

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Engenharia de Sistemas

Desenvolvimento de um Sistema para Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição

1613423

Exemplar corresponde à redação final da tese defendida por PATRÍCIA ROMEIRO DA SILVA JOTA e aprovada pela Comissão julgadora em 31 / 05 / 96.	 Orientador
--	---

Por: Ms.Eng. Patrícia Romeiro da Silva Jota
Orientador: Prof. Dr. Anésio dos Santos Jr.

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas, para
preenchimento dos pré-requisitos parciais
para obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Maio de 1996

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T. UNICAMP
J	81 d
V.	Ex.
P. 100 BC	28417
P. 100	667/96
C	☐
D	☒
P. 100	28411,00
DATA	03/09/96
N.º CPD	

CM-00091721-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

J81d Jota, Patrícia Romeiro da Silva
Desenvolvimento de um sistema para detecção de falhas de alta impedância em redes de distribuição / Patrícia Romeiro da Silva Jota.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Anésio dos Santos Jr.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia elétrica - Proteção. 2. Sistemas digitais. 3. Inteligência artificial. 4. Energia elétrica - Distribuição. 5. Falha de sistema (engenharia). I. Santos Jr. Anésio dos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Aos meus pais e ao
meu esposo Fábio

Agradecimentos

Esta tese é resultado de uma longa caminhada que se iniciou durante o estágio que fiz na concessionária CEMIG em 1987. Naquela época, fui despertada para o problema de falha de alta impedância durante proveitosas discussões com o então meu chefe, o Eng. Paulo Sérgio de Azambuja Rocha. Ao longo do desenvolvimento de todo este trabalho, tive o seu apoio constante e indispensável. Graças a ele pude dar prosseguimento a este trabalho realizando os testes de campo. Ao Paulo eu agradeço pelo apoio, pela presença e pela confiança. À CEMIG, aos Engs. Lairton Villela e Fernando Otávio e a toda a equipe técnica que me assistiu, agradeço pelo apoio indispensável na realização deste trabalho. Aos profs. Wallace Boaventura e Glássio Costa de Miranda da UFMG agradeço pela ajuda na fase de medição.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amados pais que sempre acreditaram e incentivaram o meu trabalho e que sacrificaram as suas vidas para deixarem às suas filhas a herança mais preciosa: dignidade e educação. Às minhas irmãs Simone e Valéria que eu tanto amo e que sempre me apoiaram nesta investida. Aos meus sobrinhos maravilhosos João Victor e Gutemberg que tanto fizeram falta durante a minha estada em Campinas. Às minhas queridas avós Lozita e Otilia que sempre foram exemplo de mulheres fortes e que eu sempre admirei.

Agradeço a Deus por não me deixar desistir, por estar sempre presente, principalmente nos momentos mais difíceis, e por ter colocado Jussara no meu caminho. Minha grande amiga Jussara que foi um grande achado em uma fase tão difícil.

Agradeço ao meu esposo, Fábio, que tanto amo, que fez com grande sabedoria os papéis de orientador, crítico, conselheiro e companheiro.

Agradeço ao CEFET/MG pelo apoio, me liberando parcialmente das atividades acadêmicas.

Ao meu orientador Anésio que me recebeu e me acompanhou durante toda esta jornada.

Este trabalho teve suporte financeiro durante um ano e meio do CNPq através de bolsa de doutorado e apoio Técnico-Financeiro da CEMIG através do projeto Detecção de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição.

Sumário

Dedicatória	i
Agradecimentos.....	ii
Sumário	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Resumo.....	xi
Abstract	xii
I. Introdução	1
I.1 Motivação e Contextualização do problema	1
I.2 Definição dos objetivos da tese	2
I.3 Forma de apresentação da tese	3
II. Falhas de Alta Impedância (FAI).....	5
II.1 Definição do problema	5
II.2 Importância da estimativa da distância	8
II.3 Breve Revisão sobre FAI	9
III. Algoritmo de Detecção e Processamento dos Dados.....	18
III.1 Princípio básico de funcionamento do Algoritmo proposto	19
III.2 Levantamento preliminar em campo no Alimentador	21
III.3 Algoritmo de Análise, Detecção e Cálculo da Distância	22
III.4 Processamento dos Dados para o Algoritmo de Detecção.....	23
III.4.1 Medição	24
III.4.2 Dados de entrada	24
III.4.3 Pré-processamento do sinal	25
III.4.3.1 Filtragem	26
III.4.3.2 Normalização	28
IV Sistema Inteligente de Detecção de FAI.....	31
IV.1 Organização do Conhecimento presente nos Dados	31
IV.1.1 Banco de Dados - Configurações e Distâncias.....	31
IV.1.2 Estimativa da Distância	33
IV.2 Sistema de Processamento do Conhecimento	36
IV.2.1 Análise da consistência das medidas-Sistema Inteligente-Fase 1	36
IV.2.2 Busca da configuração - Sistema Inteligente - fase 2	39
IV.2.2.1 Dispersão discriminativa.....	40
IV.2.2.2 Sistema Baseado em Regras.....	43

IV.2.2.3 Sistema Difuso de Decisão	48
IV.2.2.4 Neurônio Difuso	53
IV.3 Necessidade de Medição em Campo	56
V Medição e Análise	57
V.1 Alimentadores de distribuição	58
V.2 Descrição do processo utilizado para se obter os dados	59
V.2.1 O sinal-resposta	60
V.2.2 Resposta do alimentador a um impulso de tensão	60
V.2.3 Escolha do alimentador a ser testado	62
V.2.4 Gerador de Impulsos	62
V.2.4.1 Importância do tempo de frente e do tempo de cauda da onda	63
V.2.4.2 Aterramento da linha com um indutor	65
V.2.4.3 Valores utilizados no gerador	65
V.2.5 Testes realizados no alimentador	67
V.3 Dificuldades encontradas	70
V.3.1 Limitações dos testes	71
V.4 Resultados obtidos nos experimentos	72
V.4.1 Primeiro grupo de testes	72
V.4.1.1 Transformadores	77
V.4.1.2 Abertura de chaves de manobra	79
V.4.1.3 Banco de capacitores	82
V.4.1.4 Falhas de alta impedância	83
V.4.1.5 Resumo das observações feitas	84
V.4.2 Segundo grupo de testes	85
V.4.2.1 Ruído	85
V.4.2.2 Chaves operadas	88
V.5 Análise nos domínios do tempo e da frequência	93
V.5.1 Pré-processamento	93
V.5.1.1.1 Quantização	93
V.5.1.1.2 Erro de quantização	94
V.5.1.1.3 Amostragem	95
V.6 Espectros de frequências - Escolha do tamanho da janela de observação	97
V.6.1 Escolha do número de frequências utilizadas para caracterizar o evento	98
VI Resultados Experimentais.....	101
VI.1 Dispersão representada por conjuntos difusos	103
VI.2 Técnicas utilizadas	105

VI.2.1 Sistemas de regras e regras adaptativas	106
VI.2.2 Regras Adaptativas	107
VI.2.3 Neurônios Difusos	108
VI.2.4 Sistema Difuso	108
VI.3 Resultados	108
VI.3.1 Resultados obtidos com a aplicação da técnica de Regras Adaptativas	110
VI.3.2 Resultados obtidos com a aplicação da técnica de Sistemas Difusos	112
VI.3.3 Resultados obtidos com a aplicação da técnica de Neurônios Difusos	114
VI.3.1 Estimativa das distâncias dos eventos	121
VI.3.2 Resumo dos resultados	122
VII Conclusões	136
Bibliografia	141
Apêndice A - Detalhamento das Técnicas Utilizadas.....	150
A.1 Sistemas Baseados em Regras	150
A.1.1 Processo de inferência	150
A.1.2 Certeza de uma regra	151
A.1.3 Dados de entrada	152
A.1.4 Conjunto de regras	153
A.2 Sistema Difuso	156
A.3 Redes Neuroniais	163
A.3.1 Neurônios Difusos	164
Apêndice B - Detalhamento do Alimentador Utilizado	166
Apêndice C - Exemplo de Regras Utilizadas.....	169
C.1 Primeira Fase - Verificação da Consistência	169
C.2 Sistemas Baseados em Regras	170
C.3 Sistema Difuso	170

Lista de Figuras

Capítulo II

Figura II-1- Falha de Baixa Impedância	7
Figura II-2- Falha de Alta Impedância	8

Capítulo III

Figura III-1 Ondas Viajantes.....	20
Figura III-2 Diagrama de Blocos do algoritmo de supervisão.....	23
Figura III-3 Janelas de amostragem.....	25
Figura III-4 Pré-processador.....	26
Figura III-5 Filtro recursivo de primeira ordem	27
Figura III-6 Comparação entre sinais filtrado e não filtrado	27
Figura III-7 Sinais medidos.....	29
Figura III-8 a) Sinal referência e sinal amostrado após primeira normalização; b) Sinal normalizado para cálculo de distância	30

Capítulo IV

Figura IV-1 Forma de armazenagem de “n” configurações.....	32
Figura IV-2- Banco de dados contendo as distâncias.....	32
Figura IV-3 Onda normalizada utilizada no cálculo da distância da falha.....	34
Figura IV-4 a e b) Dispersão entre medidas de um mesmo evento	38
Figura IV-5 Sistema Inteligente de Decisão - Fase 2	40
Figura IV-6 a) Dispersões calculadas entre duas respostas para configurações diferentes; b) Detalhe entre as frequências de ordem 2 e 11.....	42
Figura IV-7- Conjuntos Difusos que representam a dispersão.....	43
Figura IV-8 Definição de valores limites dos conjuntos difusos	44
Figura IV-9-Fluxo de sinais do Sistema Baseado em Regras	45
Figura IV-10 Diagrama em blocos do SBR.....	47
Figura IV-11- Fluxo de sinais no sistema Difuso de decisão.....	49
Figura IV-12- Conjuntos Difusos de Saída	53
Figura IV-13- Conjunto de Neurônios Difusos.....	54

Capítulo V

Figura V-1 Sinal gerado pelo gerador utilizado.....	64
Figura V-2 Esquema do gerador de impulsos	64
Figura V-3 Configuração final do gerador	66

Figura V-4 Forma de onda	66
Figura V-5 Diagrama de conexão do banco de capacitores.....	67
Figura V-6 Falha de alta impedância na chave	69
Figura V-7 Falha de alta impedância antes da chave	69
Figura V-8 Sinal-resposta padrão (5000 pontos = 200 μ s)	74
Figura V-9 Sinal-resposta padrão parcial (100 pontos = 4 μ s).....	74
Figura V-10 Comparação entre a resposta padrão e a retirada do transformador 2052.....	78
Figura V-11 Comparação entre a resposta padrão e todos os testes realizados no transformador 2052.....	79
Figura V-12 Comparação com a resposta padrão com os testes realizados na fase C.....	80
Figura V-13 Comparação com a resposta padrão da resposta do alimentador para a abertura da chave 31443	81
Figura V-14 Comparação com a resposta padrão da resposta do alimentador para a abertura da chave 31111	81
Figura V-15 Comparação entre a resposta padrão, a resposta do alimentador com um banco de capacitores e a resposta para um curto-circuito no ponto de colocação do banco.....	82
Figura V-16 Comparação com a resposta padrão de falhas de alta impedância "shunts".....	83
Figura V-17 Comparação entre a resposta padrão e a resposta para falhas nas proximidades da chave 31111 (antes e depois) e da abertura da chave.	84
Figura V-18 Ruído do alimentador (4000 pontos = 40ms)	86
Figura V-19 Comparação ruído x onda padrão	87
Figura V-20 Medição repetitiva da onda padrão	87
Figura V-21 Comparação entre a resposta padrão e a resposta da chave mais próxima (4000 pontos = 200 μ s).....	92
Figura V-22 Comparação entre a resposta padrão e a resposta da chave mais distante (4000 pontos = 200 μ s).....	92
Figura V-23 Processo de digitalização.....	94
Figura V-24 Curva de transferência do quantizador	95
Figura V-25 Espectro de frequências para a onda padrão (em volts).....	99
Capítulo VI	
Figura VI-1Esboço do Alimentador testado.....	103
Figura VI-2 Classificação das dispersões entre amostras e suas ondas médias.....	104
Figura VI-3 Classificação das dispersões entre FAI à 10m das chaves e as ondas médias das respostas das chaves	105
Figura VI-4 Classificação das dispersões para Chave aberta, FAI a 10m e FAI a 60m.....	106
Figura VI-5 Saídas para a técnica Sistema de Regras Adaptativas.....	112

Figura VI-6 Saídas para a técnica Sistema Difuso.....	116
Figura VI-7 Saídas para a técnica Neurônios Difusos.....	119
Figura VI-8 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31443.....	125
Figura VI-9 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30109.....	126
Figura VI-10 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30106.....	127
Figura VI-11 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31116.....	128
Figura VI-12 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31061.....	129
Figura VI-13 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31111.....	130
Figura VI-14 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 28223.....	131
Figura VI-15 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31018.....	132
Figura VI-16 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31118.....	133
Figura VI-17 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30067.....	134
Figura VI-18 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30177.....	135

Lista de Tabelas

Capítulo V

TABELA V-1 QUADRO RESUMO DOS TESTES REALIZADOS NO PRIMEIRO GRUPO DE TESTES.....	77
TABELA V-2 FREQUÊNCIAS MAIS IMPORTANTES OBTIDAS NO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DO RUÍDO - JANELA DE 50MS	86
TABELA V-3 RESUMO DOS TESTES REALIZADOS NO SEGUNDO GRUPO	90
TABELA V-4 RESUMO DAS QUANTIDADES DE ELEMENTOS RETIRADOS.....	91
TABELA V-5 VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS ENCONTRADOS PARA ALGUMAS FREQUÊNCIAS COMPARANDO-SE TODOS OS CASOS MEDIDOS - TODOS OS CASOS FORAM NORMALIZADOS TOMANDO-SE COMO REFERÊNCIA O CASO PADRÃO.....	100

Capítulo VI

TABELA VI-1 NÚMERO DOS EVENTOS NOS GRÁFICOS APRESENTADOS A SEGUIR.....	110
TABELA VI-2 CONFIGURAÇÕES SIMILARES	121
TABELA VI-3 ESTIMATIVA DAS DISTÂNCIAS.....	122
TABELA VI-4 RESUMO DOS RESULTADOS	124
TABELA VI-5 RESUMO DOS ERROS NA DISTÂNCIA.....	124

Resumo

Nesta tese, apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia para detecção de falhas de alta impedância em Redes de Distribuição Radiais. As técnicas empregadas se baseiam na resposta do alimentador a um impulso de tensão injetado periodicamente na saída da subestação. Esta resposta é armazenada e comparada com um banco de dados previamente construído. Este banco contém as respostas do alimentador para configurações normais de operação. Considera-se que o alimentador está operando em condição faltosa toda vez que a sua resposta não coincidir com as respostas armazenadas no banco de dados. Três técnicas distintas foram implementadas e testadas utilizando dados medidos em um alimentador real da concessionária CEMIG, na cidade de Caratinga, MG. O alimentador testado possui características mistas (parte rural e parte urbana) com 120,7km (distância máxima da subestação de 19km) de condutores e 229 transformadores. Detalhes de todo o processo de medição feita no alimentador e das técnicas empregadas no alimentador real são também dados. Os resultados são apresentados de forma comparativa. Estes mostram que a metodologia proposta é efetiva na detecção de falhas de alta impedância e encoraja que investigações mais aprofundadas sejam feitas.

Abstract

In this thesis, the development of a methodology for detection of High Impedance Faults in primary distribution feeders is presented. The technique used is based on the feeder response to a short pulse signal periodically injected at the substation outlet. The response to each pulse is compared to the ones previously stored in a database. This database contains the feeder responses to the known normal operating configurations. It is assumed that if the response does not coincide with any of the stored responses, then the feeder is operating in a faulty condition. Three different techniques have been implemented and tested using data collected from a real feeder of Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), at Caratinga city, State of Minas Gerais (MG), Brazil. The feeder has mixed characteristics (partly urban and partly rural); it has 120.7 km of conductors (with maximum distance to the substation of 19km) and 229 transformers. Details of the measurement process and of the techniques applied to the real feeder are also given. The results are presented in a comparative basis. They show that the proposed methodology is effective in detecting High Impedance Faults and warrants further investigations.

Capítulo I

Introdução

Propõe-se nesta tese apresentar uma metodologia de detecção e localização de falhas de alta impedância (FAI) passivas, bem como um algoritmo computacional envolvendo três técnicas alternativas utilizadas. Pode-se classificar a operação de chaves fusíveis, e principalmente, o rompimento de condutores sem o contato com superfícies condutoras como FAI. A diferenciação entre as duas se dá através da distância do ponto da falha até a subestação, uma vez que as distâncias das chaves fusíveis são conhecidas.

1.1 Motivação e Contextualização do problema

A falha de alta impedância é um tipo de falha inerente ao sistema de distribuição multiterrado. Durante muitos anos tentou-se desenvolver uma técnica capaz de detectá-la utilizando os recursos convencionais de proteção (Aucoin, 1987). A proteção convencional só analisa tensões e correntes de 60Hz. Através da evolução destas técnicas obteve-se uma proteção mais eficiente estreitando-se a faixa de corrente das falhas não detectadas. Equipamentos que se baseiam nas técnicas convencionais atingiram o menor valor de ajuste para o qual não ocorrem erros nas suas operações. Isto porque, ajustes de relés de terra com correntes menores que os já alcançados levariam a proteção a operar indevidamente. A operação poderia ocorrer para correntes de desequilíbrio, devido a cargas monofásicas, energização de equipamentos ou outras situações que causassem desequilíbrio. A partir daí, verificou-se a impossibilidade de um tratamento convencional para tais falhas (Aucoin, 1985).

Com a digitalização dos sistemas de proteção houve um novo crescimento de grupos de pesquisa que passaram a estudar esta falha, buscando um

processamento mais sofisticado do sinal. Este processamento inclui não apenas as correntes e tensões de 60Hz mas também o conteúdo espectral do sinal de corrente e tensão. Isto porque o arco elétrico, que normalmente ocorre em falhas ativas, gera sinais de diversas frequências devido ao seu comportamento intermitente (Aucoin e Russell, 1982). Alguns resultados significativos foram obtidos na busca do estreitamento da faixa não detectável de correntes de falha (Patterson, 1995). As falhas passivas, porém, não foram igualmente estudadas e poucos trabalhos são apresentados na literatura (Balser e colaboradores, 1986).

O Brasil apresenta uma grande variedade de solos com resistividades que cobrem uma faixa muito ampla (de centenas de Ωm até milhares de Ωm). Em regiões que apresentam alta resistividade, o número de ocorrências de falhas passivas é muito elevado. A ocorrência de acidentes envolvendo vítimas apresenta agora maior repercussão (devido à maior conscientização da população acerca da responsabilidade da concessionária) forçando, assim, que as concessionárias busquem desenvolver tecnologias próprias na busca de soluções (Dumont, 1982).

1.2 Definição dos objetivos da tese

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia capaz de detectar a existência de uma falha de alta impedância passiva em um alimentador com as características específicas dos sistemas brasileiros. Como objetivos secundários podemos enumerar em ordem de prioridade a estimativa da distância da falha até a subestação e a indicação da configuração na qual o alimentador se encontra.

Estas informações complementares fornecidas pelo método de detecção proposto colaboram nos procedimentos de manutenção dos alimentadores, agilizando-os. A indicação da distância da falha amplia as possibilidades de sua rápida localização, diminuindo em muito o tempo de restabelecimento do sistema e facilitando o trabalho das equipes de manutenção.

A detecção da falha de alta impedância passiva por si só já é um grande avanço, uma vez que este tipo de falha coloca em risco pessoas e bens. A solução deste problema para o sistema brasileiro, com características próprias (extensão, cargas desequilibradas, solos variados, etc), não se daria utilizando as metodologias ora desenvolvidas e em desenvolvimento em outros países (Dumont, 1982). O sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro se caracteriza por ter grandes dimensões físicas e operar com fases desequilibradas devido ao alto índice de linhas e cargas monofásicas. Nos sistemas desbalanceados o nível da corrente de carga pode variar rapidamente mascarando os dados, levando alguns sistemas de detecção à indicação errônea (Kim e colaboradores, 1990). Outra causa de erros nas indicações das técnicas propostas na literatura são as cargas que geram frequências harmônicas com comportamento similar às FAI. Kim e colaboradores fazem as seguintes afirmações:

- nenhuma técnica separada cobre todos os casos de FAI;
- cada técnica é muito bem formulada e baseada em teoria e experimentos, porém , sob certas condições específicas;
- as técnicas não apresentam adaptabilidade com variações das características ambientais (tais como: umidade, tipo de solo, revestimento do solo, etc);
- cada técnica tem, no mínimo, uma falha devido a variações nas características ambientais;
- técnicas que levam em consideração as características ambientais devem ser necessariamente compensadas por variações nas mesmas.

1.3 Forma de apresentação da tese

No capítulo II, o problema da falha de alta impedância é introduzido contextualizando-o no cenário nacional e internacional.

No capítulo III, é apresentada a filosofia geral do algoritmo proposto e descrito o pré-processamento dos dados da resposta de um alimentador.

No capítulo IV, descreve-se a organização e modelamento do conhecimento presente nos dados de resposta do alimentador, bem como o sistema inteligente desenvolvido para detecção de FAI.

No capítulo V, resultados de medição em campo, realizados em um alimentador na cidade de Caratinga, Minas Gerais, pertencente à concessionária CEMIG, são apresentados. O processo utilizado para a obtenção dos dados, bem como as dificuldades encontradas são relacionados.

No capítulo VI, apresenta-se os resultados encontrados em cada técnica e os compara mostrando os seus pontos positivos e negativos.

No capítulo VII, são tecidas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

Capítulo II

Falhas de Alta Impedância (FAI)

Neste capítulo o problema da falha de alta impedância (FAI) é caracterizado e em seguida é feita uma breve revisão evidenciando as técnicas mais significativas aplicadas ao problema. Observa-se que a grande maioria das técnicas são baseadas na metodologia de análise das frequências geradas pelo comportamento não linear do arco elétrico presente nas FAI ativas. Para FAI passivas, os poucos trabalhos apresentados se baseiam na metodologia de análise do desequilíbrio ocorrido entre as fases devido a ocorrência de FAI.

É importante ressaltar que, em nenhum dos trabalhos são informadas as dimensões ou tipo de topologia dos alimentadores testados. Sabe-se porém, que os alimentadores brasileiros normalmente superam em dimensões os dos Estados Unidos (país que apresenta o maior número de artigos na área), isto devido à falta de recursos para a instalação do número de subestações necessárias. Outro aspecto importante é o desequilíbrio de corrente admitido pelas concessionárias brasileiras que supera em muito o admitido naquele país.

II.1 Definição do problema

O sistema de distribuição de energia elétrica aéreo é um sistema normalmente radial que percorre grandes distâncias em uma determinada região alimentando transformadores trifásicos e monofásicos. A proteção deste sistema é distribuída ao longo de seus ramais, de forma hierárquica, para que defeitos em um determinado trecho sejam eliminados pelo elemento protetor mais próximo, evitando desligamentos de trechos maiores. Os defeitos que ocorrem nos alimentadores são chamados de falhas e podem ser do tipo: série ou paralela. Defeitos séries são aqueles que interrompem a corrente em cargas localizadas a

jusante da falha. Normalmente são falhas que envolvem queda de condutores, ou seja, interrompem o circuito no ponto do defeito. Defeitos paralelos são aqueles que não interferem na corrente que alimenta as cargas a jusante, apenas drenam corrente para o ponto de defeito.

No contexto desta tese falha é:

Uma ocorrência que leva o sistema a apresentar privação de um fornecimento adequado de energia aos consumidores. Porém esta privação se dá sem a interferência de operadores, ou seja, não há conhecimento prévio da mesma.

Classifica-se assim como falha, segundo esta definição, apenas o defeito série. Apesar disto, o defeito paralelo também é chamado de falha paralela ou “shunt”. Existem basicamente dois tipos de defeitos séries: falha de baixa impedância e falha de alta impedância.

Falha de baixa impedância é um tipo de falha que apresenta um acréscimo substancial na corrente do alimentador suficiente para provocar a atuação da proteção. Ou seja, a falha oferece um caminho de baixa impedância para a corrente. Estas falhas são rapidamente eliminadas pelo elemento protetor mais próximo que interrompe a corrente que flui para o ponto de falha e para os elementos a jusante. Neste instante passamos a ter uma falha série de alta impedância (infinita) que interrompe a passagem de corrente. O elemento protetor, neste caso, é na maioria das vezes uma chave fusível. Houve, portanto, dois eventos localizados em pontos próximos no alimentador. O primeiro evento (curto-circuito) interrompeu a corrente em um determinado trecho. O segundo (abertura de uma chave fusível) ocorreu com o objetivo de eliminar danos elétricos, que o primeiro poderia trazer aos equipamentos do sistema. Entretanto a operação da chave fusível eliminou, juntamente com a falha, mais um trecho de cargas, figura

II.1. A abertura da chave fusível, portanto, estabelece uma situação de falha onde nenhum elemento de supervisão do alimentador tem o conhecimento de sua ocorrência. Nestes casos, a única forma de se restabelecer o fornecimento das cargas desconectadas é através da reclamação de algum consumidor afetado, fazendo com que a concessionária envie uma equipe de manutenção para o local.

Falha de alta impedância (FAI) é aquela em que a corrente que se estabelece não é suficiente para acionar nenhum dispositivo de proteção, figura II.2. Neste caso, o circuito continua energizado oferecendo riscos à população bem como à propriedade. Nestes casos, o condutor se rompe e entra em contato com uma superfície de alta resistividade, podendo ser a cobertura do solo, tais como concreto ou asfalto, ou mesmo o próprio solo de alta resistividade. Estas falhas podem ser classificadas como falhas passivas e falhas ativas.

As FAI passivas são aquelas que não apresentam arco elétrico. As correntes que circulam são tão pequenas que são consideradas correntes de fuga. As falhas ativas apresentam correntes maiores do que as passivas e na maioria dos casos apresentam arco elétrico.

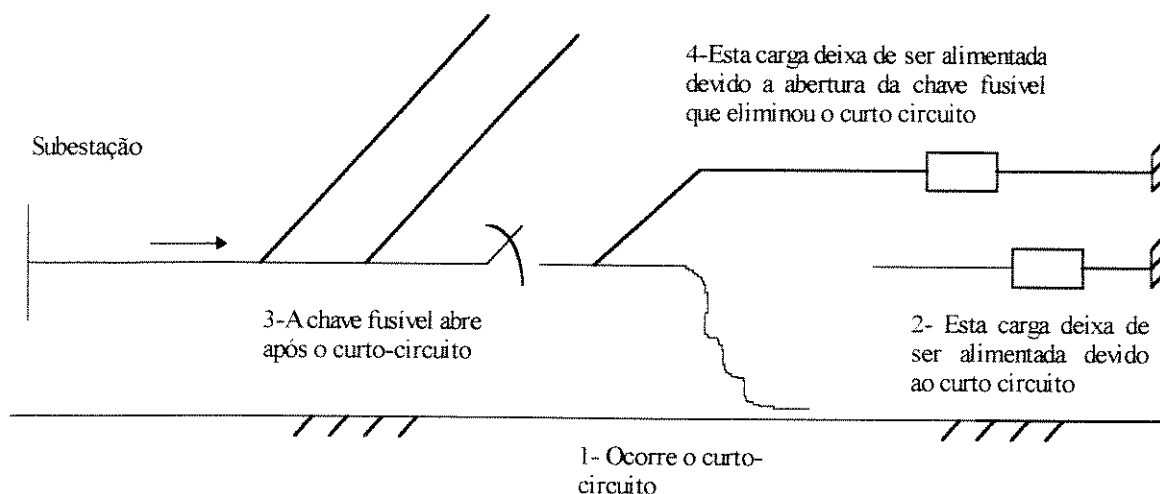


Figura II-1 Falha de Baixa Impedância

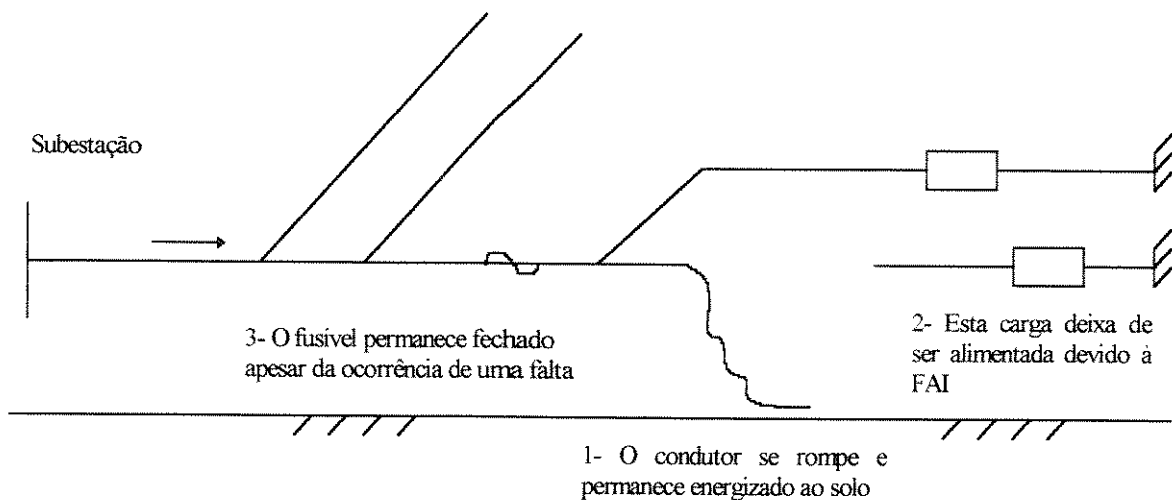


Figura II-2- Falha de Alta Impedância

Do ponto de vista de circulação de corrente, a única diferença entre uma FAI passiva e a abertura de uma chave fusível é uma perda maior de carga quando existe ramificação a jusante da chave e a montante do ramo com uma FAI, figura II.2. Ou seja, na abertura de uma chave fusível um número maior de consumidores deixará de ser atendido. Entretanto, do ponto de vista da segurança, a falha põe em risco a vida de pessoas.

Outro tipo de falha passiva é aquela onde o condutor que entra em contato com o solo é o condutor da carga. Este condutor fica energizado (por retorno) pelo transformador mais próximo e portanto oferece perigo. Porém, para a proteção, ocorreu apenas uma perda de carga, não sendo, portanto, operada nenhuma proteção.

II.2 Importância da estimativa da distância

A localização de falhas em alimentadores não é tarefa trivial. Os alimentadores rurais, por exemplo, percorrem grandes distâncias em regiões de difícil acesso. Por esta razão, a simples indicação da ocorrência de uma FAI em um alimentador de 100km de condutores, por exemplo, não parece ser uma informação suficiente. Isto porque, percorrer todo o alimentador para localizar a

falha é um trabalho muito difícil. Indicar a existência de uma falha e fornecer uma boa estimativa da distância da mesma até a subestação reduz os pontos possíveis a um número relativamente pequeno, diminuindo bruscamente o tempo de busca. A indicação da distância também pode diferenciar uma FAI de uma operação de chave fusível. Esta informação aliada a reclamações de consumidores pode indicar o ponto da ocorrência.

É importante salientar que não existe nenhuma técnica descrita na literatura que faz este tipo de indicação utilizando informações e equipamentos localizados apenas na subestação.

II.3 Breve Revisão sobre FAI

A FAI tem sido muito estudada nos últimos 20 anos. Com o avanço das tecnologias de tratamento de dados e a incorporação de microprocessadores nos sistemas de proteção de redes, as técnicas de detecção deste tipo de falha evoluíram para algoritmos sofisticados incluindo, inclusive, técnicas de inteligência artificial. A seguir é apresentado um breve resumo sobre as técnicas propostas na literatura que merecem destaque.

Nos primórdios do uso das redes de distribuição, muitas eram as falhas não detectadas pela proteção. O objetivo principal da proteção era desligar as linhas quando ocorresse uma falha que pudesse danificar algum equipamento. À medida em que o sistema foi ampliando a potência instalada e por consequência aumentando a potência de curto-circuito, a proteção teve que evoluir em busca de tempos de operação e correntes de falhas cada vez menores. Embora hoje já se tenha uma boa proteção para equipamentos da rede, o mesmo não ocorre com a proteção contra danos pessoais. Desta forma, nos últimos 20 anos a busca se concentrou na busca de uma técnica capaz de detectar falhas com baixas correntes ou mesmo sem corrente alguma.

Os primeiros artigos datados do final da década de 70 e início dos anos 80 discorrem sobre as técnicas convencionais e levantam os problemas encontrados. Wolff (1979) apresenta as técnicas utilizadas pela PP&C (Pennsylvania Power & Co.) desde 1973 na detecção de FAI. Carr (1981) discute sobre algumas técnicas de detecção de FAI apontando os pontos fracos das mesmas. O autor afirma que o método mais promissor consiste em somar proporções fixas de correntes, obtendo-se assim um sinal dependente somente da corrente de falta.

A década de 80 foi muito rica em publicações. Um grupo forte liderado pelo Prof. Russell (Russell, 1988 e 1989, e Kim e colaboradores, 1988, 1990, 1991 e 1993) se formou no Texas A&M University. Outros pequenos grupos também se interessaram pelo assunto, sem portanto apresentarem tantas contribuições como este do Texas.

Elmore (1981) apresenta o princípio básico de funcionamento de um relé desenvolvido pela Westinghouse Electric Corporation chamado CGR. Calhoum (1982), Lee e Bishop (1983 e 1985) apresentam os resultados obtidos em testes utilizando um computador analógico que simula a linha e o relé RGR, também da Westinghouse.

Aucoin e Russell (1982) apresentam uma metodologia de detecção baseada na observação das altas frequências geradas pelo arco elétrico muitas vezes existentes nestas falhas. A faixa de frequências utilizada vai de 2 kHz a 10kHz. Os autores afirmam que falhas com correntes superiores a 10A serão detectadas. Porém, não comentam sobre a distância desta falha até a subestação, fator determinante, uma vez que uma falha no final do alimentador pode apresentar valores de amplitude muito baixos em altas frequências devido à atenuação da própria linha. Os bancos de capacitores dificultam a detecção devido à atenuação por eles imposta nesta faixa de frequências.

Burke e Lawrence (1984) apresentam o resultado de um estudo estatístico realizado durante dois anos em treze concessionárias de energia elétrica nos EUA. Este artigo fornece dados sobre tempo médio de duração de falhas, tipos de falhas mais freqüentes, magnitude das correntes de falha, etc. Segundo os autores a falha fase-terra é a segunda em número de ocorrências, sendo causada na maioria das vezes por descargas atmosféricas e o contato com árvores. A duração das falhas para terra são em sua maioria de até 10 ciclos de 60Hz. Em Aucoin (1985) FAI é definida e discutida a questão legal a respeito dos riscos deste tipo de falha, bem como, de questões econômicas e operacionais envolvidas. Falhas passivas são tratadas por Balser e colaboradores (1986) através da análise do desbalanço das correntes, na frequência fundamental, terceiro e quinto harmônicos no momento da falha em relação a níveis de desbalanços medidos em instantes anteriores.

Aucoin e Russell (1987) afirmam que não é possível estabelecer diferença entre as correntes e tensões de um sistema sob condições normais e correntes e tensões sob condições de falha, analisando-se apenas a frequência fundamental. Durante testes feitos por Aucoin e Russell, estes verificaram que, ao contrário do que se pensava, as amplitudes das correntes deste tipo de falha diminuem no decorrer do tempo.

Kim e Russell (1988) verificaram o comportamento dos harmônicos gerados pela característica tensão x corrente do arco elétrico. Foram realizados testes onde as falhas foram provocadas em superfícies diversas. Concluiu-se neste artigo que analisando-se as freqüências harmônicas pode-se verificar a presença de arco elétrico e que os harmônicos pares são mais indicados para a monitoração de falhas com arco do que os ímpares, pois estes últimos sofrem mais o efeito da existência de banco de capacitores, bem como se alteram mais ao longo do dia.

Russell e colaboradores (1988a) fazem um estudo do comportamento das baixas freqüências (próximas ao 60Hz) tanto para FAI quanto para o chaveamento

de banco de capacitores. Foram realizados diversos testes onde FAIs foram simuladas variando-se algumas características, tais como: arco de curta, média e longa duração, solos secos e molhados, solos variados. Baseados nestes testes eles afirmam que as freqüências entre harmônicas apresentam vantagens em relação às freqüências harmônicas, pois, permitem a distinção entre uma FAI e um chaveamento de banco de capacitores. Isto porque, o chaveamento de banco de capacitores afeta basicamente as freqüências harmônicas. Os autores afirmam, também, que as amplitudes das freqüências entre harmônicas serão tanto maiores quanto menor for o tempo de duração do arco, ou seja quanto mais instável for o arco.

Russell e colaboradores(1988b) escolhem duas freqüências para a detecção de FAI, sendo uma harmônica (180Hz) e a outra entre harmônicas (210Hz) e desenvolvem um algoritmo hierárquico com características adaptativas. Apesar de a freqüência de 180Hz apresentar uma grande variação quando da ocorrência de arco elétrico, sabe-se que cargas não lineares também apresentam a geração destas freqüências e muitas vezes de forma aleatória como no caso dos fornos à arco. A distinção entre uma falha e uma carga pode ser crítica nesta freqüência. Uma questão não levantada neste artigo é a geração de harmônicos não característicos por cargas especiais. Isto ocorre devido à distorção da tensão de alimentação devido à circulação de correntes harmônicas no sistema e que faz com que as cargas especiais alimentadas por tensões distorcidas passem a gerar correntes com componente de freqüências entre harmônicas. A poluição harmônica pode variar durante todo o dia e, portanto, tais técnicas devem ter um limite mínimo de detecção adaptativo.

Russell e Chinchali (1989) apresentam um sistema especialista para detecção de falhas de alta impedância, baseado em conhecimentos prévios das características da falha. São monitorados sete tipos de parâmetros diferentes, tais como, freqüências harmônicas não característicos, freqüências harmônicas pares e ímpares, altas freqüências, etc. Apesar de o Prof. Russell ter publicado muitos artigos utilizando baixas freqüências, ele não abandonou a sua proposta inicial de

detectar falhas utilizando altas frequências. Assim, Russell e Chinchali apresentam uma técnica que engloba várias técnicas. O cruzamento de informações fornecidas por estas técnicas é importante na busca da detecção da FAI. Jeerings e Linders (1989) fazem uma análise mais profunda do efeito da resistência do solo nas FAI.

Huang e colaboradores (1988) comparam quatro técnicas propostas na literatura, sendo elas, o relé diferencial, o relé proporcional de terra, o relé de corrente harmônica e o relé de segundo e terceiro harmônicos. Os autores afirmam que os melhores resultados foram obtidos com o relé proporcional de terra, que identificou todas as faltas que apresentaram correntes superiores a 15A.

Christopoulos e colaboradores (1988) utilizam uma técnica de detecção e localização de falhas em linhas de transmissão baseada em ondas viajantes. Na realidade esta é uma técnica antiga utilizada para localizar falhas em linhas de transmissão estando estas desenergizadas. O princípio destas técnicas é utilizar a resposta a um sinal impulsivo injetado na linha de transmissão.

A detecção de falhas em linhas de distribuição utilizando como informação a onda viajante gerada pela própria falha no instante da sua ocorrência, bem como a localização da falha, foi apresentada em 1990 por Silva e colaboradores.

A detecção de FAI tendo como informação a resposta do alimentador a um impulso de tensão foi apresentado por Silva, 1992, 1994, 1995. Este é o princípio proposto nesta tese para uma metodologia de detecção de FAI.

Kim e colaboradores (1990) propõem um método genérico que busca a técnica ou técnicas mais adequadas para o conjunto de dados coletados. Isto foi proposto porque o comportamento da FAI é diferente para cada condição ambiental e algumas técnicas se comportam melhor sob certas condições ambientais.

Hsu e colaboradores (1990) apresentam a aplicação de sistemas especialistas na localização de falhas em redes de distribuição a partir de dados provenientes do sistema elétrico e do sistema de registros de reclamações da empresa concessionária. O sistema foi desenvolvido na linguagem PROLOG e usa como informação básica a topologia do alimentador, as coordenadas de cada ponto de ramificação, de chaves, transformadores, o telefone e endereço de consumidores-chaves, etc. Ebron e colaboradores (1990) apresentam um sistema de detecção baseado em uma rede neuronal¹ treinada para reconhecer falhas de alta impedância. A rede é treinada a partir de dados provenientes de simulação. Um dos problemas básicos de uma rede neuronal é exatamente os dados de teste. Se uma rede é submetida a um treinamento com determinado tipo de característica, não se pode afirmar que comportamento esta terá com dados com características diferentes. Assim, como as falhas de alta impedância apresentam comportamento bastante aleatório e fortemente dependente de condições ambientais parece difícil treinar uma rede para reconhecê-las, uma vez que não existe um padrão de comportamento.

Em Girgis e colaboradores (1990) a FAI é acompanhada por variações temporais da amplitude da frequência fundamental e das amplitudes das componentes harmônicas. Este artigo apresenta uma tentativa de modelagem das variações temporais usando filtro de Kalman. É importante salientar que todas as técnicas que observam variáveis da rede devem apresentar a incorporação de técnicas adaptativas para que possam ser aplicadas a redes reais.

Em Kim e colaboradores (1990) e Kim e Russell (1991), demonstra-se que as variáveis físicas e os parâmetros do ambiente que influenciam o comportamento da FAI são em grande número e de quantificação difícil. A configuração do alimentador, o tipo e nível da carga, as condições de superfície e climáticas são variáveis que afetam o comportamento da FAI. O comportamento da FAI é

¹ Alguns grupos de pesquisa no Brasil utilizam o termo neural e outros utilizam o termo neuronal. Segundo o dicionário Aurélio aquilo que se relaciona a neurônio é neuronal, neural é aquilo que se relaciona a nervo e a palavra neuronal não existe. Por esta razão optamos pelo termo neuronal

aleatório e em muitos casos imprevisível, desta forma, o resultado de cada técnica baseada no seu comportamento não é sempre correto. Sob condições similares, outras falhas apresentam comportamentos com características diferentes e apresentam correntes harmônicas com amplitudes menores que falhas anteriores geradas na mesma superfície. Em superfícies do tipo grama, asfalto e concreto, o comportamento das falhas de alta impedância pode ser muito similar ao efeito gerado pelo chaveamento (Kim, Russell e Watson, 1990).

Em 1991 Jeerings e Linders apresentaram uma proposta de relé baseado nas variações ocorridas nos harmônicos devido à presença do arco na falha. Kwon e colaboradores (1991) fizeram testes com FAI e desenvolveram uma técnica baseada na variação incremental dos harmônicos pares.

Em Johns e Aggarwal (1990), Johns e colaboradores (1991) e El-Hami e colaboradores (1992) apresenta-se uma técnica onde são distribuídos elementos de supervisão ao longo da rede e que detectam a existência de correntes de arco em trechos do alimentador. Esta técnica porém, torna-se inviável economicamente uma vez que o número de bifurcações num alimentador é grande e, portanto, o número de elementos a serem distribuídos torna-se elevado.

Em Sultan (1992) as seguintes afirmações são feitas: falhas em solo seco são caracterizadas por semi-ciclos assimétricos e intervalos curtos de corrente nos semi-ciclos, o mesmo não ocorrendo em superfícies molhadas que apresentam longos períodos de corrente. O grau de umidade e as condições da superfície irão resultar em diferentes combinações nas características da corrente. Neste artigo, Sultan treina uma rede de perceptrons multi-camadas para reconhecer um conjunto de casos medidos. Patterson (1995), que foi o responsável pela implementação comercial da técnica de detecção desenvolvida por Russell e seus colaboradores, afirma que os valores das correntes de falha variam enormemente dependendo do tipo de solo, por exemplo: se a superfície de contato é o asfalto ou areia secos, então, a corrente é zero, se for areia molhada a corrente pode atingir

15 A. Em grama seca, porém, a corrente pode atingir 25A. Apesar de se medir a corrente da falha, isto não implica que as porcentagens das amplitudes das frequências harmônicas permaneçam as mesmas. Assim, uma falha com corrente de 15A pode ser detectada e outra de 30A pode não ser devido à sua diferente composição de frequências..

Em Barnard e Pahwa (1993) apresenta-se uma análise probabilística sobre o impacto da FAI sobre o sistema de distribuição. A FAI é modelada como uma função de probabilidade Weibull. O trabalho mostra a ineficácia da proteção convencional na detecção deste tipo de falha. Christie e colaboradores (1993) discorrem a respeito de FAI em redes subterrâneas de baixa tensão (<600V). Testes com FAI foram realizadas em laboratório. Os autores concluem que a FAI nestes sistemas são similares aos dos sistemas de distribuição aéreos. Kim e Russell (1993) apresentam uma rede adaptativa que foi treinada para reconhecer os padrões das falhas. A rede adaptativa nada mais é do que um tipo de rede neuronal que aprende casos a ela apresentada. Neste artigo os autores afirmam ser muito fácil detectar falhas em redes de distribuição inclusive a de alta impedância e que difícil é distinguir falhas de alta impedância de outros eventos normais que ocorrem na rede. Na realidade isto ocorre, porque, as falhas de alta impedância possuem características similares aos chaveamentos.

Patterson (1995) apresenta o princípio de funcionamento de um monitor da General Electric Company (GE) que se propõe a detectar falhas de alta impedância. Este monitor utiliza-se de sistemas inteligentes de decisão e cruza diversas informações provenientes do alimentador. Este monitor foi testado pela CEMIG, Companhia Energética do Estado de Minas Gerais recentemente em um alimentador na cidade de Sete Lagoas. Uma bateria de testes foi realizada em laboratório e outra no alimentador. Segundo exigência da própria GE foram colocados em contato com o solo cerca de 20m de condutores. Os testes foram realizados em dias chuvosos. Os resultados dos testes ainda estão sob análise.

De uma forma geral pode-se dizer que a metodologia baseada nos harmônicos gerados pelo arco elétrico está predominando. Esta metodologia logicamente só verifica a existência de falhas de alta impedância quando esta vem acompanhada de arco elétrico. Ou seja, tais técnicas só verificam a existência de falhas ativas. As falhas passivas não receberam ao longo destes anos a atenção devida. Até onde os dados divulgados permitem analisar, nenhuma das técnicas propostas tratam da indicação da distância da falha até a subestação.

Capítulo III

Algoritmo de Detecção e Processamento dos Dados

Como foi apresentado no capítulo II, as técnicas propostas na literatura para detectar FAIs utilizam como informação básica as variações, decorrentes da ocorrência da falha, nas correntes e tensões de linha. Por esta razão estas técnicas são afetadas pelo desequilíbrio de fases ou harmônicos existentes na linha. A aplicação das mesmas requer, portanto, um estudo preliminar para caracterizar o comportamento destes fatores ao longo de períodos normais de funcionamento do alimentador. Sabe-se, porém, que tais fatores podem variar de forma expressiva podendo inviabilizar a aplicação destas metodologias. O sistema elétrico brasileiro possui um alto nível de desequilíbrio devido ao grande número de cargas monofásicas e a amplitude das frequências harmônicas tem crescido nos últimos anos dificultando a aplicação dessas técnicas, (Dumont, 1982).

Este trabalho teve início na busca de uma metodologia alternativa que fosse menos dependente de tais fatores. Nesta busca, optou-se por uma abordagem baseada na filosofia de supervisão, onde um sinal de controle é injetado no alimentador e a sua resposta a esta excitação é medida e analisada. A análise das respostas obtidas é baseada na comparação destas com respostas padrões previamente processadas e disponíveis em memória computacional.

O sinal injetado no alimentador possui um comprimento de onda muito menor que o comprimento da linha de distribuição e por esta razão se comporta como uma “onda viajante” (Johnson, 1988) que percorre toda a extensão do alimentador sofrendo os fenômenos de refração e reflexão.

III.1 Princípio básico de funcionamento do Algoritmo proposto

Um sinal impulsivo é injetado no início do alimentador (saída da subestação). Este sinal passa a percorrer o alimentador em direção às suas extremidades. Ao longo do seu percurso, o sinal encontra pontos de descontinuidade (bifurcações ou saída de ramais, as mudanças de bitola de condutores, os dispositivos de proteção e manobra, os transformadores, os finais de trechos ou até mesmo as alterações nas impedâncias do sistema devido a existência de construções próximas à linha, mudança das características do solo, etc) onde ocorrem os fenômenos de refração e reflexão. A parte refratada do sinal continua a percorrer o alimentador. A parte refletida retorna à fonte, como ilustra a figura III.1. Neste percurso de volta, o sinal passa a ser novamente dividido nos pontos de descontinuidade.

O sinal de teste injetado no alimentador possui uma forma de onda bem definida. A resposta do alimentador a esta excitação é uma composição, no tempo, de todas as parcelas da onda refletida que retornam ao ponto de medição. Assim, cada descontinuidade irá contribuir de forma diferente para a formação do sinal resposta dependendo do tipo e de sua distância.

Sabe-se que o alimentador possui, ao longo de sua extensão, chaves de manobras que possibilitam ao mesmo operar em configurações diferentes, quando necessário. O alimentador responderá ao sinal de excitação com uma onda característica que reflete exatamente as contribuições fornecidas pela configuração no momento do teste. Desta forma, ter-se-ão respostas diferentes para configurações diferentes. As falhas no sistema de distribuição alteram a configuração de trabalho de forma diferente da alteração provocada por uma chave, pois rompem o condutor em pontos não determinados da linha.

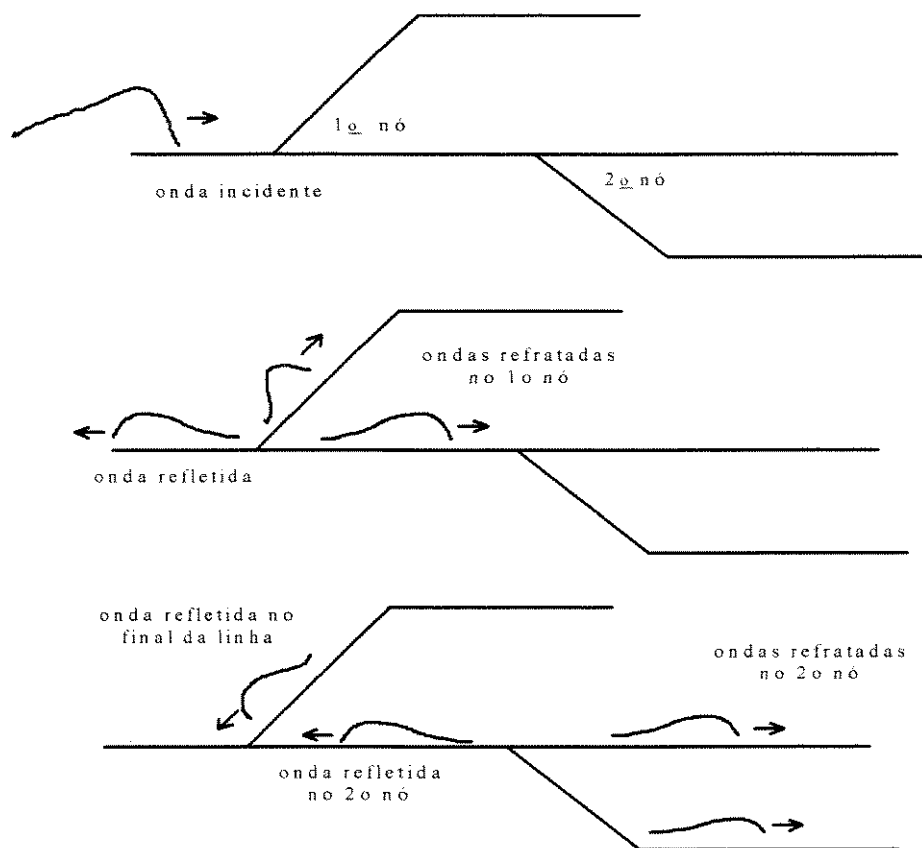


Figura III-1- Ondas Viajantes

No algoritmo aqui proposto, as respostas ao sinal de excitação, para todas as possíveis configurações de primeira ordem¹ do alimentador, são armazenados em um banco de dados. Estas respostas devem ser aceitas como respostas normais. Esse banco de dados contém pois as respostas-padrão do alimentador operando em situação normal. Assim, antes que a técnica seja aplicada a um alimentador um levantamento prévio destas configurações deve ser feito. Este levantamento consiste de testes de campo realizados no alimentador que receberá o sistema de detecção. As respostas do alimentador ao sinal excitador para cada configuração são processadas fornecendo parâmetros que as caracterizam como operações normais. Com este banco de dados armazenado, o alimentador operará recebendo sinais impulsivos² de tensão tendo suas respostas comparadas com os padrões contidos no banco. Se a resposta não coincidir com nenhum padrão

¹ Operação de apenas uma chave de cada vez.

² O intervalo entre grupos de medidas será o tempo necessário para o processamento da informação.

armazenado, então diz-se que o alimentador está operando em condição faltosa. Uma estimativa da distância do ponto da falha até a subestação é calculada e um relatório é emitido informando a existência de uma falha e a distância estimada da mesma. Desta forma, com a topologia em mãos, pode-se informar os possíveis trechos faltosos.

III.2 Levantamento preliminar em campo no Alimentador

Todo alimentador possui uma configuração básica de operação. Esta é a configuração na qual o alimentador permanece a maior parte do tempo, ou seja, em situações normais. Para facilitar a manutenção ou mesmo a transferência de cargas para outros alimentadores são utilizadas chaves de manobra que estão distribuídas ao longo de toda a sua extensão. A configuração básica de operação é aqui denominada de padrão básico. As demais configurações de operação, obtidas através de operações de chaves de manobra, são denominadas de configurações de operação. Nesta fase preliminar, é necessário que todas as possíveis configurações de operação, consideradas normais, sejam levantadas juntamente com as equipes de planejamento, projeto, operação e manutenção. A abertura de chaves de manobra é feita para proceder a manutenção de determinados trechos. O fechamento de chaves ocorre quando da transferência de carga de um alimentador vizinho.

Alterações na configuração, que não sejam conseqüentes da operação de chaves de manobra, só podem ser provocadas pela abertura de chaves fusíveis (devido a um curto-circuito) ou FAI série. Em ambos os casos, a alteração é decorrente de uma falha no alimentador. No primeiro caso, o curto-circuito é eliminado permanecendo uma falha série sem corrente. No segundo caso, a falha pode possuir corrente, sendo porém menor que a corrente de “pick-up” dos elementos protetores do alimentador. Neste caso a falha é série e o condutor muitas vezes permanece energizado, em contato ou não com o solo, oferecendo risco de vida à população.

Em ambos os casos, a concessionária não possui informação imediata sobre a ocorrência da falha. Esta só tomará conhecimento da mesma após reclamação dos consumidores da falha de energia em suas residências. A localização só será possível após um número grande de consumidores informarem as suas localizações, indicando assim a região aproximada do evento.

No capítulo V será apresentado o detalhamento das medições de campo realizadas para o desenvolvimento do algoritmo de detecção dedicado a um alimentador da concessionária CEMIG.

III.3 Algoritmo de Análise, Detecção e Cálculo da Distância

O algoritmo é baseado na monitoração da resposta do alimentador ao sinal impulsivo durante sua operação e é apresentado na figura III.2. Inicialmente um sinal é injetado no alimentador e a sua resposta é medida em seguida. O processo é repetido um certo número de vezes³. O conjunto de medidas feitas é então pré-processado. O pré-processamento consiste da filtragem e da normalização dos dados. Em seguida a consistência dos dados é verificada. Existindo coerência, os dados são enviados para a fase de detecção. Se os dados não forem coerentes novas medições serão feitas. Permanecendo a incoerência, o analisador de consistência inicia uma verificação de distância para determinar se se trata do caso de ocorrência de uma falha com arco.

A fase de detecção é composta por um sistema inteligente que verifica as respostas comparando-as com as respostas-padrão armazenadas no banco de dados. Constatando-se que se trata de uma falha, o sistema estima a distância da mesma e emite relatório. O sistema inteligente de decisão pode utilizar diferentes métodos de inteligência artificial. Neste trabalho, foram usados três métodos distintos que serão apresentados no capítulo IV. Basicamente, o algoritmo de detecção proposto se divide em três partes distintas, sendo elas: processamento

³ Nos testes realizados em alimentador real foram feitos cinco medições consecutivas.

dos dados medidos em campo (A), organização (B) e processamento do conhecimento contido nos dados (C).

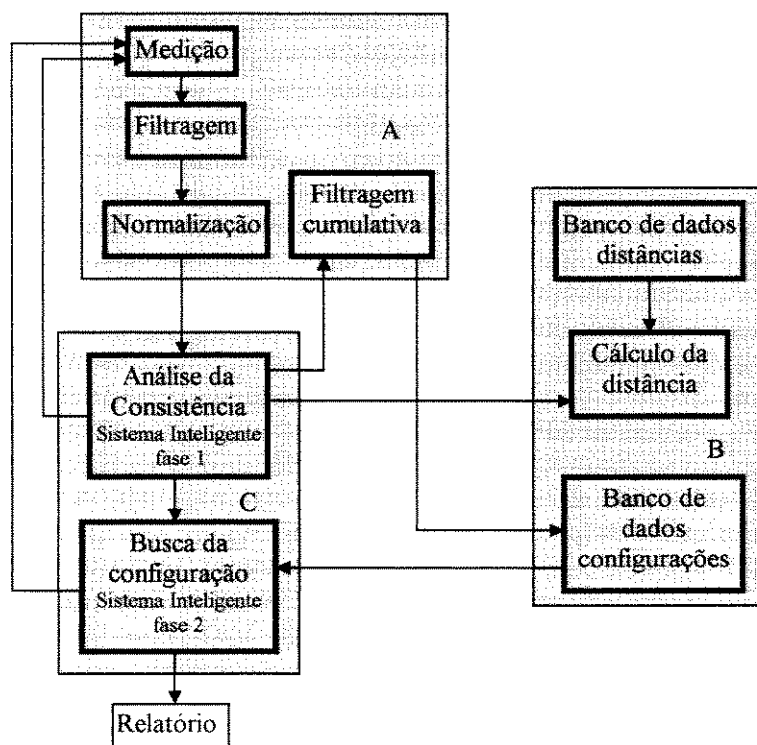


Figura III-2- Diagrama de blocos do algoritmo de supervisão

A seguir é apresentado o processamento dos dados medidos em campo e no capítulo IV são apresentados a organização e o processamento do conhecimento contido nos dados.

III.4 Processamento dos Dados para o Algoritmo de Detecção

Neste item é apresentado o tratamento dos dados utilizados pelo algoritmo proposto para detecção de FAI. Os dados são obtidos através de medição em tempo real e em seguida recebem um tratamento adequado para representar o comportamento dominante do alimentador. A seguir, as etapas deste processamento dentro do sistema de detecção são descritas com maiores detalhes.

III.4.1 Medição

A medição tem por objetivo obter a resposta do alimentador a um sinal impulsivo de excitação. O processo de medição é decisivo para a garantia da qualidade dos dados e, portanto, da informação neles contida. Alguns cuidados devem ser tomados, tais como: escolha da frequência de amostragem e análise do erro de quantização. O estabelecimento dos critérios de medição é feito no momento em que os dados são coletados para a construção do sistema supervisor. Na fase de supervisão tais critérios não são mais alvo de análise. O capítulo V discorrerá a respeito destes critérios com detalhes.

III.4.2 Dados de entrada

As variáveis de entrada do processo de análise são obtidas a partir da resposta do alimentador ao sinal de excitação. As variáveis utilizadas neste trabalho são as componentes dos espectros de frequência de duas janelas de observação, compostas por partes da onda medida e que cobrem toda a janela amostrada.

Foram utilizadas duas janelas de amostragem para que todos os pontos amostrados fossem utilizados na análise e para que o número de pontos utilizados no cálculo da FFT (Fast Fourier Transform) fosse do tipo 2^n . Outra justificativa é a escolha da frequência mínima do espectro que não deve ser muito baixa. No caso estudado neste trabalho, foi feita uma medição digital contendo 5000 pontos de amostragem. Neste caso, tomou-se os 4096 primeiros pontos para a primeira janela e os 4096 últimos pontos para compor a segunda janela de observação, como mostra a figura III.3. Assim toda a janela de 5000 pontos foi utilizada na análise. Para cada janela escolhida, calculou-se o espectro de frequência correspondente. Deste espectro apenas as vinte primeiras frequências⁴ foram utilizadas na análise. Assim, tomando-se a parte real e imaginária das 20

⁴ Verificou-se que as vinte primeiras frequências são suficientes para representar o sinal medido sem perda importante de informação.

freqüências para duas janelas totalizamos 80 variáveis observadas. A escolha de apenas 20 freqüências é justificado no capítulo V.

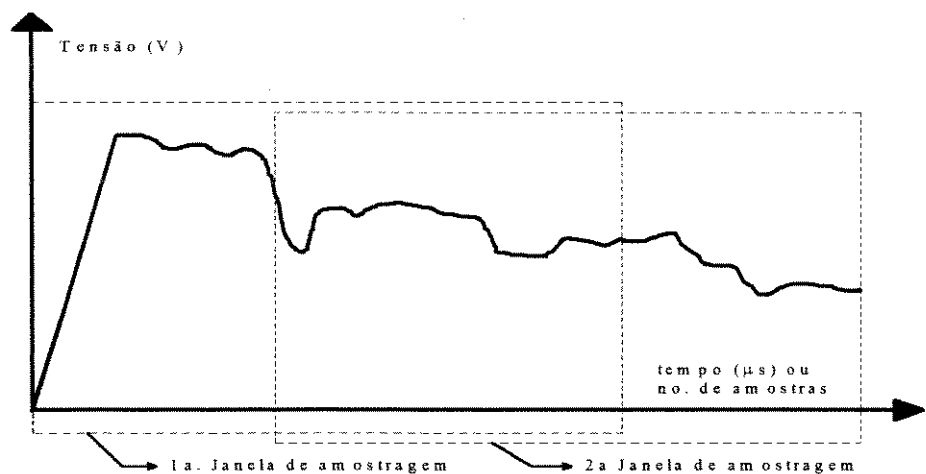


Figura III-3- Janelas de amostragem

III.4.3 Pré-processamento do sinal

Esta é uma fase anterior ao algoritmo de detecção da FAI e é tão importante quanto esta, pois é nesta fase que se validam os dados e, portanto, o resultado final. Os dados de entrada são dados provenientes de um processo de amostragem e quantização que por si só já introduzem erros. Ruídos existentes na linha interferem no sinal que se deseja medir introduzindo erros. Estes ruídos devem ser reduzidos para que o sinal não seja mascarado. Qualquer que seja a causa do ruído, a sua influência no sinal medido deve ser previamente analisada e se necessário as medições devem ser refeitas. O processo realizado no pré-processamento é ilustrado na figura III.4.

Inicialmente o sinal medido é filtrado por um filtro digital para amortecer o efeito da quantização. O capítulo V trata, com maiores detalhes, o efeito da amostragem e quantização na conversão do sinal analógico em digital.

Após a filtragem, o sinal é normalizado. Dois tipos de normalização são utilizados no algoritmo. O primeiro consiste em corrigir o valor de pico do sinal

injetado que pode variar devido às características do gerador. O segundo consiste em dividir o sinal amostrado por um sinal de referência previamente escolhido.

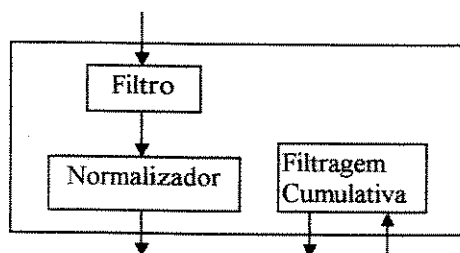


Figura III-4- Pré-processador

III.4.3.1 Filtragem

As respostas ao sinal impulsivo são sinais analógicos e portanto devem ser convertidos para a forma digital para serem analisados e processados pelo sistema de detecção. A conversão de um sinal analógico para a forma digital sofre os efeitos de amostragem e quantização. Para se reduzir o efeito da quantização no sinal, utiliza-se filtros digitais.

Filtro digital

O sinal analógico apresenta um ruído sobreposto, de origem externa e interna à linha. Este ruído associado ao efeito da digitalização deforma ainda mais o sinal. Para amenizar estes efeitos, foi utilizado um filtro digital de primeira ordem buscando reduzir principalmente as componentes de altas frequências associadas à quantização do sinal. Assim, o filtro reduz o efeito da quantização eliminando os degraus, como ilustra a figura III.6.

Foi utilizado um filtro recursivo de primeira ordem (Williams 1986) dado pela equação III.1

$$y_k = c \ y_{k-1} + (1-c) \ x_k \quad (\text{III.1})$$

onde:

x_k - sinal a ser filtrado no instante k

y_{k-1} - sinal filtrado no instante anterior k-1

y_k - sinal filtrado no instante k

$0 < c < 1$, $c \approx 1$

Este filtro é chamado de recursivo pois utiliza uma realimentação de valores anteriores de saída, figura III.6.

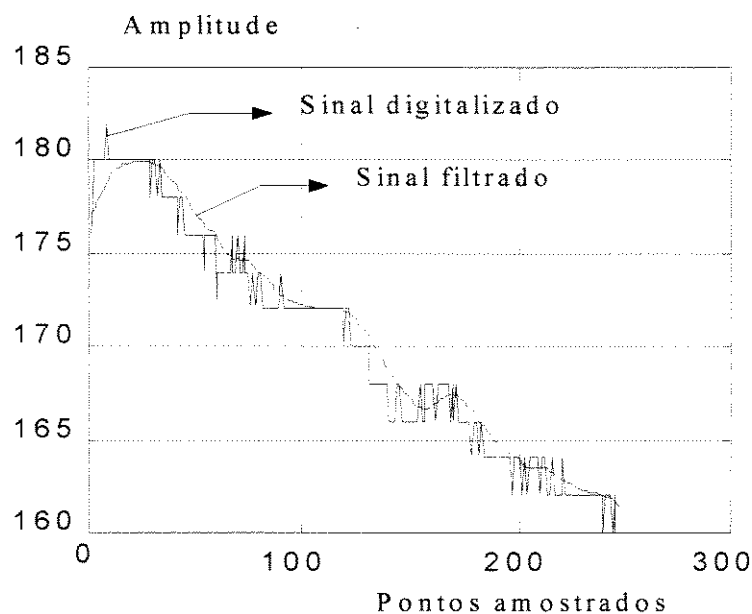


Figura III-5-Comparação entre sinais filtrado e não filtrado

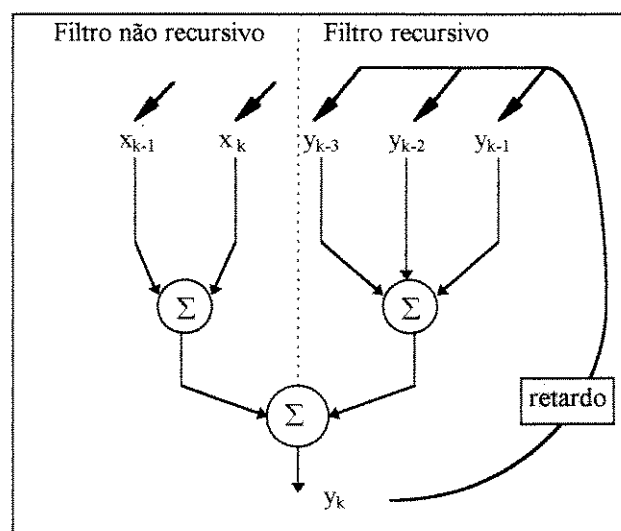


Figura III-6 - Filtro recursivo de primeira ordem

A figura III.5 apresenta a comparação entre um sinal medido e o mesmo sinal após filtragem. Observa-se que a filtragem reduz o efeito da quantização. O coeficiente do filtro digital utilizado neste exemplo foi $c = 0.8$.

Filtragem Cumulativa

Em sistemas reais, quando se faz várias medidas de um mesmo evento é comum ter-se sinais diferentes para cada medição. Estando o alimentador operando numa mesma configuração, isto ocorre devido à existência de ruídos na linha. Assim, para se obter o sinal-resposta mais próximo do real deve-se tomar várias medidas de um mesmo evento calculando em seguida a média destes sinais. Este processo de medição cumulativa melhora a relação sinal/ruído na razão de $\sqrt{n}$ onde n é o número de medidas acumuladas (Jota, 1994). Porém, se alguma destas ondas estiver fortemente corrompida por alguma perturbação muito forte, a onda média também será afetada. Portanto, é necessário verificar a consistência entre as medidas antes deste tipo de filtragem.

III.4.3.2 Normalização

A normalização consiste na correção do valor máximo da onda amostrada. Esta correção é necessária pois o sinal injetado durante a medição pode sofrer pequenas variações de amplitude. Este valor depende da tensão de disparo entre duas esferas ajustáveis, presentes no gerador de impulso. Como a tensão de disparo pode variar com as condições ambientais, este efeito deve ser eliminado através da normalização. Todas as respostas medidas são normalizadas para apresentarem o mesmo valor máximo que a onda padrão, como mostra a figura III.7. Após o sinal ser submetido a este procedimento ele é enviado para a verificação da consistência.

Outro tipo de normalização é feito durante o cálculo da distância. Esta segunda normalização tem como objetivo evidenciar a divergência entre o sinal amostrado e o sinal de referência, ou seja, facilitar o cálculo da distância. Os sinais

a serem analisados são similares aos da configuração padrão, porém, com alterações a partir de um determinado tempo. Qualquer operação de chaves ou falhas podem retirar um certo número de elementos, resultando em variações no sinal medido em relação ao sinal padrão. Por esta razão, observando os dois sinais juntos verifica-se que pode-se facilitar a análise normalizando-se. Esta normalização evidencia o ponto de início da divergência entre os sinais, ou seja, o tempo correspondente para que o sinal viaje até o ponto onde houve alteração na configuração e retorne ao ponto de medição e, portanto é utilizada no processo. Utiliza-se como referência o sinal-resposta para a configuração de operação antes da ocorrência da falta.

A figura III.8a apresenta duas respostas a serem comparadas. Após a normalização porém, figura III.8b, observa-se que a caracterização das diferenças entre esta onda e a resposta padrão fica facilitada. Por esta razão, conforme a conveniência da análise, os sinais serão normalizados e o sinal referência será citado caso este seja diferente do sinal padrão.

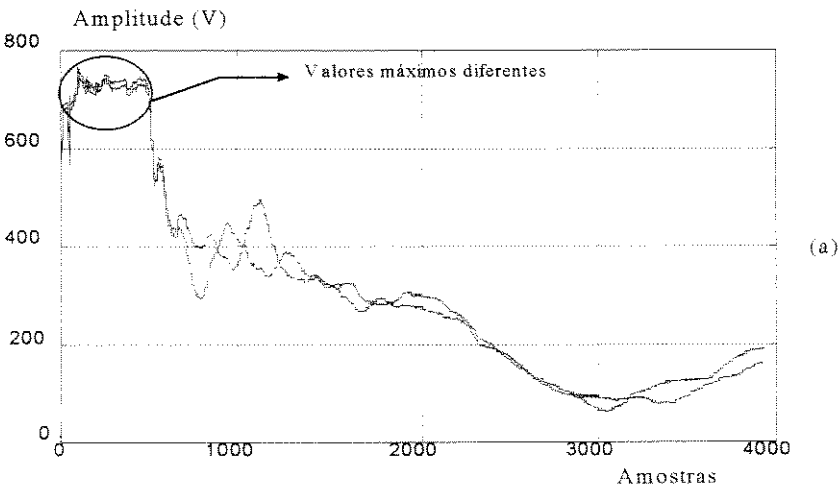


Figura III-7 Sinais medidos

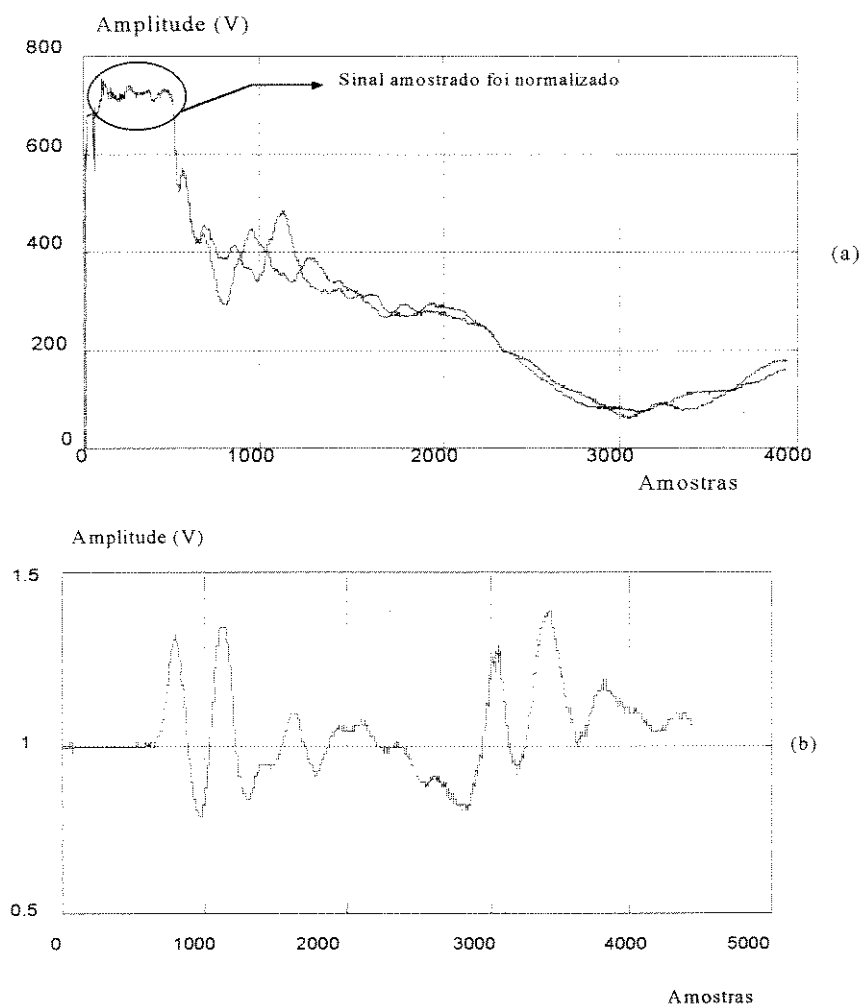


Figura III-8 a) Sinal referência e sinal amostrado após primeira normalização; b) Sinal normalizado para cálculo de distância

Capítulo IV

Sistema Inteligente de Detecção de FAI

Neste capítulo são apresentadas a organização e a forma de processamento do conhecimento implícito nos dados obtidos nos testes de campo. O processamento do conhecimento é apresentado aqui de forma sucinta e de forma detalhada no apêndice A.

IV.1 Organização do Conhecimento presente nos Dados

Após uma análise minuciosa dos dados pré-processados pode-se extrair o informações úteis dos mesmos. Uma parte dessas informações, após um tratamento prévio, é armazenada na forma de banco de dados. Subconjuntos dessas informações são trabalhados e organizados na forma de um banco de conhecimento. Em seguida, os dois bancos, de dados e de conhecimento, são utilizados no processo de detecção de FAI.

IV.1.1 Banco de Dados - Configurações e Distâncias

O sistema de detecção é composto por dois bancos de dados (respostas-padrão e distâncias). Estes bancos são compostos por parte do **conhecimento** presente nas respostas do alimentador. O primeiro banco contém as respostas a um impulso de tensão para todas as configurações de operação do alimentador. Estas respostas são representadas por parte dos seus espectros de frequências, figura IV.1. A medição das respostas do alimentador para cada configuração de operação, é feita na fase preliminar do processo de implantação do sistema. Os

espectros armazenados são calculados a partir dos dados submetidos à filtragem cumulativa.

Conf.1	fo	...	fn		Conf.n	fo	...	fn
A1∠φ				...	A1∠φ			
...					...			
An∠φ					An∠φ			

Figura IV-1 Forma de armazenagem de “n” configurações

O segundo banco de dados é composto pelas distâncias de cada chave a ser operada para gerar cada uma das configurações do banco anterior, como ilustra a figura IV.2.

Chave	Distância
Ch.1	d1
...	...
Ch.n	dn

Figura IV-2- Banco de dados contendo as distâncias

Para se obter estas distâncias faz-se um cruzamento de informações entre os dados de projeto com os da própria medição. Isto é feito porque a obtenção da distância a partir do projeto não é muito exata uma vez que as escalas utilizadas nos projetos não fornecem precisão suficiente, pois, muitos detalhes da topologia são omitidos. A medição com uma régua milimetrada em uma planta na escala de 1 para 20000, que é a escala mais utilizada, fornece um erro de 20 metros a cada milímetro de erro. Como existem muitas curvas, esta medição fica difícil e não fornece a precisão adequada. Além do mais, as distâncias obtidas no projeto são distâncias entre postes não considerando que o condutor descreve uma catenária entre um poste e outro e não uma linha reta e esta catenária varia com a carga do alimentador e com a temperatura (Pansini, 1988). Outro problema é a localização

exata da chave, que no desenho é indicada na saída do ramal, e que muitas vezes por questões práticas¹ são colocadas um ou dois postes depois. Em uma linha rural esta diferença pode chegar a 200m. Por esta razão a escolha do valor da distância será um trabalho de verificação e bom senso.

IV.1.2 Estimativa da Distância

A estimativa da distância da falha, ainda que aproximada, até a subestação tem um papel importante no sentido de auxiliar a localização do defeito. Observando as respostas do alimentador, esta identificação parece não ser difícil quando a onda em questão está normalizada. Enquanto a onda medida permanecer igual a onda de referência, isto significa que não houve nenhuma alteração na configuração. A partir do ponto onde as duas ondas passam a divergir, pode-se concluir que houve alteração na configuração. O tempo t_1 onde ocorre o início da divergência tem relação direta com a distância da falha até a subestação, como ilustra a figura IV.3. O sinal impulsivo injetado no alimentador se propaga no mesmo com uma velocidade muito próxima à da luz (Johnson, 1988). Este sinal percorre o alimentador até o ponto da falha, é refletido e retorna à subestação com a informação desta alteração na configuração. O tempo decorrido entre a injeção do pulso e o retorno da primeira informação do ponto da falha é o dobro do tempo gasto para o sinal percorrer o alimentador. Assim pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$t_1 = d/v \quad (IV.1)$$

onde d - distância percorrida $d=2d_{ch}$

¹ As chaves podem ser deslocadas devido ao número elevado de elementos no poste, ou devido a problemas de esforços mecânicos.

d_{ch} - distância do ponto de defeito até a subestação

v - velocidade da luz - $3 \cdot 10^8$ m/s

t_1 - tempo decorrido até o início da divergência entre as duas ondas

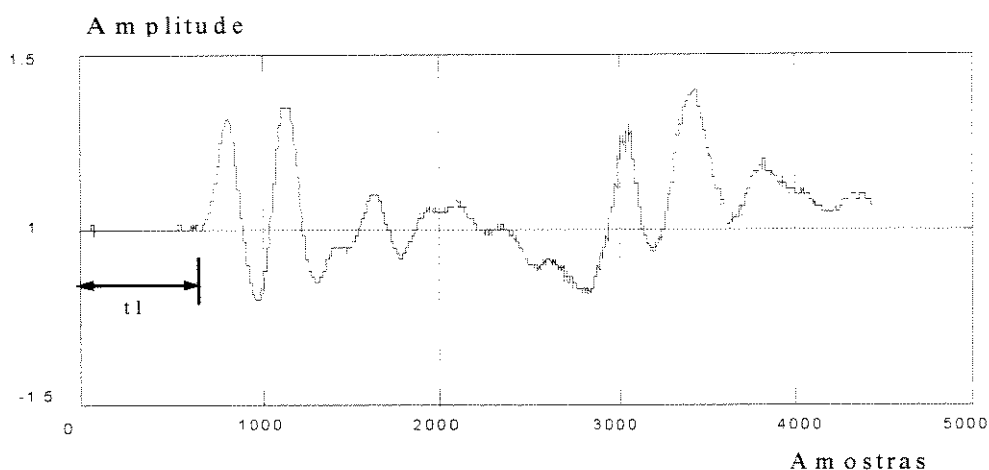


Figura IV-3 Onda normalizada utilizada no cálculo da distância da falha

Observando a figura IV.3 verifica-se com facilidade o ponto onde ocorre o início da divergência, utilizado no cálculo da distância, porém, a mesma facilidade não é obtida no cálculo deste valor. Devido a presença de ruídos este cálculo é dificultado. O limite mínimo para o qual se considerará que o sinal está divergindo do da unidade deverá ser variável para cada sinal analisado. Isto porque, o ruído pode afetar os sinais medidos de forma diferente e portanto um valor fixo levaria inevitavelmente a erros. Para tanto, calcula-se inicialmente a variância da amostra. Esta informação contribuirá decisivamente para o estabelecimento do limite para a amostra analisada.

Variância

A abordagem apresentada nesta tese se baseia na comparação entre sinais conhecidos e desconhecidos. Para que se possa fazer a comparação e a distinção

entre duas ondas, deve-se estabelecer um valor mínimo no qual variações superiores a este possam ser consideradas como um indicativo de divergência entre as mesmas. Por esta razão, foram calculadas as variâncias de todos os sinais a serem analisados. A variância é calculada para as ondas normalizadas e filtradas, através da equação IV.2 (Papoulis, 1965).

$$V(x) = E\{(x - x_m)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - x_m)^2 f(x) dx$$

(IV.2)

$$E\{y\} = (\sum y_i) / N$$

onde

$V(x)$ - variância de x

$E\{y\}$ - esperança de y

x_m - média dos valores considerados no cálculo da variância

N - número total de amostras do sinal

Após o cálculo da variância, pode-se estabelecer o limite mínimo para o qual será considerada uma indicação de divergência entre as ondas. Em seguida calcula-se a derivada da onda, verificando se a mesma é positiva nesta região e se esta também permanece positiva durante um certo tempo. A derivada segunda fornece a velocidade com que a curva se distancia da unidade. Estabeleceu-se um valor de velocidade mínimo para o qual o trecho passa a ser observado. Se esta velocidade permanecer crescente por um determinado tempo pré-estabelecido então considera-se a região como sendo a região de início da divergência.

IV.2 Sistema de Processamento do Conhecimento

Após a preparação dos dados e a organização do conhecimento neles presente, passamos ao processamento deste conhecimento e tomada de decisão. Nesta fase serão analisadas as amostras apresentadas e se decidirá a respeito do “status” do alimentador. Como pode ser visto no algoritmo apresentado no capítulo III, o sistema de processamento do conhecimento é dividido em duas partes. A seguir elas são apresentadas com detalhes.

IV.2.1 Análise da consistência das medidas - Sistema Inteligente - Fase 1

Nesta fase tem-se como dados de entrada os sinais-resposta do alimentador em uma dada configuração. Aqui a consistência dos dados é verificada, pois, os sinais podem estar corrompidos por ruídos. Assim, antes de se analisar os dados para se retirar alguma informação dos mesmos é necessário verificar a sua consistência. Caso estejam corrompidos por ruídos as amostras serão descartadas e novas medidas serão realizadas. A coerência é verificada através do cálculo das dispersões entre as amostras e a onda média obtida através da filtragem cumulativa. As dispersões devem estar dentro de certos limites aceitáveis. Isto pode não ocorrer por dois motivos. Primeiro, os sinais podem estar corrompidos por ruídos e, segundo, pode-se tratar de uma FAI ativa. Neste caso, a distância do evento até o ponto de medição deve ser calculada para cada uma das amostras. Caso as distâncias calculadas apresentem valores muito próximos, pode-se concluir que se trata de uma FAI ativa. Se isto não ocorrer novas medidas serão realizadas.

Dispersão relativa

A dispersão é calculada entre cada amostra e a onda média. Esta, por sua vez, é obtida através da filtragem cumulativa. A onda média é calculada no

domínio do tempo e em seguida são calculados os espectros de frequência das n amostras e os da respectiva onda média.

Pelo fato de a análise do sinal-resposta não ser feito no domínio do tempo a dispersão é calculada no domínio da frequência. Isto é feito pois apesar de as variações serem pequenas no domínio do tempo, estas variações se refletem diretamente naquelas frequências que foram corrompidas por ruídos. Assim, a variação fica localizada nas amplitudes destas frequências (que podem variar dependendo do ruído), facilitando a identificação do problema. Para a análise toma-se apenas as componentes reais e imaginárias das vinte primeiras frequências da(s) janela(s) observada(s). Para cada componente é calculada a dispersão em relação à componente correspondente do espectro da onda média.

Na ocorrência de uma descarga atmosférica ou de outro evento que induza perturbações no momento da medição da resposta do alimentador, a dispersão da medida afetada irá indicar a falta de consistência desta com as demais medidas. Neste caso, pode-se eliminar a medida afetada ou mesmo todas as n medidas substituindo-as por medidas novas. A figura IV.4 ilustra a dispersão encontrada entre medidas de um mesmo evento pouco corrompido por ruídos.

Observa-se que a dispersão típica entre as medidas se concentra em torno do zero. Alguns valores, porém, ultrapassam 5%. Portanto, mesmo para medidas consecutivas, para uma dada configuração, obtemos valores de dispersão fora de uma faixa aceitável. Se, porém, a análise estabelecer limites fixos muitas medidas indicarão falha erroneamente. Desta forma, um tratamento especial deste dados deve ser feito na análise.

O cálculo da dispersão entre medidas é feito antes de qualquer processamento da informação. Durante a fase de processamento da informação também existe a necessidade de realizar o cálculo da dispersão que será denominada de dispersão discriminativa.

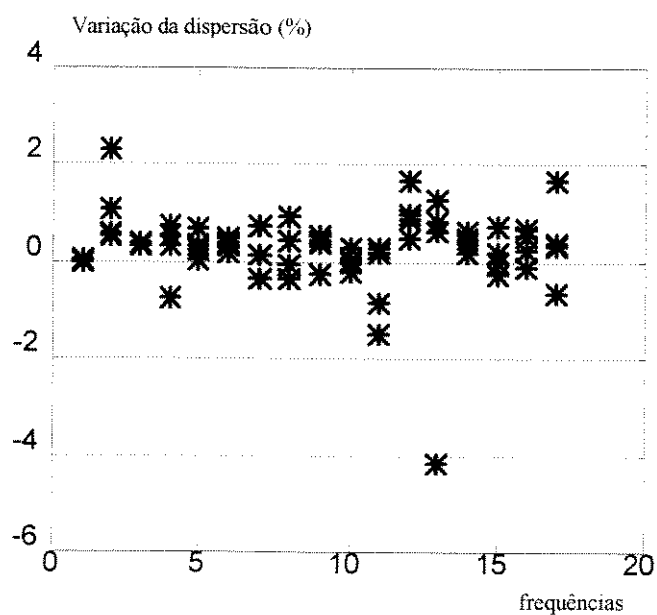
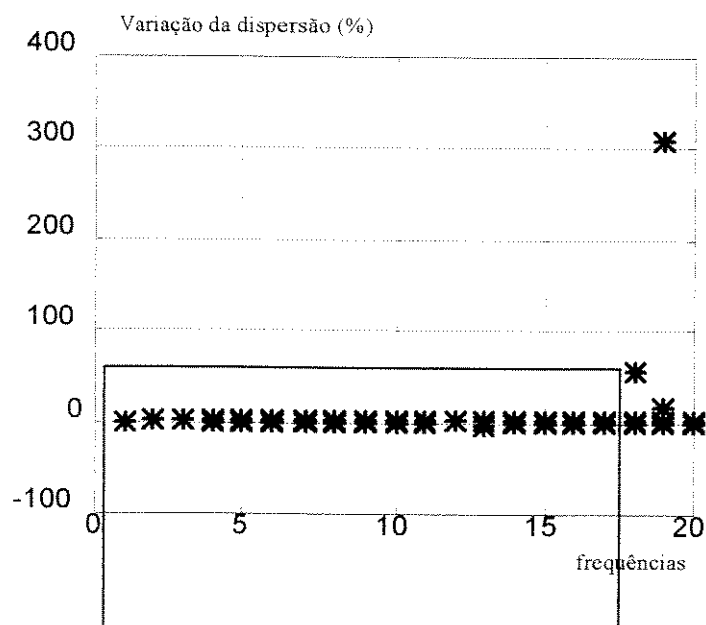


Figura IV-4 a e b) Dispersão entre medidas de um mesmo evento

Este sistema conta com um conhecimento organizado através de regras armazenadas em um banco com regras. Algumas dessas regras estão explicitadas na seção C.1 do Apêndice C.

IV.2.2 Busca da configuração - Sistema Inteligente - fase 2

Quando as amostras processadas são enviadas à segunda fase, estas são comparadas com as respostas contidas no banco de dados para verificar se o alimentador está operando em alguma configuração conhecida. Para tanto, as amostras são comparadas ao banco de dados contendo as configurações normais. Esta comparação é feita através da análise das dispersões discriminativas. Estas dispersões são calculadas tomando-se como referência os casos armazenados no banco de dados. A amostra é comparada com cada uma das respostas de configurações do banco. O sistema inteligente analisa cada dispersão calculada e ao final conclui a partir das informações obtidas nas análises, conforme mostrado na figura IV.5.

A filosofia da detecção é basicamente o reconhecimento da resposta do alimentador ao impulso de tensão como sendo igual a uma das respostas armazenadas no banco de dados, ou seja, o reconhecimento do "status" do alimentador como sendo normal ou não. Foram implementadas três técnicas distintas nesta fase: sistema baseado em regras, sistema difuso e neurônio difuso. Para qualquer uma das três técnicas utilizadas os dados de entrada são as dispersões das componentes das frequências analisadas em relação às das referências contidas no banco de dados (dispersões discriminativas). A seguir são apresentadas as três técnicas para decisão utilizadas neste trabalho.

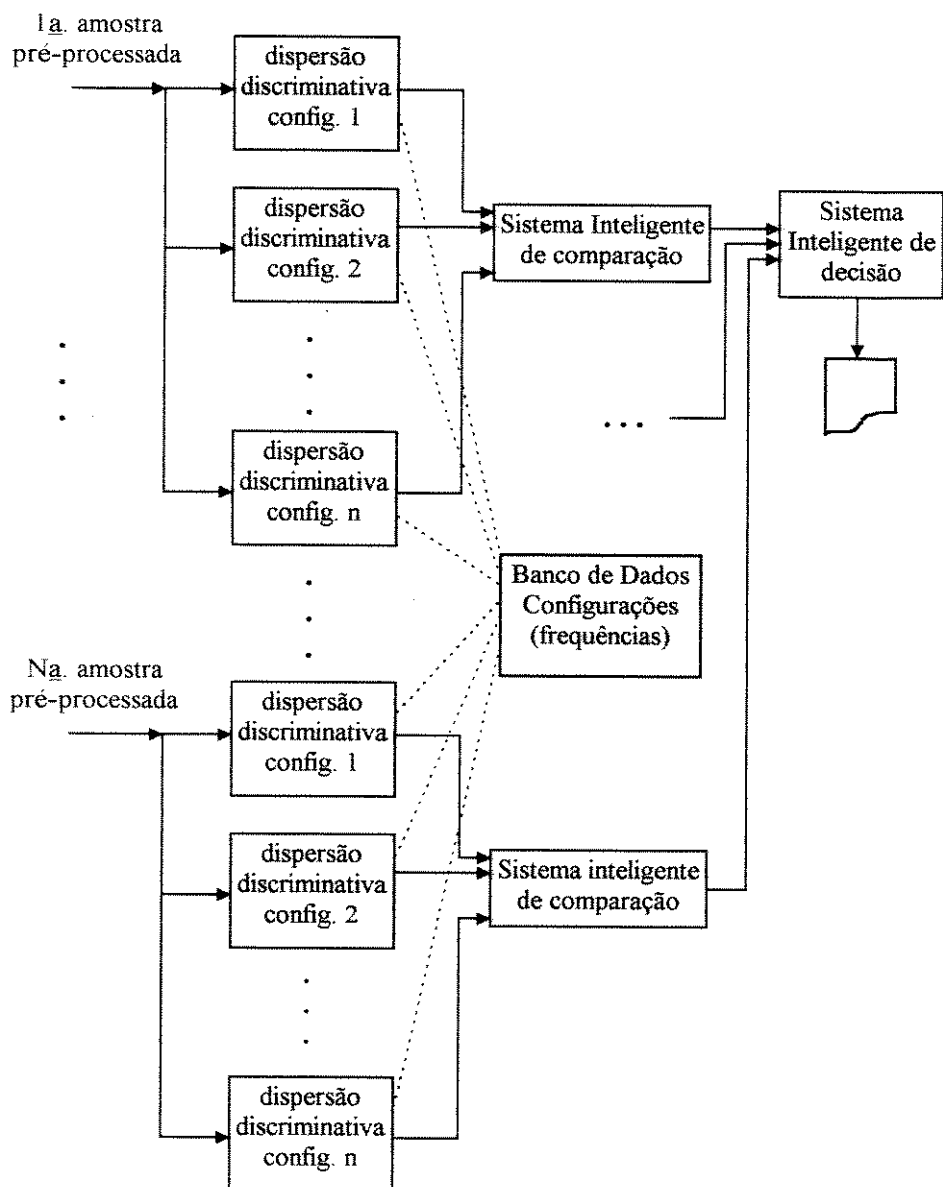


Figura IV-5 Sistema Inteligente de Decisão - Fase 2

IV.2.2.1 Dispersão discriminativa

A partir do conhecimento do padrão de comportamento das dispersões entre medidas consecutivas, pode-se estabelecer faixas para a sua classificação. A comparação de uma onda desconhecida com uma pertencente ao banco de dados, através da dispersão entre elas, nos fornece a informação se estes dois

sinais são similares (faixa de dispersão aceitável) ou não (faixa de dispersão inaceitável). Porém, tem-se a informação da dispersão de cada componente de frequência analisada, ou seja, trata-se de um número grande de dispersões que podem estar nas várias faixas de classificação. A análise do conjunto de dispersões como um todo nos informará se se trata de ondas similares ou não. Esta análise da dispersão é feita pelas técnicas apresentadas a seguir. Porém, se forem estabelecidos limites rígidos na análise da dispersão, podem ocorrer significativos erros de avaliação.

Como pode ser visto na figura IV.4, as dispersões entre medidas consecutivas apresentam valores que giram em torno do zero, mas para algumas frequências ultrapassam o aceitável. Não se pode prever qual frequência apresentará valores inaceitáveis uma vez que as perturbações causadoras são aleatórias. Este comportamento indica um tratamento não convencional² deixando de estabelecer limites fixos.

A figura IV.6 apresenta outro conjunto de dispersões agora calculado entre amostras de configurações diferentes. A amostra comparada com a referência não representa a mesma configuração que esta. Observa-se que algumas frequências apresentam pequenas dispersões, porém, a maioria assume valores maiores. Observa-se que a análise das dispersões da amostra medida em relação às referências contidas no banco de dados nos fornece informação a respeito da similaridade entre a amostra e as respostas armazenadas no banco de dados. O processamento desta informação nos fornece o conhecimento que será utilizado no processo de detecção.

² Lógica difusa

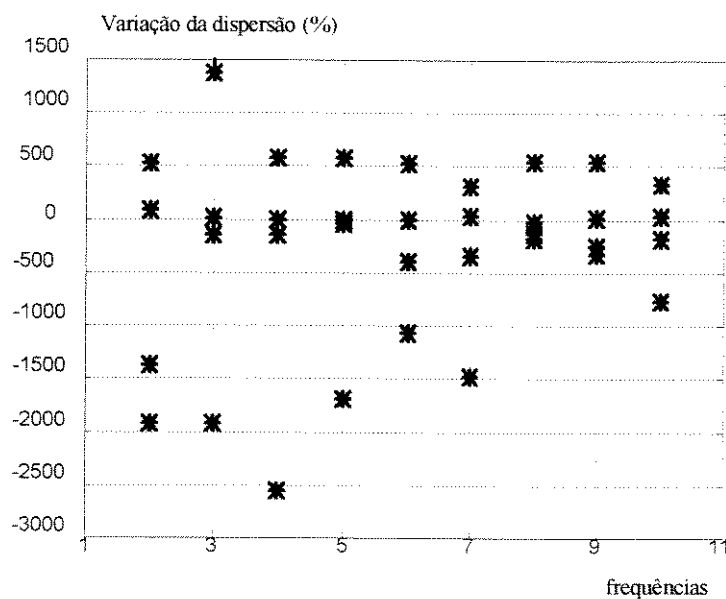
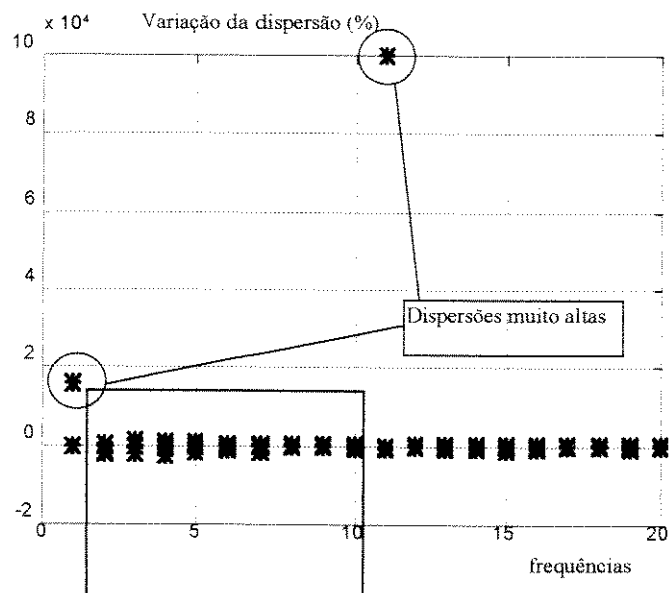


Figura IV-6 a) Dispersões calculadas entre duas respostas para configurações diferentes; b) Detalhe entre as frequências de ordem 2 e 11

Se se estabelecer limites máximos de dispersão, para cada uma das frequências, verificaremos que cometeríamos um erro grave de avaliação. Não há como eliminar totalmente o ruído presente e, por esta razão, não se pode afirmar qual das frequências será afetada a cada instante. A dispersão varia muito,

impossibilitando o estabelecimento rígido de um limite para todas as componentes. Assim, o que seria aceitável? O que seria tolerável com restrições? O que seria realmente inaceitável? Estas perguntas dificilmente seriam respondidas estabelecendo-se valores fixos. Se isto fosse feito, não seria possível classificar corretamente todas as amostras. Muitos erros seriam cometidos devido à intolerância, ou em alguns casos à tolerância destes limites. Porém, é possível estabelecer faixas, mas a fronteira entre o aceitável e o tolerável não é bem clara. Devido à natureza das perturbações, o uso de heurísticas nesse processo de classificação torna-se imprescindível.

Para obter maior clareza da informação contida nas dispersões utilizaremos uma representação difusa das mesmas. Como foi dito, não existem limites bem definidos para a faixa do aceitável (dispersão pequena), do tolerável (média) e do inaceitável (grande). Para tanto, conjuntos difusos são estabelecidos. Dois tipos de conjuntos difusos foram formados, como pode ser visto na figura IV.7. Estes conjuntos representam o critério do especialista na avaliação dos dados. Assim, existe uma faixa duvidosa nas fronteiras de cada conjunto. Foram adotados conjuntos difusos diferentes para o sistema de regras e para as demais técnicas implementadas. Durante o processo de construção das regras, necessitou-se de uma maior divisão dos conjuntos difusos. Nas demais técnicas esta divisão não foi necessária.

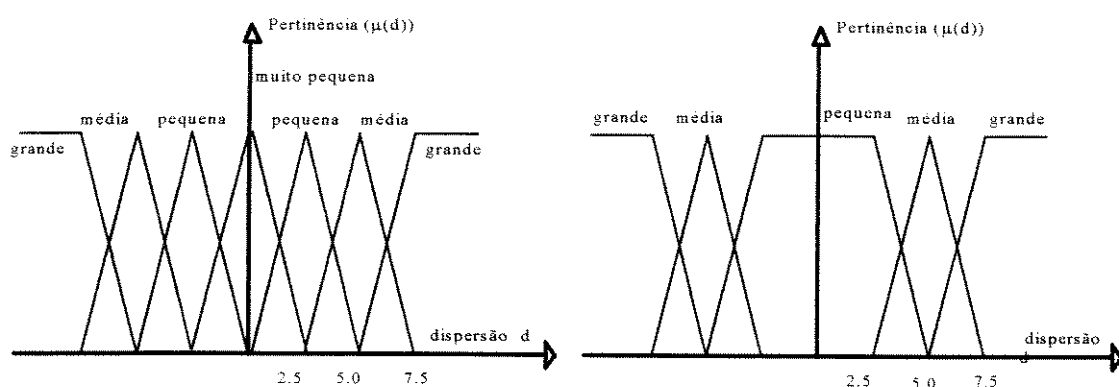


Figura IV-7- Conjuntos Difusos que representam a dispersão

As fronteiras entre os conjuntos foram estabelecidas tendo como dados as dispersões de todas as ondas repetidas comparadas entre si. A figura IV.8 ilustra como este processo foi feito. A maior parte da dispersão é menor do que 2.5%, desta forma, o conjunto pequeno foi construído com este limite.

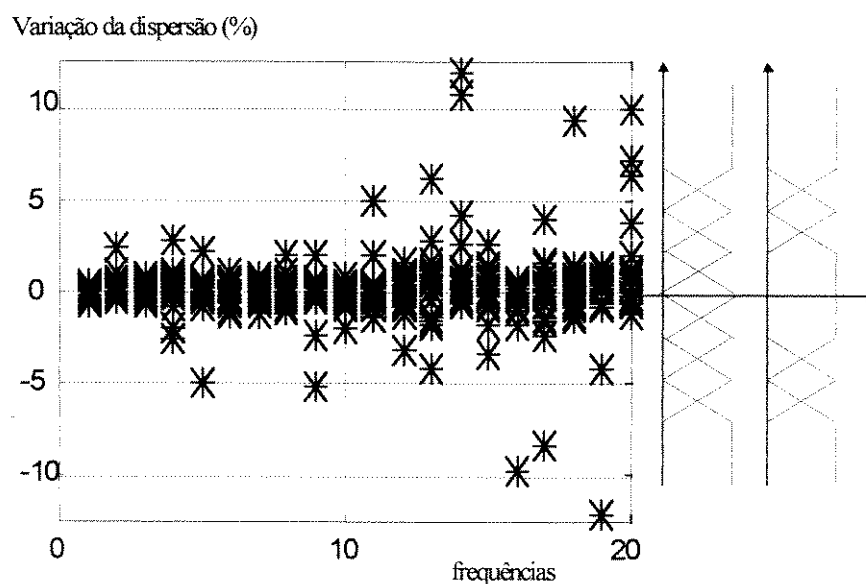


Figura IV-8 Definição de valores limites dos conjuntos difusos

As dispersões entre as componentes de freqüência da onda analisada e as componentes correspondentes do sinal de referência fornecem o conhecimento necessário para classificá-las como similares ou diferentes. Um especialista pode obter informações do conjunto de dispersões através de uma análise visual do gráfico. Porém, a análise por um computador pode ser mais complexa. A busca da representação do raciocínio utilizado para se tirar uma conclusão a respeito da amostra medida é proposta de várias formas. Esta representação do raciocínio compõe o processamento do conhecimento.

IV.2.2.2 Sistema Baseado em Regras

Este sistema é composto por regras que caracterizam uma dada amostra como falha ou como configuração conhecida, veja figura IV.9. Duas abordagens

foram feitas utilizando-se esta técnica. Na primeira, as regras foram geradas a partir da observação exaustiva do comportamento das dispersões das amostras. Ou seja, as regras foram escritas através da observação do comportamento das dispersões entre amostras repetitivas e a onda média (calculada para estas amostras-filtragem cumulativa), e ao comparar amostras representando eventos distintos.

Foram calculadas as dispersões entre as duas primeiras amostras de cada um dos eventos de abertura de chaves e a sua respectiva onda média. Este procedimento foi realizado para todos os eventos medidos. Observou-se o comportamento de cada uma das dispersões representadas através dos conjuntos difusos. Através da observação do comportamento das pertinências em cada conjunto difuso foi possível escrever regras que os caracterizasse. O mesmo procedimento foi realizado comparando-se amostras a referências que representam eventos distintos.

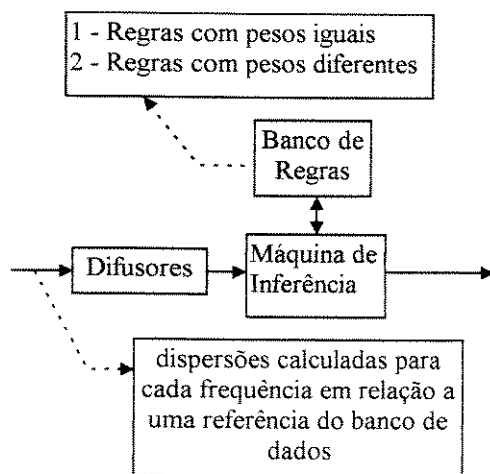


Figura IV-9-Fluxo de sinais do Sistema Baseado em Regras

Na segunda abordagem, tomou-se as regras da primeira abordagem e novas regras foram acrescentadas. A este conjunto de regras foi atribuído pesos diferentes para cada regra. O peso é tanto maior quanto maior for a importância da

regra. Algumas regras são mais exigentes, mais rígidas e portanto foram disparadas poucas vezes, mas quando isto ocorria significava que a amostra apresentava uma grande semelhança com a configuração de referência. Neste caso, à esta regra foi atribuído um peso maior que à outra mais “frouxa” que a todo momento foi disparada. Uma regra exigente para ser disparada necessita de dispersões muito pequenas. Regras “frouxas” portanto são mais tolerantes e são disparadas com dispersões médias e portanto, são regras menos importantes.

Construção das regras

As regras foram construídas com base na experiência adquirida no processo de análise dos resultados de medição. Este processo de classificação conta em grande parte com a percepção humana que por muitas vezes é de difícil modelagem uma vez que nem sempre é facilmente explicável pela linguagem natural. Trata-se de um raciocínio encadeado que envolve experiências passadas e já absorvidas pela mente.

Na primeira abordagem o sistema baseado em regras foi dividido em duas partes - a primeira apresenta regras mais rígidas e tem por objetivo verificar se com os dados obtidos através de medição pode-se ou não classificar o sinal medido como uma operação normal de chave ou uma falha - a segunda apresenta regras mais flexíveis e limites para os conjuntos difusos maiores (5, 7.5 e 10) que verificam se existe algum sinal similar aquele medido, indicando a possibilidade de uma falha nas proximidades de uma chave previamente conhecida, figura IV.10. No total tem-se oitenta regras que verificam condições. Destas 56 são auxiliares, 14 são regras do primeiro grupo e 10 são regras do segundo grupo. As regras do primeiro grupo buscam a classificação dos eventos como falhas e as do segundo grupo são utilizadas quando o evento foi classificado como falha e a busca tenta verificar se a resposta possui características de alguma configuração. Este procedimento tenta detectar falhas nas proximidades de alguma chave conhecida.

A seguir apresentamos alguns exemplos de regras utilizadas:

SE o número de ocorrências no conjunto difuso PEQUENO predominante para as amplitudes das componentes imaginárias da primeira janela for maior que 70% **ENTÃO** acrescente um ponto para a classificação.

SE o número de ocorrências nos conjuntos difusos PEQUENO predominante e MÉDIO predominante para as amplitudes das componentes imaginárias da segunda janela for maior que 85% **ENTÃO** acrescente um ponto para a classificação.

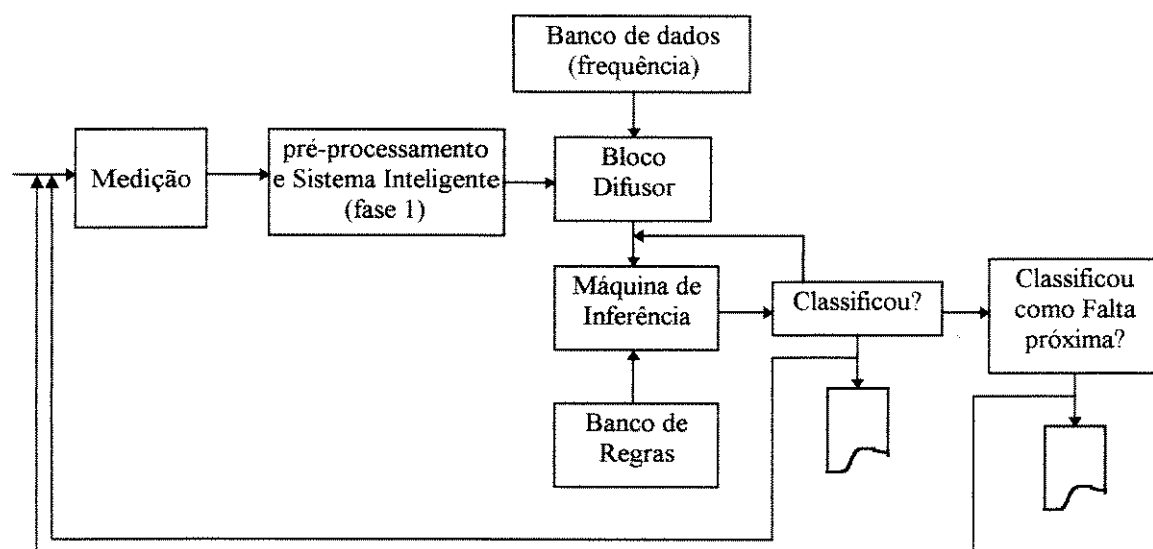


Figura IV-10 Diagrama em blocos do SBR

Para o sistema de regras adaptativas, além das regras utilizadas no processo anterior, algumas variações das mesmas foram propostas e outras regras foram construídas, porém, não se tenta classificar falhas nas proximidades das chaves. Na busca dos pesos mais adequados, utilizou-se as duas primeiras amostras de cada evento medido para serem comparadas com a sua respectiva média. Durante esta comparação as regras que foram sendo utilizadas foram

recebendo pontuação. Aquelas que foram utilizadas em todos os casos receberam pontuação máxima, ou seja 100%. O peso foi atribuído como sendo um nível de exigência das regras. As regras mais exigentes foram pouco ativadas e portanto quando forem ativadas estas deverão dar um grande impulso no sentido da classificação da amostra (Michel e Jota, 1995). Regras menos exigentes foram muito utilizadas ou sempre utilizadas. Estas receberam o peso 1. As demais receberam peso inversamente proporcional à sua frequência de ocorrência: 50% de ocorrência implica em peso $1/0.5=2$. Regras que não foram ativadas nenhuma vez foram desprezadas.

O resultado obtido foi melhor que para as regras de pesos iguais. Neste caso, porém, a resposta da classificação de cada amostra para cada referência passa a ser uma curva, pois a amostra pode disparar uma ou outra regra ganhando assim uma pontuação. Para estabelecer qual seria a pontuação mínima a ser necessária para se considerar que a amostra foi classificada, tomou-se as regras com índice de ativação acima de 90% o que resulta em uma pontuação total de 10.36. Caso todas as regras sejam ativadas a pontuação alcançada é de 26.49.

Estas duas abordagens serão apresentadas em detalhes no apêndice A e são denominadas de Sistema Baseado em Regras e Sistema de Regras Adaptativas (Michel e Jota, 1995).

IV.2.2.3 Sistema Difuso de Decisão

O sistema difuso de decisão é baseado em regras compostas por antecedentes e conseqüentes difusos, juntamente com alguns neurônios lógicos. Uma seqüência encadeada de regras e neurônios foi desenvolvida para que o mesmo forneça como resposta se as amostras analisadas representam configurações conhecidas ou se se trata da ocorrência de uma FAI, o fluxo de sinais é apresentado na figura IV.11.

Regras difusas são aquelas que possuem antecedentes e conseqüentes difusos. Os neurônios aqui utilizados são aqueles que efetuam funções tais como: mínimo e máximo. O neurônio limitador efetua funções como o próprio nome diz, ou seja limita a sua saída segundo limites pré-estabelecidos. Um tratamento mais detalhado desta técnica é apresentado no apêndice A. A seguir apresenta-se o algoritmo de decisão de forma resumida.

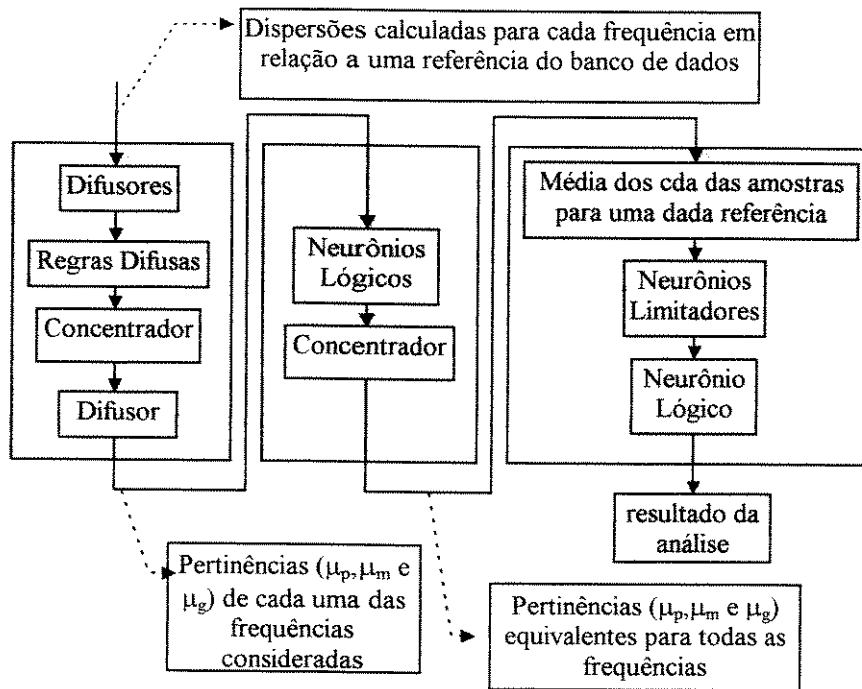


Figura IV-11- Fluxo de sinais no sistema Difuso de decisão

Algoritmo de decisão

1. Dados de entrada: Dispersão entre a amostra e a referência (Duas janelas de observação, 20 frequências de cada janela com suas respectivas componentes real e imaginária) Matriz [20x4]
2. Conjuntos difusos 1 : pequeno, médio e grande
3. Número de combinações possíveis $3^4 = 81$
4. Regras difusas - 81 regras. A saída destas regras são representadas pelos conjuntos difusos apresentados na figura IV.12.

Se (R_1 for pequena) E (Im_1 for pequena) E (R_2 for pequena) E (Im_2 for pequena)
então a saída é pequena

Todas as combinações de regras são feitas. A operação realizada nas regras é o MIN.

5. Saída obtida - O resultado de cada regra ativada para cada uma das 20 frequências.

6. Das 81 regras - 15 apresentam saída localizada no conjunto difuso pequeno
39 apresentam saída localizada no conjunto difuso médio
27 apresentam saída localizada no conjunto difuso grande

7. Calcula-se o MAX entre as saídas que pertencem ao mesmo conjunto difuso

8. Neste ponto, para cada frequência poderemos ter $\mu_p \neq 0$, $\mu_m \neq 0$ e $\mu_g \neq 0$ e também $\mu_p + \mu_m + \mu_g \neq 1$ normalmente > 1 .

9. Calcula-se o CDA (concentrador) CDA1

10. Difunde-se novamente (μ_p, μ_m e μ_g) para cada frequência

11. Soma-se os graus de pertinência de todas as frequências para cada conjunto difuso

12. Conjuntos difusos 2 : pequeno, médio e grande

13. Calcula-se o CDA2

14. Toma-se o resultado de cada amostra para cada frequência e tira-se a média dos CDAs.

15. Se $CDA_{min} > 5.5$ então classificou aquela amostra como similar para a referência

16. Aquela referência para o qual a amostra obter o maior $CDA_{médio}$ será a considerada similar.

A busca desta informação resumida é feita em etapas bem definidas e através de um raciocínio lógico. Pode-se dividir o raciocínio aplicado em três etapas. A primeira etapa realiza a análise por frequência dando um resumo para cada uma delas. A segunda realiza a análise conjunta de todas as frequências para cada amostra. A terceira, analisa os resultados de todas as amostras, dando o resultado final.

Para ilustrar o raciocínio desenvolvido, apresenta-se um exemplo onde as amostras apresentadas representam uma chave aberta e esta será comparada com as referências contidas no banco de dados. Uma das referências deverá classificá-las como chave aberta. Inicialmente calcula-se a pertinência aos conjuntos difusos das componentes de frequência.

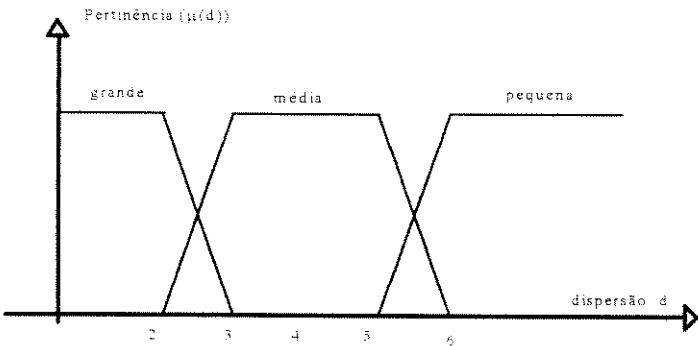


Figura IV-12- Conjuntos Difusos de saída

Fase 1

Dispersão entre a amostra1 e a referência padrão

	Pequeno	Médio	Grande
Real1(6.1kHz)	0	0	1
Imag.1(6.1kHz)	1	0	0
Real2(6.1kHz)	0	0	1
Imag.2(6.1kHz)	1	0	0

Saída do item 10 do algoritmo para f1

	P	M	G
6.1kHz	0	1	0

Dispersão entre a amostra1 e a referência similar à amostra

	Pequeno	Médio	Grande
Real1(6.1kHz)	1	0	0
Imag.1(6.1kHz)	1	0	0
Real2(6.1kHz)	1	0	0

Imag.2(6.1kHz)	1	0	0
----------------	---	---	---

Saída do item 10 do algoritmo para f1

	P	M	G
6.1kHz	1	0	0

De posse dos dados resumidos provenientes de cada frequência, pode-se resumi-los em uma única informação também representada pelos conjuntos difusos mostrados na fase1. A fase 2 ilustra o processamento realizado nesta etapa.

Fase 2

Resultado por frequência - amostra1 e a referência similar à amostra

	P	M	G
f1(6.1kHz)	1	0	0
f2	1	0	0
f3	1	0	0
f4	1	0	0
:	:	:	:
f13	0.67	0	0
:	:	:	:
f18	0	1	0
f19	1	0	0

Saída do item 14 do algoritmo para amostra 1

	CDA
Amostra 1	6.37

As duas primeiras fases são realizadas considerando-se todas as referências contidas no banco de dados. Os resultados obtidos são apresentados

à terceira fase do processamento, onde é obtido o resultado final. Este processamento é apresentado na fase 3.

Fase 3

	Padrão	Ref2	Ref3	...	Ref12
Amostra 1	1.91	1.68	6.37	...	1.74
Amostra2	1.95	1.65	6.50	...	1.94
Amostra 3	1.84	1.63	6.27	...	1.80
Amostra 4	1.94	1.67	6.35	...	1.93
Amostra 5	1.97	1.68	6.37	...	1.67

Saída do item 16 do algoritmo

	CDA
Resposta Final	6.37

IV.2.2.4 Neurônio Difuso

Os neurônios difusos diferem dos neurônios tradicionais por realizarem funções pré-programadas utilizando dados na forma difusa, ou seja, são fornecidos ao neurônio as pertinências dos dados de entrada nos conjuntos difusos pré-definidos. Este tipo de neurônio também possui pesos internos que devem ser ajustados durante a fase de treino. O neurônio é treinado na fase inicial para reconhecer uma determinada onda padrão. Assim, para cada configuração conhecida tem-se um neurônio dedicado à sua identificação, conforme ilustrado na figura IV.13.

Cada neurônio treinado apresenta saída ativada quando os dados de entrada são iguais aos da referência. Caso contrário, o mesmo apresentará saída não ativada. Desta forma, tem-se um conjunto de neurônios que representa as

configurações consideradas normais de operação do alimentador. Configurações diferentes daquelas armazenadas pelos neurônios não são reconhecidas e portanto são consideradas falhas.

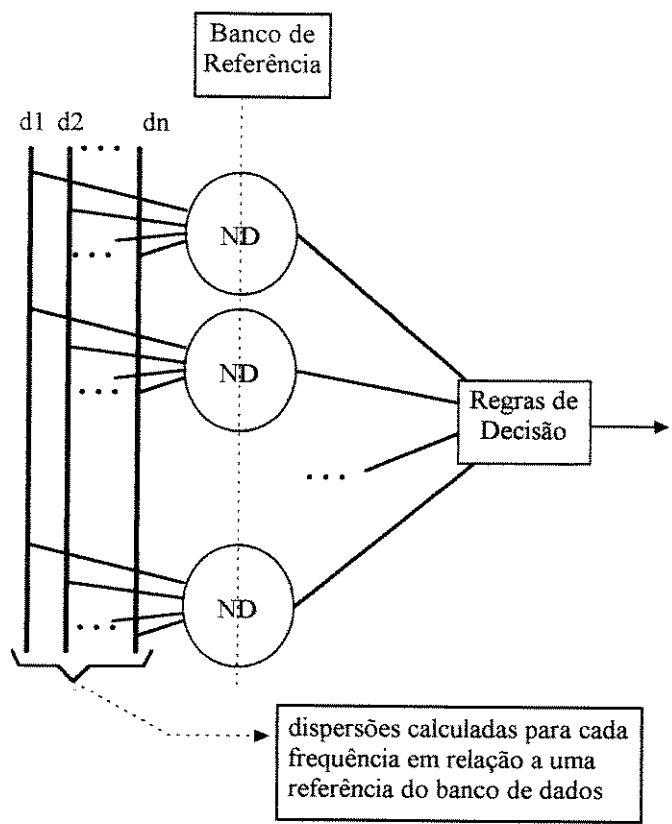


Figura IV-13- Conjunto de Neurônios Difusos

Identificação de Falhas utilizando neurônios Difusos

No sistema supervisorio proposto (Silva, 1995a), o número de neurônios treinados é igual ao número de configurações de operação possíveis do alimentador. O processo de comparação se desenvolve da seguinte forma: após a injeção do pulso de tensão, o alimentador é monitorado em intervalos regulares de tempo. O sinal medido pelo sistema supervisor é pré-processado, conforme já descrito, e em seguida apresentado ao conjunto de neurônios já treinados. As componentes de frequência do sinal-resposta a ser analisado são apresentadas ao bloco difusor de cada neurônio. Neste bloco as dispersões das componentes de

freqüência apresentadas em relação às componentes do sinal de referência de cada neurônio (configuração de referência utilizada no treino de cada neurônio) são calculadas. Em seguida, são calculados os graus de pertinência (μ) de cada componente a um dado conjunto difuso. A dispersão de um componente pode pertencer a um ou dois conjuntos difusos, onde nos conjuntos difusos aqui definidos a somatória das suas pertinências é sempre igual a 1 ($\sum \mu_{ij}=1$). Para cada componente de freqüência apresentado tem-se os três graus de pertinências correspondentes (sendo pelo menos um igual a zero), obtendo-se assim uma matriz de pertinências na saída do bloco difusor. A matriz de pertinências, μ_{ij} , é multiplicada pela matriz de pesos w_{ij} . Estes pesos são ajustados durante a fase de treinamento do neurônio para que este passe a reconhecer adequadamente as respostas. Vários espectros são apresentados aos neurônios a serem treinados e as suas saídas são monitoradas para que estas apresentem condição ativada ($=1$), quando o sinal sob investigação representar a configuração para a qual cada um deles foi treinado, e desativado ($=0$), em caso contrário.

Os neurônios que apresentarem saída ativada, $0.75 < y < 1.2$, serão comparados entre si, apêndice A. Esta faixa é estabelecida durante a fase de treino do neurônio como sendo uma faixa aceitável para a classificação. Aquele que apresentar um maior grau de ativação será considerado como a resposta da rede de neurônios. Para cada monitoração realizada, cinco ou mais medidas são feitas. O sistema inteligente só considerará a classificação como uma configuração de operação se o mesmo neurônio apresentar a maior saída ativada para todas as cinco amostras apresentadas. Se as amostras forem classificadas por mais de um neurônio o sistema indicará a existência de uma falha. A mesma indicação será dada caso nenhum neurônio seja ativado. A queima de fusíveis, por exemplo, será considerada como uma FAI série, uma vez que esta interrompe-se o fornecimento de energia aos consumidores. Uma vez diagnosticado a existência de uma falha, a distância do ponto onde esta se localiza fisicamente é calculada pela alteração na configuração e, juntamente com reclamações dos consumidores, pode-se localizar a chave fusível ou mesmo a FAI.

IV.3 Necessidade de Medição em Campo

Como pode ser visto nos itens anteriores, todo o sistema de análise e decisão é baseado no conhecimento obtido a partir do processamento da informação contida nas respostas do alimentador em diversas condições de operação. Assim, para a montagem do banco de conhecimento e do sistema inteligente de análise, necessita-se de um conjunto de medições realizadas no alimentador a ser monitorado. O sistema de análise e decisão é dedicado e, para cada novo alimentador a ser monitorado, é necessário fazer um conjunto de medições preliminares em campo.

Para se verificar a aplicação da metodologia aqui proposta, foi necessário ser escolhido um alimentador real e nele ser realizado os testes de campo. No capítulo seguinte é apresentado um conjunto de medições realizadas no alimentador e feita uma análise dos cuidados necessários durante estes testes e dos resultados obtidos.

Capítulo V

Medição e Análise

O funcionamento da técnica proposta depende das características do alimentador a ser supervisionado. Por esta razão, a etapa de levantamento das características do alimentador é parte fundamental no projeto do sistema de detecção.

Para a aplicação da técnica, o primeiro passo consiste em se levantar as características básicas bem como as particularidades do sistema a ser supervisionado. Todo alimentador possui chaves de manobra ao longo do seu percurso. Estas chaves são utilizadas para isolar trechos para manutenção ou na transferência de carga. Chaves fusíveis e outros dispositivos de proteção também se encontram distribuídos ao longo do alimentador. O tipo de proteção dependerá da possibilidade de coordenação entre os vários dispositivos.

O levantamento preliminar das características do alimentador deve ser feito juntamente com as equipes de projeto, operação e manutenção. A equipe de projeto fornece uma visão sistêmica e as possibilidades de ampliação. A equipe de operação fornece informações a respeito de falhas de proteção, frequência de defeitos, regiões mais propensas a falhas de alta impedância, manobras de transferências, etc. Por último, a equipe de manutenção fornece informações complementares sobre os procedimentos de busca de defeitos e reparo. Informações sobre falhas de alta impedância também podem ser obtidas.

Os alimentadores de distribuição possuem três categorias com características bem definidas. São elas: alimentadores (tipicamente) urbanos, mistos e (tipicamente) rurais.

V.1 Alimentadores de distribuição

Os alimentadores tipicamente urbanos são aqueles que alimentam centros urbanos onde a carga é relativamente concentrada. Estes alimentadores são de comprimento variável dependendo do grau de concentração das cargas. Tais alimentadores possuem um grande número de transformadores, sendo a maioria trifásicos. Apresentam pontos que possibilitam a conexão entre alimentadores para transferência de carga e são os que apresentam o maior índice de automatização. Nos grandes centros urbanos que exigem sistemas de alta confiabilidade, alimentadores possuem chaves tele-comandadas pelo centro de operação da distribuição.

Os alimentadores mistos estão normalmente localizados em cidades de menor porte onde a região urbana é relativamente pequena e a rural se encontra ao redor próxima aos bairros mais afastados. Estes alimentadores possuem dimensões maiores e cargas concentradas e distribuídas. Possuem regiões com concentração de transformadores e outras com grande espaçamento entre eles. Tais alimentadores são trifásicos nos trechos de maior concentração de carga e monofásicos na parte rural. Nestes pontos, cada fase percorre uma região cobrindo, ao final, uma grande área. Estes alimentadores possuem pontos para transferência de carga apenas nas proximidades da subestação, ou seja, nas áreas urbanas. Ao se tornarem monofásicas não possuem mais tais recursos.

Os alimentadores rurais são os mais longos e possuem cargas muito espaçadas. Normalmente não apresentam pontos para transferência de carga. No presente trabalho foi utilizado um alimentador do tipo misto.

V.2 Descrição do processo utilizado para se obter os dados

As falhas de alta impedância ocorrem por motivos diferentes dependendo do tipo do alimentador. Alimentadores urbanos apresentam falhas série e “shunt”. Regiões com alto índice de vegetação costumam apresentar falhas do tipo “shunt” entre o condutor fase e galhos de árvores. Tais falhas podem ser temporárias ou não. O rompimento de condutores ocorre com frequência como decorrência de abalroamentos. Os condutores rompidos em regiões urbanas encontram superfícies recobertas por concreto ou asfalto que são superfícies de alta resistividade e alta resistência de contato. As correntes neste tipo de falha podem variar dependendo de parâmetros fora do controle da concessionária, tais como umidade, distância até o aterramento mais próximo, etc. Falhas desta natureza podem ser acompanhadas pela formação de arco elétrico. Quando ocorre o arco, o risco de incêndio cresce. Com relação à população, a ocorrência de arco elétrico evidencia a condição energizada do condutor afastando as pessoas do local; nesses casos, a própria população avisa a concessionária sobre a falha. Quando não ocorre arco elétrico, a queda do condutor pode passar despercebida podendo causar mortes ao leve toque no mesmo. Na falha sem arco, porém, o risco de incêndio é menor. Em regiões rurais, a queda do condutor pode se dar por arrancamento de poste por esforço mecânico desequilibrado, erosão, etc. Devido ao pouco movimento de pessoas, estas falhas podem durar até dias sem o conhecimento da concessionária. A eletrificação acidental de cercas não é rara, bem como a morte de animais eletrocutados. A ocorrência desta falha em regiões rurais se dá devido aos baixos níveis de potência de curto-circuito nos alimentadores rurais associados aos solos de alta resistividade.

O conhecimento adquirido durante o levantamento realizado com as equipes técnicas deverá ser armazenado no sistema supervisor para posterior consulta. Observa-se que as informações obtidas giram em torno da configuração no qual o alimentador se encontra a cada momento. As possibilidades de configurações de operação do alimentador são relativamente poucas e são obtidas também

juntamente com as equipes técnicas. O sistema de supervisão deverá ser capaz de reconhecer uma configuração previamente considerada como normal e a todo instante verificar se o alimentador se encontra operando em uma configuração conhecida. A capacidade do sistema de verificação da configuração vai depender da montagem adequada de um banco de dados.

V.2.1 O sinal-resposta

Para se levantar as características de um sistema desconhecido utilizam-se técnicas de identificação de sistemas. Uma das técnicas mais conhecidas é a resposta impulsiva do sistema (Doebelin, 1980). Através desta resposta, pode-se obter a função de transferência que é uma relação matemática entre os sinais de entrada e saída, que representa o sistema em questão, na faixa de frequências existente no sinal excitador. Na função de transferência do alimentador, a entrada é o sinal impulsivo e a saída é o sinal refletido. Para um sinal excitador conhecido, o sistema pode ser representado simplesmente por seu sinal-resposta. A alteração da configuração do alimentador caracteriza-se pela alteração do sinal resposta do sistema sob análise. Cada configuração terá, portanto, uma resposta distinta.

V.2.2 Resposta do alimentador a um impulso de tensão

Ao se aplicar um impulso de tensão em um alimentador, a tensão não aparece instantaneamente em todos os pontos da rede e sim passa a viajar pela mesma sofrendo o fenômeno de refração e reflexão ao longo de toda a sua extensão (Johnson 1988). A velocidade de propagação dependerá do meio onde o condutor se encontra. Se o meio for o ar (linhas aéreas) o sinal injetado trafegará com uma velocidade aproximadamente igual à da luz no vácuo.

Quando uma tensão senoidal é injetada em uma linha, a distância percorrida em um ciclo é igual ao comprimento de onda λ .

$$\lambda = \text{velocidade} \times \text{período} \quad (\text{V.1})$$

ou

$$\lambda = v/f$$

onde v = velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8$ m/s

f - frequência do sinal senoidal

Se o comprimento da linha, onde uma onda senoidal foi aplicada, for comparável a um quarto do comprimento de onda, então este sinal deverá ser tratado como uma onda viajante. Linhas construídas com condutores nus apresentam perdas por radiação excessivas para altas frequências de rádio (Greenwood, 1988).

O sinal de teste (impulsivo) que será injetado no alimentador não é um sinal senoidal e nem periódico. Trata-se de um sinal de curta duração com uma parte denominada de *frente da onda* (onde o sinal cresce a uma grande taxa de variação) e uma segunda parte, denominada *cauda* (onde o sinal decresce, a uma taxa pequena comparada com a da frente).

Um sinal desta natureza, ao ser injetado no alimentador, passa a viajar em direção às suas extremidades. Ao longo do trajeto, encontra descontinuidades, (mudança de impedância, tais como, mudança de condutor, bifurcações, transformadores, etc), onde o sinal sofre os fenômenos de reflexão e refração. Assim, parte do sinal é transmitido e parte retorna ao ponto de injeção. A resposta

do alimentador será a combinação de todos os sinais que retornam ao ponto de medição, combinados com o sinal de entrada.

V.2.3 Escolha do alimentador a ser testado

A escolha do alimentador a ser testado foi feita segundo alguns requisitos básicos: o alimentador deveria ser misto, apresentar características representativas em relação ao universo dos alimentadores existentes no País do ponto de vista de carga, idade do alimentador, poluição ambiental, comprimento máximo, total de condutores, etc. O alimentador escolhido foi o 14F4 da subestação (SE) de Caratinga da cidade de mesmo nome, pertencente à concessionária CEMIG. Este alimentador é constituído por um total de 120,7km de condutores na fase testada (fase A) estando o ponto mais distante a 19km de condutores da SE. Trata-se de um alimentador considerado grande, do ponto de vista de alimentadores urbanos, e de médio porte, para os rurais. Este alimentador foi escolhido por ser representativo em termos gerais. O número de transformadores também é representativo, com um valor médio de um transformador a cada 530m de condutores primários. Inicialmente, um levantamento completo do alimentador foi realizado. O esquema detalhado do mesmo é apresentado no apêndice B.

V.2.4 Gerador de Impulsos

Como foi dito anteriormente, optou-se por monitorar a configuração do alimentador através da resposta do mesmo a um sinal excitador impulsivo. A tensão aplicada no alimentador é tal que os ruídos existentes no mesmo não afetem de forma expressiva o sinal observado. A forma de onda do sinal injetado também é um fator importante. O sinal pode ser caracterizado pelo seu valor de pico, tempo de frente e tempo de cauda. O sinal gerado e utilizado nos testes é apresentado na figura V.1. O gerador deste sinal consiste de um capacitor que é

carregado até que a tensão de isolamento do gap (esferas que funcionam como uma chave operada por tensão) é vencida e o sinal é aplicado a um circuito RC, como mostrado na figura V.2.

V.2.4.1 Importância do tempo de frente e do tempo de cauda da onda

O sinal aplicado ao alimentador sob teste, ao encontrar o primeiro ponto de descontinuidade, retorna à subestação alterando a onda medida que é a composição do sinal de entrada e os retornos vindos do alimentador. Quando os sinais chegam com tempos menores que o tempo de frente da onda, o pico do sinal aplicado estará sendo comprometido diminuindo o alcance do sinal. A tensão de pico afeta a energia da onda e portanto o alcance da mesma no alimentador. Desta forma, deseja-se que o sinal tenha uma frente de onda rápida, para que as primeiras reflexões só sejam sentidas na cauda da onda. Optou-se por um tempo de frente de 1 μ s. Descontinuidades distantes de 150m do ponto de medição já serão sentidas na cauda da onda.

A equação V.2 descreve a forma de onda da tensão gerada.

$$V = V_0[\exp(-at) - \exp(-bt)] \quad (V.2)$$

Considerando-se $R_c \gg R_a$ (Greenwood, 1991), a e b podem ser calculados pelas equações abaixo.

$$a \cong \frac{1}{R_c(C_s + C_p)} \quad e \quad b \cong \frac{C_p + C_s}{R_a C_p C_s}$$

O tempo de frente está relacionado com o valor de b e o tempo de cauda com o valor de a. O valor do tempo de frente é determinado por R_a , C_s e C_p e o valor do tempo de cauda é controlado por C_s , C_p e R_c (Greenwood, 1991). Este gerador possui a vantagem de ser simples e, portanto, de fácil construção. Como

desvantagens, possui pouca flexibilidade no controle da forma de onda e esta depende fortemente da carga colocada em seus terminais.

O tempo de cauda está ligado diretamente com a energia do sinal injetado e portanto do alcance do sinal. por esta razão, deseja-se que o sinal possua uma cauda longa.

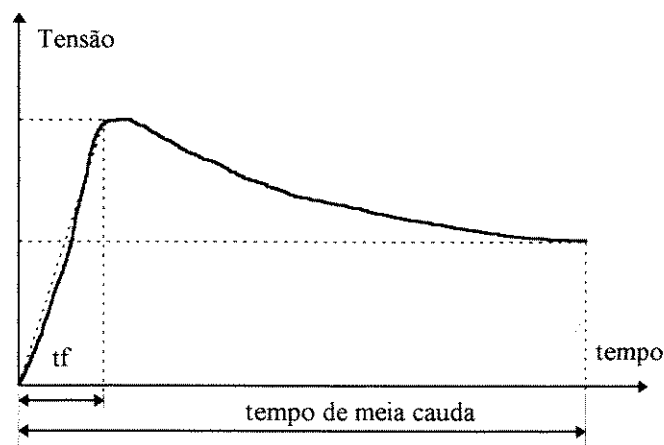


Figura V-1 Sinal gerado pelo gerador utilizado

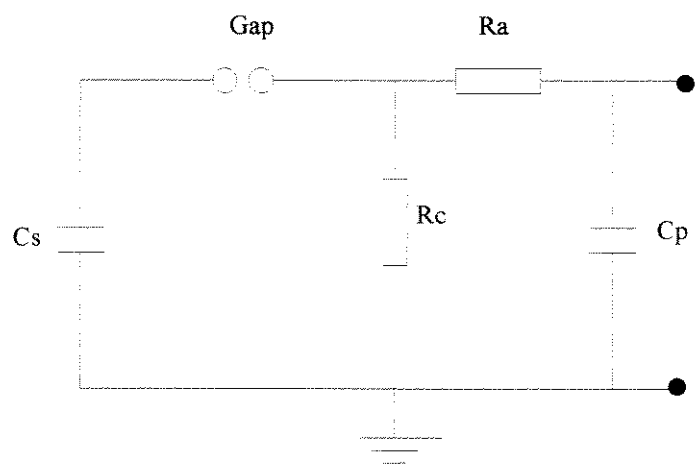


Figura V-2 Esquema do gerador de impulsos

V.2.4.2 Aterramento da linha com um indutor

Para a realização dos testes no alimentador, o mesmo foi desconectado do barramento da subestação e os equipamentos de medição e o gerador foram acoplados no ponto de desconexão. Por medida de segurança, o alimentador deve estar aterrado para sinais à frequência fundamental. Esta medida visa evitar acidentes causados por energização acidental, uma vez que não se tem o controle de toda a extensão do alimentador. Para obtermos o aterramento à frequência fundamental foi colocada uma bobina com indutância de 68,5 mH.

Observou-se durante os testes que, apesar de não ter havido, felizmente, nenhuma energização acidental, tensões induzidas apareceram na linha devido ao paralelismo com linhas energizadas em alguns trechos.

A simples colocação da indutância em paralelo com o gerador limitou o tempo da cauda da onda. Por esta razão, a escolha dos componentes do gerador foi feita com base nesta informação.

V.2.4.3 Valores utilizados no gerador

O objetivo principal é o de construir um gerador com energia razoável para que as alterações ocorridas em pontos distantes do alimentador possam ser verificadas. As dimensões do mesmo também são importantes, pois é necessário que seja portátil. Assim sendo o gerador construído possui energia de 2,5 J e volume igual a 6 dm^3 com peso inferior a 2,5 kg. A configuração final do gerador é apresentada na figura V.3 e a sua forma de onda obtida através de simulação digital é apresentada na figura V.4. Nesta simulação C_s é considerado carregado e o gap é substituído por uma chave que se fecha em $t=0$.

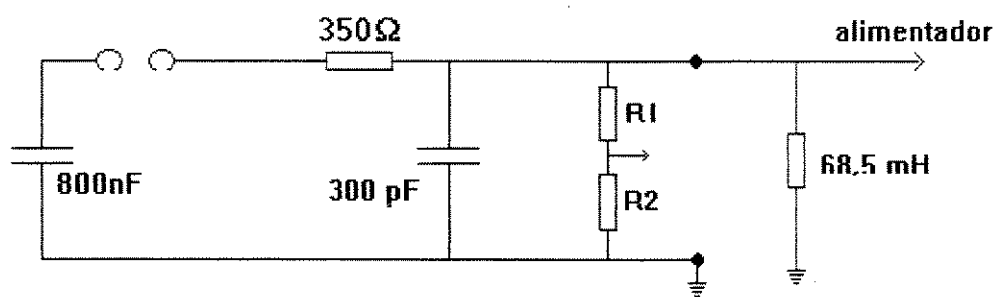


Figura V-3 Configuração final do gerador

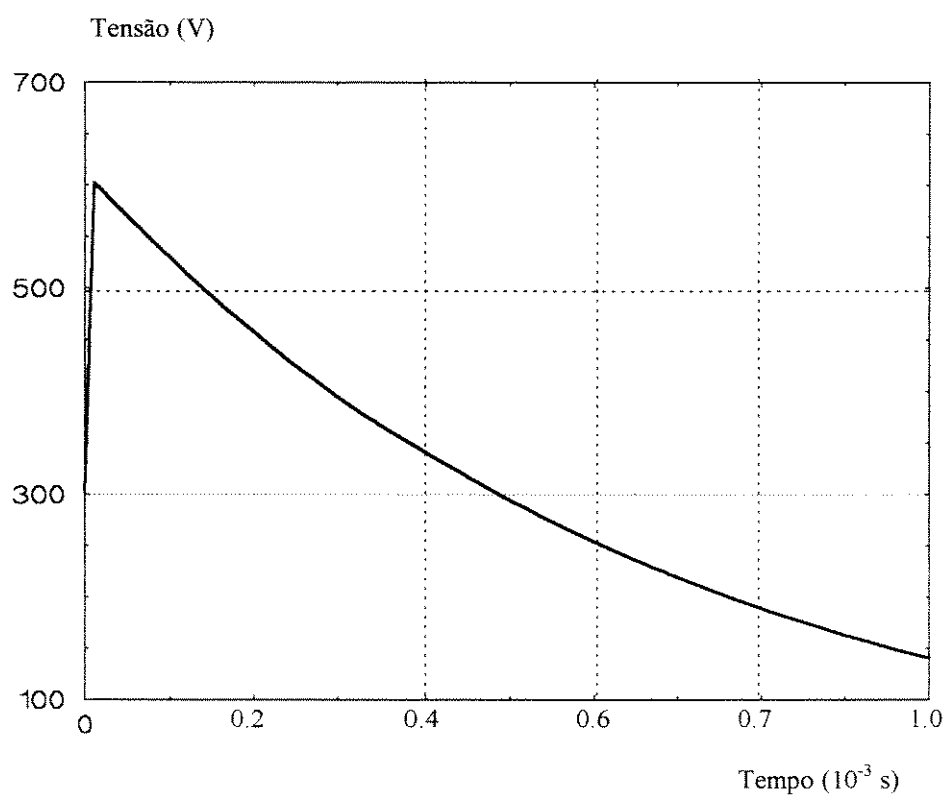


Figura V-4 Forma de onda

V.2.5 Testes realizados no alimentador

Os testes realizados no alimentador de Caratinga podem ser divididos em quatro grupos. São eles: influência de banco de capacitores, abertura de chaves, falhas de baixa impedância e falhas de alta impedância.

Influência de bancos de capacitores

Alimentadores longos necessitam de compensação de potência reativa, (Stevenson, 1986). Esta compensação pode ser feita na barra da subestação ou mesmo em pontos mais distantes da SE através de bancos de capacitores. Porém, para frequências elevadas, na faixa das frequências que compõem o sinal injetado, os bancos apresentam baixa impedância. Por esta razão, foi feito um teste colocando-se um banco monofásico na fase sob teste, figura V.5.

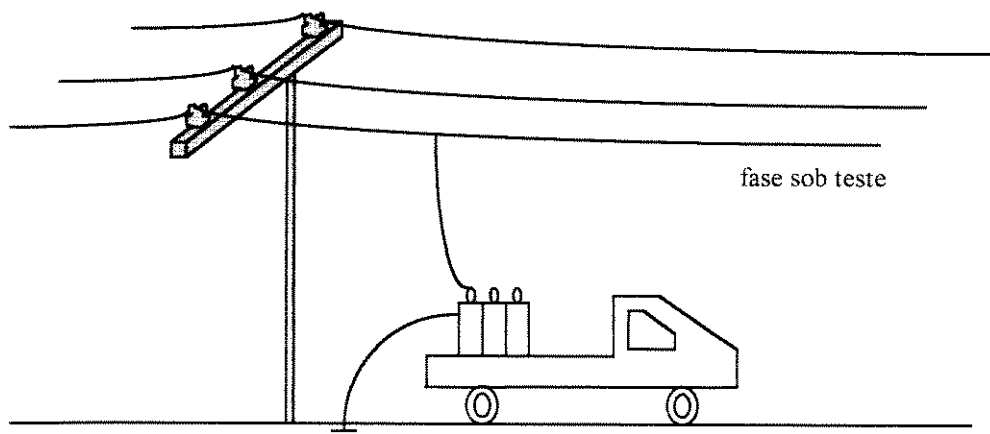


Figura V-5 Diagrama de conexão do banco de capacitores

Abertura de chaves

Todo alimentador de distribuição opera normalmente, na grande maioria do tempo, em uma determinada configuração denominada aqui como padrão. Porém,

devido a condições operacionais, o alimentador pode trabalhar em diversas outras configurações bastando a operação de uma chave ao longo do alimentador. Existem dois tipos de chaves ao longo do alimentador a serem operadas, chaves de manobra (manuais ou automáticas) e chaves de proteção.

As chaves de manobras são operadas quando existe a necessidade de transferência de carga de/para outro alimentador ou mesmo durante a manutenção de um trecho defeituoso.

As chaves de proteção são operadas devido a falhas (curto-circuitos) em trechos do alimentador. A maior parte destas chaves são do tipo fusíveis e interrompem a corrente da fase defeituosa.

A diferença básica entre a operação de uma chave de manobra e uma de proteção é que a primeira é operada segundo uma programação pré-estabelecida e a segunda opera em condições de defeito no alimentador.

Algumas chaves foram operadas para a montagem do banco de dados contendo as configurações básicas.

Falha de baixa impedância

No conjunto de testes realizados, as falhas de baixa impedância foram provocadas nos pontos onde estão localizadas as chaves operadas. Para realizar tais falhas a chave de manobra foi aberta e a fase e o neutro foram interligados.

Falha de alta impedância

As falhas de alta impedância foram também realizadas nos pontos das chaves operadas. Com a chave aberta um condutor foi conectado antes da chave

e a outra ponta permaneceu em contato com o solo (figura V.6). Este tipo de teste simula uma falha de alta impedância a aproximadamente 10m, depois da chave. Em alguns casos também foi lançado o cabo ao solo uma estrutura (poste) antes da chave (com a chave aberta), figura V.7, e uma estrutura depois (com a chave fechada).

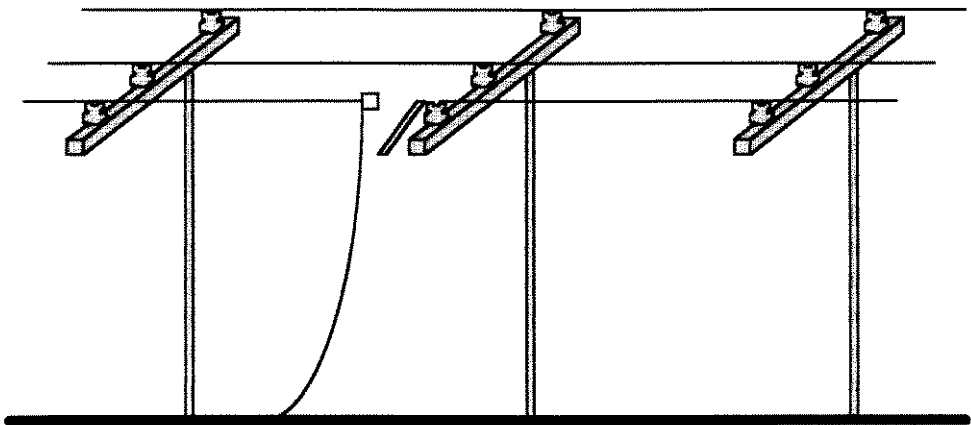


Figura V-6 Falha de alta impedância na chave

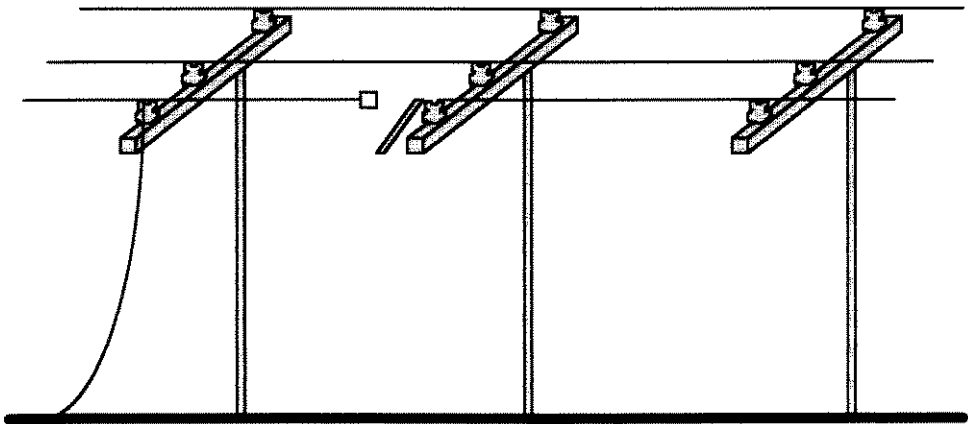


Figura V-7 Falha de alta impedância antes da chave

V.3 Dificuldades encontradas

Embora a medição das respostas do alimentador aos vários testes realizados com a rede energizada pudesse ser mais rica em informações, esta não foi realizada. Isto requeriria a construção de dois filtros bloqueadores que deveriam ser colocados em série e em paralelo com o alimentador.

O primeiro deveria ser projetado para bloquear o sinal injetado isolando o alimentador da subestação para altas frequências. Este filtro série é necessário pois as subestações possuem, normalmente, bancos de capacitores no seu barramento, o que seria um curto circuito para o sinal injetado.

O segundo filtro deveria ser colocado em paralelo com o alimentador e em série com o medidor, bloqueando a passagem de baixas frequências, ou seja, a frequência fundamental.

A concessionária CEMIG possui normas de segurança rígidas e a operação de equipamentos de medição em rede energizada necessitaria satisfazer tais requisitos, dificultando o manuseio destes. Para a realização dos testes com cabo ao solo, as equipes de operação deveriam passar por um processo de treinamento longo, prevendo todas as possibilidades de eventos decorrentes daquela operação. Falhas de baixa impedância também não poderiam ser realizadas por motivos de segurança. Em reuniões com as equipes técnicas envolvidas, decidiu-se por se fazer os testes com a rede desenergizada e após análise das informações obtidas estudar a possibilidade de testes mais elaborados.

Cabe aqui dizer que, no caso da utilização desta metodologia em um alimentador, os testes a serem realizados só envolvem abertura ou fechamento de chaves e portanto não envolve eventos como falhas. Entretanto, para o nosso estudo (teste da metodologia proposta) a simulação de falhas são necessárias.

Dentro do conhecimento da equipe que elaborou a bateria de testes, estes são inéditos em nível mundial e a obtenção do apoio de uma concessionária para realizá-los não é fácil. A CEMIG apoiou este projeto e fez aquilo que naquele momento era possível ser feito. Para a realização dos testes a empresa mobilizou quatro engenheiros e disponibilizou quatro equipes compostas por quatro eletricitas cada, que fizeram a batelada de testes em dois dias diferentes (4h/dia).

V.3.1 Limitações dos testes

Duas informações importantes não puderam ser obtidas devido a natureza dos testes (rede desenergizada): a verificação do ruído existente no alimentador na faixa de frequências utilizadas nos testes, acima de 6 kHz, decorrentes da operação do alimentador, e a realização de falhas de alta impedância ativas, ou seja, com arco elétrico.

A verificação do ruído na faixa de frequência do nosso interesse deverá ser considerada em uma próxima etapa de estudo. Sabe-se, entretanto, que ruídos nesta faixa de frequências não são gerados por cargas especiais (Arrillaga, 1982). Estes ruídos podem ser consequência de correntes de fuga em isoladores, indução devido a descargas atmosféricas ou mesmo alimentador funcionando como uma antena para frequências na faixa de rádio. O estudo destes ruídos portanto deverá ser feito fazendo um grande número de medidas em alimentadores localizados em regiões próximas a estações de rádio, com tempo de uso suficiente para verificar a interferência dos isoladores e se possível durante tempestades com descargas atmosféricas.

A não realização de falhas de alta impedância ativas nos priva de tirar conclusões a respeito das mesmas. Sabe-se, porém, que este tipo de falha apresenta impedância variável com os períodos de reignição do arco (Aucoin

1982). Esta informação sugere que para efeito da medição a ser realizada com a injeção de um impulso de tensão ter-se-á respostas distintas a cada medição.

Apesar das limitações dos testes realizados, informações suficientes foram obtidas para o desenvolvimento do trabalho sem que as conclusões sejam comprometidas. Cabe ressaltar que a detecção de falhas de alta impedância ativas é a mais estudada pelos centros de pesquisas internacionais por ser mais "fácil" de ser detectada do que a falha passiva. Este trabalho portanto poderá preencher um espaço ainda pouco explorado nesta área uma vez que se destina ao estudo de FAI passivas.

V.4 Resultados obtidos nos experimentos

Foram realizados dois grupos de testes no mesmo alimentador, porém não foi possível utilizar a mesma configuração devido a questões internas à concessionária. Os resultados são analisados separadamente devido às diferenças de enfoque nos testes.

V.4.1 Primeiro grupo de testes

O primeiro grupo de testes foi realizado no dia 20 de junho de 1993, na cidade de Caratinga, e teve duração aproximada de 4 horas. Nestes testes, foi simulada uma grande variedade de eventos buscando cobrir diferentes possibilidades de ocorrências. O sistema de medição foi instalado depois do religador do alimentador estando este desligado. Inicialmente, foi feito o aterramento do alimentador e os equipamentos foram instalados em paralelo com este aterramento. As equipes de campo começaram a percorrer o alimentador tomando os seus postos para o início das manobras. Através de comunicação via rádio, as equipes foram provocando os eventos necessários. Ao final de cada manobra, o alimentador era desaterrado na subestação e o pulso de tensão era

injetado e a resposta do alimentador armazenada. A tabela V.1 apresenta um quadro resumo de todos os testes realizados.

A primeira resposta foi medida com o alimentador completo, sem que nenhuma operação fosse feita. Esta resposta é a resposta padrão do alimentador, ou seja, representa a configuração completa do mesmo. Esta resposta é apresentada na figura V.8. O sinal resposta é igual ao injetado até que a primeira descontinuidade seja encontrada.

A medição foi realizada através de um osciloscópio digital de 500MHz. A janela de amostragem utilizada nas medições foi de 200 μ s, com taxa de amostragem de 40ns correspondendo a 5000 amostras coletadas.

A figura V.9 apresenta uma ampliação do início da onda. Pode-se verificar que uma mudança brusca ocorre em torno de 50 pontos (2 μ s). Esta alteração é devido a um pequeno bairro localizado logo na saída da subestação (300m) e que possui alguns transformadores. Os transformadores de distribuição ao serem atingidos por sinais impulsivos se comportam como elementos capacitivos, pois, as capacitâncias parasitas apresentam reatâncias baixas para altas frequências. O alimentador raramente apresenta terminações em aberto, estas terminações duplicam o sinal neste ponto e retornam o sinal para o início do alimentador (Greenwood 1980). As terminações são, quase na sua totalidade, transformadores e, por esta razão, o sinal-resposta possui energia muito menor que o sinal injetado.

A tabela V.1 mostra as várias distâncias nas quais foram feitas manobras no alimentador. Para cada uma das chaves operadas, correspondente a uma distância, foi retirado um número diferente de elementos, (transformadores, nós e condutores). O diagrama esquemático pode ser visto no apêndice B.

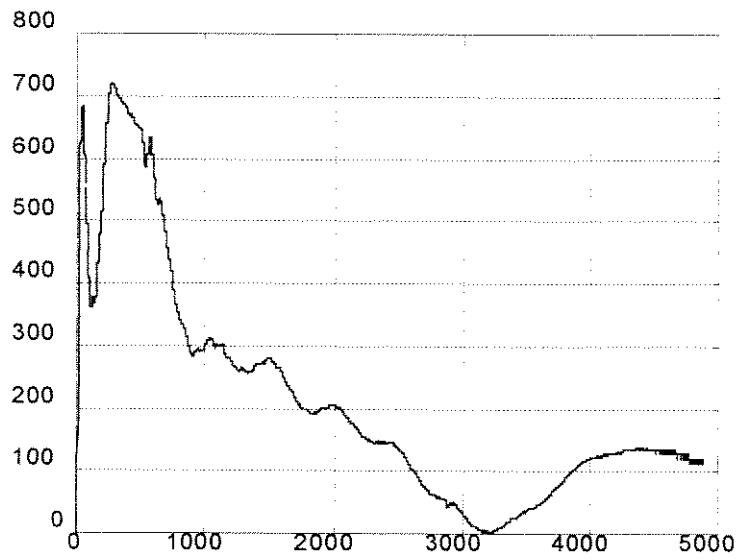


Figura V-8 Sinal-resposta padrão (5000 pontos = 200 μ s)

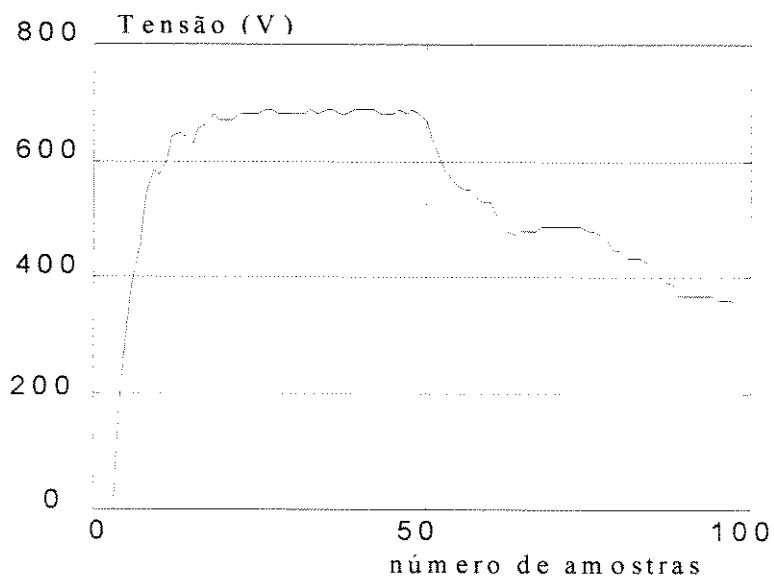


Figura V-9 Sinal-resposta padrão parcial (100 pontos = 4 μ s)

Teste	Descrição Operação/Elemento retirado/Ação	Distância (m)
1	Resposta padrão	-
2	Transformador 2052 - Abertura da chave fase A	620
3	Transformador 2052 - Abertura da chave fases A,B e C	"
4	Transformador 2052 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância (SHUNT)	620+10
5	Transformador 2052 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito	4180
6	Transformador 21394 - Abertura da chave fase A	"
7	Transformador 21394 - Abertura de chave fase A,B e C	"
8	Transformador 21394 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância (SHUNT)	4180+10
9	Transformador 21394 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito	"
10	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase C	3730
11	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase C Falha de Alta Impedância	3730+10
12	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase C Curto-Circuito	"
13	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase A	"
14	Chave Faca 31443 - Abertura de chave fase A Falha de Alta Impedância	3730+10
15	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito	"
16	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância Duas estruturas antes	3680

17	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância Duas estruturas antes	3680
18	Chave Faca 31443 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito Duas estruturas antes	3670
19	Chave Faca 31443 - Chave fechada Falha de Alta Impedância (SHUNT) Uma estrutura depois	3770
20	Chave Faca 31443 - Chave fechada Curto-Circuito Uma estrutura depois	3760
21	Chave Faca 31111 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito	6200
22	Chave Faca 31111 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância	6200+10
23	Chave Faca 31111 - Abertura da chave fase A	"
24	Chave Faca 30067 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito	6260
25	Chave Faca 30067 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância	6260+10
26	Chave Faca 30067 - Abertura da chave fase A	"
27	Chave Faca 31111 - Abertura de chave fase A Curto-Circuito Uma estruturas antes	6170
28	Chave Faca 31111 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância Uma estruturas antes	6180
29	Chave Faca 30067 Banco de Capacitores (A e B)	6260

30	Chave Faca 31111 - Abertura da chave fase A Curto-Circuito Uma estrutura depois	6230
31	Chave Faca 31111 - Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância (SHUNT) Uma estruturas depois	6240
32	Chave Faca 31116 Abertura da chave fase A	13660
33	Chave Faca 31116 Abertura da chave fase A Curto-Circuito	"
34	Chave Faca 31018 Abertura da chave fase A Curto-Circuito	11090
35	Chave Faca 31018 Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância	11100
36	Chave Faca 31018 Abertura da chave fase A	"
37	Chave Faca 31116 Abertura da chave fase A Falha de Alta Impedância	13670
38	Chave Faca 31116 Abertura da chave fase A	13660

Tabela V-1 Quadro resumo dos testes realizados no primeiro grupo de testes

V.4.1.1 Transformadores

A figura V.10 apresenta uma comparação entre a resposta padrão e a resposta do alimentador com a chave da fase A do transformador 2052 aberta. A retirada de um transformador nas proximidades da subestação foi proposital para se verificar o seu efeito na resposta do alimentador. Não se deseja que a saída de um único transformador seja percebida pela técnica, pois o objetivo da mesma é detectar falhas. Observa-se que o efeito na resposta é muito pequeno em termos de variação de amplitude, mas permanece ao longo de toda a resposta.

Os testes de abertura das três chaves do transformador e a falha de alta impedância no ponto de acoplamento do transformador também apresentaram uma variação de amplitude muito pequena. O teste abrindo as três chaves do transformador foi feita para se verificar o grau de acoplamento entre as fases. Verificou-se que o acoplamento pode ser percebido neste teste, porém pode ser desprezado nas análises por ter um efeito muito pequeno. A falha de alta impedância provocada nos terminais do alimentador é do tipo “shunt”. Portanto, afeta muito pouco o sistema, pois é simplesmente uma alta impedância colocada em paralelo com o alimentador.

A resposta para o curto-circuito provocado no transformador é totalmente distinguível da resposta padrão. A figura V.11 apresenta todos os testes realizados no transformador. A única curva que se diferencia de forma identificável é a do teste de curto circuito.

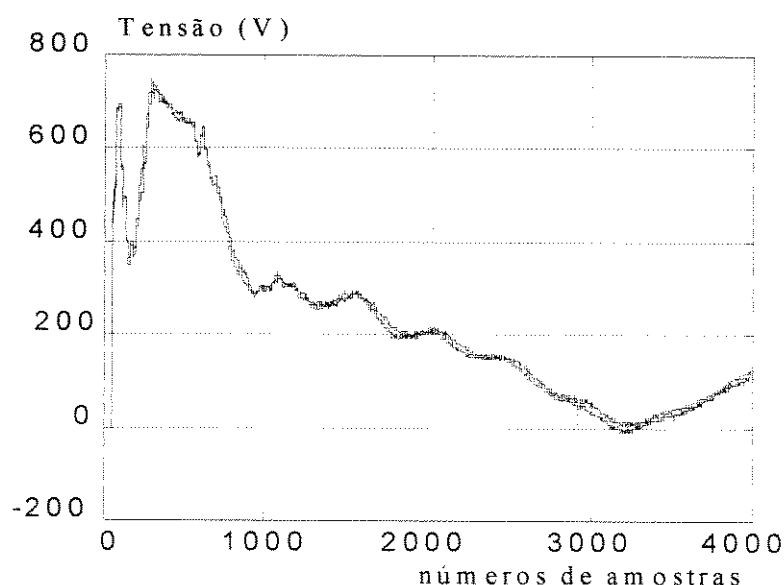


Figura V-10 Comparação entre a resposta padrão e a retirada do transformador 2052

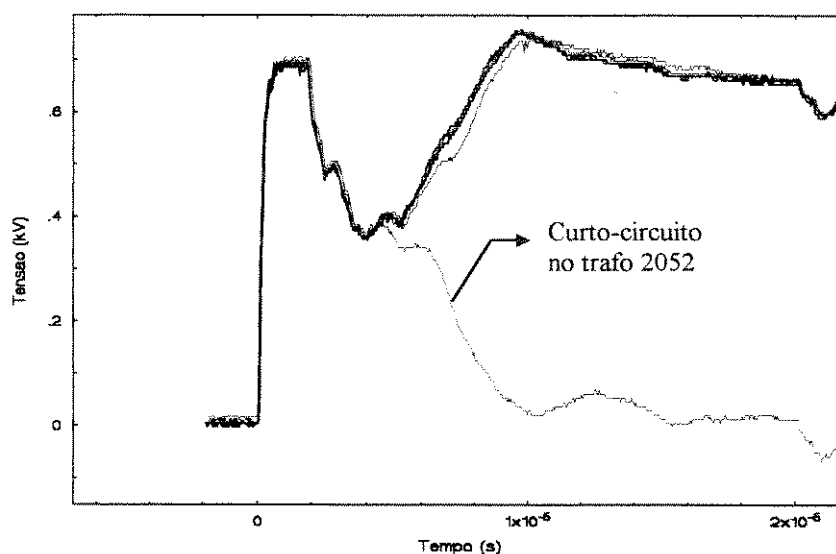


Figura V-11 Comparação entre a resposta padrão e todos os testes realizados no transformador 2052

O teste com o transformador 21394 confirma as observações feitas e as alterações de amplitude são ainda menores devido ao fato de ele estar mais afastado da subestação.

V.4.1.2 Abertura de chaves de manobra

As chaves operadas retiram de 7 a 59 transformadores. O efeito da retirada de elementos do alimentador devido a abertura de chaves é função do número de elementos retirados (transformadores, comprimentos de condutores e número de nós) e da distância da chave até a subestação. Outra característica que afeta o resultado, porém mais difícil de ser analisada, é o número de descontinuidades pelo qual o sinal foi submetido no seu caminho de ida e volta ao ponto de medição. Alimentadores muito ramificados apresentam resultados piores (menores variações ao se retirar elementos) para uma mesma distância e mesmo número de elementos retirados do que um alimentador com poucas ramificações. A disposição dos elementos também é importante e também difícil de ser analisada.

Os testes 10, 11 e 12 foram realizados na fase C, estando a medição e o gerador de impulsos acoplados à fase A. Este teste ocorreu devido a um erro na indicação do projeto da fase correspondente. Desta forma, os eletricitistas operaram a chave da fase C pensando que fosse a chave da fase A. Este erro foi diagnosticado no instante dos testes devido a pequena diferença na forma de onda ao se operar esta chave. O teste conectando a fase ao neutro foi feita e verificou-se que a fase não era a desejada. A figura V.12 apresenta os testes 10,11 e 12 comparados à resposta padrão. Observa-se claramente que existe um problema no teste 12 que é praticamente coincidente aos demais. Após este teste todos os outros foram feitos realizando-se o curto-circuito primeiro para verificar se a fase testada era a correta.

A figura V.13 apresenta a comparação entre a resposta padrão e a resposta para a operação da chave 31443 localizada a 3730m da subestação e que retira apenas 7 transformadores. A figura V.14 apresenta a comparação entre a resposta padrão e a resposta para a operação da chave 31111 localizada a 6200m da subestação e que retira 59 transformadores

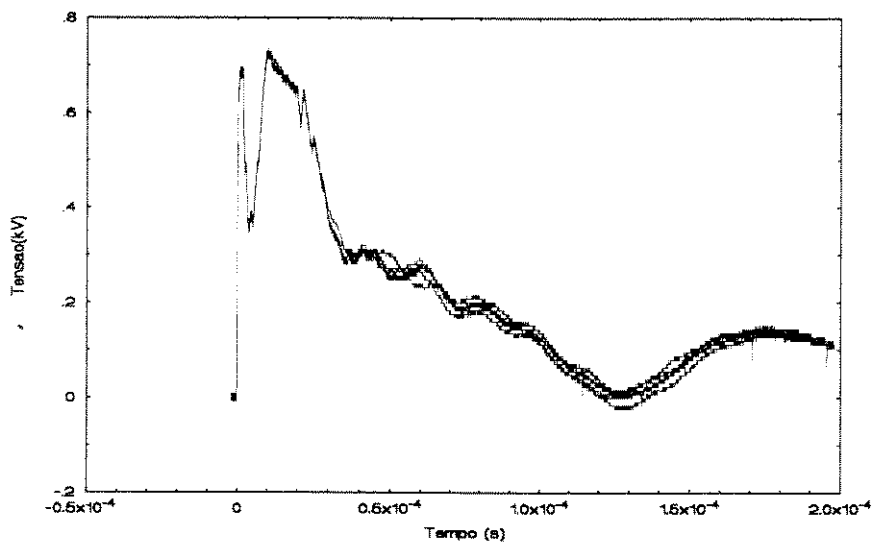


Figura V-12 Comparação com a resposta padrão com os testes realizados na fase C

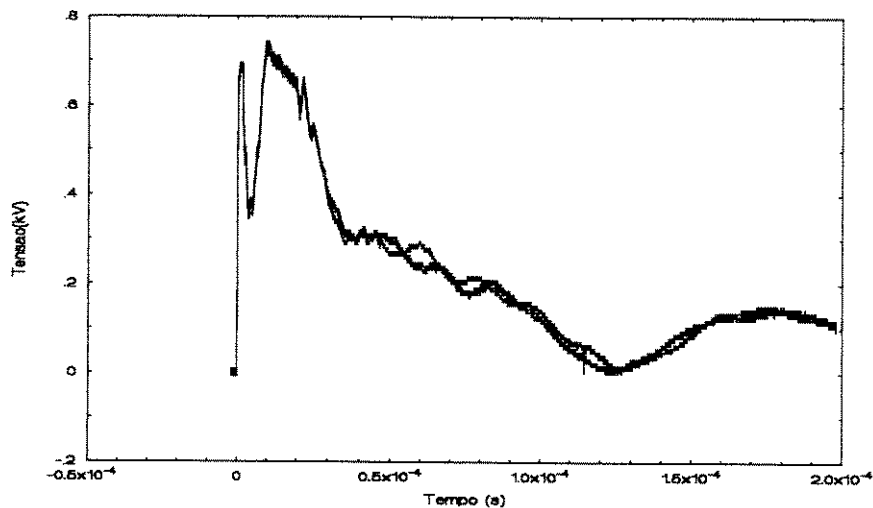


Figura V-13 Comparação com a resposta padrão da resposta do alimentador para a abertura da chave 31443

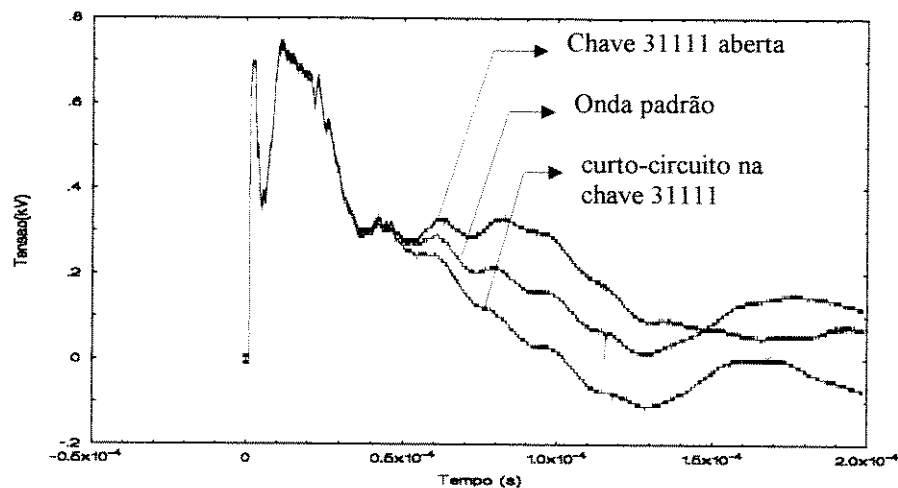


Figura V-14 Comparação com a resposta padrão da resposta do alimentador para a abertura da chave 31111

Através das figuras apresentadas pode-se dizer que as aberturas de chaves são identificáveis a uma simples análise visual. Percebe-se também que as respostas são características das chaves apresentando respostas diferentes para chaves diferentes.

V.4.1.3 Banco de capacitores

Foi colocado um banco de capacitores entre as fases A e B e a terra. O banco foi conectado na chave 30067 a 6260m da subestação. Após o teste com o banco fez-se um teste de curto circuito no mesmo ponto de colocação do banco. As respostas obtidas juntamente com a resposta padrão são apresentadas na figura V.15. Observa-se que o banco tem praticamente o mesmo efeito para o sinal injetado que um curto circuito. Desta forma, conclui-se que no caso de se haver um banco de capacitores localizado ao longo do alimentador, é necessária a colocação de uma bobina entre o ponto neutro da estrela e a terra. Caso isto não seja feito o sistema de detecção não "enxergará" nada além do ponto do banco de capacitores.

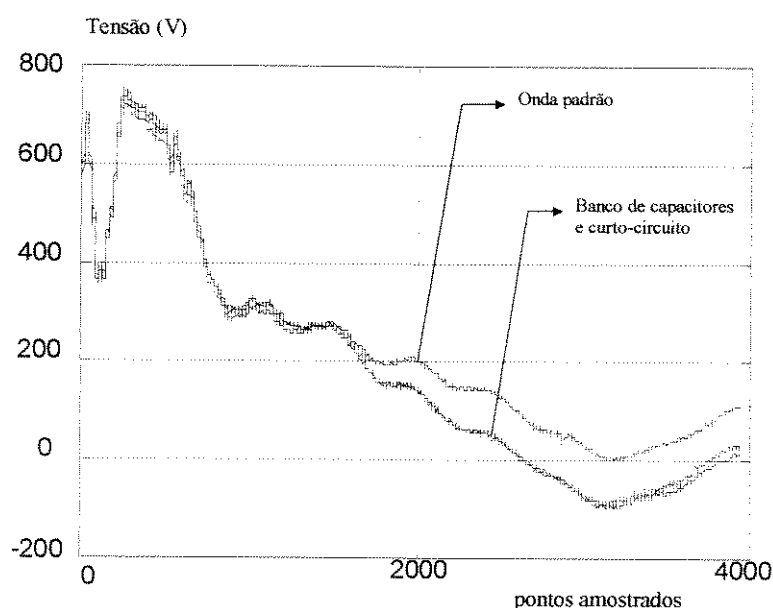


Figura V-15 Comparação entre a resposta padrão, a resposta do alimentador com um banco de capacitores e a resposta para um curto-circuito no ponto de colocação do banco.

V.4.1.4 Falhas de alta impedância

Foram simuladas falhas de alta impedância passiva em todas as chaves e transformadores. Como era esperado, as falhas nos transformadores por serem “shunts” apresentaram resultado muito parecido com a resposta padrão, veja figura V.16.

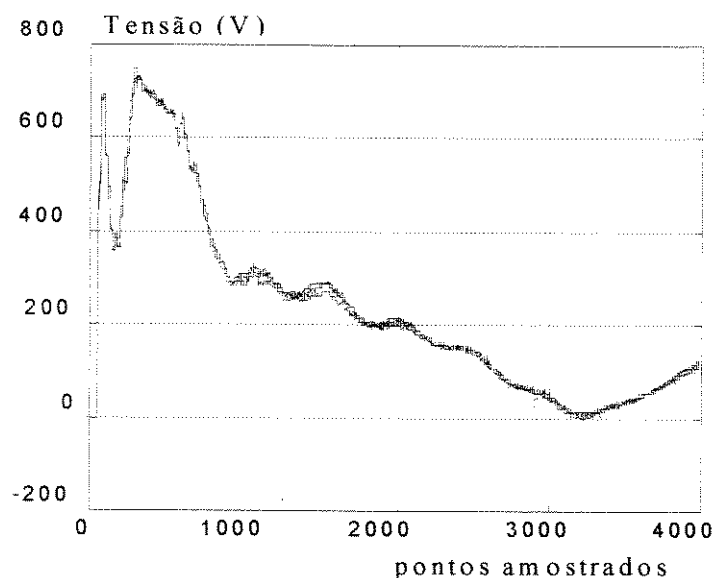


Figura V-16 Comparação com a resposta padrão de falhas de alta impedância “shunts”

As falhas localizadas no ponto das chaves apresentam respostas similares à abertura das chaves, as localizadas uma ou duas estruturas antes (com a chave aberta) também apresentam respostas similares às das chaves, como mostrado na figura V.17. As falhas localizadas uma ou duas estruturas depois (com a chave fechada) apresentam respostas similares à resposta padrão. Estes resultados já eram esperados pois a falha de alta impedância passiva série se assemelha a uma abertura de chave e o seu efeito é o mesmo, ou seja, retira elementos do circuito apresentando-se como uma alta impedância para o sinal. As falhas “shunt” apresentam pouca variação na impedância equivalente do alimentador no ponto da sua ocorrência pois a seu valor de impedância é muito elevado. A presença de

tensões de 60 Hz fatalmente alteraria este resultado apresentando alguns miliampéres através da falha.

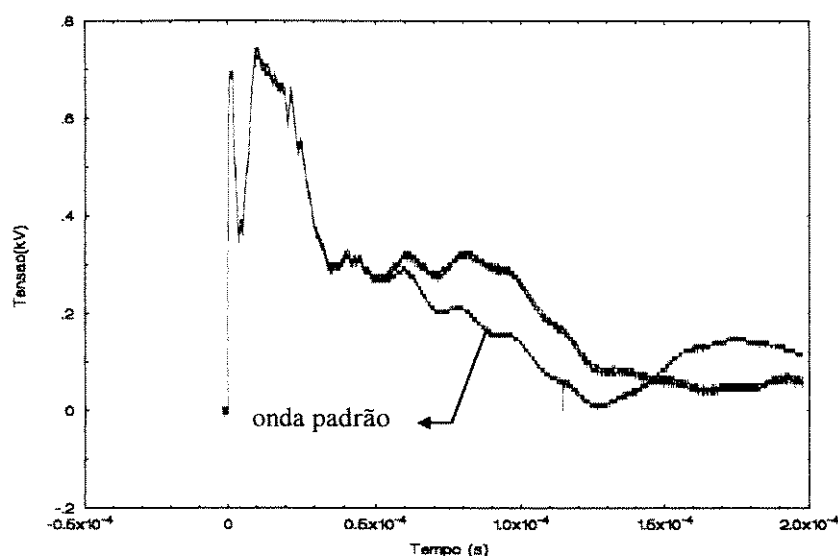


Figura V-17 Comparação entre a resposta padrão e a resposta para falhas nas proximidades da chave 31111 (antes e depois) e da abertura da chave.

V.4.1.5 Resumo das observações feitas

A análise global dos resultados permite afirmar que:

- a) A simples observação visual das respostas do alimentador a um impulso de tensão é capaz de indicar mudanças de configuração do alimentador.
- b) As respostas para as operações de chaves são diferentes entre si podendo assim ser diferenciadas por simples comparação.
- c) A saída de um único transformador é pouco apercebida em uma análise visual.
- d) As falhas “shunt” apresentam respostas bastante similares à padrão.
- e) As falhas de alta impedância séries no mesmo ponto da chave apresentam respostas similares às das chaves.

- f) Os bancos de capacitores se comportam como curto-circuito para o sinal injetado e, portanto, devem ter um filtro para bloquear altas frequências para terra.

V.4.2 Segundo grupo de testes

O segundo grupo de testes foi realizado no dia 05 de dezembro de 1993 e teve como objetivo principal verificar o efeito do ruído de medição nas respostas medidas no campo. Após a análise do primeiro grupo de testes, verificou-se a necessidade de se efetuar uma nova bateria de testes visando observar principalmente a dispersão existente entre medidas repetitivas de um mesmo evento. Estas medições evidenciaram a influência do ruído externo ou proveniente do próprio sistema de medição. Neste grupo foram realizados 117 medidas representando 25 eventos diferentes.

V.4.2.1 Ruído

Foram feitas algumas medições de ruído com o alimentador desenergizado em duas janelas diferentes de amostragem: 2ms e 50ms. Ambas as janelas amostraram utilizando 5000 pontos. A janela de 2ms apresentou um ruído de baixa intensidade e aleatório não sendo possível extrair informações representativas. A janela de 50ms apresentou resultados consistentes e é apresentada na figura V.18. Pode-se observar em análise visual que duas frequências predominam nesta figura. Observa-se que aparecem sete ciclos em 39ms, ou seja, uma onda com período de 5,56ms indicando uma frequência fundamental de 180Hz. A onda apresenta, também, uma modulação em amplitude que completa três ciclos completos na janela de 50ms. Portanto, o sinal modulante possui período de 16,7ms, ou seja, trata-se da frequência fundamental de 60Hz.

A tabela V.2 apresenta as principais frequências do espectro de frequências da janela amostrada. Estas frequências eram esperadas devido ao acoplamento

entre os alimentadores vizinhos na saída da subestação. As frequências mais altas, na faixa de 1 a 50kHz calculadas apresentou como valor máximo de amplitude 0,32V e valor médio 0,007V.

Freq.	Amplitude (V)
20Hz	8,48
60Hz	5,01
180Hz	18,34
300Hz	2,15
420Hz	1,24
540Hz	3,00

Tabela V-2 Frequências mais importantes obtidas no espectro de frequências do ruído - janela de 50ms

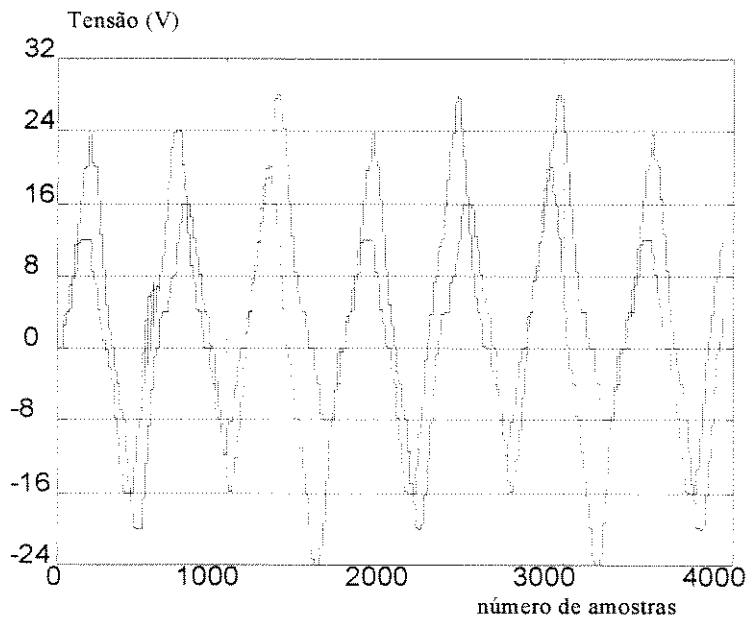


Figura V-18 Ruído do alimentador (4000 pontos = 40ms)

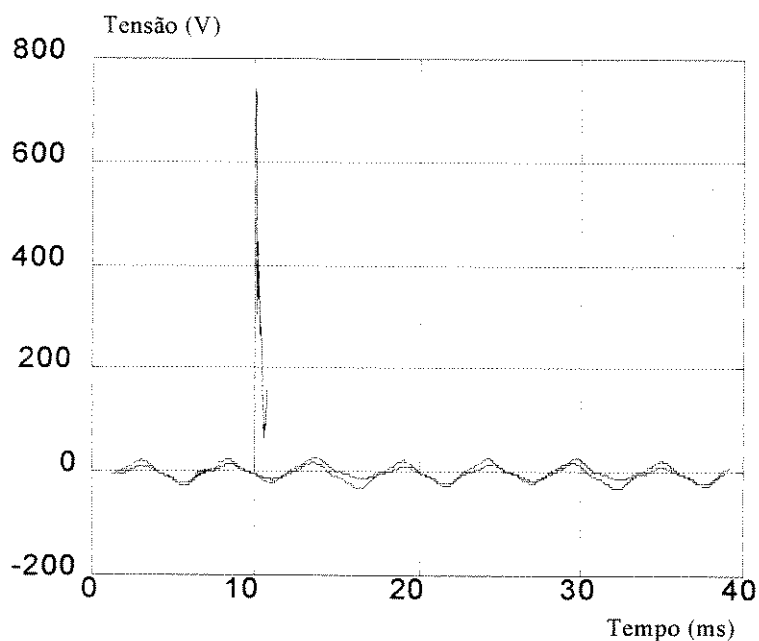


Figura V-19 Comparação ruído x onda padrão

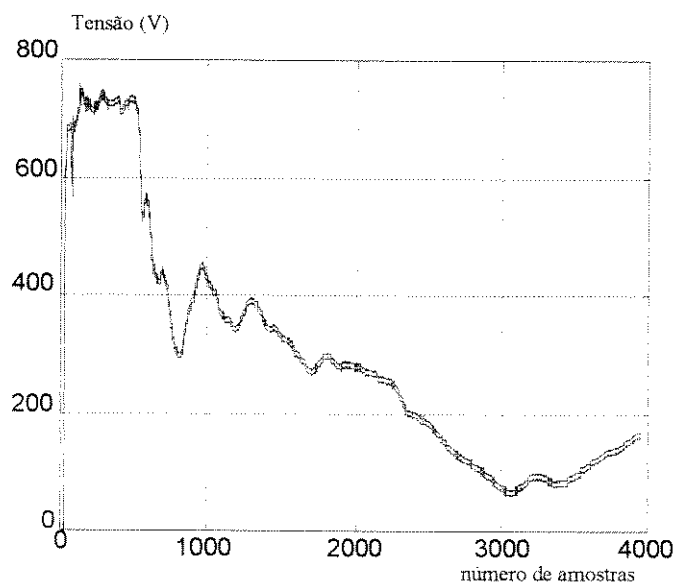


Figura V-20 Medição repetitiva da onda padrão

A figura V.19 apresenta uma comparação entre o sinal resposta e o ruído medido. A variação de amplitude do ruído está em torno de 20V enquanto que os sinais-resposta medidos apresentam valores maiores que 200V a maior parte do

tempo. O efeito destes ruídos pode ser visto na figura V.20 onde são apresentados cinco sinais resposta. A variação de amplitude entre estes sinais é consequente do ruído no momento da medição. Nesta figura também pode ser vista a diferença de amplitude no fechamento do “gap” do gerador.

V.4.2.2 Chaves operadas

Foram operadas onze chaves no alimentador, totalizando assim doze configurações diferentes. As chaves operadas apresentam distâncias as mais variadas e retiram trechos de tamanhos diversos. A tabela V.3 apresenta um resumo dos testes realizados nesta segunda fase e as distâncias das chaves até a subestação.

Teste	Descrição	distância (m)
1	ruído - janela 2ms	-
2	ruído - janela 50ms	-
3	ruído - janela 50ms	-
4	onda padrão 1	-
5-9	idem 2,3,4,5	-
10	Chave aberta 31443	3730
11-14	idem 2,3,4,5	"
15	Chave aberta 31443 Falha de alta impedância	3730+10
16-19	idem 2,3,4,5	"
20	Chave aberta 30109	3480
21-24	idem 2,3,4,5	"
25	Chave aberta 30109 Falha de alta impedância	3480+10
26-29	idem 2,3,4,5	"
30	Chave aberta 30106	14830
31-34	idem 2,3,4,5	"

35	Chave aberta 30106 Falha de alta impedância	14830+10
36-39	idem 2,3,4,5	"
40	Chave aberta 31116	13660
41-49	idem 2,3,4,5	"
50	Chave aberta 31116 Falha de alta impedância	13660+10
51-54	idem 2,3,4,5	"
60	Chave aberta 31111	6200
61-64	idem 2,3,4,5	"
65	Chave aberta 31111 Falha de alta impedância	6200+10
66-69	idem 2,3,4,5	"
70	Chave aberta 28283	8450
71-74	idem 2,3,4,5	"
75	Chave aberta 28283 Falha de alta impedância	8450+10
76-79	idem 2,3,4,5	"
80	Chaves abertas 28283 e 31018	8450
81-84	idem 2,3,4,5	"
85	Chave aberta 31018	11090
86-89	idem 2,3,4,5	"
90	Chave aberta 31018 Falha de alta impedância	11090+10
91-94	idem 2,3,4,5	"
95	Chave aberta 31118	8440
96-99	idem 2,3,4,5	"
100	Chave aberta 31118 Falha de alta impedância	8440+10

101-105	idem 2,3,4,5	"
106	Chave aberta 30067	6260
107	idem 2	"
108	Chave aberta 30067 Falha de alta impedância	6260+10
109	Chave aberta 30177	6330
110	idem 2	"
111	Chave aberta 30177 Falha de alta impedância	6330+10
112	idem 2	"
113	jumper aberto	-
114	idem 2	-
115	Jumper aberto Falha de alta impedância	-
116	idem 2	-
117	idem 3 (teste com tensão 2,5kV)	-

Tabela V-3 Resumo dos testes realizados no segundo grupo

A tabela V.4 apresenta um resumo do número de elementos retirados em cada manobra. Os valores estão apresentados como o percentual dos seguintes valores base:

Comprimento total dos condutores: 120,6km

Número total de transformadores: 229

Número total de bifurcações (nós): 441

Teste	Percentual retirado		
	Comprim. (%)	nós (%)	transformadores (%)
10-19	0,79	2,26	2,62
20-29	38,09	27,76	25,76
30-39	2,00	1,80	1,70
40-49	18,39	11,74	11,79
50-59	44,80	29,10	30,56
60-69	34,35	25,51	23,58
70-79	8,26	8,57	9,17
80-84	22,10	19,41	20,53
85-94	13,84	10,84	11,35
95-105	12,20	8,80	8,70
106-108	34,30	25,51	23,58
109-112	17,64	14,45	14,41
113-117	-	-	-

Tabela V-4 Resumo das quantidades de elementos retirados

A chave operada mais próxima da subestação está a 3480 m e a sua resposta ao impulso de tensão é comparada com a resposta padrão na figura V.21. Observa-se que inicialmente os sinais são coincidentes e que a partir de um determinado tempo t_1 os sinais se divergem. O tempo t_1 nos informa o tempo gasto para o sinal injetado percorrer o alimentador até o ponto onde a chave está localizada e retornar até o ponto de medição na subestação.

A figura V.22 apresenta uma comparação entre a resposta padrão e a resposta para a chave operada localizada no ponto mais distante (14830 m). A diferença entre elas é muito pequena uma vez que esta chave retira apenas quatro transformadores e este está muito distante da subestação. Apesar disto, a diferença entre elas pode ser detectada através desta figura.

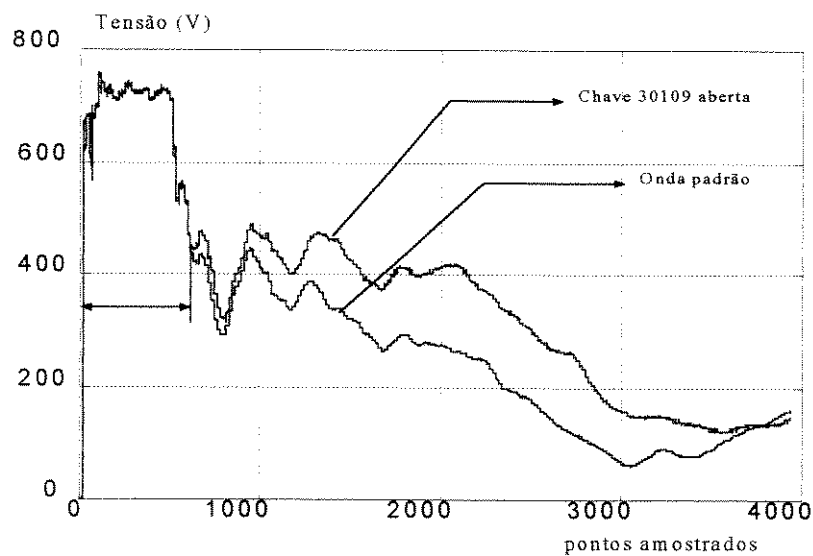


Figura V-21 Comparação entre a resposta padrão e a resposta da chave mais próxima (5000 pontos = 200 μ s)

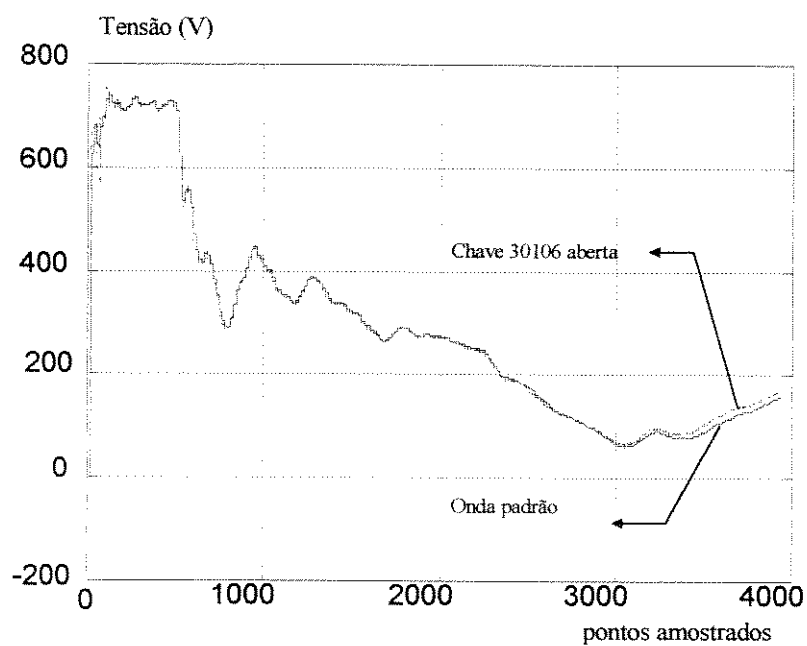


Figura V-22 Comparação entre a resposta padrão e a resposta da chave mais distante (5000 pontos = 200 μ s)

V.5 *Análise nos domínios do tempo e da frequência*

Os sinais-resposta medidos são armazenados para posterior análise. Para evitar que efeitos de ruído comprometam as conclusões e garantir a consistência dos dados, estes devem passar por uma fase inicial de pré-processamento. Esta fase consiste na verificação da dispersão entre medidas de um mesmo evento, filtragem e normalização. Após esta fase os sinais são analisados nos domínios do tempo e da frequência. A análise é feita nos dois domínios porque cada um deles fornece informações diferentes. O domínio do tempo nos dá a informação a respeito da distância. O domínio da frequência fornece informação a respeito das variações de amplitudes e fases nas frequências analisadas.

V.5.1 Pré-processamento

A fase de pré-processamento é de grande importância, pois é nesta fase que se faz uma análise qualitativa do sinal medido. Qualquer informação que venha a ser retirada do sinal em etapas subsequentes devem ser apoiadas nesta fase, ou seja, é no pré-processamento que são obtidas informações sobre o nível de ruído e a consequência deste no sinal. O processo de filtragem é descrito no capítulo III.

V.5.1.1.1 Quantização

O sinal digital é representado por números binários com número de combinações limitado. Já o sinal analógico pode assumir teoricamente infinitos valores. Desta forma, ao se tentar representar um sinal analógico de forma digital comete-se um erro chamado de erro de quantização (Williams, 1986). Assim, um sinal ao ser digitalizado apresenta uma distorção inerente ao processo de digitalização. A figura V.23 ilustra a amostragem ao longo da variável independente.

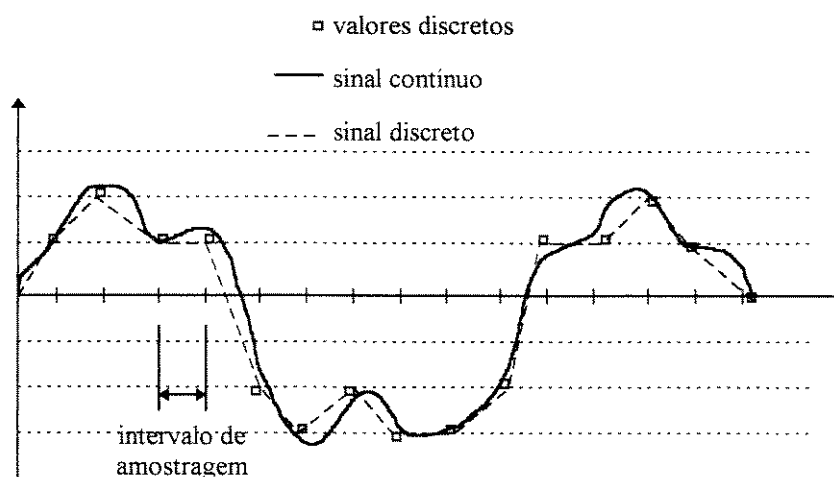


Figura V-23 Processo de digitalização

V.5.1.1.2 Erro de quantização

Suponhamos que um sinal digital seja representado por uma palavra de 8 bits. O número de intervalos de quantização será igual a $N=2^8 = 256$. A precisão do sinal será 1 parte em 256. Para um sinal representado no intervalo de 0 a 1V teremos cada nível de quantização correspondendo a $(1/256)V = 3,906\text{mV}$. Para valores do sinal analógico compreendidos entre 1,953mV e 5,859mV, por exemplo, o sinal digital correspondente terá valor 3,906mV. Observa-se que o erro é variável no intervalo e o seu valor máximo é $[(1/256)/2]=1,953\text{mV}$. Para este tipo de quantizador uniforme temos um erro que varia de 0 ao erro máximo para cada degrau (figura V.24). A reta tracejada representa a função ideal de um quantizador e a função em forma de degraus é a curva real.

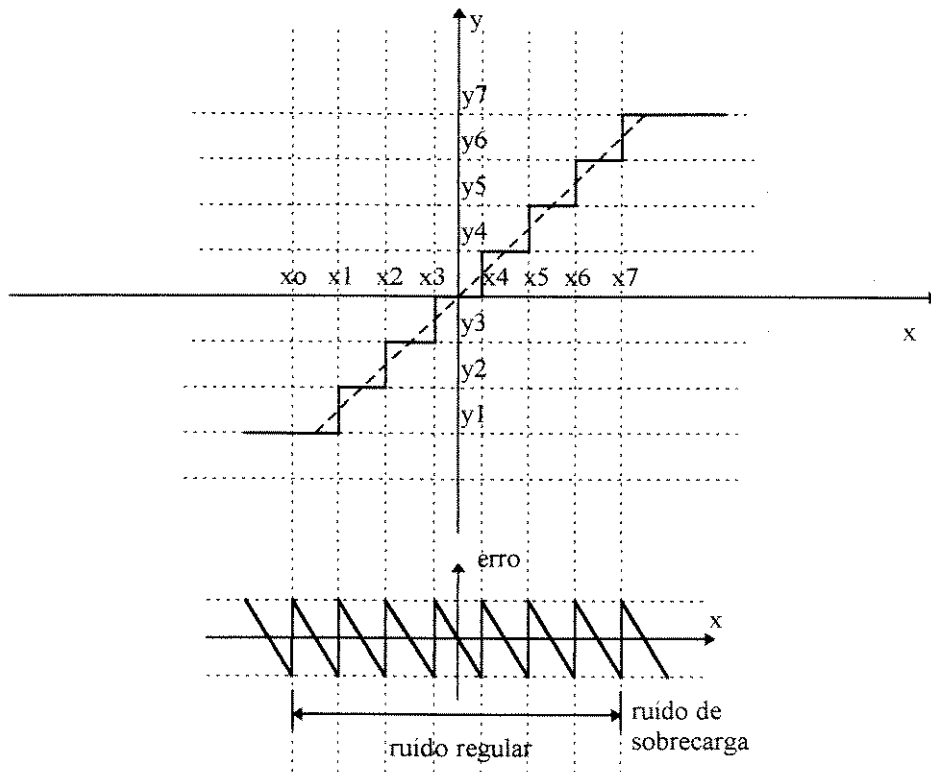


Figura V-24 Curva de transferência do quantizador

V.5.1.1.3 Amostragem

O sinal é amostrado no tempo com uma taxa, normalmente, fixa denominada frequência de amostragem t . Assim, a sequência digital é indexada na forma:

$$x_k = f \{ x(kt + t_0) \} \quad (V.4)$$

onde

t_0 - é o tempo inicial da amostragem

t - intervalo de amostragem

k - número inteiro que varia de 0 a $k_{\max}$

$k_{\max}$ - número máximo de amostras

Quando se deseja amostrar um sinal analógico, deve-se ter um cuidado especial com a taxa de amostragem, ou intervalo de amostragem. Sinais muito lentos não necessitam ser amostrados em pequenos intervalos, uma vez que variam lentamente e, portanto, poucas amostras podem representá-lo de forma satisfatória. O sinal-resposta do alimentador é um sinal rápido e uma amostragem inadequada compromete totalmente a medição.

O teorema da amostragem (Williams 1986) diz que a frequência de amostragem deve ser no mínimo duas vezes maior que a máxima frequência do sinal. Esta frequência mínima de amostragem é chamada de frequência de Nyquist.

Caso o teorema da amostragem não seja atendido ocorrerá o fenômeno de "aliasing" que é um falseamento da informação obtida. Se a frequência de amostragem for menor que a frequência de Nyquist, haverá um rebatimento das frequências superiores sobre o espectro em questão, e estas aparecerão como sendo de baixa frequências.

Como o sinal medido é um sinal-resposta a um sinal impulsivo, este apresenta valores diferentes do sinal injetado a partir de um determinado tempo. Este tempo corresponde ao tempo gasto para que o sinal percorra o trecho de ida até o primeiro ponto de reflexão do sinal injetado e volta ao ponto de medição.

Por inspeção visual observa-se que as frequências mais altas estão contidas na frente da onda injetada. Segundo Marti (1989) em uma linha de distribuição o fator de atenuação imposto às altas frequências cresce com o aumento da frequência e que para a frequência de 400kHz as perdas imprimem uma redução de 9% na sua amplitude a cada 300m. Para 2km a redução chega a 45%. Assim, a própria linha atua como um filtro passa-baixas. Por esta razão pode-

se afirmar que o sinal medido apresenta frequência máxima menor que a metade da frequência de amostragem, já que a frequência de amostragem utilizada foi 25MHz não apresentando assim o fenômeno "aliasing".

V.6 Espectros de frequências - Escolha do tamanho da janela de observação

O sinal medido possui uma forma de onda característica que é resultado das reflexões e refrações ocorridas devido a topologia do alimentador. O sinal é medido durante uma janela de amostragem determinada. Esta janela deverá ser dimensionada para que a informação, fornecida ao sinal, do ponto eletricamente mais distante possa chegar ao ponto de medição e sua alteração ser sentida durante um intervalo de tempo suficiente para a sua detecção. Desta forma, como primeira fase deve-se fazer um levantamento preliminar do comprimento total do alimentador. Para determinar o tamanho da janela de observação deve-se fazer alguns testes preliminares operando as chaves mais distantes do alimentador. Estes testes são necessários pois o efeito mais significativo da mudança na configuração aparece de forma crescente e em intervalos de tempo à frente. Caso os testes preliminares não possam ser feitos, uma relação com um certo grau de segurança e que a janela amostre durante um tempo três vezes o valor do maior tempo de retorno do alimentador.

Se, por um lado, a utilização de janelas maiores é uma garantia de que não se vai perder informações vindas do final do alimentador, por outro lado a frequência fundamental do espectro utilizando toda a janela de amostragem decresce pois, $f_1=1/T$, onde T é o tamanho da janela. Quanto menor for a frequência fundamental, mais exposta esta estará a interferências de ruídos gerados por cargas não lineares. Para se contornar este problema, pode-se dividir a janela em janelas menores. Neste caso a análise é feita comparando-se as componentes das respectivas janelas separadamente. Esta abordagem foi adotada neste trabalho, (como apresentado no capítulo III) onde foram utilizadas duas janelas de amostragem.

V.6.1 Escolha do número de freqüências utilizadas para caracterizar o evento

Como foi dito em capítulos anteriores, as respostas às diversas configurações de operação do alimentador são armazenadas na forma de espectro de freqüências. Porém, não se armazena todas as freqüências calculadas e sim apenas um número suficiente para representá-las sem perda significativa de informação. A aplicação da técnica de FFT (no cálculo do espectro de freqüências) nos retorna um número de freqüências igual a $n/2$ onde n é o número de pontos das amostras utilizados no cálculo. Assim, tomando-se 4096 amostras, por exemplo, teremos as amplitudes e fases (ou componentes real e imaginária para cada freqüência) de 2048 freqüências. No desenvolvimento deste trabalho, optou-se por utilizar o sinal por suas componentes real e imaginária. Para o caso citado acima, teremos 4096 elementos para serem analisados. Como a metodologia apresentada neste trabalho se propõe a detectar uma falha "on-line", o número de elementos a serem analisados e armazenados não deve ser elevado. Assim, fez-se um estudo do número de freqüências a ser utilizado sem que se comprometesse o desempenho da técnica. Para tanto, as amplitudes das freqüências foram observadas para vários casos.

Amplitude relativa das freqüências

Uma vez definido o número de pontos (2^n) da amostra a ser utilizado no cálculo da FFT (Fast Fourier Transform), temos definido a faixa de freqüências em que a informação está presente. O primeiro termo fornecido é a componente contínua do sinal, ou seja, a freqüência zero. Esta componente possui a parte imaginária igual a zero. O segundo termo fornecido é a freqüência fundamental do espectro que é a menor freqüência que se tem acesso no espectro de freqüências calculado. De modo geral, a freqüência fundamental é usada como referência para as demais freqüências. Observando os espectros de freqüência completos dos

vários casos estudados, pode-se afirmar que as amplitudes das frequências decaem com grande rapidez à medida que se aumenta a frequência, apresentando valores percentuais insignificantes a partir da 23ª frequência harmônica. A figura V.25 apresenta o espectro de um evento até a 9ª frequência harmônica. Comparando-se os vários eventos medidos, observa-se que o formato dos espectros não se altera de forma considerável. Como pode ser visto nos itens anteriores, o formato geral das respostas são muito parecidos.

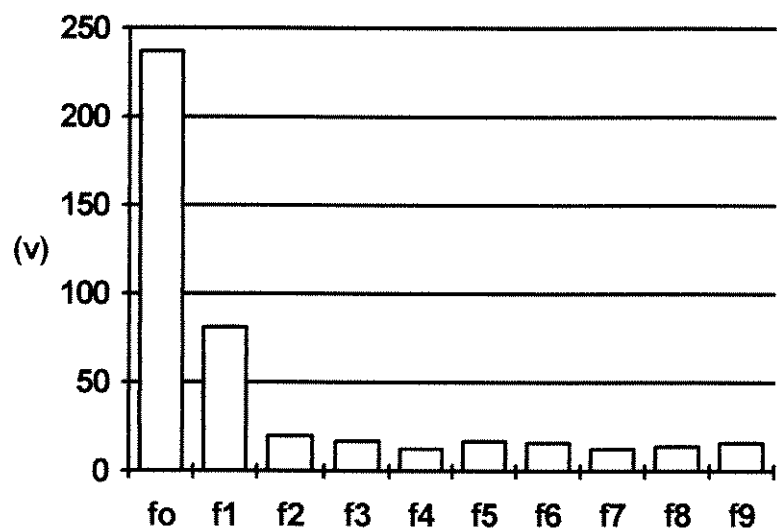


Figura V-25 Espectro de frequências para a onda padrão (em volts)

A tabela V.5 apresenta as faixas de variação da amplitude de algumas frequências para todos os testes de campo. As ondas foram inicialmente normalizadas tendo como referência a resposta da configuração padrão. (A amplitude mínima encontrada para a componente contínua foi 0,966 e a máxima 1,73. Para a componente fundamental temos os valores máximo e mínimo respectivamente 0,6008 e $11 \cdot 10^{-3}$.)

Após análise das amplitudes obtidas para os sinais normalizados, concluiu-se que 20 frequências são suficientes para representá-las de forma adequada.

	Amplitude	Amplitude
	máxima	mínima
f ₀ (6.1kHz)	1,7329	0,9664
f ₁	0,6008	0,0011
f ₂	0,3614	0,0005
f ₅	0,0406	0,0002
f ₁₀	0,0354	0,0000
f ₂₀ 1228 Hz	0,0050	0,0000
f ₃₀	0,0034	0,0000
f ₅₀	0,0017	0,0000
f ₁₀₀	0,0009	0,0000
f ₅₀₀	0,0003	0,0000
f ₁₀₀₀	0,0001	0,0000
f ₂₀₀₀	0,0001	0,0000

Tabela V.5 - Valores máximos e mínimos encontrados para algumas frequências comparando-se todos os casos medidos - todos os casos foram normalizados tomando-se como referência o caso padrão

Capítulo VI

Resultados Experimentais

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na aplicação das técnicas propostas a dados coletados em campo. Os dados utilizados neste capítulo foram obtidos no segundo grupo de testes quando foram feitas medições repetitivas dos eventos. O alimentador utilizado foi o apresentado no capítulo V, denominado 14F4 da subestação de Caratinga. O esboço do alimentador é apresentado na figura VI.1 e o diagrama detalhado do alimentador é apresentado no apêndice B.

A metodologia proposta foi implementada em um sistema computacional que possibilitou comparar as respostas relativas a FAI com padrões. Arquivos de dados, bancos de regras e todo o processamento foram implementados e simulados em ambiente MATLAB. Os resultados obtidos das simulações são discutidos neste capítulo.

O alimentador sob análise é considerado misto, parte urbana e parte rural, com trechos trifásicos e monofásicos. Considerou-se nestes testes que o alimentador possuía apenas as chaves operadas durante os testes, ou seja, 11 chaves. Cada uma destas chaves foram operadas separadamente e as respostas para as configurações decorrentes destas aberturas foram coletadas.

Como não foi possível fazer um grande número de testes, alguns artifícios foram necessários para se obter um melhor aproveitamento dos dados coletados para verificação das técnicas. Em seguida, estes são apresentados.

- Para cada chave operada, foi realizada uma falha de alta impedância a 10 m da mesma. Assim 11 FAIs a 10m das chaves foram realizadas.
- Como a chave 31111 está localizada a 60m da chave 30067, durante os testes, considerou-se a resposta de uma das chaves como uma FAI a 60m da outra, e a FAI (localizada próxima a esta) localizada a 70m. Assim, 4 FAIs à distâncias de 60 e 70m puderam ser testadas.
- O mesmo foi feito para chaves mais distantes uma das outras. Foi o caso das chaves 31111 (6200m da SE) e 30177 (6330m da SE) e da chave 31018 (11090m da SE) e do jumper (11190m da SE). A combinação entre eles e suas respectivas FAI a 10m possibilitou a realização de 8 FAI a distâncias ≤ 140 m de distância.
- Durante os testes, tendo uma referência fixada (resposta para uma chave aberta), usou-se todos os outros resultados (demais chaves e FAIs) para comporem os dados de testes. Para todas as referências, obteve-se um total de 300 eventos a serem classificados (12 referências x 25 eventos). Destes 12 eventos são configurações conhecidas, 11 são FAI a 10m de chaves, 4 são FAI a 70m de chaves e 8 são FAI a 130m de chaves.
- Durante a fase de concepção dos sistemas, utilizou-se as duas primeiras amostras para cada evento de abertura de chave como sinais de referência, de uma série de 5, guardando as demais para testes. Os casos onde foi feito um número menor de medições, tomou-se a primeira amostra como referência.

Para cada chave utilizada como referência, dever-se-á calcular a dispersão entre a amostra sob teste e esta referência. Esta dispersão é calculada entre as componentes real e imaginária de duas janelas de observação (como mostrado em capítulos anteriores). Em seguida, esta dispersão é representada por seus graus de pertinência a conjuntos difusos previamente definidos. Estes são os dados de

entrada das técnicas de análise aqui propostas. A seguir são apresentadas as dispersões obtidas e os resultados das análises derivadas de cada técnica.

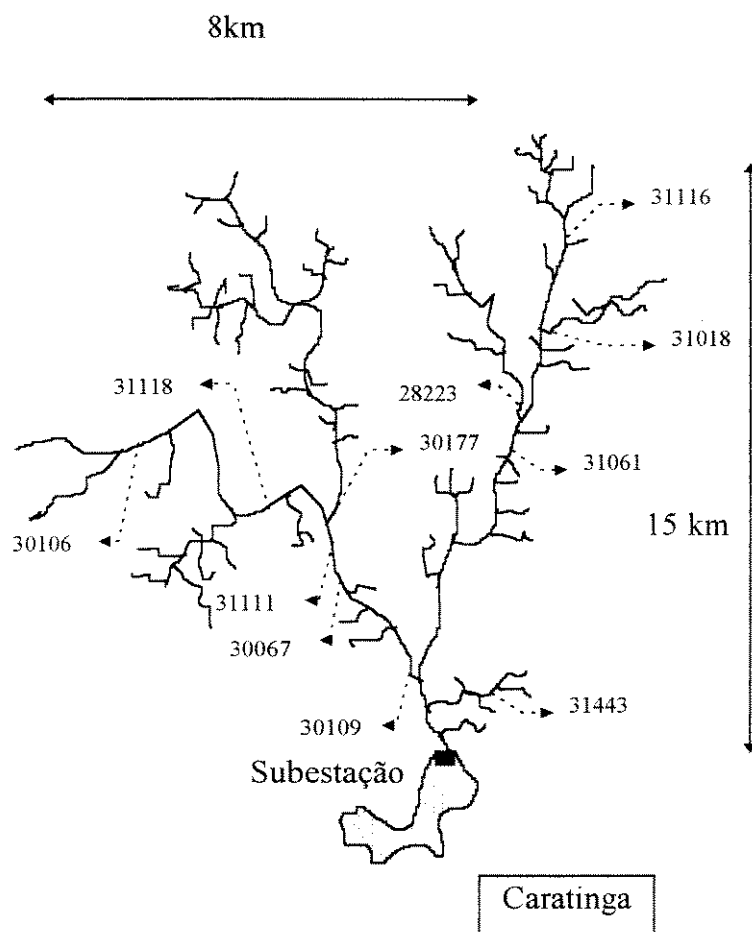


Figura VI-1 Esboço do Alimentador testado

VI.1 Dispersão representada por conjuntos difusos

Os principais dados de entrada do sistema de detecção são as dispersões das amplitudes das componentes do espectro da amostra sob teste e as componentes da referência. As dispersões calculadas são representadas através dos conjuntos difusos mostrados no capítulo IV. Os conjuntos difusos são construídos de forma a representar adequadamente as dispersões nos conjuntos "muito pequena", "pequena", "média" e "grande" para as técnicas baseadas em regras e "pequena", "média" e "grande" para as demais técnicas, figura IV.7.

Para verificar se os conjuntos difusos, construídos para representar as dispersões encontradas, satisfazem à expectativa de classificação foi feito o seguinte teste: primeiramente tomou-se todas as amostras com as medidas da operação de chaves e suas respectivas médias. Para cada uma das amostras foi calculada a representação da sua dispersão em relação à onda média correspondente nos conjuntos difusos definidos.

A figura VI.2 apresenta uma ilustração das classificações encontradas. Nestas, os graus de pertinências ao conjunto pequena são representadas por asterisco, ao conjunto médio por círculos e ao conjunto grande por x. Foi classificado como dispersão exclusivamente pequena ($\mu_p=1$) 90% das dispersões calculadas e como dispersão exclusivamente grande ($\mu_g=1$) 3% das dispersões. As demais dispersões foram classificadas como pequena e média ou média e grande. Com este resultado pode-se concluir que os conjuntos difusos escolhidos são satisfatórios porque conseguem representar o comportamento da dispersão na forma linguística.

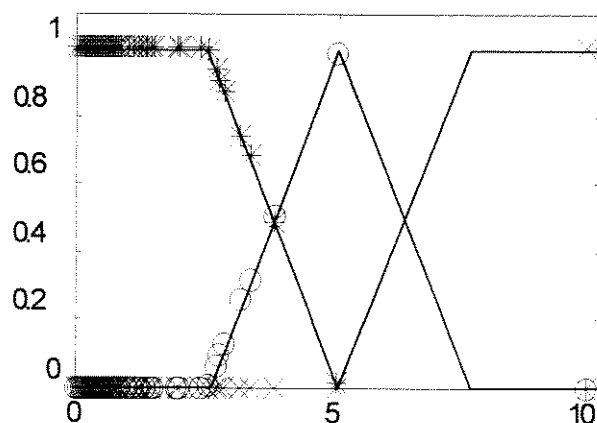


Figura VI-2 Classificação das dispersões entre amostras e suas ondas médias

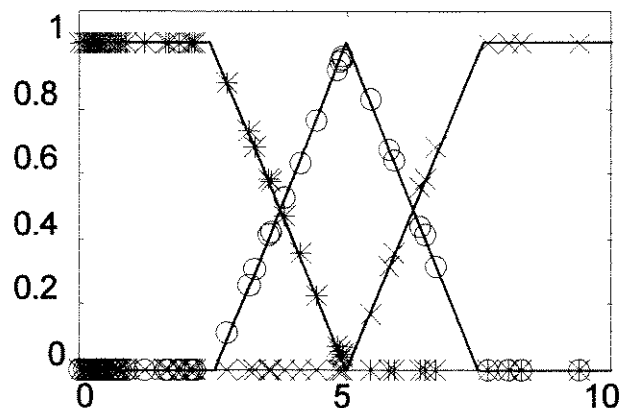


Figura VI-3 Classificação das dispersões entre FAI a 10m das chaves e as ondas médias das respostas das chaves

O mesmo teste foi feito tomando-se agora as amostras que representam falhas de alta impedância. Os resultados encontrados também são coerentes. A figura VI.3 ilustra os resultados encontrados. Cerca de 50% das dispersões são considerados grandes e apenas 27% são considerados exclusivamente pequenas. A figura VI.3 só apresenta as dispersões contidas dentro da faixa de 0 a 10%. A maioria das dispersões estão fora desta faixa.

Para uma análise mais profunda, escolheu-se a chave 31111 localizada a 6200m da SE. Cinco medidas diferentes foram realizadas para a abertura desta chave. A média destas medidas foi então calculada. Em seguida, foram provocadas FAI a 10m e a 60m da mesma. As dispersões entre as amostras e a onda média foram classificadas pelos conjuntos difusos. Como resultado obteve-se 96% das dispersões calculadas para as amostras que representam a chave aberta classificadas como pequena. Para a FAI a 10m esta porcentagem caiu para 67% e para a FAI a 60m esta foi para 64%. A figura VI.4 apresenta um gráfico que ilustra este resultado. Observa-se que a classificação da dispersão da amostra da chave, como média e grande é insignificante. Através deste resultado pode-se concluir que pode-se distinguir entre os eventos apenas observando estas dispersões.

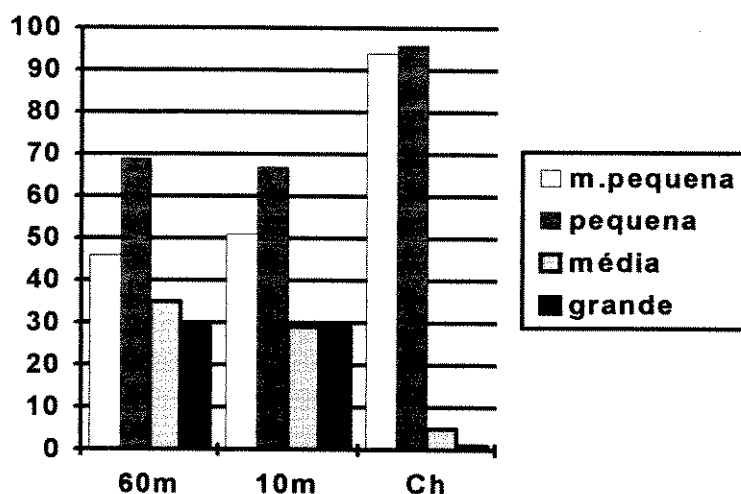


Figura VI-4 Classificação das dispersões para Chave aberta, FAI a 10m e FAI a 60m

VI.2 Técnicas utilizadas

Foram utilizadas três técnicas distintas no processamento do conhecimento obtido nos dados: Sistema Baseado em Regras, Sistema Difuso e Neurônio Difuso. O sistema de regras apresenta duas abordagens: o sistema de regras e o sistema adaptativo. A primeira abordagem não apresenta saída numérica contínua dentro de uma determinada faixa. A sua saída é binária: Sim ou Não. Assim, uma determinada amostra é classificada ou não como configuração conhecida. A segunda versão do sistema de regras, denominada sistema de regras adaptativas, apresenta uma saída numérica contínua podendo assumir vários valores. As outras duas técnicas também apresentam saídas numéricas. Desta forma, os resultados das técnicas com saídas numéricas são comparadas de forma mais intensiva. Todos os algoritmos utilizados foram programados utilizando-se o MATLAB. Nenhum outro “software” foi utilizado.

VI.2.1 Sistemas de regras

No sistema de regras, as regras são construídas através da observação do comportamento das dispersões para as diversas referências. Como foi dito anteriormente, para cada novo evento, 5 amostras foram coletadas com a exceção de alguns casos onde este procedimento não foi possível. Para todos os casos, as

duas primeiras respostas foram utilizadas na obtenção da onda média a ser armazenada no Banco de Dados de Referências. As demais respostas (3 restantes de cada caso) foram separadas para posterior utilização nos testes.

Tomando-se as duas primeiras ondas e observando-se o comportamento das dispersões em relação as referências, foi possível estabelecer regras para imitar o raciocínio desenvolvido por um especialista ao analisar os dados.

O processamento das regras é feito em paralelo, ou seja, várias regras são estabelecidas paralelamente e não de forma sequencial encadeada. O sucesso na avaliação de todas, ou de quase toda a sua totalidade, indica a similaridade entre a amostra e a referência. Neste caso as regras possuem pesos iguais. Ao final do processo de análise, a amostra é classificada como configuração conhecida ou como uma FAI. Quando a amostra for classificada por mais de uma referência tomar-se-á como classificação correta aquela em que a dispersão apresentar a maior média entre as pertinências no conjunto pequeno. Os resultados obtidos com esta técnica foram razoáveis e são apresentados a seguir.

Para melhorar a definição do processo decisório das regras, foi necessário se estabelecer pesos diferentes para as regras. A partir daí, um processo de análise e decisão foi estabelecido, sendo denominado sistema de regras adaptativas.

VI.2.2 Regras Adaptativas

O sistema de regras adaptativas permitiu melhorar o sistema de regras conferindo um certo automatismo no uso mais adequado das mesmas. Como as regras possuem pesos diferentes, a saída é a soma dos pesos das regras disparadas. Conforme explicitado no item IV.2.2.2, valores superiores a 10.36 serão considerados classificados.

VI.2.3 Neurônios Difusos

Nesta técnica, cada neurônio é treinado para reconhecer uma determinada referência. Desta forma, tem-se 11 neurônios treinados (foram considerados 11 configurações possíveis), um para cada configuração. O sinal de entrada de cada neurônio corresponde à dispersão entre a amostra sob teste e a resposta de referência daquele neurônio. Saídas com valores entre 0.75 e 1.2 serão considerados como classificadas, apêndice A.

VI.2.4 Sistema Difuso

Como foi mostrado no capítulo IV, o sistema difuso é composto por regras e neurônios lógicos. Os dados de entrada são as dispersões entre a amostra sob teste e a resposta da configuração de referência. No total, são 80 dados de entrada que após processados devem ser representados por uma única saída. A informação final indica a similaridade ou não da amostra analisada em relação à referência. Valores de saída superiores a 5.5 serão considerados como classificados, apêndice A.

VI.3 Resultados

Para facilitar a comparação entre os resultados das várias respostas das técnicas utilizadas, são apresentados gráficos contendo a saída de cada técnica quando uma única configuração padrão é considerada como referência. Para cada configuração padrão teremos um gráfico. Como são 12 configurações que são tomadas como referência ter-se-á doze gráficos de saída para cada técnica. A saída da técnica considerando-se todas as referências é a união dos doze gráficos tomando o máximo de doze valores para cada amostra.

A sistemática dos gráficos é a seguinte: Todas as amostras são apresentadas para a referência escolhida. A saída do sistema de análise é uma pontuação para cada uma das amostras apresentadas. Para cada conjunto de amostras repetidas (normalmente 5) tomar-se-á a média dos resultados. Desta

forma cada gráfico terá 25 amostras de saída que serão dispostas no eixo y e o eixo x apresenta o valor de saída da técnica para cada uma das amostras. Cada técnica apresenta no gráfico a região de classificação das amostras. A tabela VI.1 apresenta a identificação dos grupos de amostras e a numeração correspondente. Também são apresentados os números das referências para os quais elas devem ser classificadas. Aquelas amostras que não apresentam o número da referência devem ser classificadas como falhas.

A técnica Sistema de Regras não apresenta pontuação para as amostras, simplesmente as classifica ou não. Por esta razão esta técnica não será utilizada na comparação por gráficos, apenas na comparação final.

Nos testes de desempenho das técnicas será utilizado uma configuração de referência e todas as amostras serão a elas apresentadas. Estando uma determinada configuração na referência, o sistema sob teste deverá reconhecer apenas as amostras que representam esta configuração. Por exemplo, estando a configuração 1 (tabela VI.1) na referência de um neurônio este deverá apresentar saída ativada para a amostra 1 e desativada para as demais amostras.

Configuração de referência e letra correspondente do gráfico	Representada nos gráficos pelo número	Configuração
1 (a)	1	completa (padrão)
2 (b)	2	padrão com chave 31443 aberta
	3	FAI a 10m da chave 31443
3 (c)	4	padrão com chave 30109 aberta
	5	FAI a 10m da chave 30109
4 (d)	6	padrão com chave 30106 aberta
	7	FAI a 10m da chave 30106
5 (e)	8	padrão com chave 31116 aberta

	9	FAI a 10m da chave 31116
6 (f)	10	padrão com chave 31061 aberta
	11	FAI a 10m da chave 31061
7 (g)	12	padrão com chave 31111 aberta
	13	FAI a 10m da chave 31111
8 (h)	14	padrão com chave 28223 aberta
	15	FAI a 10m da chave 28223
9 (i)	16	padrão com chave 31018 aberta
	17	FAI a 10m da chave 31018
10 (j)	18	padrão com chave 31118 aberta
	19	FAI a 10m da chave 31118
11 (k)	20	padrão com chave 30067 aberta
	21	FAI a 10m da chave 30067
12 (l)	22	padrão com chave 30177 aberta
	23	FAI a 10m da chave 30177
	24	FAI a 100m da chave 31018
	25	FAI a 110m da chave 31018

Tabela VI-1 Número dos eventos nos gráficos apresentados a seguir

VI.3.1 Resultados obtidos com a aplicação da técnica de Regras Adaptativas

A figura VI.5 apresenta doze gráficos contendo cada um a resposta da técnica de Regras Adaptativas para uma dada referência. A ordem dos gráficos segue a ordem das referências, assim, o gráfico (a) apresenta a resposta para a referência 1 e assim por diante.

A linha tracejada nos gráficos indica que as amostras que apresentarem valores à direita da linha tracejada são classificadas (classificação=1) e aquelas que estiverem à sua esquerda não são classificadas (classificação=0).

Os gráficos (a), (b), (c), (d), (g) e (k) apresentam apenas uma amostra classificada em cada um. Estas amostras (1,2,4,6,12 e 20) estão corretamente

classificadas, pois, representam exatamente a configuração padrão usada na referência (ou seja, 1,2,3,4,7 e 11, respectivamente). Os demais gráficos apresentam mais de uma amostra classificada.

Os gráficos (f), (h), (i), (j) e (l) apresentam duas amostras classificadas. Uma delas representa a configuração padrão utilizada na referência, portanto, está corretamente classificada. Assim, no gráfico VI.5 (f) foi classificada a amostra 8 para a referência 5 o que está correto (veja tabela VI.1). A outra amostra classificada, em cada um dos gráficos citados, corresponde às FAIs localizadas a 10 m da chave correspondente à configuração de referência. Assim, a referência 5, utilizada no gráfico (f), representa a configuração padrão estando a chave 31116 aberta, e as amostras classificadas neste gráfico foram: a amostra que representa a configuração de referência (amostra=referência 5) e a FAI a 10m da chave 31116. Este erro de detecção, FAI sendo classificada como configuração normal, era até certo ponto esperado pois a resposta do alimentador a uma FAI passiva a 10m de uma chave ou a resposta do alimentador estando este com esta chave aberta são praticamente idênticas. Em ambos os casos o número de transformadores retirados é o mesmo, só se diferenciando pela distância desta abertura até o ponto de medição em 10m. Porém, 10m comparados a alguns quilômetros resulta em diferença entre as respostas quase desprezível. No caso da indicação equivocada para falhas muito próximas a chaves, isto na realidade é positivo, pois exige ação para reestabelecer o sistema. A informação de que esta chave foi operada é de conhecimento do operador que, ao conferir que esta não foi operada, conclui que há uma falha nas proximidades da mesma.

No gráfico (e), três amostras foram classificadas. Duas delas recaem no caso anterior, porém, a terceira amostra é a de nº 25. Esta representa uma falha localizada entre as chaves 31116 e 31018 (veja figura VI.1). Neste caso, esta foi confundida com a chave 31116 que retira quase o mesmo trecho que a falta. As amostra 3, 5, 7, 13, 21 e 25 não foram classificadas por nenhuma referência, ou seja, são falhas, o que está correto. Nenhuma amostra foi classificada por mais de uma referência.

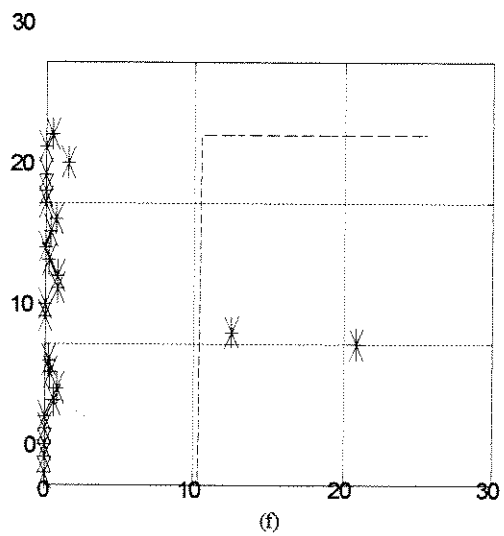
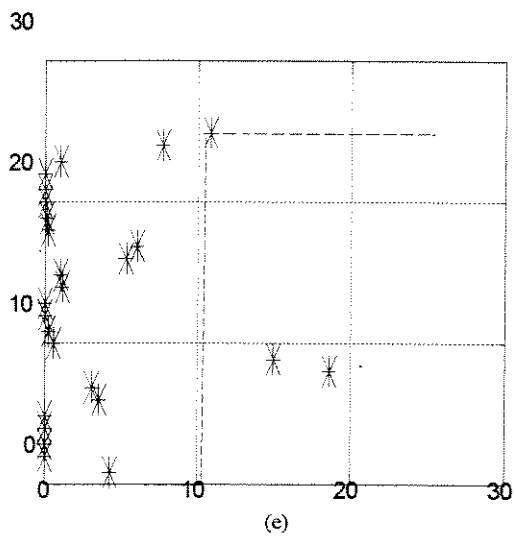
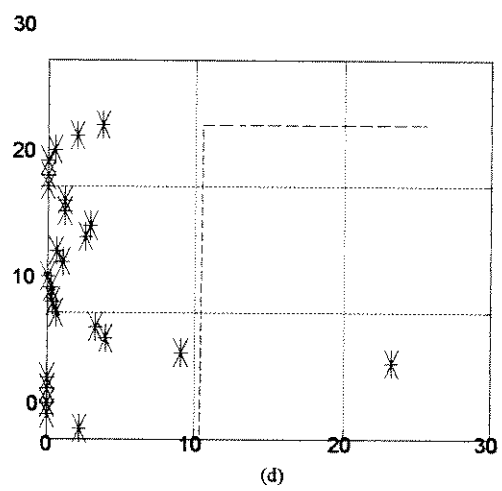
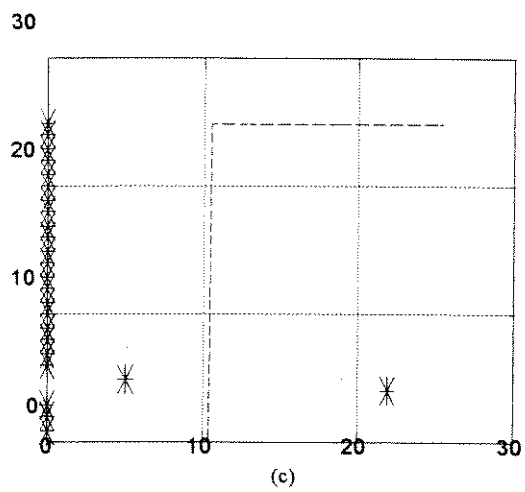
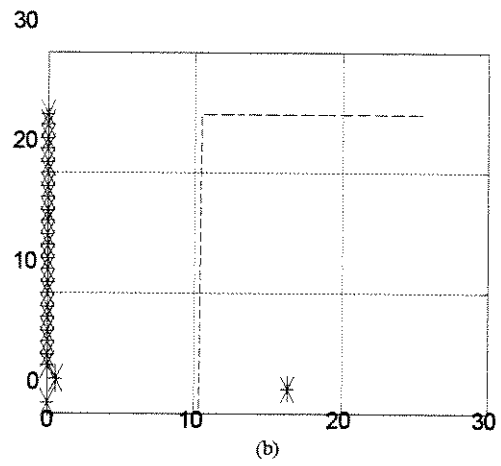
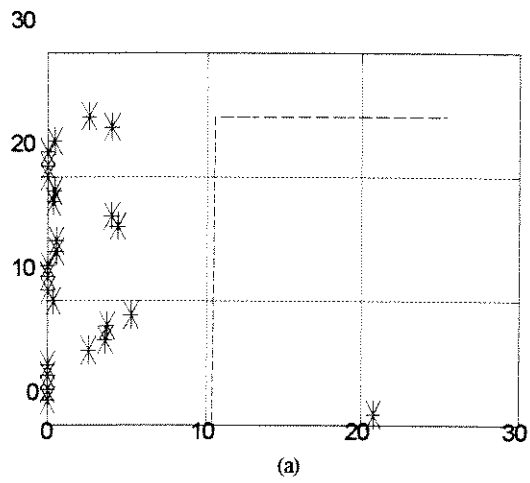


Figura VI-5 Saídas para a técnica Sistema de Regras Adaptativas

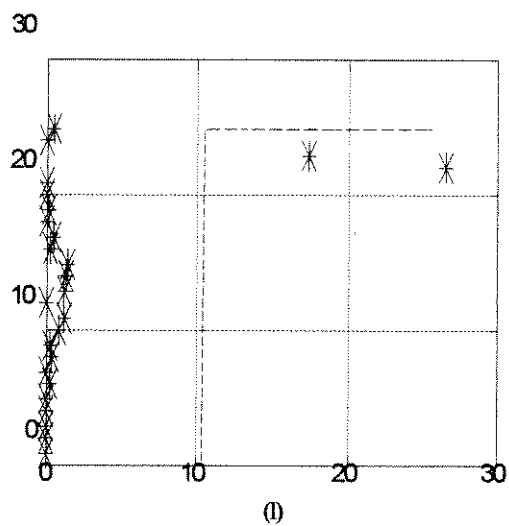
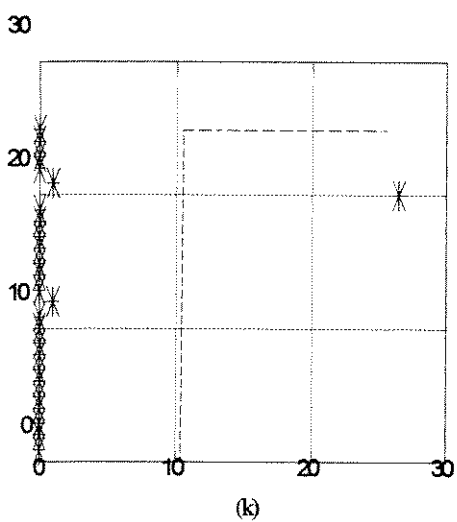
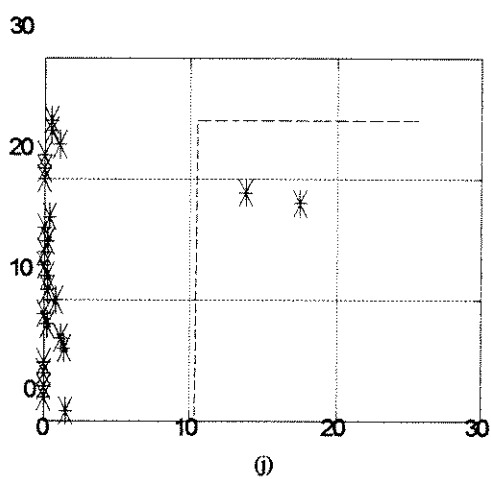
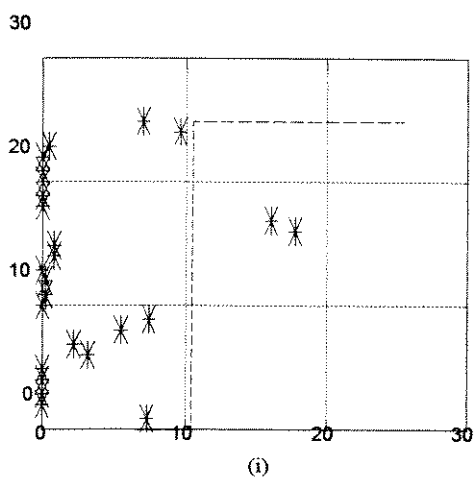
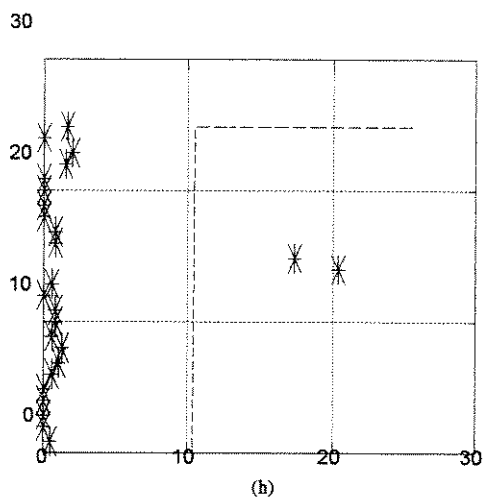
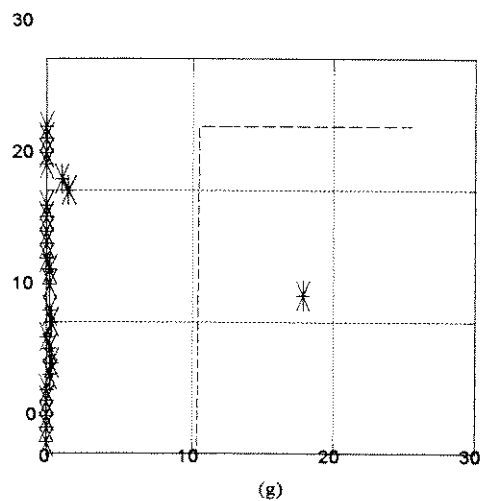


Figura VI-5 Saídas para a técnica Sistema de Regras Adaptativas (continuação)

VI.3.2 Resultados obtidos com a aplicação da técnica de Sistemas Difusos

Os resultados obtidos com a técnica baseada em sistemas difusos são apresentados nas figuras VI.6. No eixo y são apresentadas as amostras e no eixo x o valor de saída do sistema que neste caso é o CDA (centro de área) resultante para os grupos de amostras. Também são apresentados nos gráficos os conjuntos difusos de saída desta técnica. Assim, tomando-se a saída da amostra pode-se saber os graus de pertinências desta saída a cada um dos conjuntos difusos. Para valores do CDA maiores do que 5.5 o conjunto que possui o maior grau de pertinência é o conjunto grande o que indica que a amostra (ou grupo de amostras) possui grande semelhança com o sinal de referência e, portanto, é classificado como sendo igual ao da referência.

Os gráficos (b), (c), (g) e (k) indicam a classificação de uma única amostra em cada um. Trata-se das respostas para configurações iguais às das referências. Assim, no gráfico (b), a referência utilizada é a de número 2 e a amostra classificada também é a de número 2 (veja tabela VI.1). Portanto, as respostas apresentadas nestes gráficos estão corretas.

A amostra 7 é classificada por três referências (1, 4 e 5). Esta amostra representa a resposta do alimentador com uma falha a 10m da chave 30106. A referência 1 representa a resposta do alimentador estando este na configuração padrão de operação (completa). Isto significa que as respostas são muito parecidas. Na realidade, esta falha está localizada a 13670m da subestação e a divergência entre as respostas só ocorre no final da janela de observação. Assim, esta FAI é confundida com a resposta padrão do alimentador. A figura VI.10 apresenta a resposta da configuração com a chave 30106 aberta normalizada considerando a resposta completa como referência. Observa-se que a divergência ocorre no final da janela e é pouco mais de 10%. Esta amostra ainda é confundida com as referências 4 e 5. A referência 4 representa a configuração do alimentador para a chave 30106 aberta, ou seja, apresenta uma configuração praticamente idêntica à da FAI. Já a referência 5 representa uma configuração obtida a partir da

abertura da chave 31116. Esta chave está localizada a 14830m da subestação e apresenta uma curva muito similar à da FAI devido à distância e ao pequeno efeito da falha que só é sentido no final da janela de observação.

As amostras 8 e 9 são classificadas por quatro referências (1, 4, 5 e 9). Estas amostras representam, respectivamente, a configuração obtida com a abertura da chave 31116 e uma FAI a 10m desta chave. A análise a ser feita é similar à realizada no parágrafo anterior, ou seja, trata-se de um evento ocorrido muito distante da subestação e já no final da janela de observação. O seu efeito, portanto, nas variáveis monitoradas é muito pequeno e, assim, é confundido com outros eventos com características similares. A classificação da amostra 8 pela referência 5 é correta e as demais equivocadas. O maior CDA é obtido por esta referência tanto para a amostra 8 quanto para a 9. Assim, o resultado final é correto para a amostra 8 e esperada, porém incorreta, para a amostra 9.

A confusão entre alguns eventos, entretanto, apresenta certa coerência, pois, a amostra 1 (que representa configuração padrão) é confundida com a referência 5 (que representa resposta obtida a partir da abertura de uma chave, 31116, no final do alimentador) e as amostras 16 (configuração para a chave 31018 aberta) e 17 (FAI a 10m da chave 31018) são indevidamente classificadas pela referência 5.

A amostra 24 (FAI localizada entre as chaves 31116 e 31018) é classificada pelas referências 5 e 9. Porém, o CDA é maior para a referência 9; portanto, a classificação final é dada como referência 9. Na realidade esta FAI se encontra nas proximidades da chave 31116.

Os gráficos (f), (h), (j) e (l) apresentam duas amostras classificadas, sendo elas a configuração correspondente e a outra FAI a 10m das chaves operadas para se obter tais configurações.

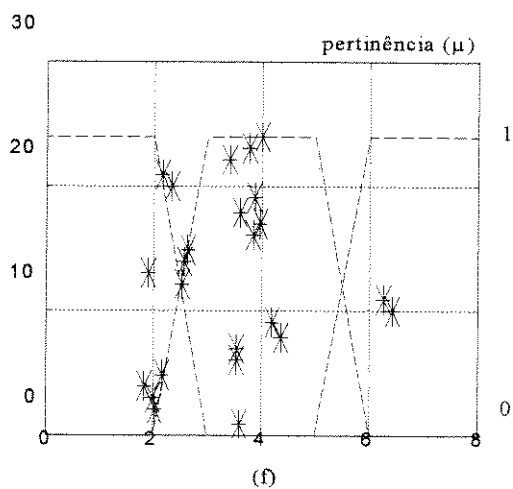
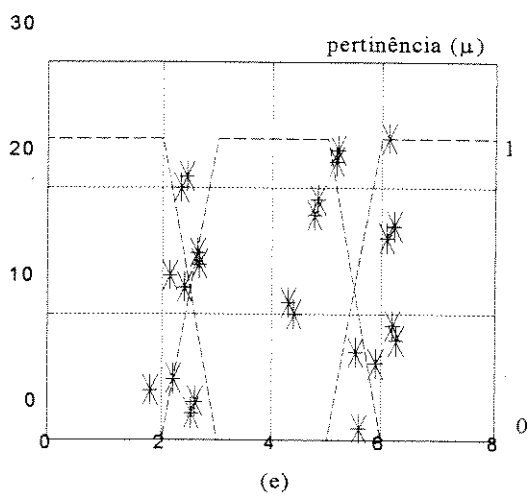
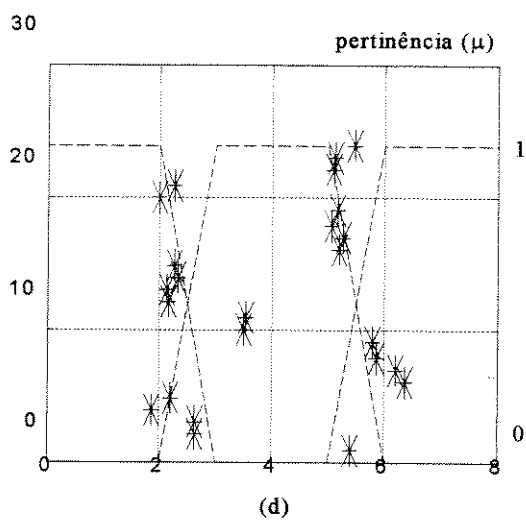
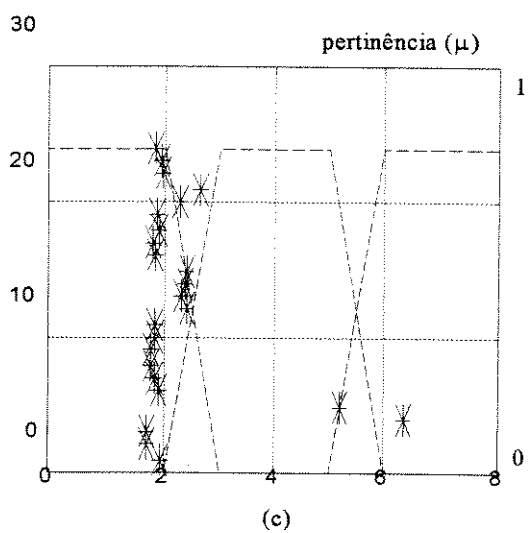
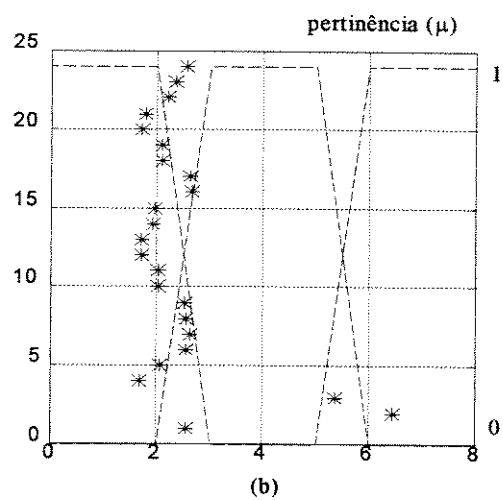
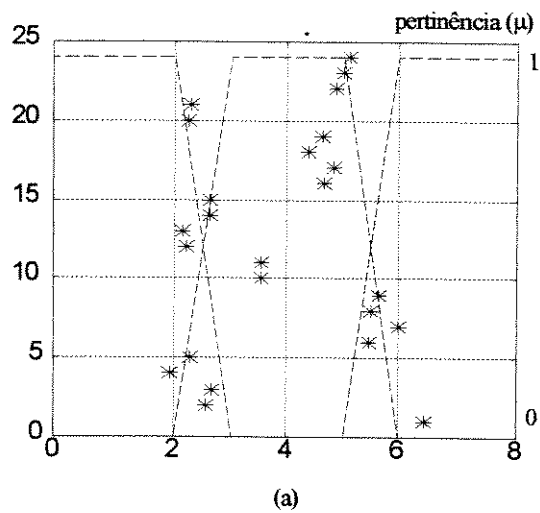


Figura VI-6 Saídas para a técnica Sistema Difuso

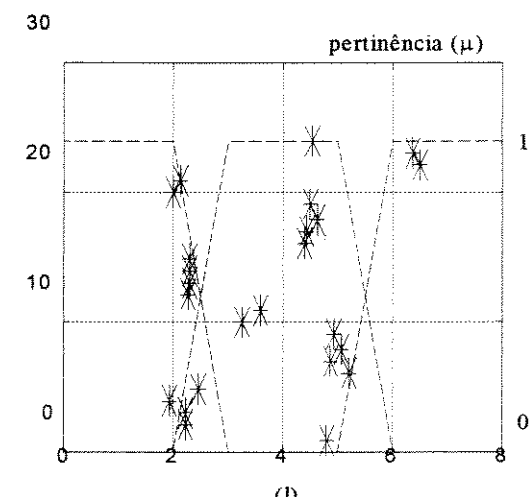
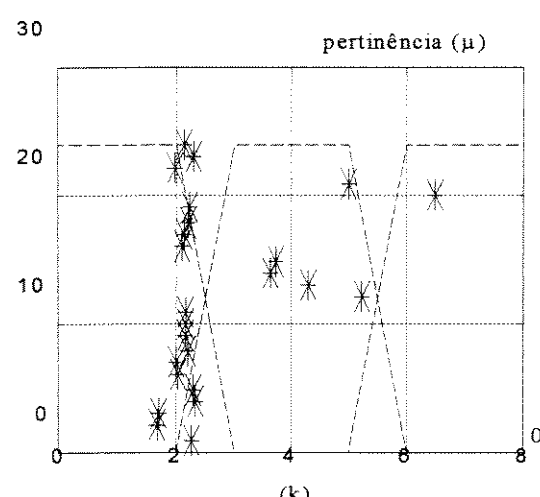
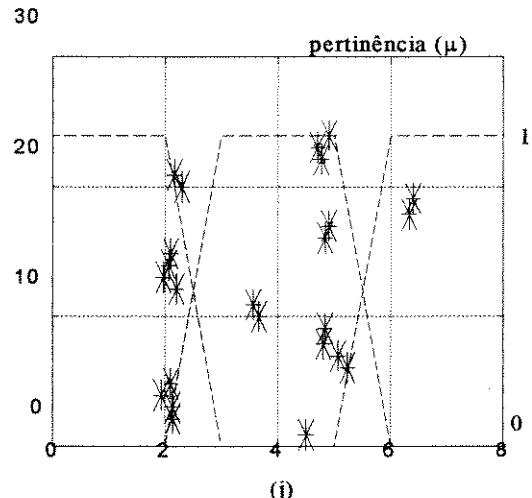
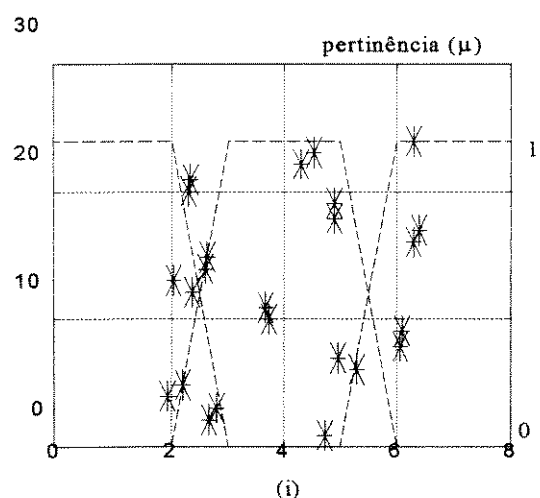
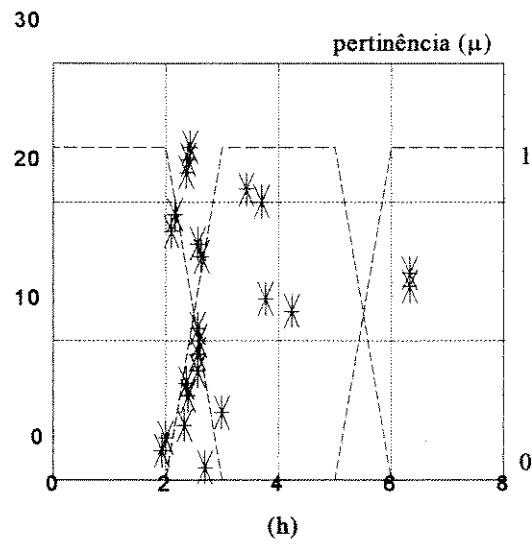
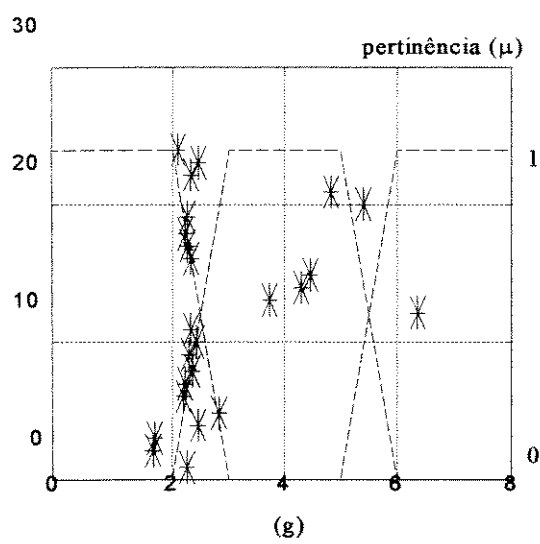


Figura VI-6 Saídas para a técnica Sistema Difuso (continuação)

Ao se tomar o resultado para todas as amostras e combiná-los, a amostra é classificada pela referência que apresentar o maior CDA (centro de área). Com os resultados combinados obtém-se todas as respostas para abertura de chaves devidamente classificadas. Oito FAIs foram classificadas como configurações obtidas a partir da abertura de chaves próximas.

VI.3.3 Resultados obtidos com a aplicação da técnica de Neurônios Difusos

Os resultados obtidos com a técnica baseada em neurônios difusos são apresentados na figura VI.7. No eixo y são apresentadas as amostras testadas e no eixo x o valor médio de saída para o conjunto de amostras repetidas. Também é apresentado nos gráficos a curva de classificação do neurônio.

O índice de classificação de FAIs a 10m de chaves como sendo a configuração obtida a partir da abertura da chave foi maior nesta técnica. Das 11 FAIs com estas características 8 foram assim classificadas.

Nesta técnica não houve confusão entre as configurações decorrentes da abertura de trechos localizados a grandes distâncias como ocorreu na técnica de Sistemas Difusos. Apesar disto houve uma confusão para uma FAI localizada a 10m da chave 30067 (amostra 21) que foi classificada por três referências. Esta amostra representa uma única medição e não cinco como as demais. A referência que representa a configuração mais próxima apresentou uma resposta muito maior do que 1 e portanto não foi considerada. Esta foi a única FAI classificada errada, visto que a classificação de FAIs próximas a chaves como sendo iguais às respostas a estas chaves abertas não são consideradas de todo erradas, uma vez que pode ser facilmente verificada com informação disponível ao operador e por ser um limite inerente à metodologia.

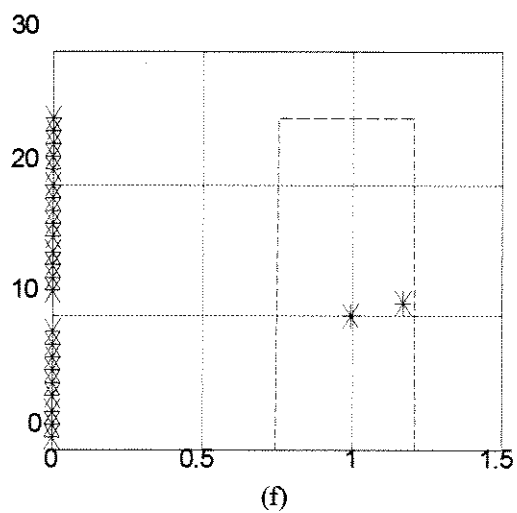
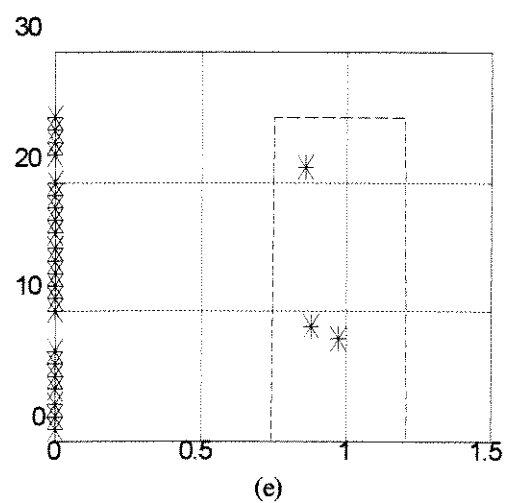
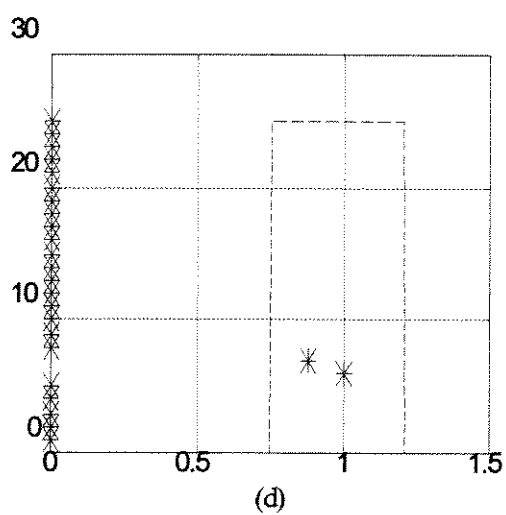
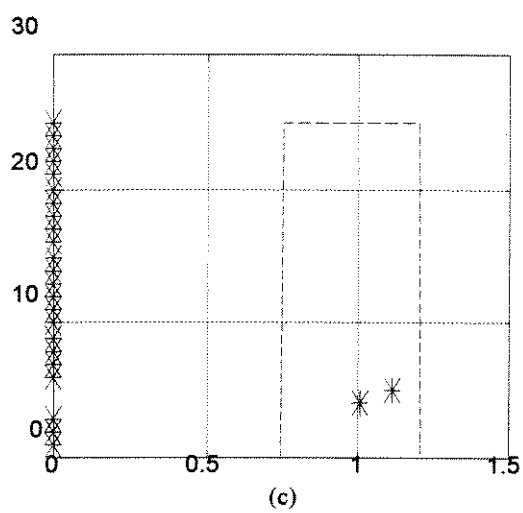
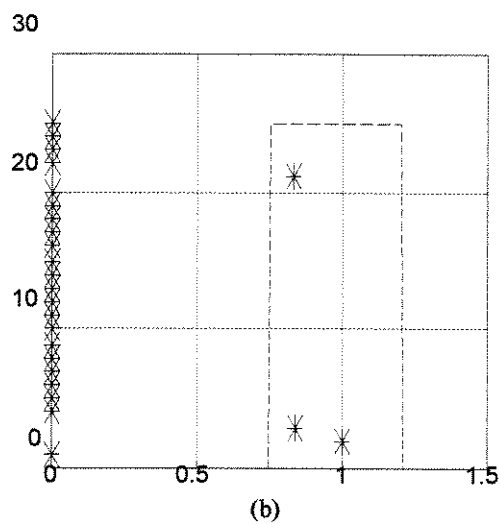
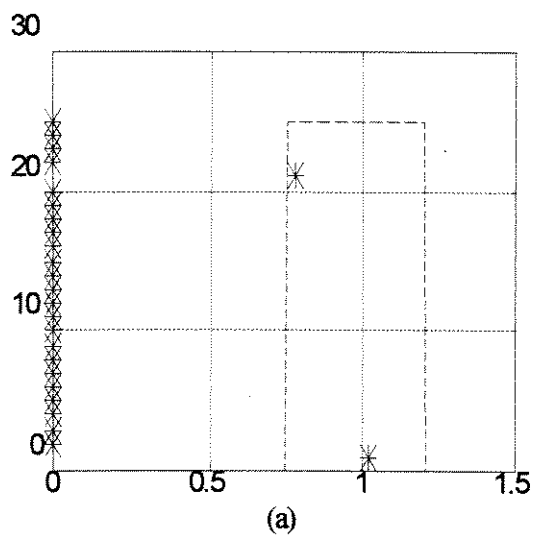


Figura VI-7 Saídas para a técnica Neurônios Difusos

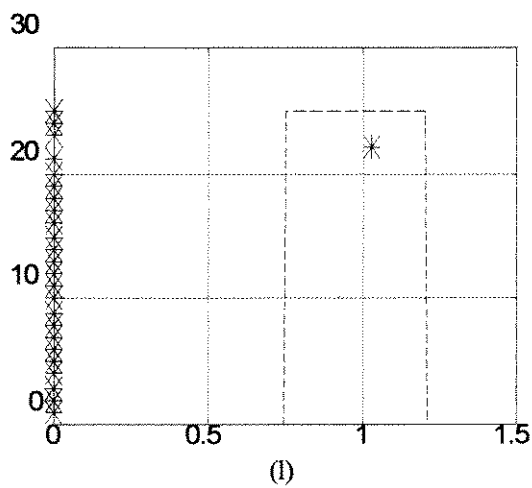
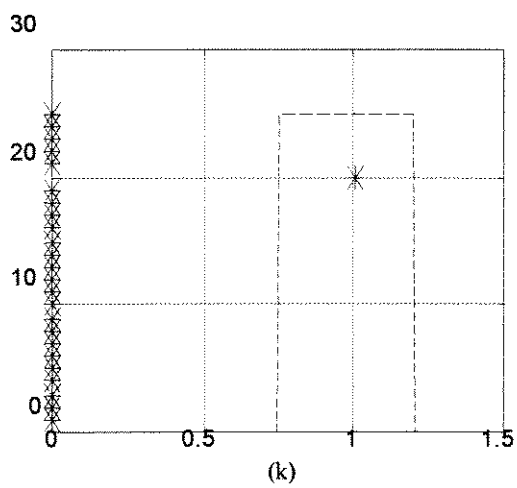
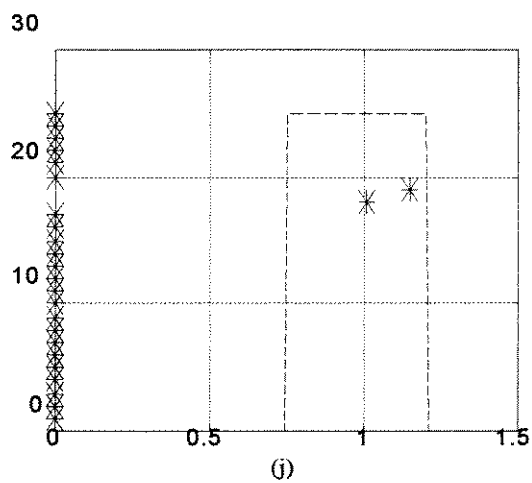
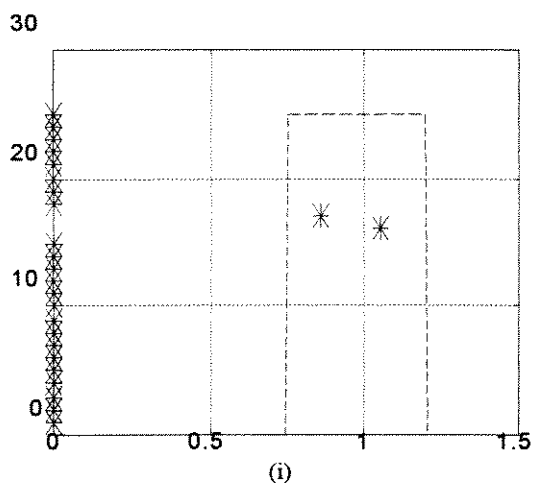
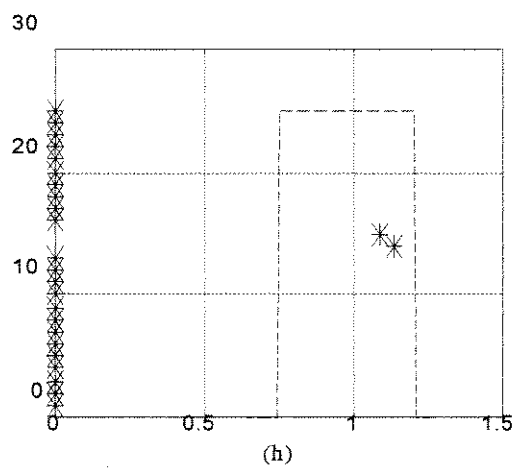
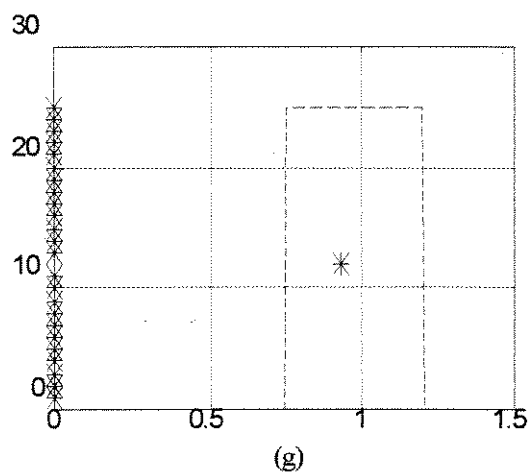


Figura VI-7 Saídas para a técnica Neurônios Difusos (continuação)

Em nenhuma das três técnicas implementadas as referências 7 e 11 apresentaram qualquer tipo de confusão. Estas referências representam configurações muito parecidas, pois as chaves operadas para se obter cada uma destas configurações estão distantes uma da outra apenas 60m e retiram exatamente os mesmos elementos.

As referências 8 e 10 também não se confundem entre si embora estejam a praticamente à mesma distância da subestação. A tabela VI.2 faz um resumo das características destas duas configurações. Estas chaves estão dispostas em pontos distintos do alimentador, com distâncias praticamente idênticas e retiram trechos com características muito semelhantes. Apesar disto as suas respostas são completamente diferentes.

Chave operada	28223	31118
distância	8450	8440
transformadores retirados	21	20
condutores retirados(m)	9970	14730
nós retirados	38	39

Tabela VI-2 Configurações similares

VI.3.4 Estimativa das distâncias dos eventos

As distâncias, dos eventos até a subestação, foram estimadas através da observação das variâncias dos sinais normalizados e filtrados e da observação das derivadas dos mesmos. Os erros envolvidos neste cálculo são grandes e portanto trata-se de uma estimativa e não da determinação da mesma. A curva medida se distancia, em muitos casos, muito lentamente da referência e portanto a determinação do ponto onde esta divergência se inicia (que define a distância da falha) não é uma tarefa fácil. Apesar disto, a simples indicação de uma região já é uma informação razoável para um sistema que hoje não dispõe de nenhum tipo de indicação. As figuras VI.8 a VI.19 apresentam as respostas das várias configurações após filtragem cumulativa e normalização (primeiro e segundo tipos, capítulo III). Observa-se que nem sempre o ponto onde se inicia a divergência é visível. Em cada figura são mostrados dois gráficos. No primeiro é apresentada a

resposta quase completa (4000 pontos com taxa de amostragem de 40ns) e no segundo é feita uma ampliação da parte da resposta em torno do início da divergência e o ponto mais provável do início da falta (avaliação visual). A tabela VI.3 apresenta os erros obtidos na busca da distância dos eventos até a subestação. A primeira busca foi feita de forma visual e a segunda através de algoritmo desenvolvido no capítulo IV. Observa-se que existe uma grande diferença entre os erros de cada método. Os dados considerados como corretos são os apresentados na tabela V.1. Estes dados não levam em conta a existência de catenária nos condutores.

Gráfico número/ identificação	Erro percentual visual	Erro percentual no cálculo	Gráfico número/ identificação	Erro percentual visual	Erro percentual no cálculo
VI.8 (Ch31443)	7.8	1.38	FAI a 10m da Ch31111		1.5
FAI a 10m da Ch31443		1.58	VI.14 (Ch28223)	13.6	18.4
VI.9 (Ch30109)	3.4	5.5	FAI a 10m da Ch28223		10.38
FAI a 10m da Ch30109		0.9	VI.15 (Ch31018)	28.7	3.8
VI.10 (Ch30106)	2.0	4.0	FAI a 10m da Ch31018		30.0
FAI a 10m da Ch30106		4.8	VI.16 (Ch31118)	6.6	27.8
VI.11 (Ch31116)	4.9	2.8	FAI a 10m da Ch31118		15.5
FAI a 10m da Ch31116		0.36	VI.17 (Ch30067)	5.4	20.9
VI.12 (Ch31061)	20.9	1.0	FAI a 10m da Ch30067		10.78
FAI a 10m da Ch31061		10.5	VI.18 (Ch30177)	13.7	14.4
VI.13 (Ch31111)	6.4	15.0	FAI a 10m da Ch30177		23.0

Tabela VI-3 Estimativa das distâncias

VI.3.5 Resumo dos resultados

A seguir apresenta-se um quadro resumo com o resultado das classificações verificadas para o SD, SRA e ND, veja tabela VI.4. Os resultados

finais mostram que as técnicas implementadas apresentaram resultados satisfatórios, estando o índice de acerto acima de 93%. Não é possível afirmar qual das técnicas implementadas apresentou uma melhor desempenho, baseando-se apenas nestes resultados, pois os mesmos estão muito próximos.

Em uma análise mais minuciosa das técnicas, pode-se afirmar que o desempenho do sistema de regras adaptativas foi sem dúvida o melhor. Durante o processo de construção das regras, é necessário que se tenha um conhecimento profundo dos dados a serem classificadas. Apesar disto, o sistema de regras foi implementado de forma simples e sem grande inter-dependência entre elas. O sistema de inferência é encadeado e a busca das regras a serem disparadas é feita de forma sequencial.

No processo de treino dos neurônios não se tem informação do que exatamente está sendo aprendido por estes. A monitoração se resume na observação das suas saídas, ajustando-se pesos para que se obtenha valor desejado. Devido a existência de dispersões entre medidas e de existirem contra exemplos muito parecidos com os próprios exemplos, a convergência torna-se lenta e muitas vezes difícil.

O sistema difuso se apresenta como a técnica mais estruturada, onde todo o raciocínio desenvolvido é lógico e portanto de fácil entendimento. Apesar de ter apresentado o menor grau de acerto, este sistema parece possuir o maior potencial para desenvolvimentos futuros. Um tratamento mais adequado dos dados antes da sua apresentação pode solucionar os problemas apresentados levando a um crescimento do seu desempenho.

Após análise dos dados contidos na tabela, pode-se concluir que o grande problema de classificação se encontra nas falhas nas redondezas da chave conhecida. É importante lembrar aqui que as falhas medidas nos testes de campo só se diferenciam da abertura de chaves pela distância de condutores, uma vez

que as falhas são passivas. Assim, pode-se afirmar que os resultados foram satisfatórios.

	Regras	Regras Adaptativas	Neurônios	Sistema Difuso
12 config.	12	12	12	12
11 FAI a 10m da Chave	4	5	3	5
4 FAI a 70m da Chave	1	4	4	4
6 FAI a 130m da chave	6	6	6	5
267 FAI > 130m da chave	267	266	263	253
TOTAL %	96.66	97.66	96.00	93.0

Tabela VI-4 Resumo dos resultados

Erros médios distâncias	Porcentagem de casos
< 10%	48%
< 20%	82%
< 30%	100%

Tabela VI-5 Resumo dos erros na distância

2

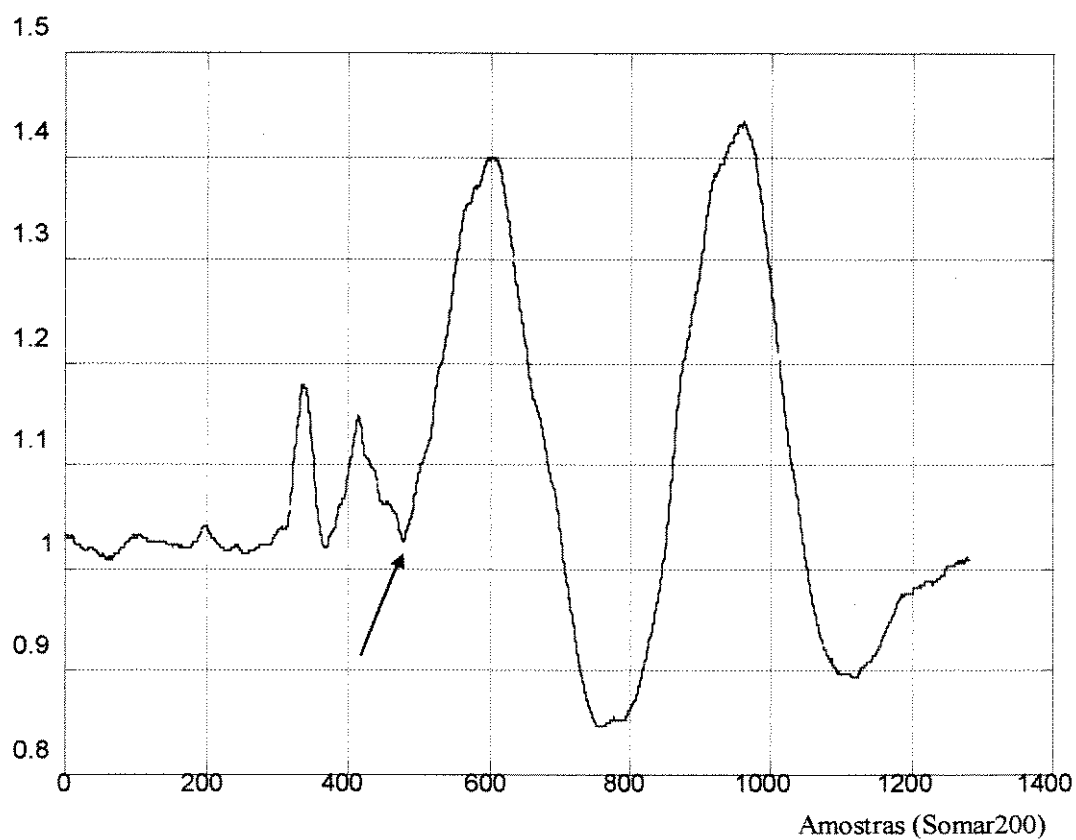
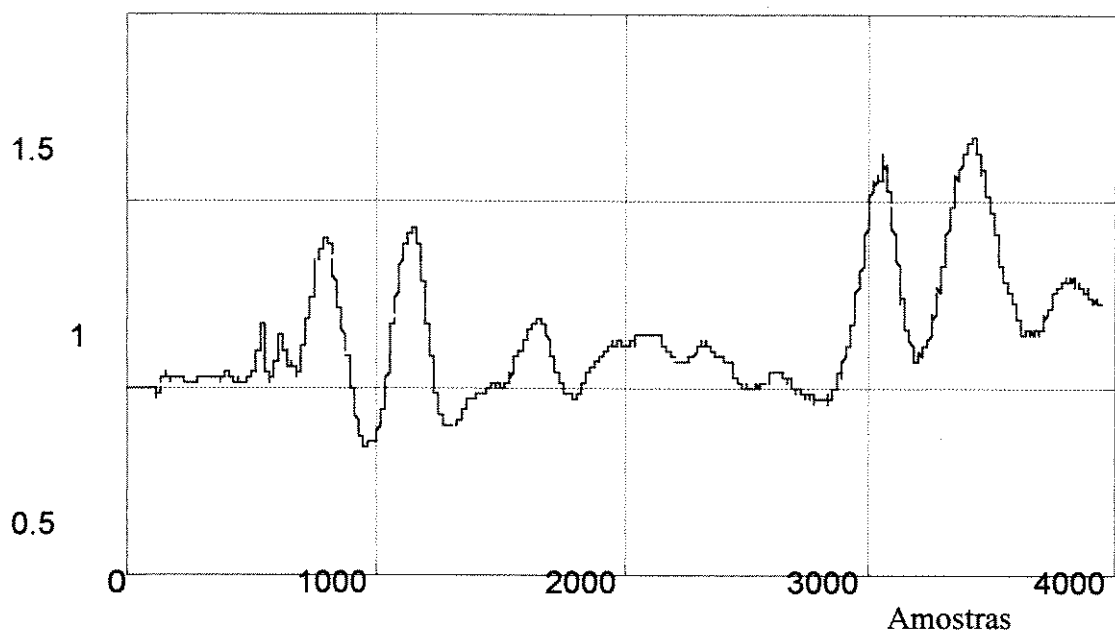


Figura VI-8 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31443

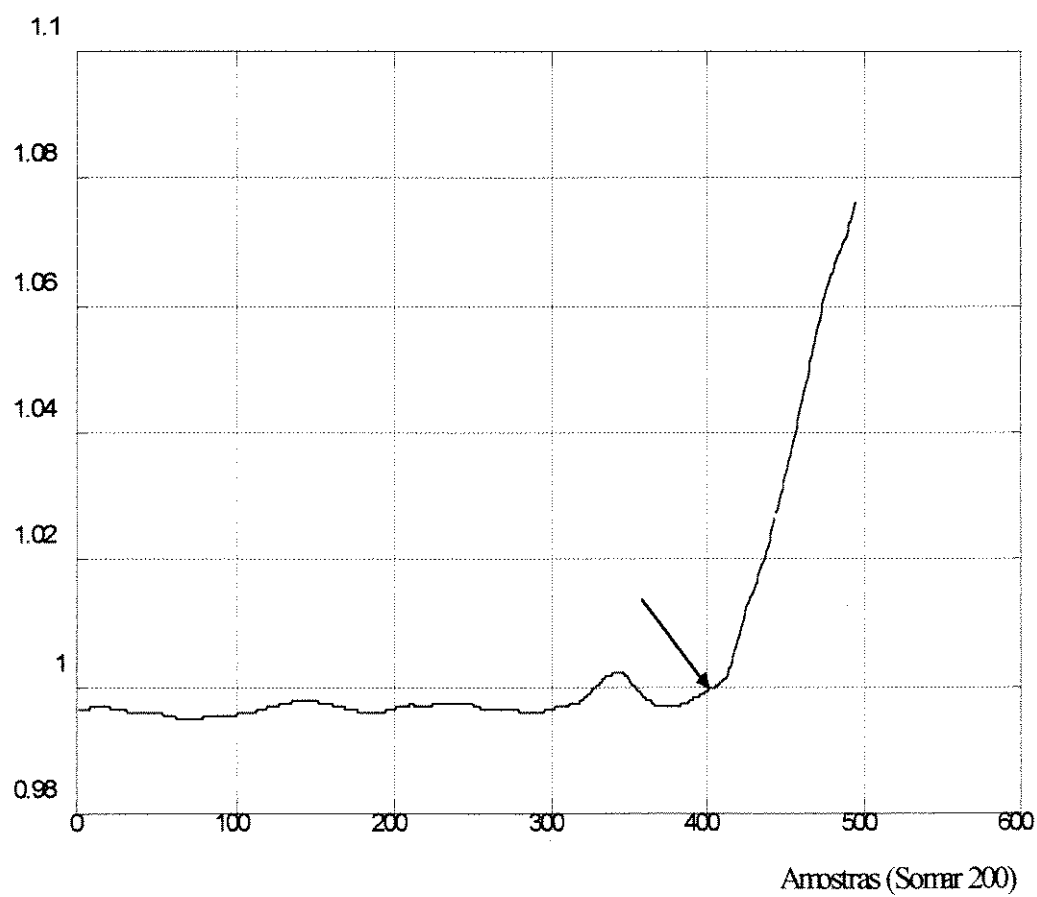
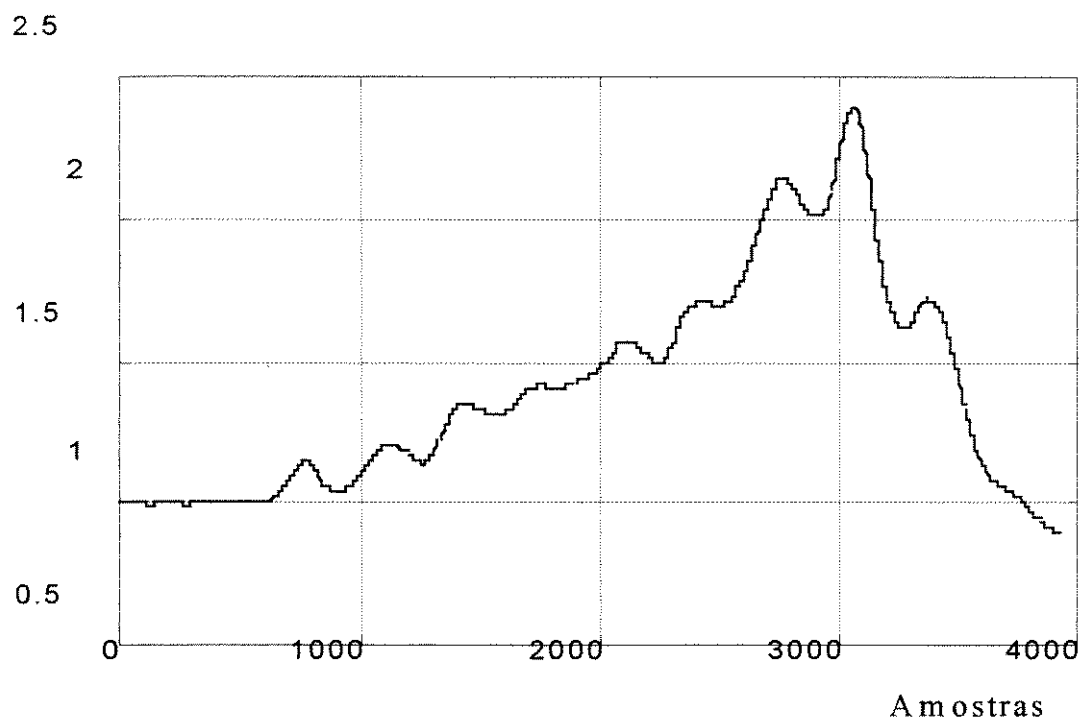


Figura VI-9 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30109

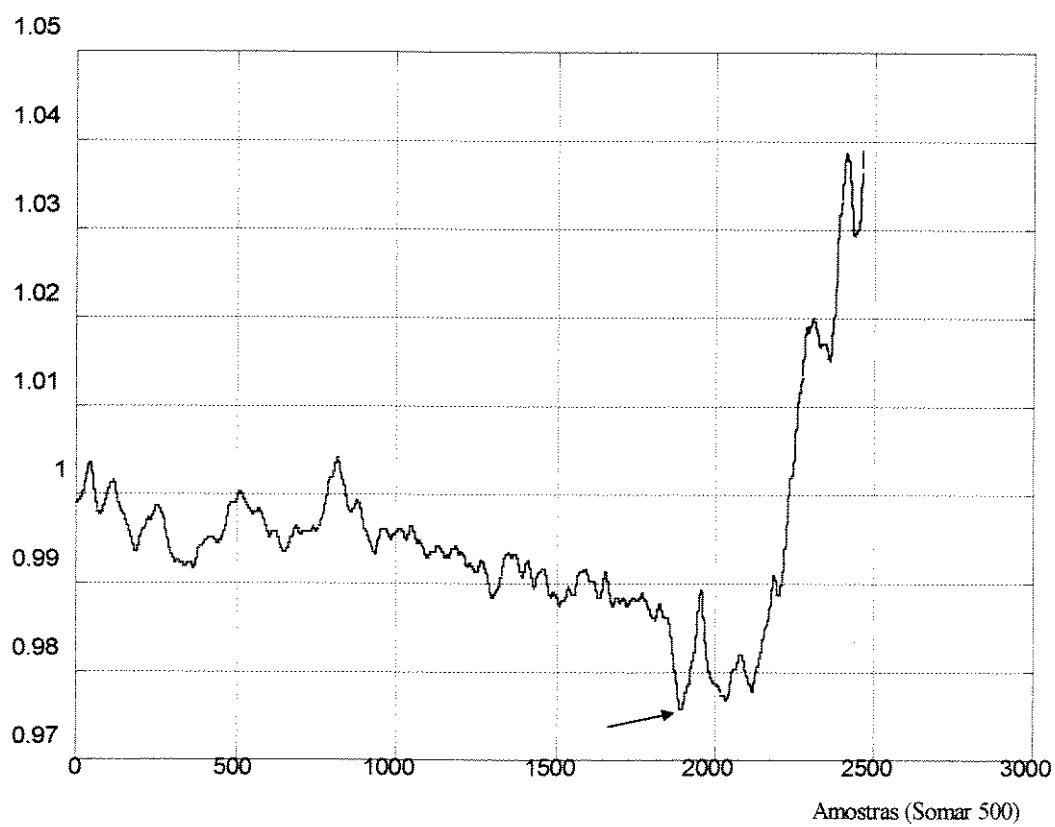
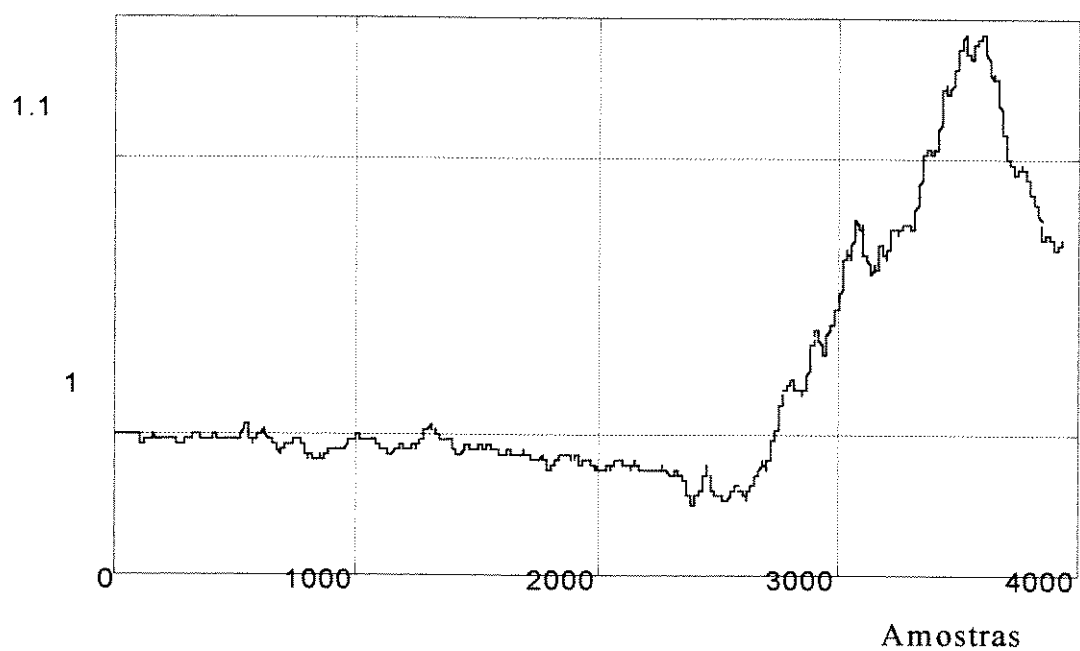


Figura VI-10 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30106

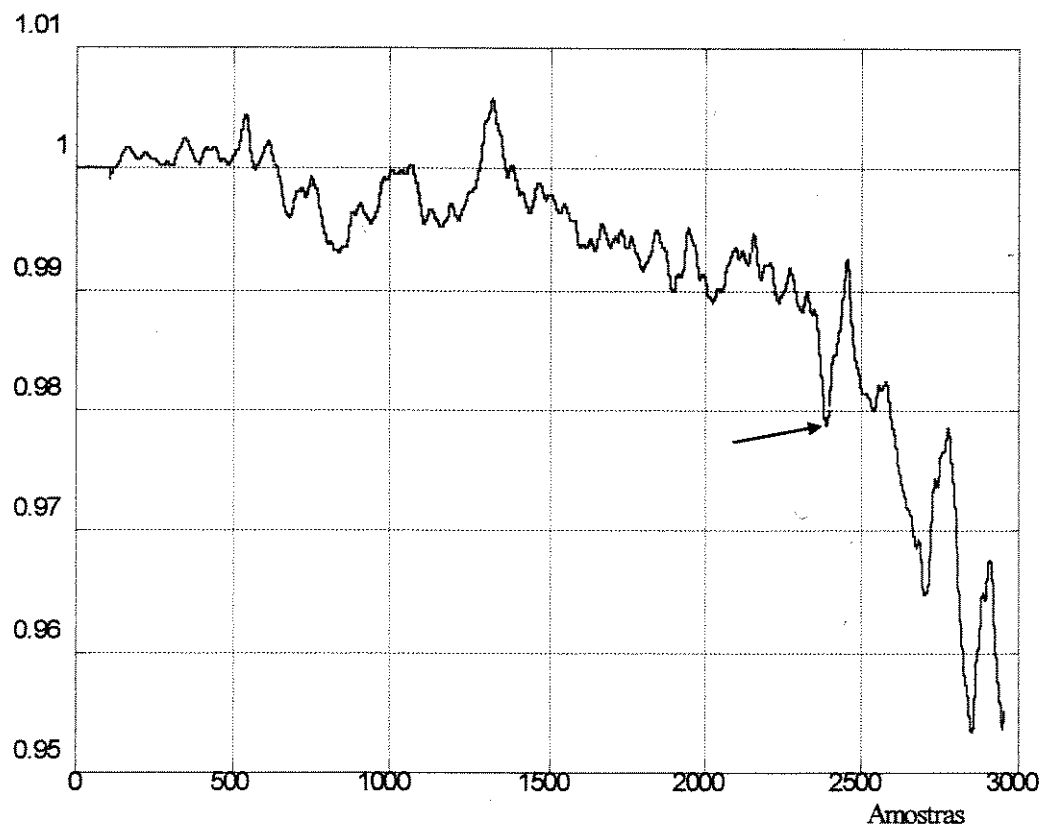
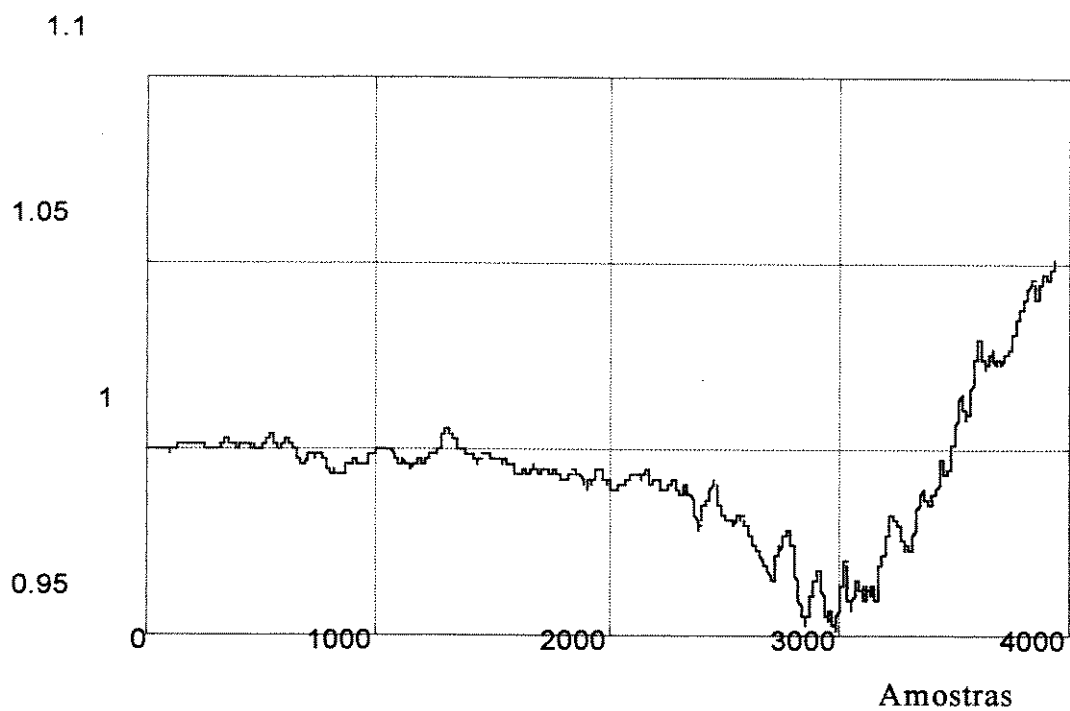


Figura VI-11 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31116

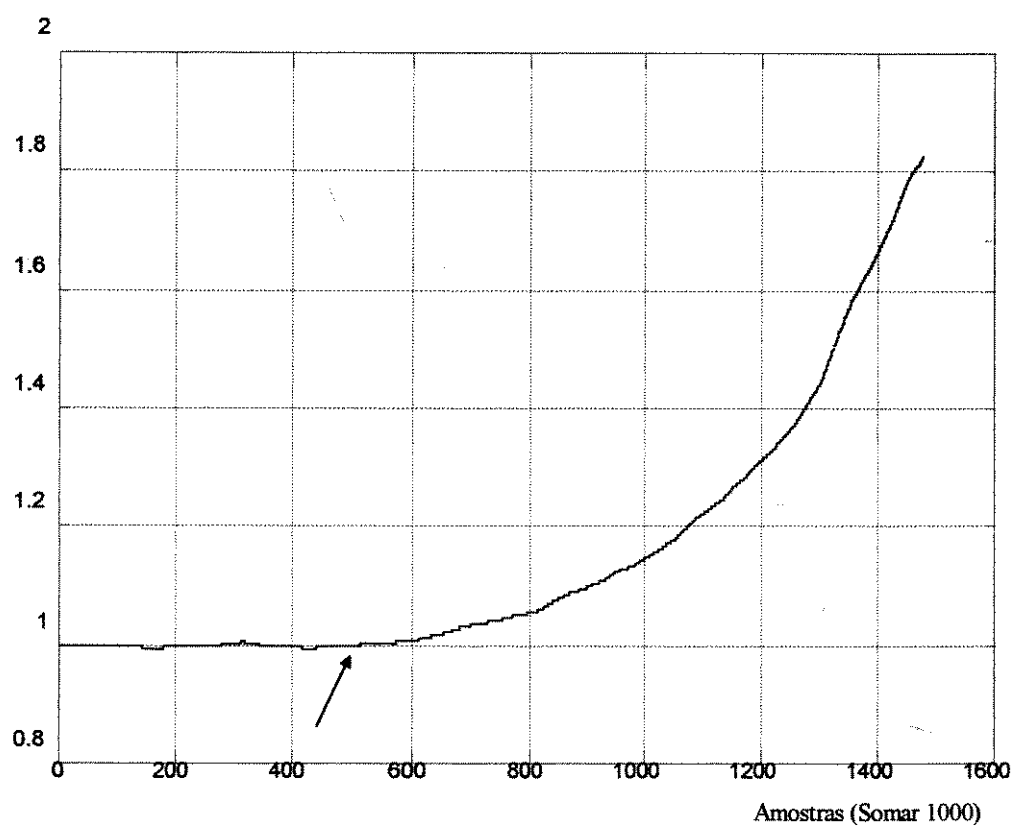
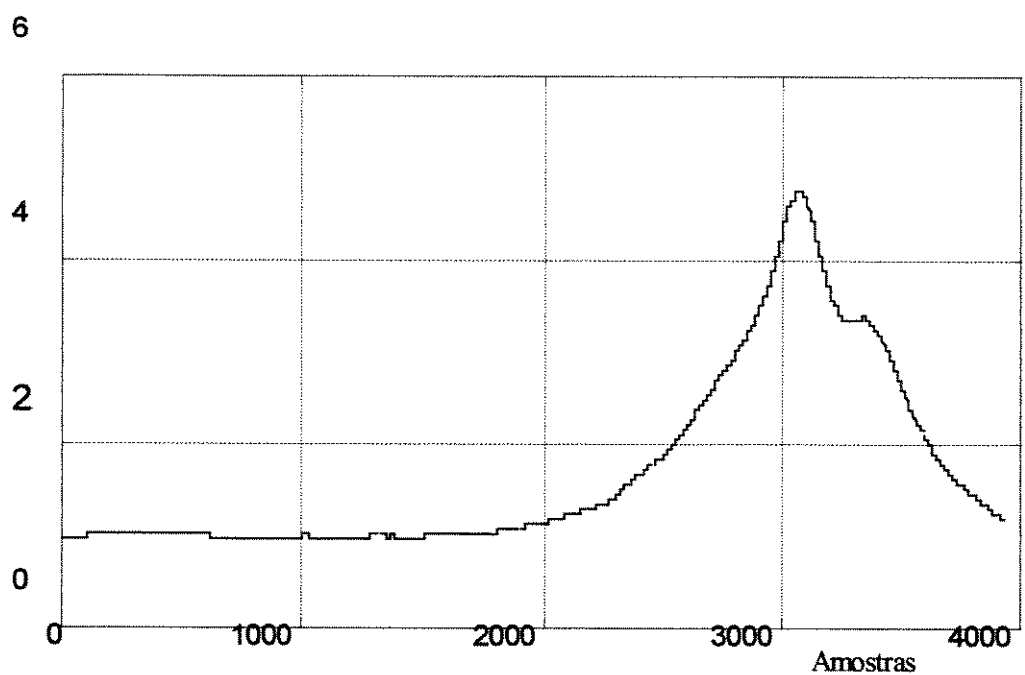


Figura VI-12 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31061

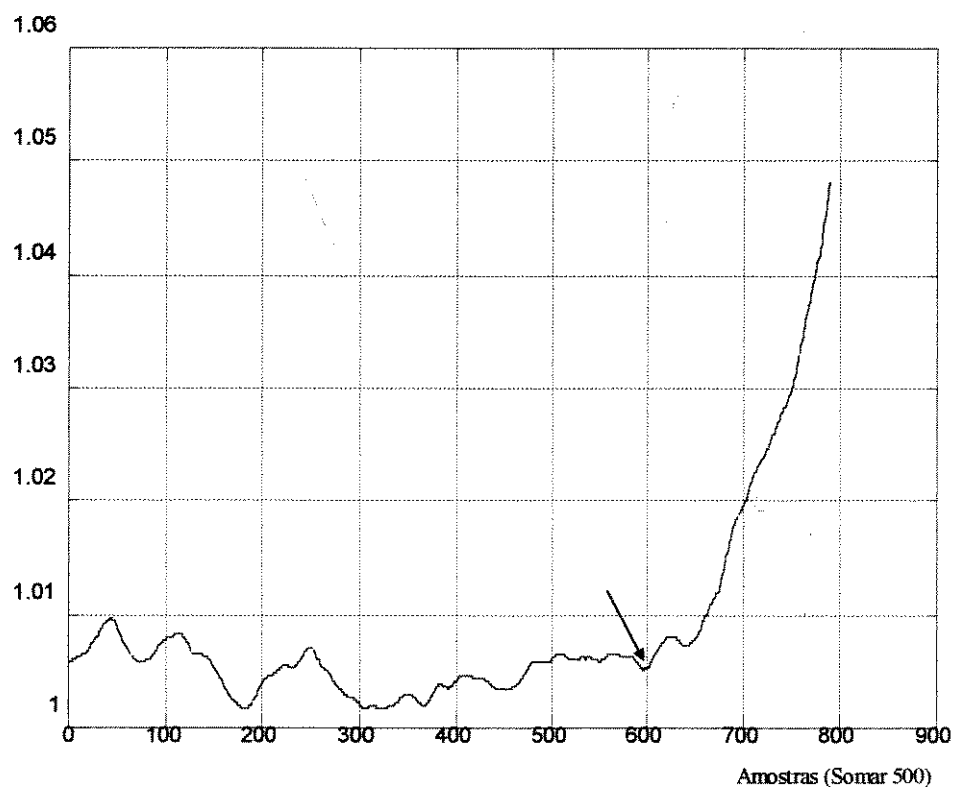
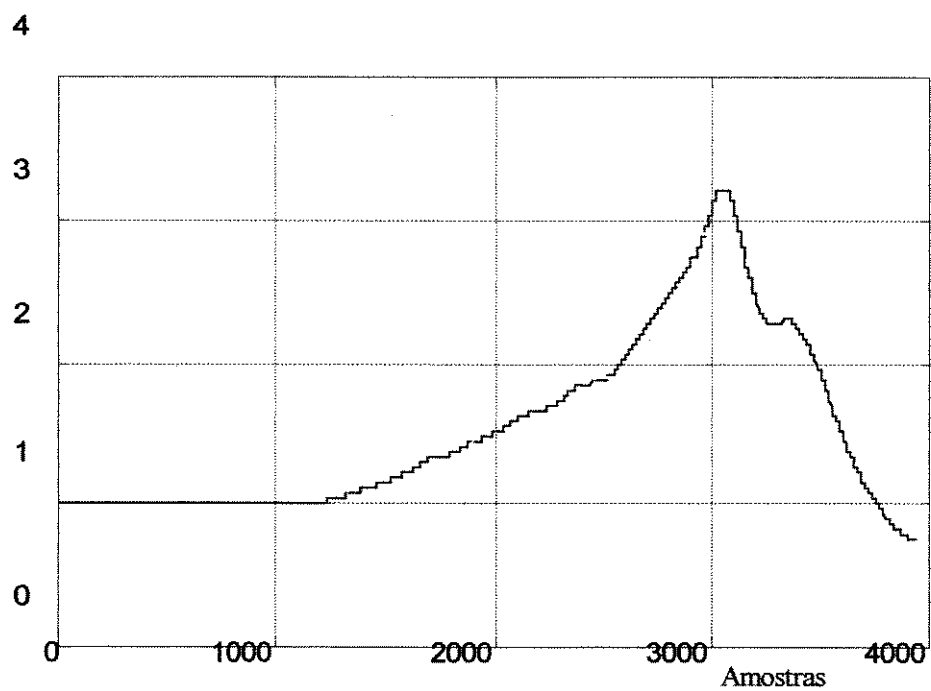
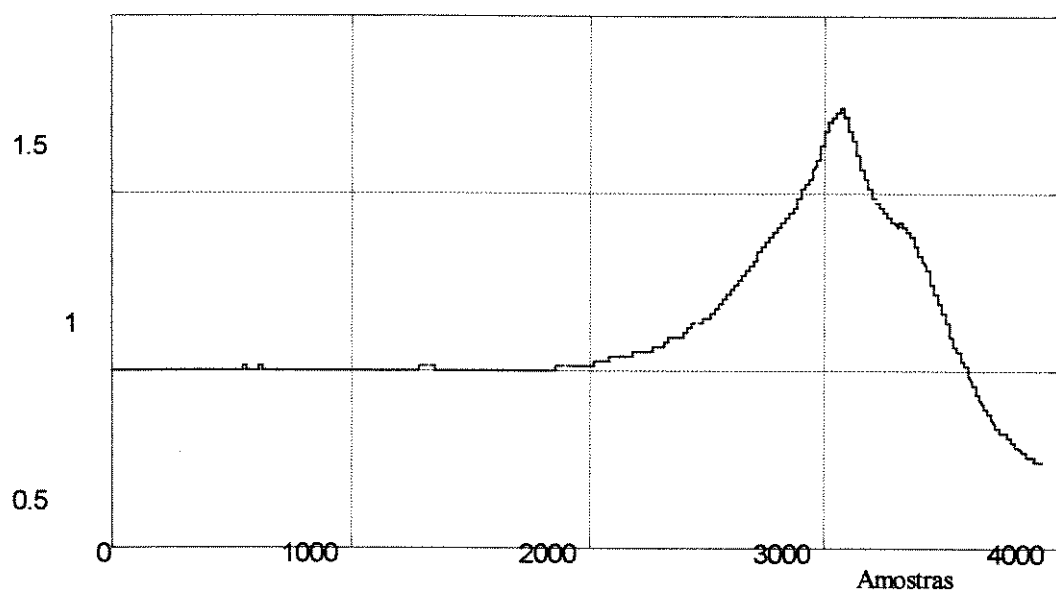


Figura VI-13 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31111

2



1.02

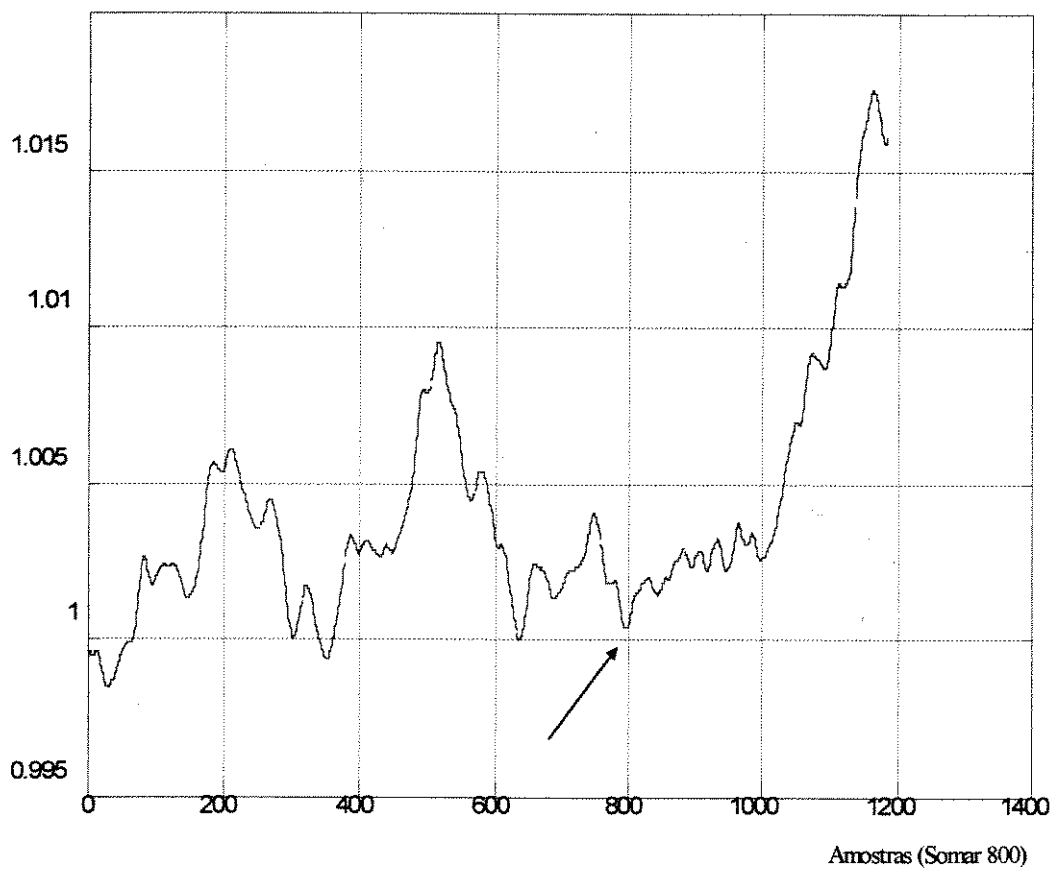


Figura VI-14 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 28223

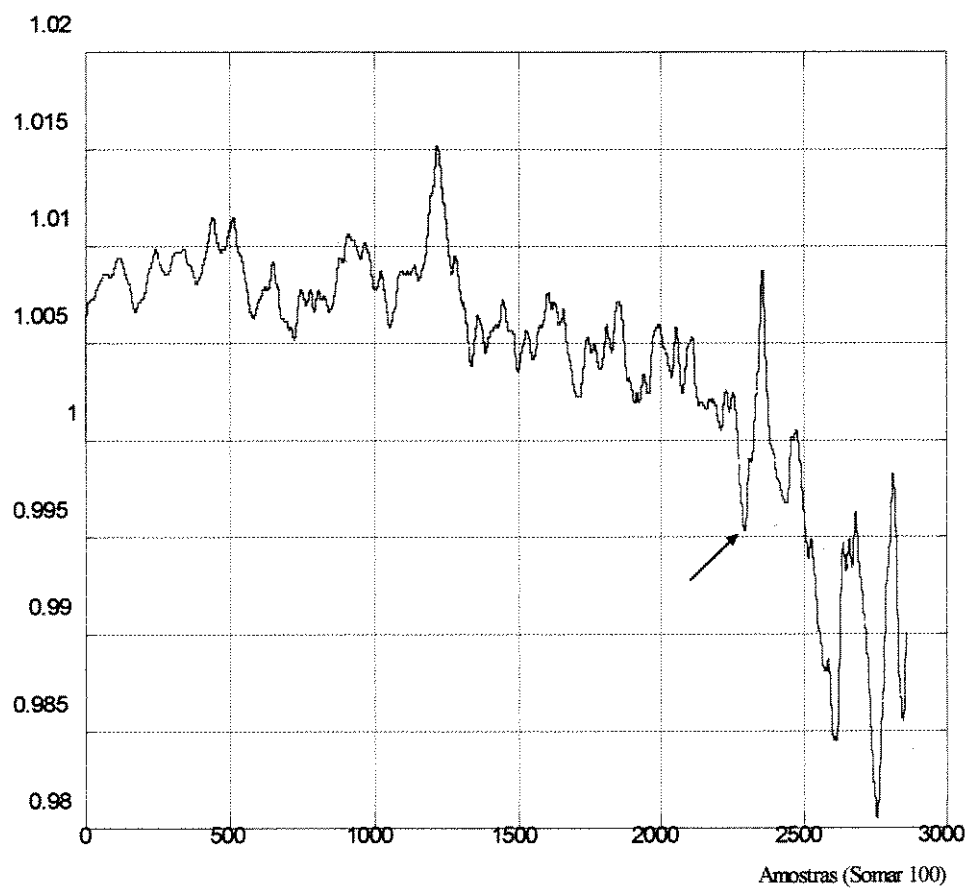
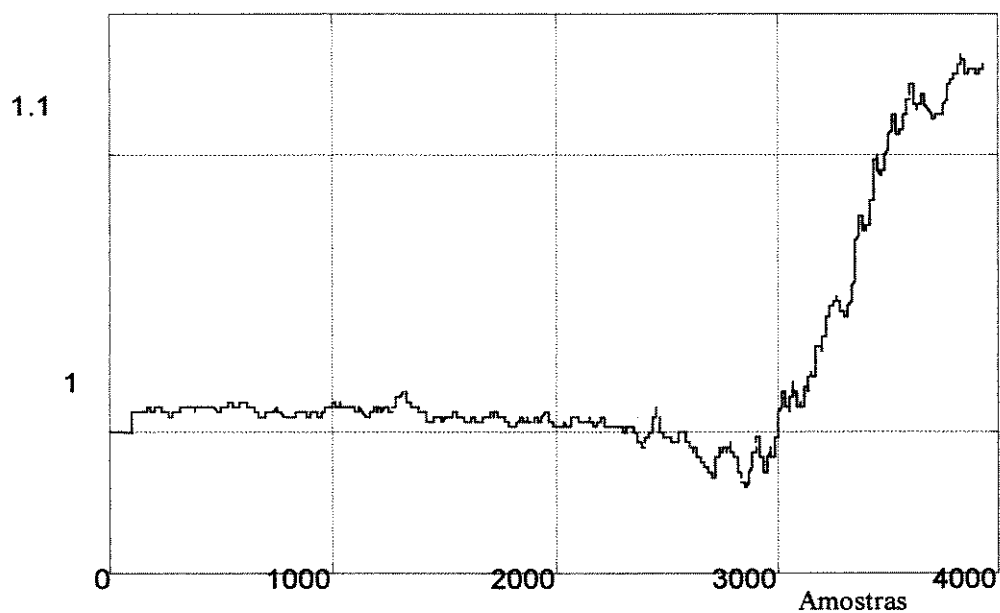


Figura VI-15 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31018

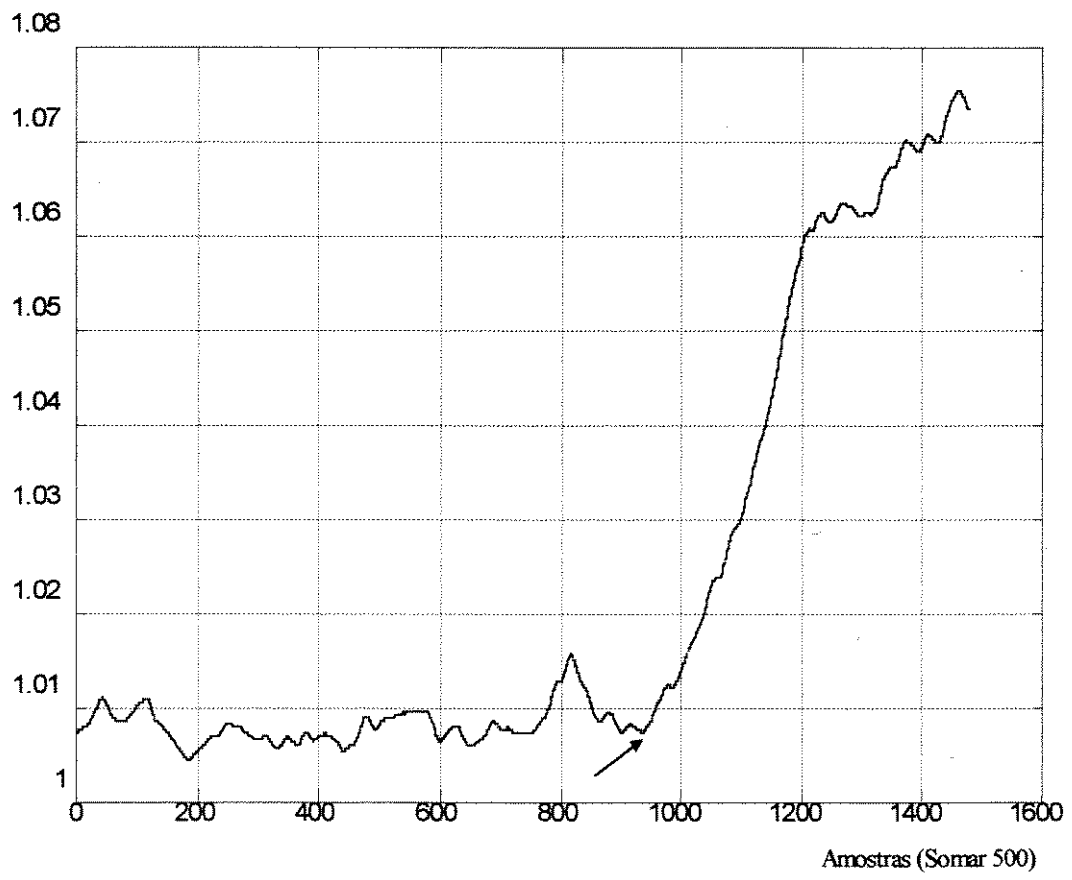
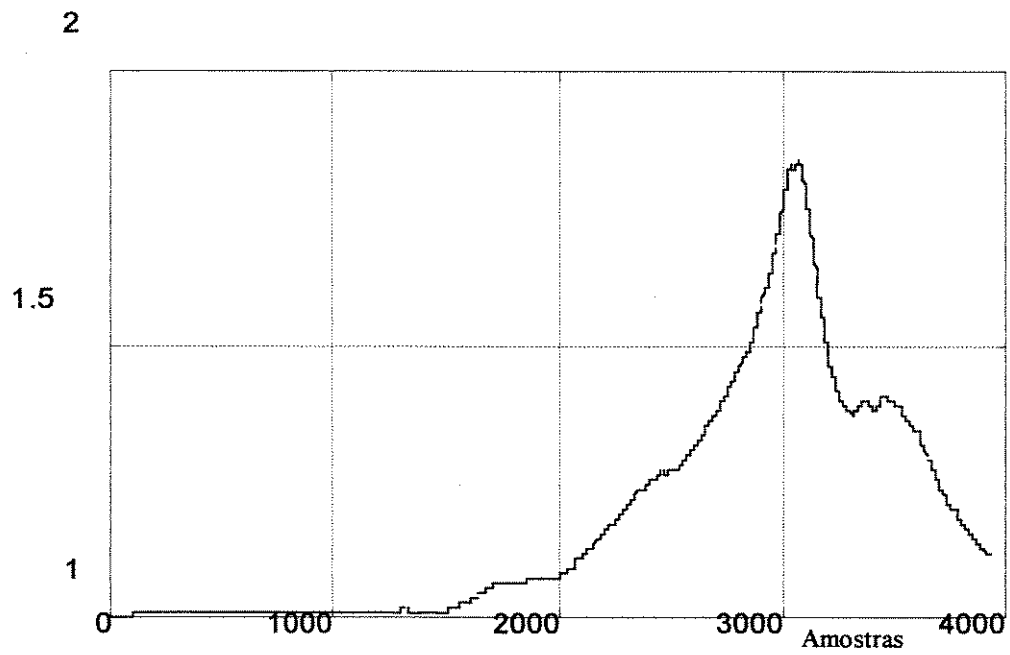
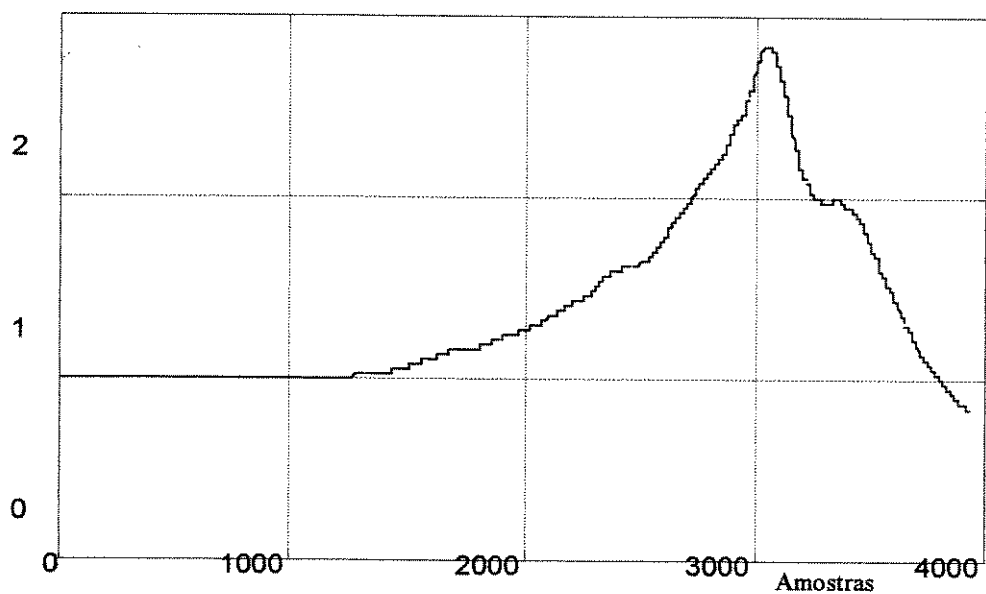


Figura VI-16 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 31118

3



0.26

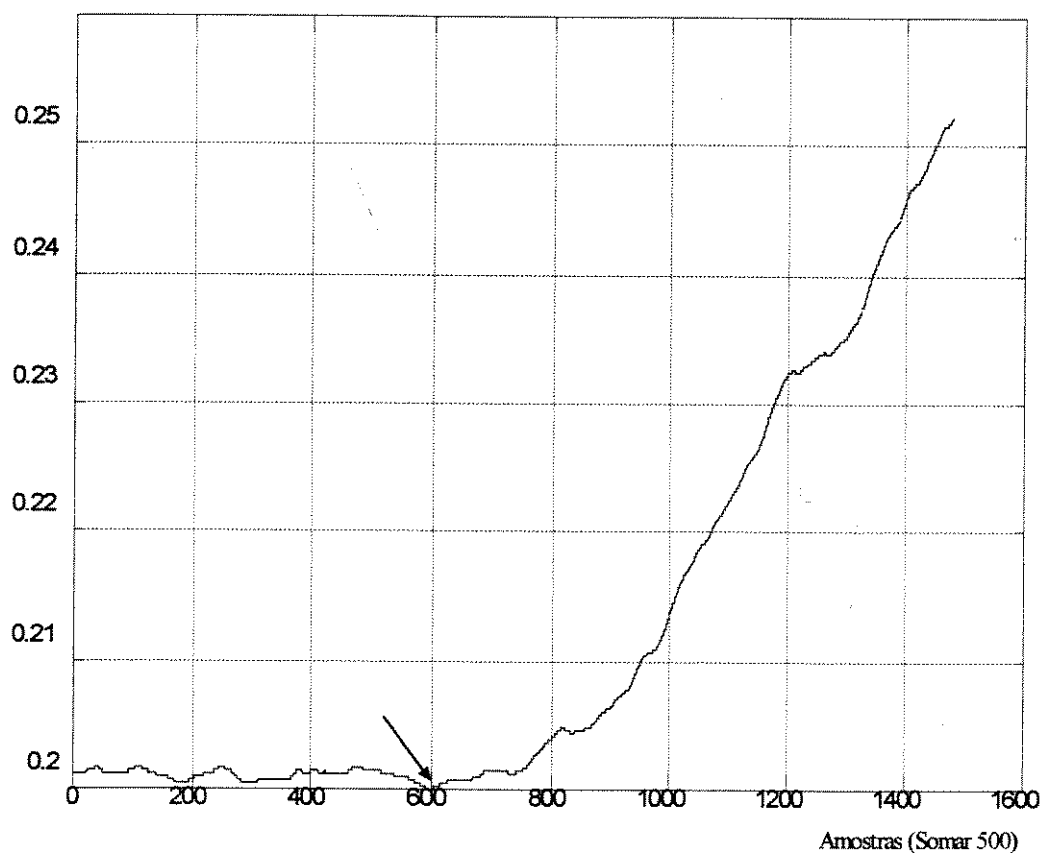


Figura VI-17 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30067

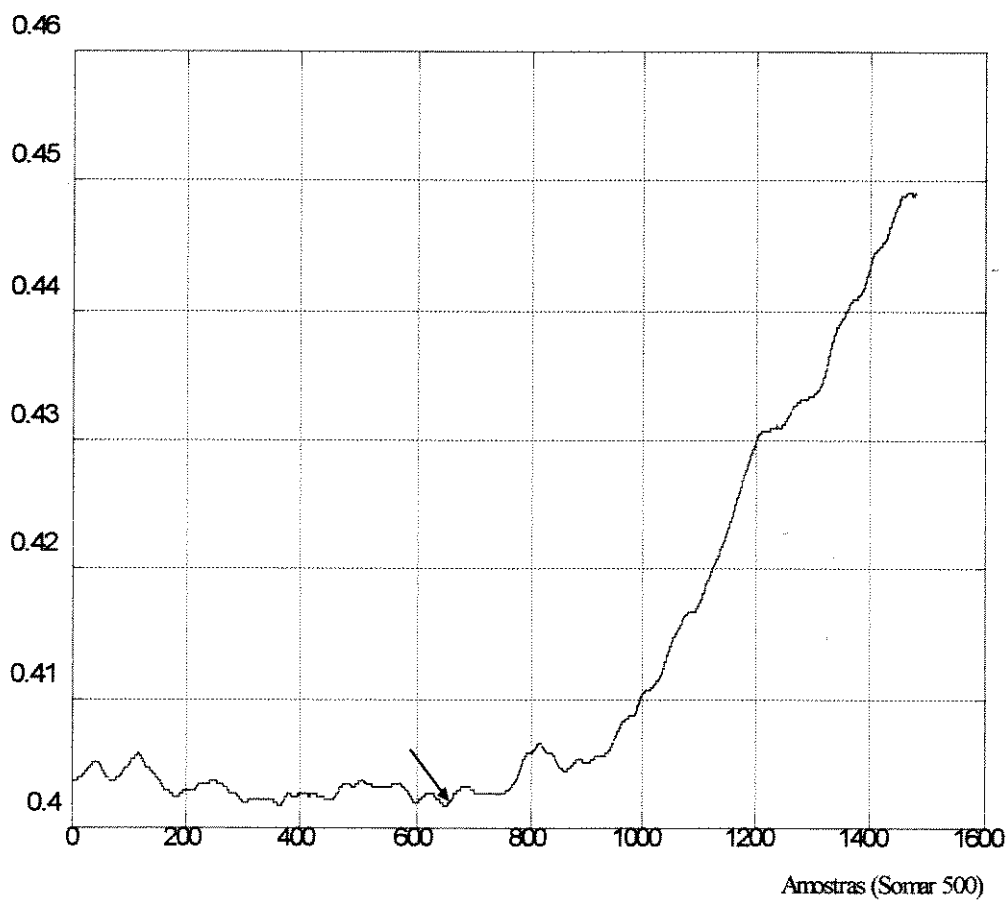
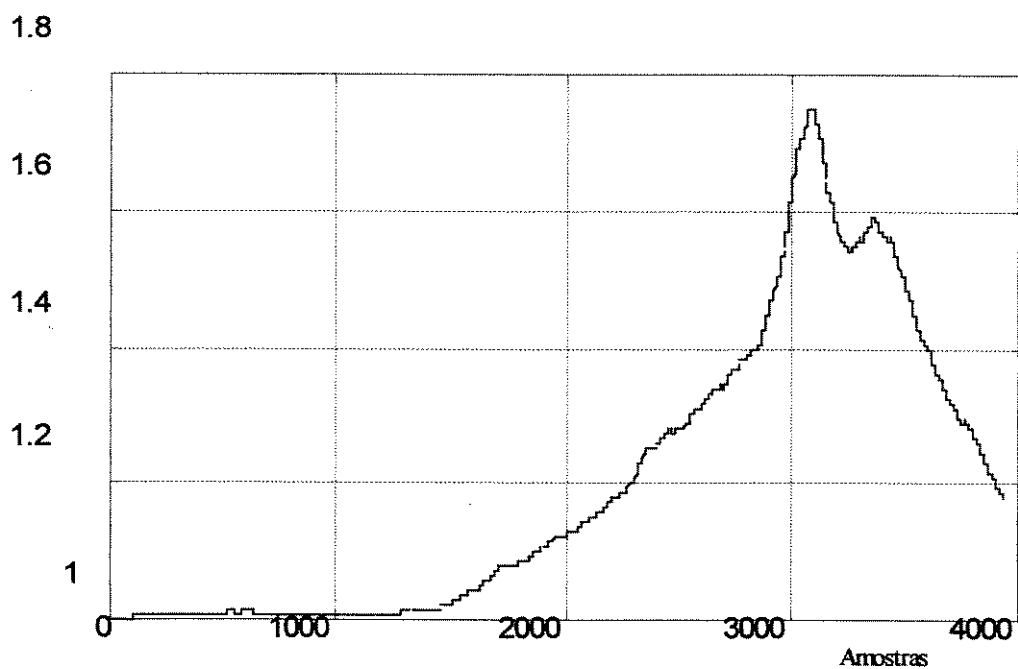


Figura VI-18 Resposta para a configuração obtida a partir da abertura da chave 30177

Capítulo VII

Conclusões

O objetivo desta tese foi o de desenvolver uma nova metodologia de detecção de falhas de alta impedância em redes de distribuição. A metodologia proposta se diferencia das demais apresentadas na literatura na sua filosofia básica. Contrariamente à maioria das técnicas existentes, a metodologia aqui proposta não utiliza de dados de corrente e tensão na determinação da existência de FAI. Estas características têm vantagens para alimentadores onde a poluição harmônica, o desequilíbrio entre fases e as características do retorno de corrente por terra estão presentes. Outra característica importante é a detecção de falhas sem a presença de arco elétrico, ou seja FAI passivas, falhas estas de difícil detecção.

As seguintes conclusões foram obtidas deste trabalho:

- Foram simulados eventos em diversos pontos do alimentador e todos os eventos foram diferenciados (em maior ou menor grau) da resposta padrão através dos índices estabelecidos. Em termos de amplitude de frequências do espectro resultante estas variações giraram entre 2 e 390%. A distância dos eventos até a SE variou de 620m a 14830m. O número de transformadores retirados variou de 1 a 72. O caso mais crítico foi a abertura da chave 30106 que está localizada a 14830m e retirou apenas 4 transformadores.

- Os fatores que mais influenciam a resposta do alimentador na ocorrência de um evento são:
 - Distância do evento até a SE
 - Número de ramificações do alimentador entre o evento e a SE
 - Número de elementos retirados
- O ruído verificado nos testes (linha desenergizada) foi de pequena intensidade e juntamente com o ruído de medição levou a uma dispersão média (entre medidas repetitivas de um mesmo evento) em torno de 0.5% com valor máximo próximo de 2%.
- A falha de alta impedância série passiva funciona exatamente como uma chave aberta (não apresenta corrente de fuga para terra). Portanto, o seu efeito é o de eliminar trechos do alimentador. Alimentadores típicos possuem chaves distribuídas ao longo do tronco e ramais, em pontos conhecidos. As respostas destas chaves foram medidas e colocadas no banco de dados para possibilitar a diferenciação entre FAI e chaves abertas.
- Falhas de alta impedância série passivas que ocorrem muito próximas (em torno de 10m) às chaves são muitas vezes confundidas com a operação de chave. Foi possível identificá-las pelas técnicas propostas da ordem de 27 a 45% das falhas testadas.
- Falhas que ocorrem a uma mesma distância da SE e que retiram trechos com características muito parecidas (no. de nós, no. de transformadores, km de condutores) puderam ser diferenciadas.
- Cada uma das técnicas testadas possui características distintas (Embora os dados de entrada sejam iguais, cada uma das técnicas os utiliza de forma

diferente) no tratamento da informação e fornecem desempenhos diferenciadas. A técnica que utiliza neurônios difusos é a única que não permite o acesso direto à informação. O processamento não permite o acompanhamento passo a passo. Já o sistema difuso é o que possui o processamento mais lógico e encadeado., permitindo o acesso e compreensão a todos os passos.

- O sistema de regras adaptativas significou um melhoramento do sistema de regras. A construção deste, porém, foi precedida de um processo de busca do conhecimento contido nos dados. Foi um trabalho exaustivo de tentativa e erro e, portanto, não é o mais recomendado quando este conhecimento não está disponível.
- A técnica que obteve o melhor desempenho foi a de regras adaptativas seguida pelo sistema de regras, neurônios, e por último sistema difuso. Todas as técnicas apresentaram um desempenho acima das expectativas indicando a viabilidade da implantação das mesmas em um sistema prático.
- Em um sistema prático (com um grande número de chaves) as técnicas mais recomendadas são as baseadas em neurônios e a do sistema difuso. Isto devido à facilidade de implantação dos mesmos. Outra possibilidade seria a utilização de mais de uma técnica no diagnóstico do evento. Este procedimento traria um aumento do desempenho e confiabilidade pelo simples cruzamento de informações.
- Os resultados obtidos mostraram a viabilidade de se detectar falhas de alta impedância em redes de distribuição radiais de pequeno e médio porte.

- Apesar de a estimativa da distância, em alguns casos, ter conduzido a erros muito grandes, esta informação é por si só uma indicação razoável a respeito da localização da falha reduzindo a área de busca.
- A metodologia se mostrou eficiente para o caso estudado indicando um caminho alternativo a ser explorado em maiores detalhes.
- Devido ao tipo de procedimento da técnica de Sistema Difuso, que utiliza funções do tipo máximo e mínimo, houve um maior número de confusões entre eventos do que as demais. Algumas tentativas foram investigadas com o objetivo de melhorar os resultados. Observou-se que, quando os eventos ocorrem em pontos mais distantes, a primeira janela utilizada no cálculo do espectro praticamente não “enxerga” este evento, sobrando apenas para a segunda janela detetá-lo. Porém, a análise é feita considerando ambas as janelas e isto leva a um mascaramento da informação. Uma possível solução seria desprezar-se a primeira janela sempre que a sua utilização puder mascarar informações contidos na segunda janela. Assim, é recomendável que uma análise prévia das janelas seja feita. Outra solução seria escolher janelas menores de forma a não haver superposição das mesmas (por exemplo, uma de 4096 pontos e outra de 1024). Por último, escolher uma janela de observação (janela total) maior, para que o efeito dos eventos mais distantes possam ser percebidos durante mais tempo. A investigação mais profunda destas alternativas foge ao escopo desta tese e fica registrada como sugestão para trabalhos futuros.
- O maior problema no cálculo da distância é a variação do sinal. Quando se busca o início da divergência entre dois sinais (o de referência e o medido) esbarra-se na pequena discrepância entre os sinais. Existe uma faixa onde não é possível dizer se os sinais estão se distanciando ou se se trata apenas da variação normal dos sinais devido a ruídos. Uma solução seria fazer um maior

número de amostragens da resposta para um determinado evento e assim obter uma melhora na relação sinal/ruído. Se, por exemplo, 100 amostras forem feitas ter-se-á uma melhoria dessa de 10 vezes (Jota, 1994).

- Por último, pode-se afirmar que a metodologia proposta é viável e uma pesquisa mais ampla no sentido da sua implantação deve ser feita. Este trabalho marca um ponto de início para vários estudos no sentido de viabilizar a implementação prática desta metodologia. Os pontos que merecem um tratamento especial são:
 - sistema de aquisição de dados robusto,
 - gerador de impulsos compacto e com características mais estáveis,
 - sistema de análise em tempo real,
 - cruzamento de informação com outros tipos de sistemas automáticos,
 - forma de atuação através de alarmes, ou emitindo relatórios,
 - implementação da metodologia propriamente dita de forma a torná-la mais robusta.

Bibliografia

Arrillaga ,J; Bradley, D.A. and Bodger, P.S.; Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 1985

Aucoin, M. and Russell, B.D., "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Componentes", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6, 1596-1606, June 1982

Aucoin, M., "Status of High Impedance Fault Detection", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 3, 638-644, March 1985

Aucoin, M. and Russell, B.D., "Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals Near 60Hz", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 2, 342-348, April 1987

Balser, S.J., Clements, K.A. and Lawrence, D.J., " A Microprocessor-Based Technique for Detection of High Impedance Faults", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986

Barnard, John and Pahwa, Anil, "Determination of the impacts of high impedance faults on protection of power distribution systems using a probabilistic model", *Electric Power Research*, 28, 11-18, April 1993

Burke, J.J. and Lawrence, D.J., "Characteristics of Fault Currents on Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 1, 1-6, January 1984

Calhoun, H., Bishop, M.T., Eichler, C.H. and Lee, R.E., "Development and Testing of an Electro-Mechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6, 1643-1650, June 1982

Carr, J., "Detection of High Impedance Faults on Multi-Grounded Primary Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 4, 2008-2016, April 1981

Christie, R.D., Zadehgoi, H. and Habib, M.M., "High Impedance Fault Detection in Low Voltage Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, 1829-1836, October 1993

Christopoulos, C., Thomas, D.W.P., Wright, A., "Scheme, based on Travelling-waves, for the protection of Major Transmission Lines", *IEE Proceedings-C*, Vol. 135, No. 1, 63-73, January 1988

Cipoli J.A., Engenharia de Distribuição, QualityMark Editora, 1993

Doebelin E.O., System Modeling and Response, John Wiley & Sons, Inc., 1980

Dumont, C.S.; Fonseca, J.O.S.; Cenachi, J.G.D.; Bueno, A.F.M. e Café, F.F.; Relatório do Grupo de Trabalho - Proteção de Faltas para Terra, CEMIG, 1982

Dunki-Jacobs, J.R., "The Effects of Arcing Ground Faults on Low-Voltage System Design", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-8, No. 3, May/June 1972

Ebron, S., Lubkeman, D.L. and White, M., "A Neural Network Approach to the Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, 905-914, April 1990

Elmore, W.A., "Application Considerations of CGR Broken Conductor Detection Relay", RPL 81-1, May 1981

El-Hami, M., Lai, L.L., Daruvala, D.J. and Johns, A.T., "A New Travelling-wave Based Scheme for Fault Detection on Overhead Power Distribution Feeders", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, 1825-1833, October 1992

Gomide, F.A.C. and Gudwin, R.R., "Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy", material didático da disciplina sobre Lógica Fuzzy ministrada pelo Prof. Fernando Gomide

Girgis, A.A., Chang, W. and Makram, E.B., "Analysis of High Impedance Fault Generated Signals Using a Kalman Filtering Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, 1714-1724, November 1990

Greenwood, A., Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1980

Hsu, Y.Y., Chien, Lu, F.C., Chien, Y., Lin, J.T., Liu, J.P., Yo, H.S. and Kuo, R.T., "An Expert System for Locating Distribution System Fault", *IEEE/PES 1990 Summer Meeting*, Minneapolis, Minnesota, 366-372, 1990

Huang, C.L., Chu, H.Y. and Chen, M.T., "Algorithm Comparison for High Impedance Fault Detection Based on Staged Fault Test", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, 1427-1435, October 1988

Jeerings, D.I. and Linders, J.R., "Ground Resistance-Revisited", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, 949-956, April 1989

Jeerings, D.I. and Linders, J.R., "A Practical Protective Relay for Down-Conductor Faults", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, April 1991

Johnson, W.C., Transmission Lines and Networks, McGraw-Hill Book Company, 1988

Johns, A.T. and Aggarwal, P., "New Approach to Power Line Protection Based upon the Detection of Fault Induced High Frequency Signals", *IEE Proceedings-C*, Vol. 137, No. 4, July 1990

Johns, A.T., Lai, L.L., El-Hami, M. and Daruvala, D.J., "New Approach to Directional Fault Location for Overhead Power distribution Feeders", *IEE Proceedings-C*, Vol. 138, No. 4, July 1991

Jota, F.G., Memorial do concurso para Professor Titular do Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG, 1994

Kim, C. J. and Russell, B.D., "Harmonic Behavior during Arcing Faults on Power Distribution Feeders", *Electric Power Research*, 14, 219-225, June 1988

Kim, C.J., Russell, B.D. and Watson, K., "A Parameter-Based Process for Selecting High Impedance Fault Detection Techniques using Decision Making Incomplete Knowledge", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, 1314-1320, July 1990

Kim, C.J. and Russell, B.D., "A Learning Method for use in Intelligent Computer Relays For High Impedance Faults", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 1, January 1991

Kim, C.J., Russell, B.D., "High-impedance fault detection system using an adaptative element model", *IEE Proceedings-C*, Vol. 140, No. 2, 153-159, March 1993

Kosko, B., Neural Networks and Fuzzy Systems - A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, Prentice Hall, 1991

Kwon, W.H., Lee, G.W., Park, Y.M., Yoon, M.C. and Yoo, M.H., "High Impedance Fault Detection Utilizing Incremental Variance of Normalized Even Order Harmonic Power", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, 557-564, April 1991

Lee, R.E. and Bishop, M.T., "A Comparison of Measured High Impedance Fault Data to Digital Computer Modeling Results", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No. 10, 2754-2758, October 1985

Lee, R.E. and Bishop, M.T., "Performance Testing of the Ratio Ground Relay on a Four-Wire Distribution Feeder", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 9 2943-2949, September 1983

Lee, M., Lee, S.Y. and Park, C.H., "Neuro-Fuzzy Identification Model of Linear Dynamic Systems", *Proceedings of the 3rd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks*, Japan, 485-488, July 17-22 1992

Marti, J.R. and Dommel, H.W.; "Line Model for Lightning Studies", Canadian Electrical Association, March 1989

Meliopoulos, A.P. and Moharam, M.G., "Transient Analysis of Grounding Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 2, 389-397, February 1983

Michel H. e Jota, F.G., "Sistema Difuso para sintonia Automática de controladores Industriais", 2o. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Setembro de 1995, Curitiba, PR, Brasil.

Montgomery, D.C., Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, 1991

Naidu, M.S. and Kamaraju, V., High Voltage Engineering, TATA McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1990

Narendra, K.S. and Parthasarathy, K., "Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.1, No. 1, 4-27, March 1990

Pansini, A.J., Electrical Distribution Engineering, McGraw-Hill International Editions, 1986

Papoulis. A.; Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill Kogakusha, LTD. 1965.

Patrick, P., Inteligência Artificial, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. - LTC 1988

Patterson Ron, "Signatures and Software Find High-Impedance Faults", *IEEE Computer Applications in Power*, 12-15, July 1995

Patterson, D.W., Introduction to Artificial Intelligence & Expert Systems, Prentice-Hall, Inc., 1990

Philip C. Jackson, Jr., Introduction to Artificial Intelligence, Dover Publications, Inc., New York, 1985

Pedrycz, W., Fuzzy Control and Fuzzy Systems, John Wiley & Sons Inc., 1992

Rich, E., Inteligência Artificial, McGraw-Hill, 1988

Russell, B.D., Chinchali, R.P. and Kim, C.J., "Behaviour of Low Frequency Spectra During Arcing Fault and Switching Events", ", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-3, No. 4, 1485-1492, October 1988a

Russell, B.D., Mehta, K. and Chinchali, R.P., "An Arcing Fault Detection Technique Using Low Frequency Current Componentes- Performance Evaluation Using Recorded Field Data", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-3, No. 4, 1493-1500, October 1988b

Russell, B.D. and Chinchali, R.P., "A Digital Signal Processing Algorithm for Detecting Arcing Faults on Power Distribution Feeders", ", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-4, No. 1, 132-140, January 1989

Silva, P.R.; Takarashi, R.H.C.; Amaral, L.S.; Seixas, P.F.; Filho, C.S.P. ; "Localização de Faltas em SEP utilizando FFT". *The First International Conference on Power Distribution* , 1990, vol.II, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Silva, P.R.; "Técnica Alternativa para Detecção de Faltas de Alta Impedância", dissertação de mestrado, CPGE-UFMG, março de 1992.

Silva, P.R., Paulino, J.O.; "Técnica Alternativa para Detecção de Falhas de Alta Impedância", *XI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, Setembro de 1992, Blumenau, SC, Brasil.

Silva, P.R., Santos Jr., A., Boaventura, W.C.; Miranda, G.C.; Scott, J.A.; "Impulsive Response Analysis of a Real Feeder for High Impedance Fault Detection" - 1994, *IEEE/PES Transmission and Distribution and Exposition*, April 10-15, 1994, Chicago, Illinois, USA.

Silva, P.R., Santos Jr., A., Jota, F.G., "Técnica Alternativa para Detecção de Falhas de Alta Impedância - Resultados Experimentais", *XI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, Outubro de 1994, Recife, PE, Brasil.

Silva, P.R. Santos Jr., A., Jota, F.G.; "An Intelligent System for Automatic Detection of High Impedance Faults in Electrical Distribution Systems", *38th MIDWEST Symposium on Circuits and Systems*, Agosto de 1995, Rio de Janeiro, Brasil.

Silva, P.R., Santos Jr., A., Jota, F.G.; "Sistema Automático de Supervisão de Redes de Distribuição Radiais", *2o. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Setembro de 1995, Curitiba, PR, Brasil.

Stevenson Jr., W.D., Elementos de Análise de Sistemas de Potência, McGraw-Hill, 1986

Sultan, A.F., Swift, G.W. and Fedirchuk, D.J., "Detection of High Impedance Arcing Faults Using a Multi-Layer Perceptron", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, 1871-1877, October 1992

Winston, P.H.; Inteligência Artificial, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1988.

Williams, C.S., Designing Digital Filters, Prentice-Hall International Editions, 1986

Wolff, R.F., "It's tough to relay high-impedance faults", *Transmission/Distribution*, 32-33, August, 1979

Yamakawa, T., Uchino, E., Miki, T. and Kusanagi, H., "A Neo Fuzzy Neuron and Its Applications to System Identification and Prediction of the System Behavior", *Proceedings of the 3rd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks*, Japan, 477-483, July 17-22 1992

Zadeh, L., "Fuzzy Sets", *IEEE Computer*, April 1988

Apêndice A

Detalhamento das Técnicas Utilizadas

Este apêndice se dedica a apresentar com maiores detalhes as técnicas utilizadas na detecção de FAI. As técnicas aqui apresentadas aplicam a metodologia desenvolvida no corpo desta tese. As técnicas utilizadas foram: sistema baseado em regras, sistema difuso e neurônios difusos.

A.1 Sistemas Baseados em Regras

A arquitetura mais comum utilizada nos sistemas especialistas é o sistema de produção ou sistema baseado em regras. O sistema é baseado em regras do tipo Se ... então... ou regras de produção.

A.1.1 Processo de inferência

No sistema baseado em regras tem-se a chegada de um fato que desencadeia o processo de disparo das regras. O processo de busca das regras a serem disparadas é executado pelo motor de inferência. No caso específico da aplicação aqui apresentada os fatos apresentados são resultado de uma análise espectral de um sinal resposta. Os fatos estão todos disponíveis ao mesmo tempo e, portanto, o processo de busca de regras a serem disparadas é bastante simples e pode ser feito de forma encadeada e fixa. Os antecedentes das regras são casados com os fatos apresentados. Em seguida, a regra é disparada e o conseqüente é executado. Na aplicação aqui apresentada os conseqüentes são índices que são ativados indicando, cada um deles, determinadas ocorrências

simultâneas de fatos.

O sistema baseado em regras foi o primeiro sistema proposto para a análise dos resultados de medição. Durante esta fase foram necessárias análises prévias dos dados utilizando a experiência pessoal para a identificação. As regras foram sendo construídas sem a preocupação com todas as possíveis regras a serem geradas envolvendo todas as variáveis ao mesmo tempo. Fez-se portanto a construção de regras que representasse o comportamento humano na análise. Neste processamento dedicou-se um tempo muito grande na construção destas regras, processo este totalmente manual. As regras são apresentadas no apêndice C.

A.1.2 Certeza de uma regra

Os dados de entrada das regras do sistema baseado em regras não são dados absolutos 0 ou 1. São dados resultantes de medição que carregam graus de incerteza. Segundo Winston (1988) deve-se estabelecer alguns procedimentos simples, tais como:

- A certeza final de entrada de uma regra com vários antecedentes será a menor certeza dos antecedentes.
- Cada regra possui associada a ela um fator de atenuação. A certeza final de uma regra será a multiplicação entre o fator de atenuação e a certeza final de entrada.
- Se várias regras apontam para um fato, ter-se-á como certeza do fato a maior certeza proposta por estas regras.

O conceito aqui proposto é similar ao de que uma cadeia é tão forte como o

mais fraco dos elos que a compõem.

A.1.3 Dados de entrada

Foram utilizados como dados de entrada as dispersões calculadas entre as amostras submetidas ao teste e as referências armazenadas no Banco de dados.

Para uma manipulação adequada a dispersão apresentada ao sistema deve apresentar uma representação simbólica correspondente. Desta forma, utilizou-se o artifício de utilizar as variáveis lingüísticas muito pequeno, pequeno, médio e grande para representar as amplitudes das dispersões dos espectros. Para tanto, foi necessário estabelecer um padrão espectral. As respostas espectrais utilizadas como referências foram calculadas a partir das respostas do alimentador para as suas configurações de operação. Entende-se como configuração de operação aquelas nas quais o alimentador opera sob condições normais.

Por utilizar variáveis lingüísticas, conjuntos difusos são utilizados para classificar as componentes espectrais. O conjunto utilizado é apresentado na figura A.1.

Admitindo-se que o sistema de medição é preciso o suficiente para dar um alto grau de certeza e que os cálculos foram feitos com um grande número de casas decimais, pode-se considerar que cada uma das variáveis possui grau de certeza igual a um. Porém, a mesma certeza não se tem quando dizemos que uma dada variável é pequena ou grande. O grau de certeza da classificação pode ser dado através dos conjuntos difusos que os classificam e que não possuem variações bruscas e pontuais de um estado de pequeno para médio por exemplo. Assim, um determinado dado de entrada irá possuir uma pertinência nos conjuntos difusos, indicando com que grau de certeza pode-se afirmar a qual deles este pertence, figura A.2. Neste exemplo, a variável x pertence ao conjunto difuso

pequeno com um grau de pertinência $\mu_p(x)$ e ao conjunto médio com um grau de pertinência $\mu_m(x)$.

A.1.4 Conjunto de regras

As regras, porém, não trabalham com pertinências e sim informações mais gerais como:

Se a componente R1 é classificada unicamente no conjunto difuso pequeno e
a componente R2 é classificada predominantemente no conjunto médio e
a componente I1 é classificada no conjunto grande

Então ...

Assim as informações são simbólicas e não numéricas. Utilizam-se três valores chaves para as pertinências:

Se a pertinência é igual a 1
então a classificação é unicamente

Se a pertinência é igual ou maior que 0,5
então a classificação é predominantemente

Assim temos três novos subconjuntos dentro do conjunto difuso classificado. Uma variável lingüística pode ser por exemplo:

Subconjunto 1 : R1 é pequeno unicamente

Subconjunto 2 : R1 é pequeno predominantemente

Subconjunto 3 : R1 é pequeno

O subconjunto 1 está contido no subconjunto 2 que por sua vez está contido no subconjunto 3. Assim cada uma das 80 variáveis pode pertencer a um ou dois conjuntos difusos e dentro de cada conjunto difuso este pode pertencer a um, dois ou três subconjuntos. Desta forma, tem-se os subconjuntos: muito-pequeno-

unicamente, muito-pequeno-predominantemente, muito-pequeno, pequeno-unicamente, pequeno-predominantemente, pequeno, médio-unicamente, ..., grande. São portanto 12 subconjuntos. Uma variável pode no mínimo pertencer a um subconjunto e no máximo a três. Se tivéssemos duas variáveis poderíamos construir um quadro como mostrado na figura A.3. Este quadro relaciona todas as combinações possíveis entre as duas variáveis para que todas as regras possam ser construídas.

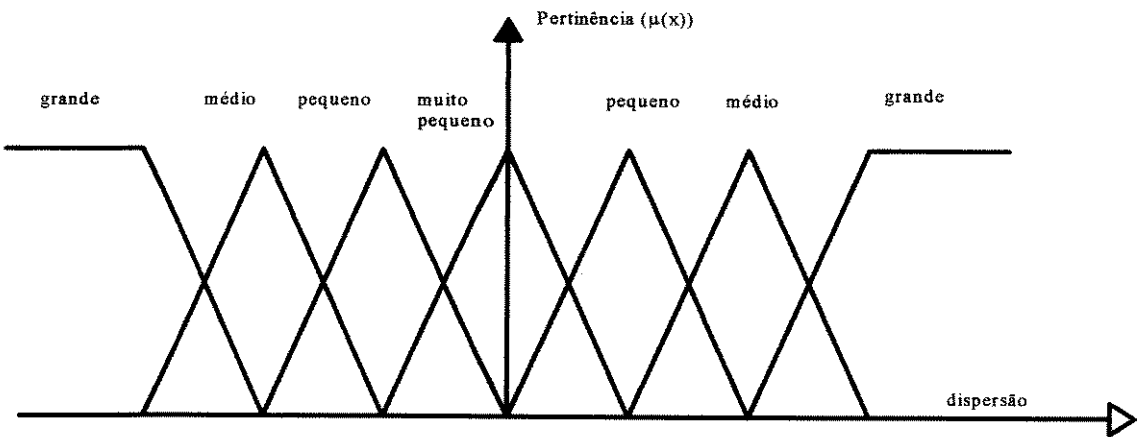


Figura A-1 Conjuntos difusos

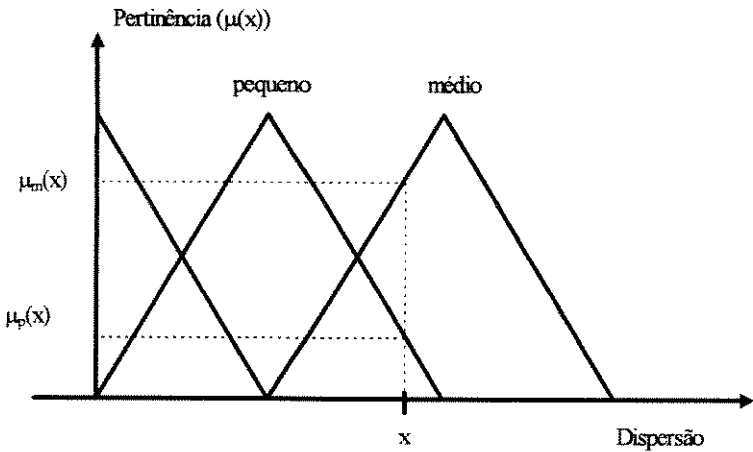


Figura A-2 Cálculo das pertinências de x em cada conjunto difuso

Por exemplo:

Se R1 é PU e R2 é PP então A

onde PU - pequeno unicamente e PP - pequeno predominantemente

Para duas variáveis temos $12^2=144$ combinações possíveis para os antecedentes de regras distintas. Para 80 variáveis teremos $12^{80}=2,16.10^{86}$ possibilidades e ao invés de termos um quadro no plano para representá-los teremos um hiper-cubo em 80ª dimensão.

		Variável R1											
		1	2	3	4	5	...						12
v a r i á v e l R2	1						...						
	2						...						
	3						...						
	4						...						
	...						...						
	12						...						

Figura A-3 Quadro de combinações possíveis das variáveis R1 e R2 sendo que cada uma pode pertencer a 12 subconjuntos

A.2 Sistema Difuso

A dispersão entre as componentes do espectro de frequências da amostra e as componentes do espectro de frequências da referência são os dados de

entrada. Esta dispersão é representada pelos seus graus de pertinência nos conjuntos difusos apresentados na figura A.4. Assim, a dispersão da componente real da frequência j e da janela i em relação a uma dada referência, R_i^j é dada por:

$$R_i^j \rightarrow \mu_p(R_i^j), \mu_m(R_i^j) \text{ e } \mu_g(R_i^j) \quad i=1,2 \quad j=1,\dots,20$$

a dispersão da componente imaginária da frequência j e da janela i em relação a uma dada referência, Im_i^j é dada por

$$Im_i^j \rightarrow \mu_p(Im_i^j), \mu_m(Im_i^j) \text{ e } \mu_g(Im_i^j) \quad i=1,2 \quad j=1,\dots,20$$

A classificação das variáveis de entrada nos conjuntos difusos dados na figura A.5 é feita conforme exemplo abaixo:

$\%R_1^1 = 2\% \rightarrow R_1^1$ é pequeno com grau de pertinência 1

$\%Im_1^1 = 3\% \rightarrow Im_1^1$ é pequeno com grau de pertinência 0.8

Im_1^1 é médio com grau de pertinência 0.2

$\%R_2^1 = 4\% \rightarrow R_2^1$ é pequeno com grau de pertinência 0.4

R_2^1 é médio com grau de pertinência 0.6

$\%Im_2^1 = 1.7\% \rightarrow Im_2^1$ é pequeno com grau de pertinência 1

Em seguida, este conjunto de pertinências é apresentado a um conjunto de

regras. As regras possuem quatro antecedentes relacionados pelo conectivo E (interseção), definindo-se o operador interseção como sendo $\wedge$ (min).

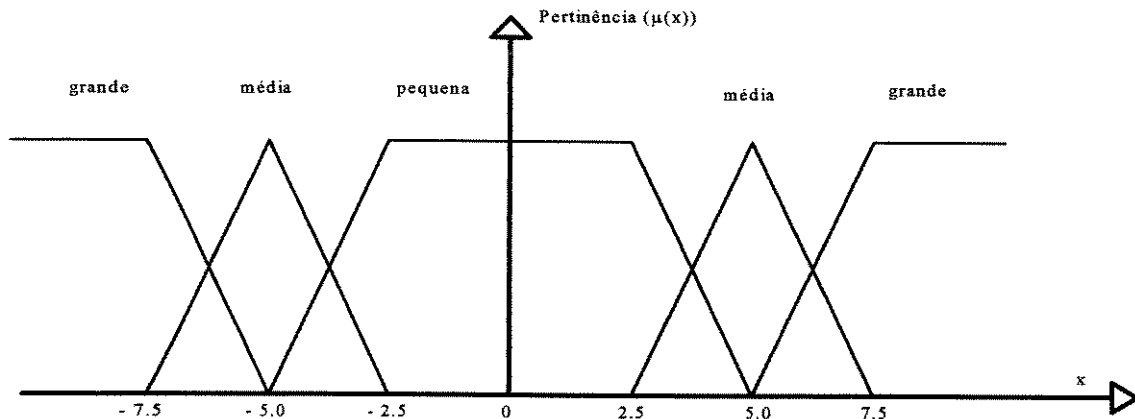


Figura A-4 Conjuntos difusos

Com as variáveis classificadas desta forma, quatro regras são ativadas, conforme exemplo abaixo:

Regra 1:

Se $(R_1^j \text{ é pequeno})$ e $(Im_1^j \text{ é pequeno})$ e $(R_2^j \text{ é pequeno})$ e $(Im_2^j \text{ é pequeno})$
então d é pequeno

Regra 2:

Se $(R_1^j \text{ é pequeno})$ e $(Im_1^j \text{ é médio})$ e $(R_2^j \text{ é médio})$ e $(Im_2^j \text{ é pequeno})$
então d é pequeno

Regra 3:

Se $(R_1^j \text{ é pequeno})$ e $(Im_1^j \text{ é médio})$ e $(R_2^j \text{ é pequeno})$ e $(Im_2^j \text{ é pequeno})$
então d é pequeno

Regra 4:

Se $(R_1^j \text{ é pequeno})$ e $(Im_1^j \text{ é pequeno})$ e $(R_2^j \text{ é médio})$ e $(Im_2^j \text{ é pequeno})$

então d é pequeno

Aplicando-se as regras para os dados do exemplo, teremos:

$$\text{Regra}_1 : \min((\mu_p(R_1^j)=1), (\mu_p(Im_1^j)=0.8), (\mu_p(R_2^j)=0.4), (\mu_p(Im_2^j)=1))=$$

$$\min(1,0.8,0.4,1)=0.4$$

$$\text{Regra}_2 : \min((\mu_p(R_1^j)=1), (\mu_m(Im_1^j)=0.2), (\mu_m(R_2^j)=0.6), (\mu_p(Im_2^j)=1))=$$

$$\min(1,0.2,0.6,1)=0.2$$

$$\text{Regra}_3 : \min((\mu_p(R_1^j)=1), (\mu_m(Im_1^j)=0.2), (\mu_p(R_2^j)=0.4), (\mu_p(Im_2^j)=1))=$$

$$\min(1,0.2,0.4,1)=0.2$$

$$\text{Regra}_4 : \min((\mu_p(R_1^j)=1), (\mu_p(Im_1^j)=0.8), (\mu_m(R_2^j)=0.6), (\mu_p(Im_2^j)=1))=$$

$$\min(1,0.8,0.6,1)=0.6$$

A representação gráfica destas operações é apresentada na Figura A.5.

Para cada frequência j teremos a ativação de regras diferentes e portanto saídas distintas.

Como tem-se três conjuntos difusos, quatro variáveis a serem representadas de forma lingüística sendo todas as quatro antecedentes das regras, teremos como consequência 3^4 combinações possíveis de antecedentes de regras. Estas 81 regras podem ser resumidas pelas três regras citadas a seguir:

Se $(n^{\circ}(\mu_{p \neq 0}) \geq 3)$ ou $(n^{\circ}(\mu_{p \neq 0}) = 2 \text{ e } (n^{\circ}(\mu_{m \neq 0}) \geq 1)$

então d é pequeno

Se $(n^{\circ}(\mu_{m \neq 0}) \geq 3)$ ou $(n^{\circ}(\mu_{p \neq 0})) = (n^{\circ}(\mu_{g \neq 0}))$

então d é médio

Se $(n^{\circ}(\mu_{g \neq 0}) \geq 2)$ e $(n^{\circ}(\mu_{p \neq 0})) \neq (n^{\circ}(\mu_{g \neq 0}))$

então d é grande

Assim, o número de combinações possíveis de antecedentes que apresentam o conseqüente da regra pertencente ao conjunto pequeno é 15. Para se obter que o conseqüente da regra pertença ao conjunto médio teremos 39 possibilidades. Por último, tem-se 27 possibilidades de se obter o conseqüente da regra pertencente ao conjunto grande.

Como foi visto no exemplo, uma única entrada pode ativar no mínimo uma regra e no máximo $2^4 = 16$, sendo 2 o número máximo de conjuntos difusos no qual uma variável pode pertencer. Portanto, podemos ter para cada amostra analisada o mínimo de $20 \times 1 = 20$ e no máximo $20 \times 16 = 320$ regras ativadas. Ou seja, as regras poderão ser ativadas mais de uma vez.

Por esta razão, para uma única frequência poderemos ter até 16 regras ativadas, com saídas pertencentes aos três conjuntos difusos. Para se obter um resumo para cada frequência faz-se a união das contribuições de cada regra ativada. A união é definida como sendo o operador MAX. Assim, obtemos valores únicos para μ_p , μ_m , μ_g do conjunto de saída das regras. Ou seja, tomaremos os valores máximos das saídas para cada frequência j. Cada frequência poderá apresentar saída em um dos três conjuntos difusos, portanto ao final do resumo poderemos ter $\mu_{p \neq 0}$, $\mu_{m \neq 0}$ e $\mu_{g \neq 0}$ ao mesmo tempo. O conjunto pequeno e grande são antagônicos e portanto deve-se descobrir qual deles é predominante. Para tanto, calcula-se o centro de área formado pela representação de cada grau de

pertinência nos respectivos conjuntos difusos. A figura A.6 ilustra esta área através de um exemplo.

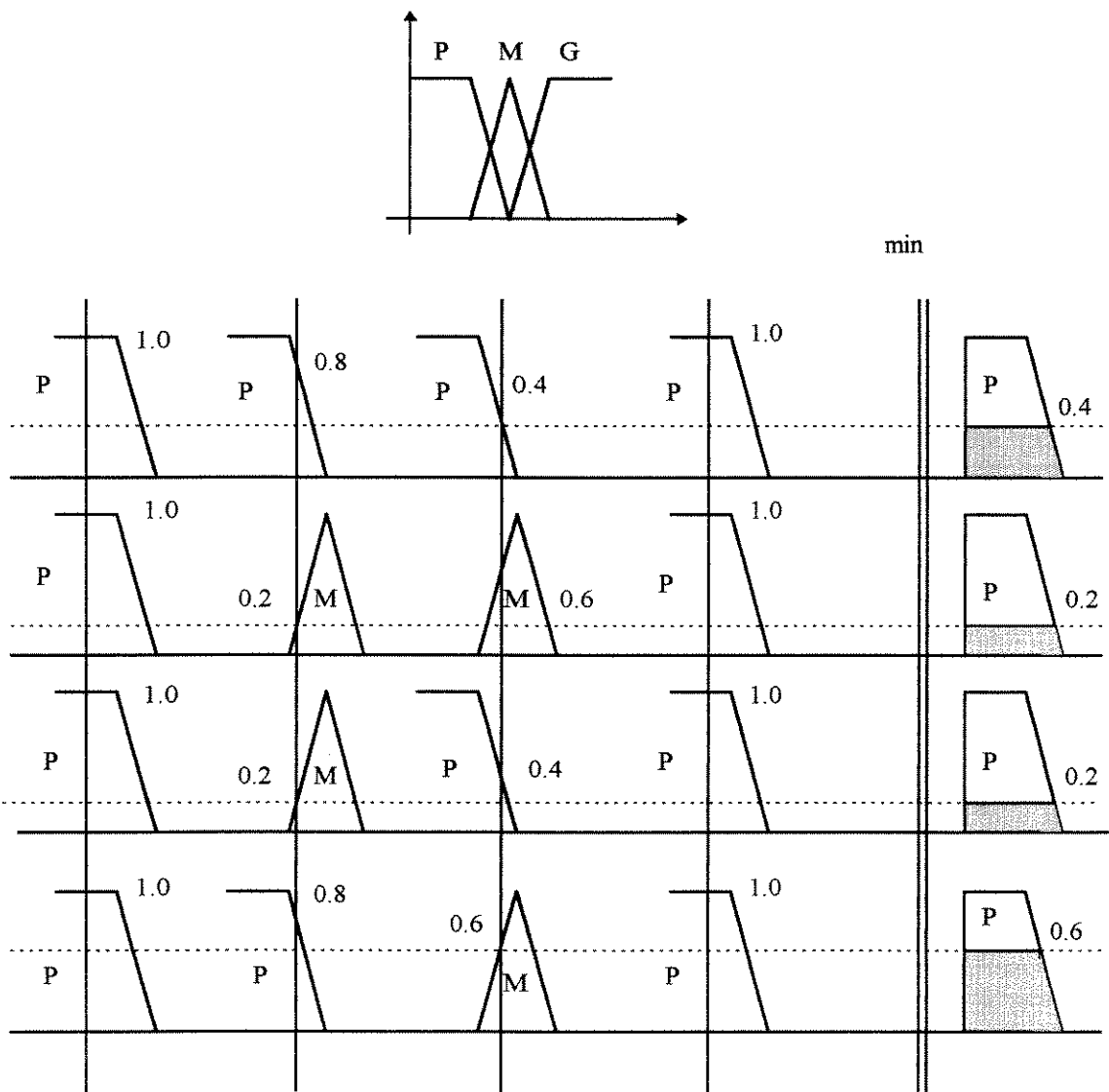


Figura A-5 Representação Gráfica das Regras

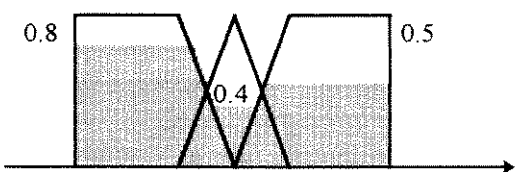


Figura A-6 Representação da área formada pelas pertinências nos respectivos conjuntos

Para se obter a dispersão d que representa a frequência em estudo, deve-se fazer o cálculo inverso ao do difusor que é realizado pelo concentrador. A operação feita pelo concentrador é dada pela equação A.1, Gomide 1994.

$$CDA = \frac{\sum_{k=1}^3 \mu_k(v_k) \cdot v(k)}{\sum_{k=1}^3 \mu_k(v_k)} \tag{A.1}$$

onde v_k é o centro de área de cada conjunto separadamente. Assim, para a figura A.6 o CDA é calculado abaixo:

$$CDA = \frac{0.8 \times 2.5 + 0.4 \times 4 + 0.5 \times 6.5}{0.8 + 0.4 + 0.5} = \frac{6.85}{1.7} = 4.03$$

Após o cálculo do CDA, obtêm-se uma dispersão única para cada frequência. Este procedimento é apresentado na figura A.7. Com o valor de cada cda em mãos calcula-se novamente os valores de μ_p , μ_m e μ_g .

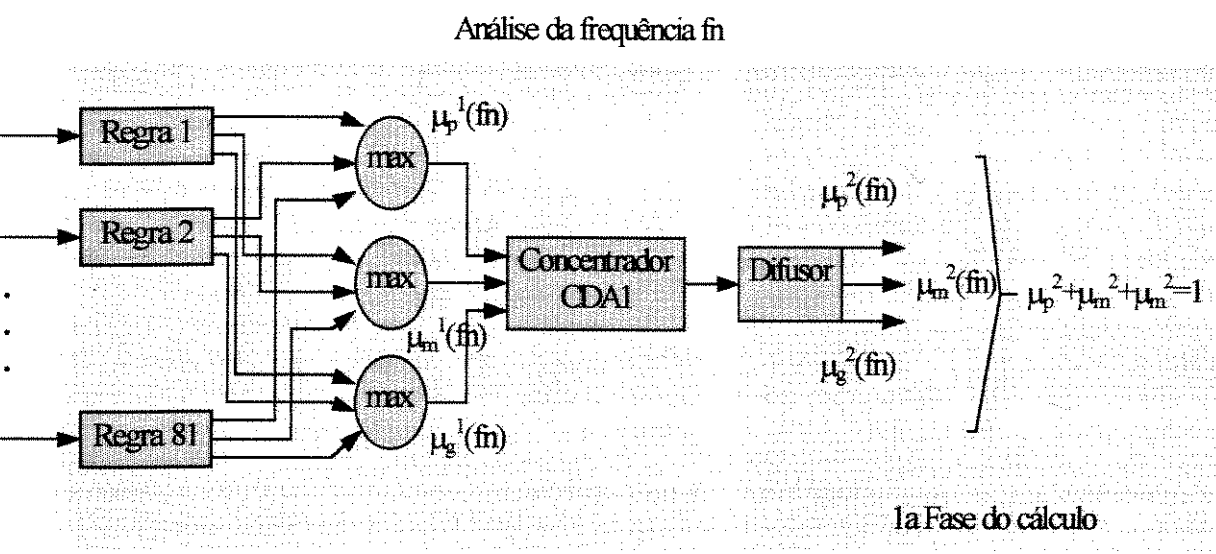


Figura A-7 Primeira etapa do sistema difuso

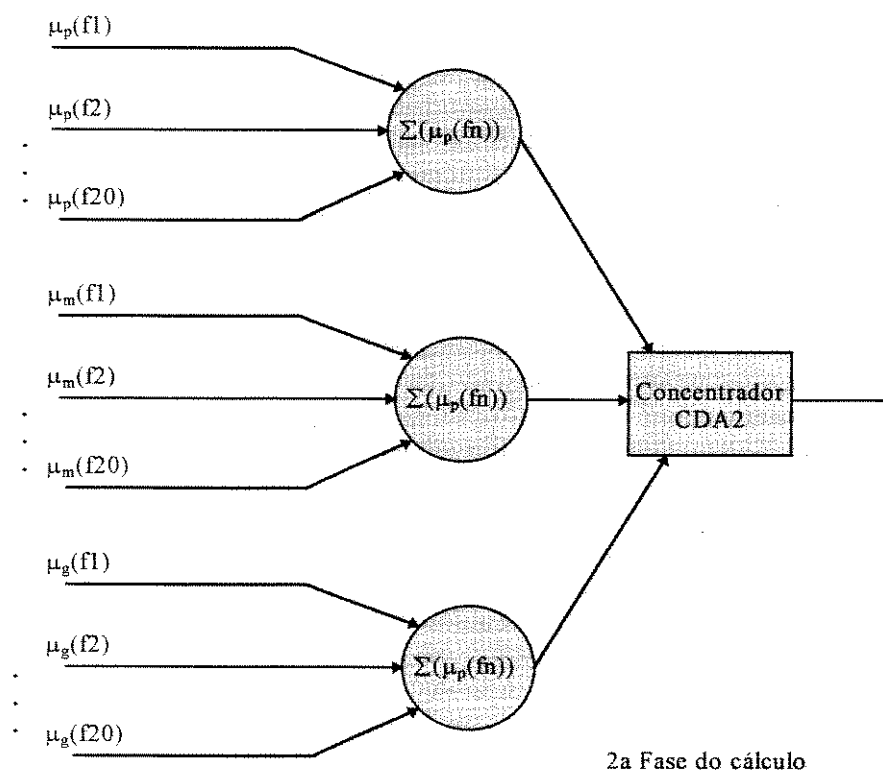


Figura A-8 Somatória dos graus de pertinência e cálculo do CDA2

Passa-se agora para uma nova etapa onde será combinada a dispersão de cada frequência com o objetivo de se concluir se o sinal apresentado é similar ao da referência ou não. Para tanto as dispersões obtidas para cada frequência são novamente difundidas. Faz-se a somatória dos graus de pertinência de cada conjunto para todas as 20 frequências, figura A.9. Em seguida, calcula-se as pertinências nos novos conjuntos difusos e o CDA novamente.

Este processo é reiniciado para novo sinal amostrado. E assim consecutivamente até totalizar no mínimo 5 amostras. Para cada um dos sinais amostrados obtém-se um CDA_2 . As n saídas são apresentadas a um neurônio lógico "E" que realiza a operação min. Esta operação é ilustrada na figura A.9. A saída do neurônio irá representar a classificação dos sinais medidos com relação ao sinal de referência segundo a regra abaixo:

Se $CDA_2 > 5.5$ então classificou como similar

Os mesmos n sinais medidos são apresentados às demais referências contidas no banco de dados e aquele que classificá-lo, será a configuração correspondente.

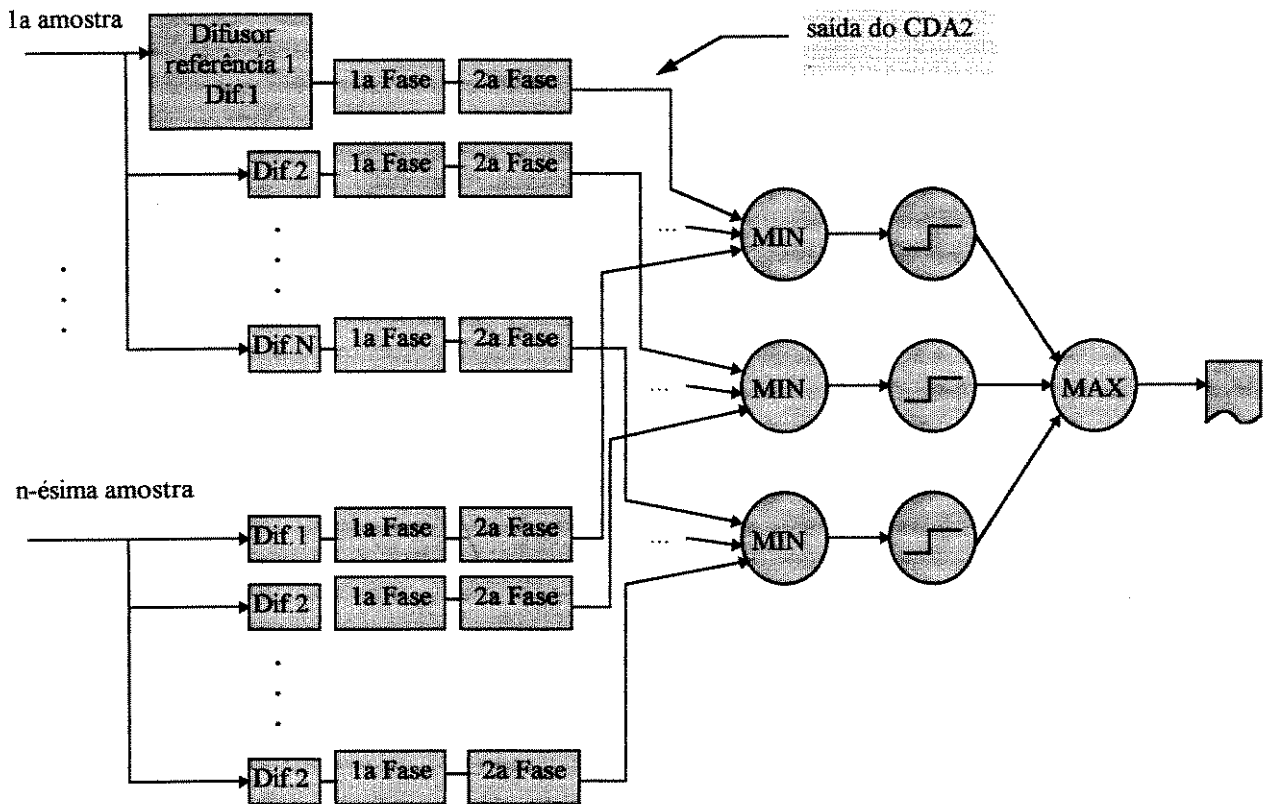


Figura A-9-Operação completa do sistema difuso

A.3 Redes Neuroniais

As redes neuroniais são sistemas computacionais que se inspiram no funcionamento do cérebro humano. As redes são compostas basicamente por elementos simples chamados neurônios dispostos em camadas e interligados de forma unidirecional com os neurônios das camadas vizinhas. As conexões estão associadas a pesos, que são alterados à medida que passa pelo processo de

aprendizagem. Existem vários tipos de redes com características distintas indicadas para aplicações distintas.

A.3.1 Neurônios Difusos

O neurônio difuso aqui utilizado foi proposto por Yamakawa 1992. A estrutura do neurônio é apresentada na figura A.10.

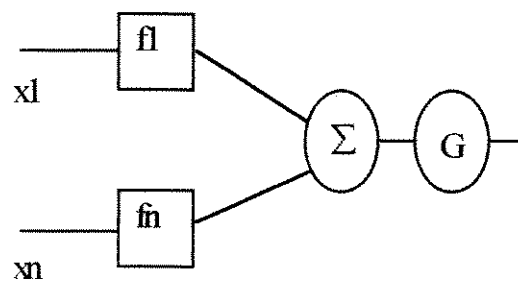


Figura A-10 - Neurônio Difuso

Inicialmente os dados de entrada passam pelo processo de difusão sendo assim representados por seus respectivos graus de pertinências aos conjuntos difusos mostrados na figura A.4. Em seguida, as saídas do bloco difuso são multiplicadas por pesos que serão ajustados durante a fase de treino do neurônio. O ajuste dos pesos é realizado pela equação A.2:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \alpha \mu_{ij}(x_i)(y_e - y) \quad (\text{A.2})$$

onde:

w_{ij} - matriz de pesos,

μ_{ij} - matriz que contém os graus de pertinência do elemento i ao conjunto difuso j ,

α - ajuste do tamanho do passo de busca do valor adequado para os pesos,

y_e - saída esperada classificando (=1) ou não (=0) o sinal-resposta apresentado como similar à configuração para o qual o neurônio está sendo treinado para

reconhecer, e

y - é a saída apresentada pelo neurônio.

O vetor resultante, da multiplicação dos elementos da matriz de pertinência com os elementos correspondentes da matriz de pesos, é apresentado à primeira sinapse, f1, do neurônio, equação A.3.

$$f_i(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}(x_j) w_{ij}}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}(x_j)} \quad (\text{A.3})$$

As contribuições de cada componente são somadas, equação A.4.

$$y = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n)$$

$$y = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (\text{A.4})$$

Finalmente o sinal de saída de cada neurônio será a saída da segunda sinapse, G, dada pela equação A.5.

$$\text{Se } 0.75 < y < 1.2 \text{ saída} = \text{ativada} \quad (\text{A.5})$$

Apêndice B

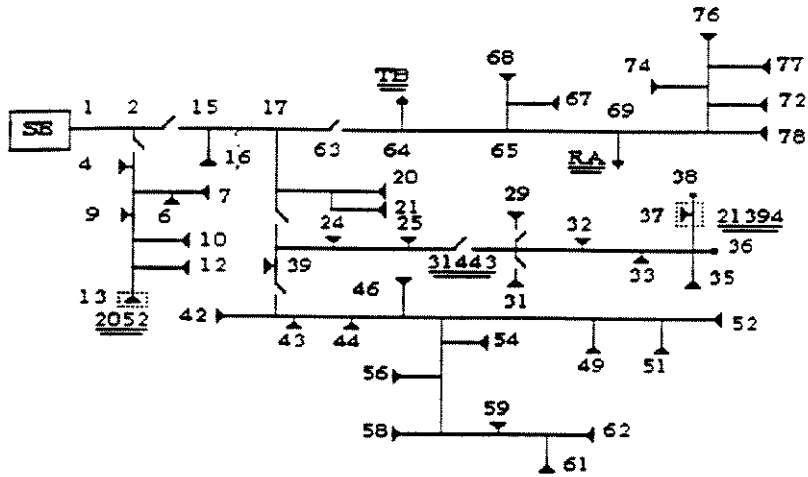
Detalhamento do Alimentador Utilizado

A seguir é apresentado o diagrama unifilar do alimentador utilizado nos testes de campo. O diagrama é dividido em 7 partes (figuras B.1 a B.7) sendo elas: tronco A (TA), tronco B (TB), ramal A (RA), ramal A1 (RA1), ramal A2 (RA2), ramal A3 (RA3) e ramal B (RB) . A numeração dos nós começa em 1 e vai até 441. A distribuição da numeração é dada na tabela B.1.

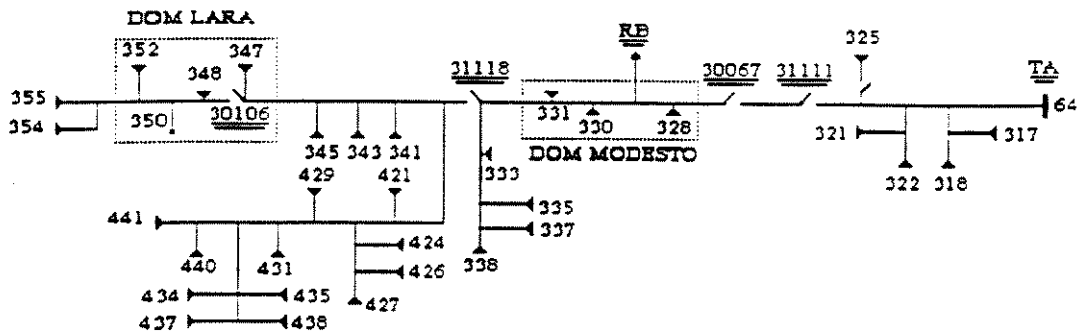
Ramos	Nó inicial	Nó final	Nó origem	Derivações	Eventos simulados	Número de Transf.
Tronco A	1	78	-	RA TB	T2052 T21394 CH31443	39
Tronco B	315 420	355 441	64 TA	RB	CH30109 CH31111 CH30067 CH31118 CH30106	32
Ramal B	356	419	329 (TB)	-	CH30177	33
Ramal A	79	185	69 (TA)	RA1 RA2 RA3	CH31061 CH31116	55
Ramal A1	186	223	123 (RA)	-	CH28223	21
Ramal A2	224	271	158 (RA)	-	CH31018	26
Ramal A3	272	314	179 (RA)	-	-	23

Tabela B-1 Quadro de distribuição de nós

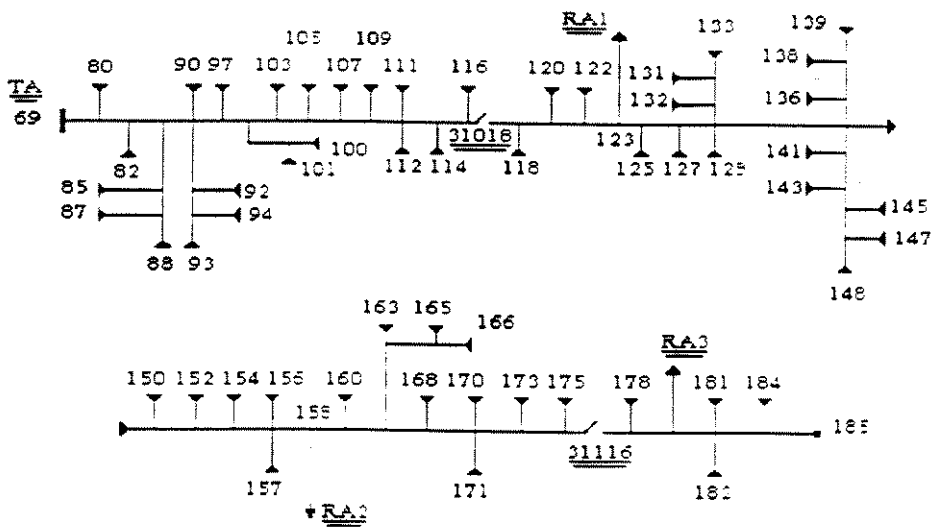
TRONCO A (TA)



TRONCO B (TB)



RAMAL A (RA)



SANTA
EFIGENIA.



Apêndice C

Exemplo de Regras Utilizadas

Entre bancos de conhecimentos e processos de inferência são utilizados aproximadamente 200 regras. Estas são distribuídas pelo sistema e algumas são apresentadas neste apêndice.

C.1 Primeira Fase - Verificação da Consistência - Fase 1

Exemplo de algumas regras implementadas na primeira fase do algoritmo - Verificação da consistência

Se a dispersão entre as medidas for pequena

então inicie o processo de verificação da configuração e calcule a distância

Se a dispersão entre medidas for muito pequena ou pequena

então passe para a próxima fase

Se o segundo grupo de medidas apresentar dispersão entre medidas muito pequena ou pequena

então passe para a próxima fase

Se o segundo grupo de medidas apresentar dispersão entre medidas média ou grande

então calcule a distância para cada uma das medidas do primeiro e segundo grupos

Se a dispersão entre as distâncias de cada medida for pequena e a dispersão entre medidas for grande

então emita a mensagem “existem grandes indícios de que exista uma FAI COM ARCO à distância $D_{\text{médio}}$ ” e faça novo grupo de medidas

Ao final deste processamento o sistema envia mensagens, reinicializa a medição ou inicia o processo de busca da configuração do alimentador.

C.2 Sistemas Baseados em Regras - Fase 2

Se o número de ocorrências de pertinências, maiores do que 0.5, no conjunto muito pequeno para os elementos do vetor imaginário da primeira janela for maior do que 70%

então acrescente um ao índice

Se o número de ocorrências de pertinências, maiores do que 0.5, no conjunto muito pequeno para os elementos do vetor imaginário da segunda janela for maior do que 80%

então acrescente um ao índice

Se o número de ocorrências de pertinências, maiores do que 0.5, no conjunto muito pequeno e pequeno para os elementos do vetor imaginário da primeira janela for maior do que 28

então acrescente um ao índice

Se o número de ocorrências de pertinências, com qualquer grau, nos conjuntos médio e grande para os elementos do vetor real da primeira janela for maior do que 28

então decresça um ao índice

C.3 Sistema Difuso - Fase 2

Foram implementadas um total de 81 regras nesta etapa.

Regra no.1 SSSS

Se $R1(i,1) \sim 0$ e $R2(i,1) \sim 0$ e $I1(i,1) \sim 0$ e $I2(i,1) \sim 0$

então $f(i,1) = \min([R1(i,1), R2(i,1), I1(i,1), I2(i,1)])$; $Fc(i,1) = 1$;

Regra no.2 SSST

Se $R1(i,1) \sim 0$ e $R2(i,1) \sim 0$ e $I1(i,1) \sim 0$ e $I2(i,2) \sim 0$

então $f(i,2) = \min([R1(i,1), R2(i,1), I1(i,1), I2(i,2)])$; $Fc(i,2) = 1$;

Regra no.3 SSTS

Se $R1(i,1) \sim 0$ e $R2(i,1) \sim 0$ e $I1(i,2) \sim 0$ e $I2(i,1) \sim 0$

então $f(i,3) = \min([R1(i,1), R2(i,1), I1(i,2), I2(i,1)])$; $Fc(i,3) = 1$;

Regra no.4 STSS

Se $R1(i,1) \sim 0$ e $R2(i,2) \sim 0$ e $I1(i,1) \sim 0$ e $I2(i,1) \sim 0$

então $f(i,4) = \min([R1(i,1), R2(i,2), I1(i,1), I2(i,1)])$; $Fc(i,4) = 1$;

Regra no.30 SNTS

Se $R1(i,1) \sim 0$ e $R2(i,3) \sim 0$ e $I1(i,2) \sim 0$ e $I2(i,1) \sim 0$

então $f(i,30) = \min([R1(i,1), R2(i,3), I1(i,2), I2(i,1)])$; $Fc(i,30) = 2$;

Regra no.81 TNNS

Se $R1(i,2) \sim 0$ e $R2(i,3) \sim 0$ e $I1(i,3) \sim 0$ e $I2(i,1) \sim 0$

então $f(i,81) = \min([R1(i,2), R2(i,3), I1(i,3), I2(i,1)])$; $Fc(i,81) = 3$;

onde:

R1 - Parte real da primeira janela;

R2 - Parte real da segunda janela;

I1 - Parte imaginária da primeira janela;

I2 - Parte imaginária da segunda janela.