

Reg. 1683893-09

E-89  
SIL  
1992  
T

---

TÉCNICA ALTERNATIVA PARA DETECÇÃO DE  
FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

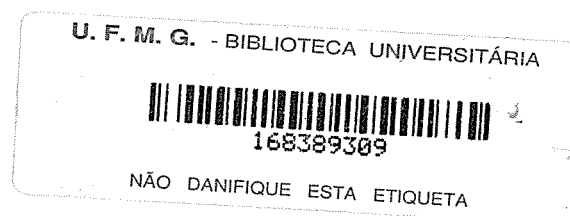
---

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para  
obtenção do título de *Mestre em Ciências* pelo Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal  
de Minas Gerais.

Autor : Patrícia Romeiro da Silva

Orientadores : José Osvaldo Saldanha Paulino

José Celso Borges de Andrade



UFMG

Belo Horizonte, Março de 1992

SET 2003

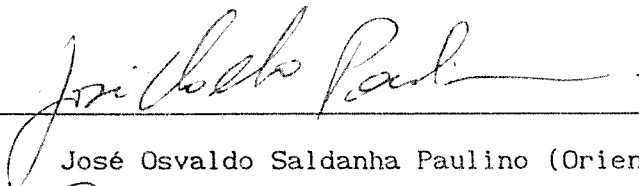
2004  
07

TECNICA ALTERNATIVA PARA DETECCAO DE  
FALTAS DE ALTA IMPEDANCIA

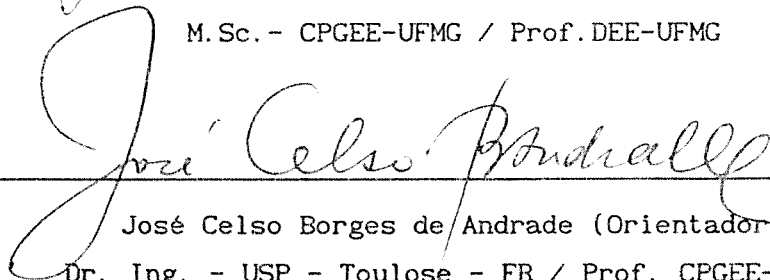
Patrícia Romeiro da Silva

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

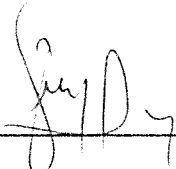
Aprovada em 27 de Março de 1992, pela banca examinadora composta por:



José Osvaldo Saldanha Paulino (Orientador)  
M.Sc. - CPGEE-UFMG / Prof. DEE-UFMG



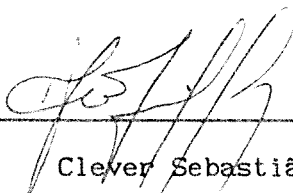
José Celso Borges de Andrade (Orientador)  
Dr. Ing. - USP - Toulouse - FR / Prof. CPGEE-UFMG



José Pissolato Filho  
Dr. Univ. Paul Sabatier - FR / Prof. UNICAMP - SP



Paulo Fernando Seixas  
Dr. Ing. - INPT - Toulouse - FR / Prof. CPGEE-UFMG



Clever Sebastião Pereira Filho  
M.Sc. COPPE-UFRJ / Prof. DEE-UFMG

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisa pelo auxílio financeiro

Aos professores e colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e em especial ao professor José Celso Borges de Andrade

Aos professores Glássio Costa de Miranda e Ricardo Hiroshi Caldeira Takahashi pelas enriquecedoras discussões e sugestões

Ao Engenheiro Paulo Sérgio de Azambuja Rocha pelo valioso incentivo

A todos que de maneira direta e indireta contribuíram para o meu sucesso nesta dissertação

Aos meus pais, familiares e amigos pelo carinho e apoio

Em especial ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino que pela forma com que me assistiu ao longo desta caminhada, tornou esta experiência de fato enriquecedora, tanto a nível profissional quanto humano

minha sincera gratidão.

À meus pais,

Ranolfo e Léa Maria.

"Instruir-te-ei, e ensinar-te-ei  
o caminho que deves seguir;  
guiar-te-ei com os meus olhos."

Salmo 32:8

## RESUMO

A falta de alta impedância é um evento anormal nos alimentadores de distribuição de energia elétrica e de difícil detecção pela proteção convencional de sobrecorrente. As técnicas propostas na literatura em sua maioria utilizam como parâmetros de detecção as correntes de fase e neutro. Este trabalho apresenta uma técnica que possui uma filosofia de detecção diferente das demais técnicas apresentadas na literatura. O alimentador recebe uma excitação de uma fonte impulsiva e a resposta do mesmo é analisada nos domínios da frequência e do tempo. A partir da análise das frequências que compõem o sinal verifica-se a existência de uma falta e no domínio do tempo obtêm-se a informação a respeito do tipo da falta, ou seja, baixa ou alta impedância e a distância da mesma até a subestação é calculada.

## ABSTRACT

A high impedance fault is an abnormal event on an electric power distribution feeder which can not be easily detected by conventional over current protective devices. Most of the methods proposed use phase and neutral currents as detection parameters. This work shows a new method of detection. Feeder receives an excitation from an impulsive source and its response is analysed in time and frequency domain. Analysis of the frequency spectrum of the output signal allows us to establish the type of fault (low or high impedance) and to calculate, in time domain, the distance between the substation and the point of fault.

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	i
Lista de Tabelas .....	v
Nomenclatura .....	vi
Capítulo I - Introdução .....	1
Capítulo II - Definição e Caracterização da Falta de Alta Impedância	
Definição de Falta de Alta Impedância .....	6
Tipos de Faltas .....	6
Mecanismos de Ocorrência .....	6
Características de uma Falta de Alta Impedância ....	7
Distribuição de Corrente para Sistema Multi-Atterrado	8
Capítulo III - Medições em Redes Reais	
Introdução .....	11
Medição das Correntes de uma Rede Real em Operação Normal .....	11
Medição das Correntes para um Sistema Submetido a Operações de Manobra .....	17
Medição de um Sistema Submetido a uma Falta de Alta Impedância .....	18
Capítulo IV - Técnicas Baseadas no Desbalanço de Corrente Gerado pela Falta	
Introdução .....	26
Relé de Razão de Terra .....	26
Relé Proporcional .....	28
Tratamento Estatístico do Desbalanço de Corrente ...	30
Capítulo V - Detecção Utilizando as Frequências Geradas Durante a Falta	
Introdução .....	39
Detecção Utilizando Altas Frequências .....	40

Detecção Utilizando Frequências Próximas à Frequência Fundamental .....	43
Capítulo VI - Técnicas Baseadas em Inteligência Artificial	
Introdução .....	53
Combinação de Parâmetros .....	53
Teoria "Connectionist" .....	55
Capítulo VII - Técnica Alternativa	
Identificação do Sistema .....	58
Modelagem do Alimentador para Simulação Digital ....	60
Análise da Resposta Encontrada .....	61
Capítulo VIII - Validação do Método	
Comparação entre Resultados Medidos e Calculados ...	66
Capítulo IX - Resultados Obtidos para um Alimentador Real	
Alimentador Real .....	71
Validação do Método para Ramais Longos.....	80
Capítulo X - Conclusões .....	84
Referências Bibliográficas .....	86

## LISTA DE FIGURAS

II.1-	Distribuição de corrente de carga.....	9
II.2-	Distribuição da corrente de falta.....	9
II.3-	Influência do número de hastes de terra na distribuição da corrente.....	9
II.4-	Influência da resistência de terra da subestação na distribuição da corrente.....	10
III.1-	Espectro da corrente de um sistema sem falta.....	14
III.2a e b	- Corrente de neutro em uma subestação medida durante uma semana e a distribuição de corrente (RMS) .....	15
III.2c	- Corrente de neutro em uma subestação medida durante uma semana e a distribuição de corrente (RMS) .....	16
III.3-	Componente de terceiro harmônico da corrente de linha medida na subestação .....	16
III.4-	Resposta de várias de frequências para a operação de um banco de capacitores .....	17
III.5-	Comparação entre as componentes de frequência para a corrente normal, com e sem banco de capacitores .....	18
III.6-	Resposta de algumas componentes de frequências durante a ocorrência de uma falta de alta impedância com banco de capacitores conectado .....	20
III.7-	Falta com arco, sem banco, em solo úmido .....	21
III.8-	Falta com arco, sem banco, em solo seco .....	21
III.9-	Falta com arco, com banco, em solo úmido .....	22
III.10-	Falta com arco, com banco, em solo seco .....	22
III.11-	Arco em solo úmido .....	24
III.12-	Arco em solo seco .....	24

III.13- Arco em solo arenoso .....	25
IV.1- Características dos relés RGR e Convencional .....	27
IV.2- Relé Proporcional .....	28
IV.3- Histogramas para as correntes fundamentais de fase .	33
IV.4- Histogramas para as correntes de terceiro harmônico das fases .....	34
IV.5- Histogramas para as correntes de quinto harmônico das fases .....	34
IV.6- Histogramas das componentes de sequência da corrente fundamental .....	35
IV.7- Histogramas das componentes de sequência da corrente de terceiro harmônico .....	35
IV.8- Histogramas das componentes de sequência da corrente de quinto harmônico .....	36
IV.9- Falta Passiva .....	37
IV.10- Falta Ativa .....	38
V.1- Dependência da resistência de falta com a corrente ..	39
V.2- Forma de onda do sistema .....	41
V.3- Variação do sinal de 180Hz filtrado .....	46
V.4- Variação da energia da frequência de 180Hz na saída e na entrada do banco de capacitores .....	47
V.5- Variação da energia da frequência de 210Hz na saída e na entrada do banco de capacitores .....	47
V.6- Variação da energia das frequências de 180 e 210Hz na operação de uma seccionadora a ar .....	48
V.7- Esquema utilizado em teste de laboratório .....	49
V.8- Oscilogramas das correntes com arco .....	49
V.9- Característica $v \times i$ do arco .....	50

V.10- Modelo teórico para falta de alta impedância com arco .....	50
V.11- Corrente harmônica versus ângulo de fase $\theta$ e tensão $\Delta V$ .....	51
V.12- Comparação entre a corrente de segundo harmônico do arco e da rede .....	51
V.13- Comparação entre a corrente de terceiro harmônico do arco e da rede .....	52
VI.1- Neurônio .....	56
VII.1- Representação do alimentador .....	59
VII.2- Ondas viajantes .....	60
VII.3- Modelagem utilizada .....	61
VII.4- Ilustração da FFT .....	63
VII.5- Fluxograma do Método .....	65
VIII.1- Croqui da Linha Experimental .....	67
VIII.2- Resposta para a linha aberta .....	67
VIII.3- Falta franca sem transformador.....	68
VIII.4- Falta franca com transformador.....	68
VIII.5- Falta de alta impedância 1.....	69
VIII.6- Falta de alta impedância 2.....	70
IX.1- Configuração do alimentador de Bocaiúva .....	71
IX.2- Resposta padrão do alimentador completo .....	72
IX.3- Resposta padrão do alimentador Bocaiúva simplificado .....	73
IX.4- Abertura de chaves .....	74
IX.5- Saída de transformadores .....	75
IX.6- Eventos simultâneos .....	76
IX.7- Falta passiva ao longo do trecho 12-13 .....	77
IX.8- Falta ativa .....	77

IX.9- Comparação entre linha aberta, falta de alta impedância e falta franca .....	78
IX.10- Configuração do alimentador utilizado .....	80
IX.11- Resposta do alimentador para todos os ramos casados .....	81
IX.12- Resposta do alimentador para todos os ramos casados exceto o ramo 6-11 .....	82
IX.13- Resposta do alimentador para todos os ramos casados exceto o ramo 3-8 .....	83

## LISTA DE TABELAS

III.1- Componentes harmônicas características e não características .....	13
III.2- Resumo estatístico e normalizado .....	13
IV.1- Média individual e desvio padrão das correntes de fase .....	32
IX.1- Variação percentual de cada componente de frequência após a abertura de um trecho .....	74
IX.2- Comparação entre a resposta padrão e a resposta mediante a saída de um transformador .....	75
IX.3- Comparação entre eventos simultâneos .....	76
IX.4- Comparação entre uma falta de alta impedância e uma falta franca ocorrida no mesmo ponto do alimentador .....	78

## NOMENCLATURA

A	Ampère
m	Metro
km	Kilômetro
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
s	Segundo
ms	Milisegundo
$\mu$ s	Microsegundo
%	Porcentagem
$\Omega$	Ohm
pF	Picofarad
kV	Kilovolt
FAI	Falta de Alta Impedância
FF	Falta Franca

## CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A ocorrência de faltas do tipo de alta impedância expõe a população a constantes riscos de acidentes, pois este tipo de falta não é detectada por relés convencionais de sobrecorrente. Por esta razão, o defeito permanece até que seja visualizado e o disjuntor seja desligado manualmente.

Cabos energizados caídos ao solo e estais energizados são tipos de faltas de alta impedância e oferecem altos riscos ao público bem como à propriedade (riscos de incêndio, eletrocução de animais, etc.).

Em pesquisa realizada pelo GRIDIS (Grupo de Intercâmbio e Difusão de Informação sobre Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho) verificou-se que em 1988 foram registradas 295 mortes e 409 lesões devido a choques em redes de 27 concessionárias brasileiras. Deste total, 30% dos acidentes fatais e 17% das lesões foram decorrentes de faltas de alta impedância, número este alarmante do ponto de vista de segurança, uma vez que a responsabilidade é exclusiva das concessionárias.

A proposta inicial desta dissertação de mestrado era uma revisão bibliográfica a respeito de faltas de alta impedância, onde seria feito uma análise crítica das técnicas propostas e seria indicada aquela que mais se adaptasse às condições do sistema.

Nesta época foi desenvolvido um trabalho que deu origem ao artigo<sup>27</sup> publicado no I-SIDEE (Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica) intitulado "Localização de Faltas em SEP utilizando FFT".

Naquela oportunidade, Robert E. Lee<sup>18,19</sup>, do EPRI, deu uma palestra intitulada "An Overview of Current Protection Distribution Systems" onde concluiu dizendo que nenhuma das técnicas propostas na literatura resolvem o problema da falta de alta impedância. Uma análise posterior do trabalho supra-citado, mostrou que a idéia era relevante, porém, como a técnica se baseava no sinal gerado no ponto da falta no momento de ocorrência da mesma e, como este só é gerado uma única vez, se se perdesse este sinal não seria mais possível detetá-lo.

Para contornar este problema, optou-se por injetar um sinal de controle na linha obtendo assim maior confiabilidade. Como o trabalho começou a apresentar bons resultados, abandonou-se a proposta inicial da dissertação de mestrado, colocando uma revisão apenas a título informativo e centrando esforços na proposição de uma técnica eficiente.

O estudo da falta de alta impedância vem sendo realizado há quase 20 anos, porém o seu maior avanço se deu nos últimos 10 anos quando a disponibilidade de ferramentas computacionais mais sofisticadas se fizeram presentes. Desta forma, o sinal medido durante uma falta pode ser analisado amplamente, permitindo um estudo mais detalhado do fenômeno.

Este trabalho propõe uma técnica alternativa, cuja filosofia é bastante diferente das técnicas propostas na literatura. A técnica é descrita e testada através de simulação digital. Medições em uma rede experimental são realizadas validando as simulações e por conseguinte o método.

Para que se possa discutir as técnicas existentes de detecção de falta de alta impedância e propor uma técnica alternativa, é

necessário definir adequadamente este tipo de falta e conhecer as suas características. O Capítulo II faz esta análise. A mesma análise é aplicada ao sistema de distribuição multiaterrado, apresentando os parâmetros que afetam a distribuição de corrente entre carga e falta, o que dificulta a detecção de faltas com alta impedância.

Com o objetivo de situar este trabalho no contexto atual, foi feita uma revisão das técnicas mais importantes propostas na literatura. Esta revisão está dividida em quatro capítulos.

Nas técnicas já apresentadas na literatura, o comportamento das correntes do sistema quando da presença de uma falta é importante. Para tanto, o Capítulo III resume as medições realizadas por diferentes grupos de pesquisa. Seus resultados são utilizados no desenrolar dos três capítulos seguintes. Dentre estas medições são apresentados resultados obtidos durante operações normais, operações de chaveamento e na ocorrência de uma falta de alta impedância. A influência do solo na formação de arco no ponto de contato do cabo com o elemento de alta impedância é também apresentada.

Uma filosofia muito aplicada na detecção de faltas desta natureza se baseia no desbalanço de corrente gerado pela falta. O capítulo IV apresenta três técnicas propostas na literatura internacional para a detecção de faltas de alta impedância com base nesta filosofia. São eles: Relé de Razão de Terra, Relé Proporcional e Relé Estatístico.

Devido à característica não linear do arco e da terra, as correntes de fase apresentam um aumento de amplitude no seu espectro de frequência. Este aumento ocorre na faixa das altas frequências, acima de

2kHz, e na faixa próxima aos 60Hz. O Capítulo V descreve alguns algoritmos que se baseiam nesta característica.

O Capítulo VI apresenta os últimos trabalhos divulgados na literatura e que se apoiam na linha de raciocínio da inteligência artificial para detectar faltas desta natureza.

No Capítulo VII é descrita a metodologia proposta por esta tese, diferente das demais técnicas anteriores, uma vez que não se baseia em nenhuma característica da falta de alta impedância e, sim, na alteração da resposta do sistema para um pulso injetado após a ocorrência de uma falta.

Para validar o método, foram feitas algumas medições em uma rede experimental. Seus resultados são mostrados no Capítulo VIII. Através da comparação destas medições com a simulação digital dos mesmos eventos, observou-se que a modelagem utilizada foi adequada, validando assim todo o raciocínio desenvolvido.

O Capítulo IX apresenta os resultados obtidos através de simulação de um alimentador real localizado na cidade de Bocaiúva, MG (CEMIG) e de um alimentador longo, com o objetivo de verificar o alcance do método.

Finalizando, o Capítulo X apresenta as conclusões gerais do trabalho e as diretrizes a serem tomadas para dar continuidade ao mesmo.

## CAPÍTULO II

### DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Todo sistema de energia elétrica está sujeito à ocorrência de faltas. O sistema adotado de forma predominante no Brasil possui uma configuração que favorece a ocorrência de um tipo de falta chamada de "Falta de Alta Impedância".

Este tipo de falta apresenta baixas amplitudes de corrente, impossibilitando a sua detecção pelos sistemas de proteção convencionais.

A proteção convencional é baseada em parâmetros tempo x corrente, cujos limites mínimos para sensibilizar os relés são elevados, não atuando para faltas de baixa corrente. Estes limites são elevados pois os relés não podem atuar para correntes de "inrush", durante surtos de energização ou na existência de cargas monofásicas que levam o sistema a um desequilíbrio. Algumas concessionárias brasileiras já permitem que o nível do desequilíbrio chegue a 30%.

Sendo o sistema multiterrado, o caminho de retorno da corrente de falta de alta impedância se dá através da terra e do neutro mas, a terra possui uma impedância variável, criando uma dinâmica física e elétrica. Esta dinâmica impõe, normalmente o fenômeno do arco de forma intermitente, resultando na modulação da corrente<sup>6</sup>. A natureza intermitente do arco contribui para dificultar ainda mais a sua detecção.

O fluxo de corrente neste tipo de falta é normal durante alguns ciclos, podendo se interromper e retornar após intervalos variáveis. Em testes realizados pela A&M University<sup>6</sup> observou-se que o fenômeno não é

repetitivo e que a magnitude da corrente decresce em função do tempo de duração da falta.

### II.1-Definição de Falta de Alta Impedância

Falta de alta impedância é um tipo de falta que ocorre em sistemas de distribuição de até 15kV, onde uma ou mais fases da rede primária entram em contato com algum elemento de alta impedância, limitando assim a corrente de falta a valores bem abaixo dos limites da proteção convencional. Desta forma, a proteção não reconhece esta falta e a mesma permanece alimentada oferecendo perigo de eletrocução à população, bem como risco de incêndio.

### II.2-Tipos de faltas

Existem dois tipos de faltas de alta impedância:

-Faltas ativas : Quando um condutor energizado se aproxima de outro objeto de potencial diferente e a diferença de potencial é suficiente para romper o isolamento do espaço que os separa, formando um arco, diz-se que ocorreu uma falta de alta impedância ativa. Este espaço pode ser o ar, ou mesmo o solo que separa o condutor do aterramento mais próximo. Este tipo de falta pode ser série (interrompendo a corrente de carga) ou "shunt";

-Faltas passivas : Quando o condutor se rompe, porém não entra em contato com nenhuma superfície condutiva, não existindo a circulação de corrente. São faltas do tipo série.

### II.3-Mecanismos de ocorrência

A falta de alta impedância apresenta baixa amplitude de corrente, algumas vezes da ordem de miliampères causada pelos seguintes fatores :

- Alta resistência, ou alta impedância do caminho de retorno da corrente de falta;
- Ocorrência da falta em localização eletricamente remota em relação à fonte, reduzindo assim a corrente de curto-circuito;
- Uma combinação dos dois fatores acima.

A falta de alta impedância pode ocorrer de vários modos e pode ser uma falta permanente ou temporária. Ela pode ser causada por :

- Rompimento do condutor, resultando em condutor caído na terra;
- Interrupção da continuidade elétrica do condutor enquanto mantém a integridade física, no caso de condutores revestidos;
- Contato do condutor com objetos estranhos, como galhos de árvores, animais ou construções.

Faltas de alta impedância causadas por condutores rompidos e caídos são normalmente faltas permanentes, requerendo a localização e o reparo do defeito. Faltas causadas por contato com objetos estranhos podem ser temporárias ou permanentes.

#### II.4- Características de uma falta de alta impedância

Uma falta de alta impedância causa anomalias nas correntes de fase medidas pelos transformadores de corrente localizados nas subestações de distribuição. No mínimo, três tipos de anomalias são possíveis quando ocorre uma falta desta natureza :

- Uma súbita mudança no desbalanço das correntes de fase;

- Um acréscimo do nível de harmônicos de baixa ordem;
- Um acréscimo no ruído de alta frequência.

O primeiro tipo de anomalia ocorre quando a falta é assimétrica. Este é o caso mais comum, uma vez que faltas de alta impedância trifásicas raramente ocorrem. Na frequência fundamental, a mudança no desbalanço de corrente pode ser detectada computando as correntes de sequência positiva, negativa e zero e, observando uma súbita mudança em seus valores. As demais anomalias aparecem quando ocorrem faltas que geram arco elétrico.

#### II.5-Distribuição de corrente para sistema multi-aterrado

O sistema adotado de forma predominante no Brasil é o sistema com o neutro multi-aterrado. A falta de alta impedância é uma falta problemática para este tipo de sistema, principalmente quando existe a alimentação de cargas monofásicas, como é o caso de cargas rurais.

Como mostram as figuras II.1 e II.2 tanto a corrente de carga como a de falta circulam, parte pela terra ( $I_{g1}$ ,  $I_{gf}$ ) e, parte pelo neutro ( $I_{n1}$ ,  $I_{nf}$ ). Desta forma, a corrente de falta que retorna pelo neutro é facilmente mascarada pela corrente de carga que percorre este mesmo caminho. J. Carr<sup>10</sup> (1981) faz uma análise da influência dos vários parâmetros envolvidos na distribuição de corrente, tanto para a alimentação de uma carga, quanto para a existência de uma falta.

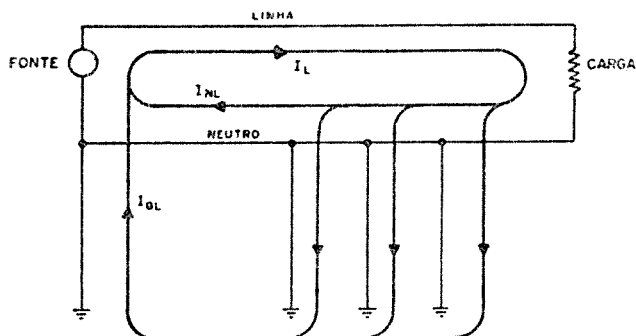


Fig.II.1- Distribuição da corrente de carga.

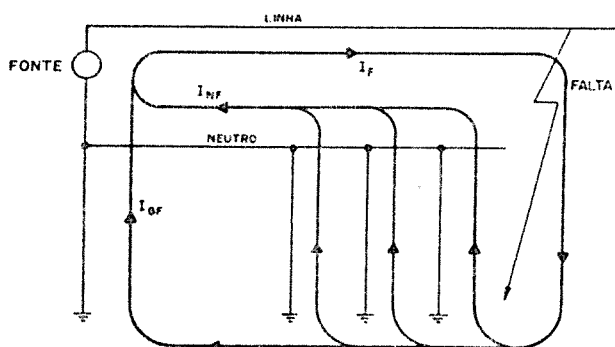


Fig.II.2- Distribuição da corrente de falta.

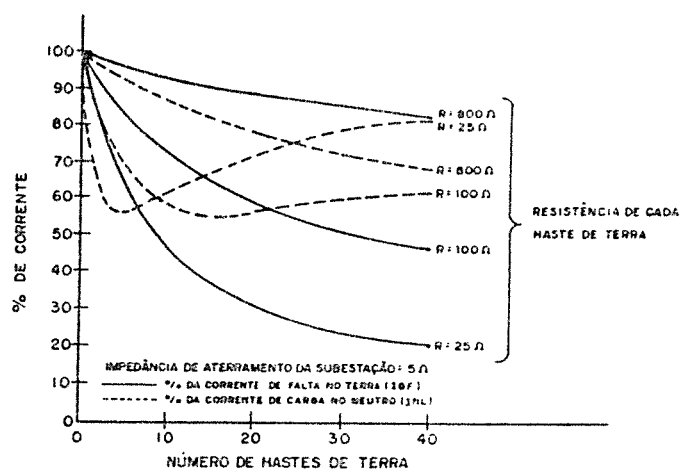


Fig.II.3- Influência do número de hastes de terra na distribuição de corrente.

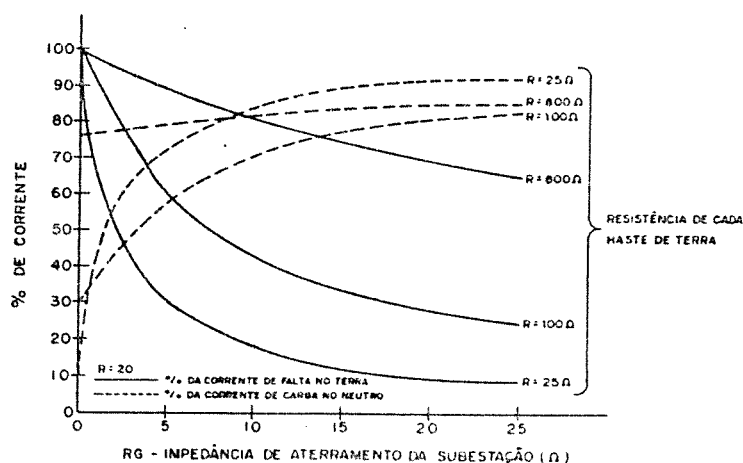


Fig.II.4- Influência da resistência de terra da subestação na distribuição de corrente.

As figuras II.3 e II.4 apresentam gráficos que resumem a influência destes parâmetros na distribuição de corrente. A variação de apenas um destes parâmetros altera completamente a distribuição de corrente. Assim a relação entre a corrente de falta e a corrente de carga se altera, dificultando ainda mais a detecção de faltas desta natureza. Caso a variação dos parâmetros seja tal que permaneça a mesma relação entre as resistências da malha da subestação e, da linha para a terra, então a distribuição de corrente permanecerá constante.

## CAPÍTULO III

### MEDIÇÕES EM REDES REAIS

#### III.1- Introdução

As técnicas mais recentes de detecção de faltas de alta impedância utilizam as variações ocorridas nas correntes de fase e neutro durante a falta como dados de análise. Desta forma é importante observar o comportamento de um sistema real para que variações normais do mesmo não sejam confundidos com variações geradas pela falta.

Teoricamente, um sistema de distribuição de energia elétrica é um sistema balanceado. Na prática, a rede não é transposta o que gera um desbalanço nas correntes de fase. Além disso a alimentação de cargas especiais (conversores, compensadores estáticos, fornos à arco, etc.) contribui para a deformação das correntes de fase. O desbalanço pode ser observado através das componentes de sequência das correntes. A deformação pode ser detectada através da análise de Fourier das ondas de corrente.

Por esta razão foram realizados, por vários grupos de estudo, medições de corrente em sistemas reais sob várias condições de operação, tais como: operação normal, chaveamentos, mudança de carga, entrada ou saída de bancos de capacitores, etc...

#### III.2 - Medição das correntes de uma rede real em operação normal

Para que uma técnica de detecção de falta possa ser validada é importante que a mesma possa diferenciar uma operação normal de uma falta. Como as redes reais não são balanceadas e possuem "poluição

harmônica", devem ser feitas medições e uma análise adequada. Técnicas baseadas no desbalanço de corrente gerada pela falta exigem uma análise das componentes de sequência das correntes. Já para as técnicas de detecção que se baseiam na "poluição harmônica" gerada pelo arco elétrico e, existente na maioria das faltas, se necessita uma análise de Fourier das correntes de fase e de neutro.

### III.2.1 - Técnica de análise pelas componentes sequenciais

Em um sistema balanceado, se as correntes de fase forem decompostas em componentes simétricas, apenas as componentes características das frequências harmônicas serão diferentes de zero, vide tabela III.1. Assim, se a corrente na frequência fundamental for decomposta em componentes de sequência, apenas a componente de sequência positiva será diferente de zero, neste caso a componente de sequência positiva é chamada de componente característica do primeiro harmônico. Da mesma forma, para o terceiro harmônico tem-se apenas a componente de sequência zero, então a componente de sequência zero será chamada de componente característica do terceiro harmônico.

Em um sistema real, onde as linhas não são transpostas e existem cargas desequilibradas, ao se decompor as correntes de fase em componentes simétricas, obtem-se também as componentes não características (componentes de sequência negativa e zero para o primeiro harmônico, positiva e negativa para o terceiro harmônico e positiva e zero para o quinto harmônico) diferentes de zero.

Balser<sup>7</sup> (1986) realizou medições em um sistema de distribuição em operação normal. As correntes de fase foram medidas e

Componentes características e não características de algumas frequências harmônicas			
Harmônico	Componentes Simétricas		
	Positivo	Negativo	Zero
1	Caract.	Não Caract.	Não Caract.
3	Não Caract.	Não Caract.	Caract.
5	Não Caract.	Caract.	Não Caract.

Tabela III.1

decompostas em componentes simétricas. Apenas as componentes não características são analisadas. Como a carga é variável ao longo do tempo, todos os valores medidos são normalizados tomando como base a amplitude da corrente na frequência fundamental. A tabela III.2 mostra o resultado obtido ao longo de 24 horas de medição, onde as componentes foram calculadas a cada 30s.

Resumo Estatístico e Normalizado			
Correntes de Sequência para alimentador real, sem falta			
Harmônico	Componente	Média	Desvio Padrão
1 R	negativo	0,118	0,0189
1 I	negativo	0,130	0,0153
1 R	zero	-0,092	0,0252
1 I	zero	-0,067	0,0119
3 R	positivo	0,011	0,0067
3 I	positivo	0,003	0,0059
3 R	negativo	-0,003	0,0038
3 I	negativo	-0,002	0,0039
5 R	positivo	-0,011	0,0049
5 I	positivo	0,014	0,0046
5 R	zero	0,017	0,0055
5 I	zero	0,009	0,0054

R - Real    I - Imaginário

Tabela III.2

Pode-se notar que em muitos casos o desvio padrão é pequeno em relação média, indicando que os desvios aleatórios não são excessivos. Isto é importante pois facilita as técnicas que se baseiam no desbalanço gerado pela falta.

### III.2.2 - Técnica de Análise pela "Poluição Harmônica"

O efeito da poluição harmônica na rede de distribuição real pode ser observado na fig.III.1, Aucoin<sup>6</sup> (1987), que apresenta o espectro de frequências de uma rede em operação normal. Pode-se observar que os picos de amplitude ocorrem para as frequências harmônicas que são geradas por cargas não lineares. Entre os harmônicos ocorrem vales, o que sugere que frequências geradas pela falta e que estejam nestas faixas são menos sujeitas a serem mascaradas pela "poluição harmônica" da rede.

Como o sistema real possui carga variável, a amplitude das componentes varia ao longo do tempo. As figs.III.2a,b e c, Emanuel<sup>15</sup>

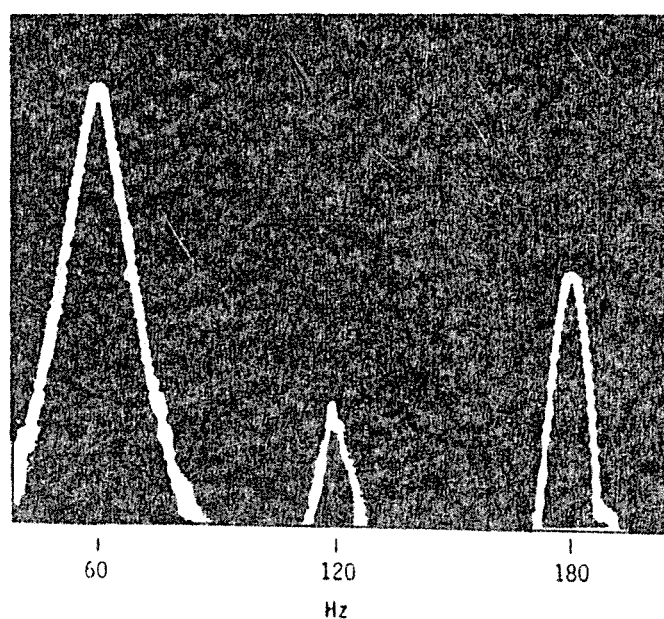


Fig.III.1 - Espectro da corrente de um sistema sem falta

(1990), mostram a variação das amplitudes das componentes do espectro de frequência, sendo elas o primeiro, o segundo e o terceiro harmônicos da corrente de neutro. Para cada uma delas é apresentada a distribuição normalizada da ocorrência pelo valor médio quadrático da corrente nominal. Observa-se que a amplitude da corrente de segundo harmônico é pequena, da ordem de 0 a 0,5A, enquanto a corrente de terceiro harmônico de maior

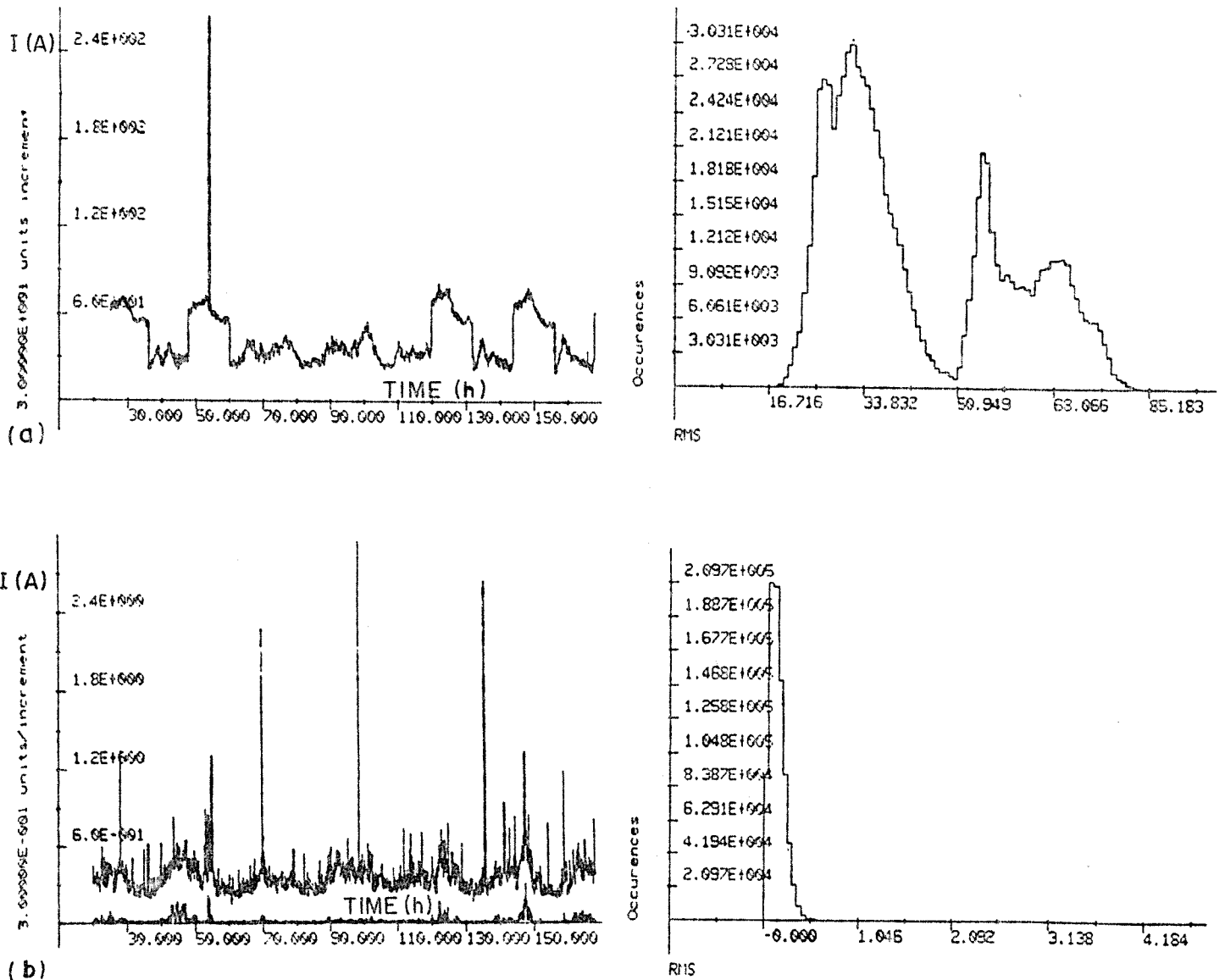


Fig.III.2a e b- Corrente de neutro em uma subestação medida durante 1 semana e a distribuição de corrente (RMS); (a) Componente fundamental (b) Segundo harmônico.

ocorrência, está na faixa de 3 a 6A. A fig.III.3<sup>15</sup> apresenta a medição da componente de terceiro harmônico da corrente de fase. Pode-se observar que a probabilidade de ocorrência de componente de terceiro harmônico na fase se concentra na faixa de 0,35 a 3,5A.

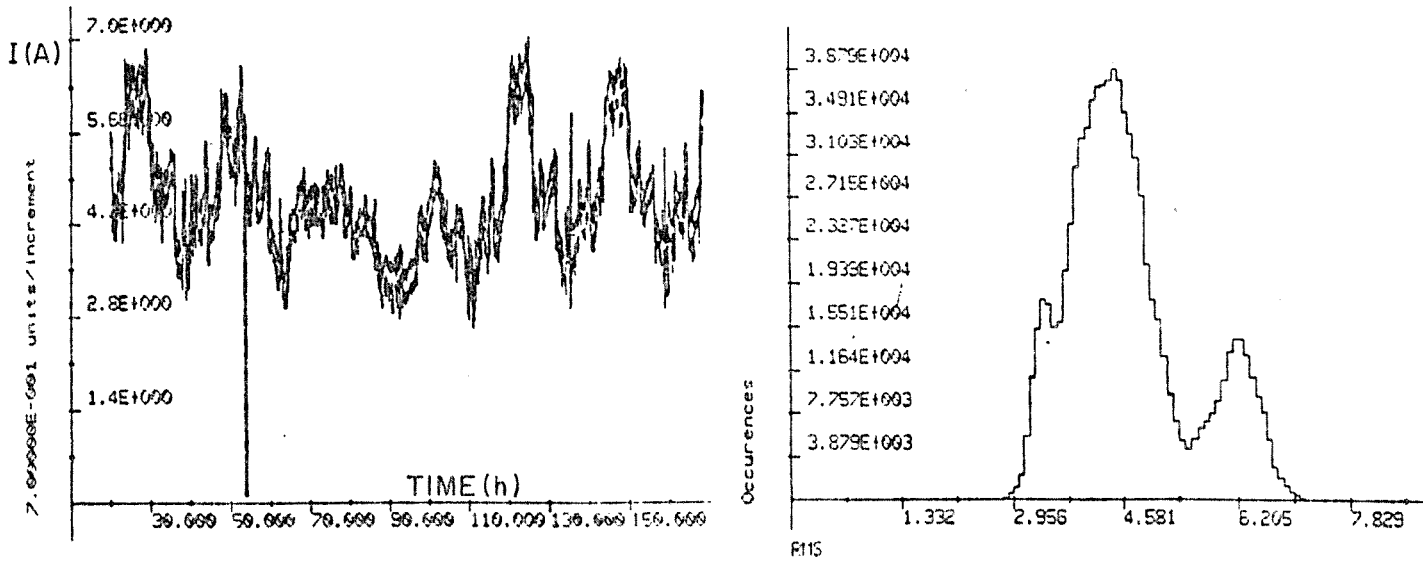


Fig.III.2c - Corrente de neutro em uma subestação medida durante 1 semana e distribuição de corrente RMS; Terceiro harmônico.

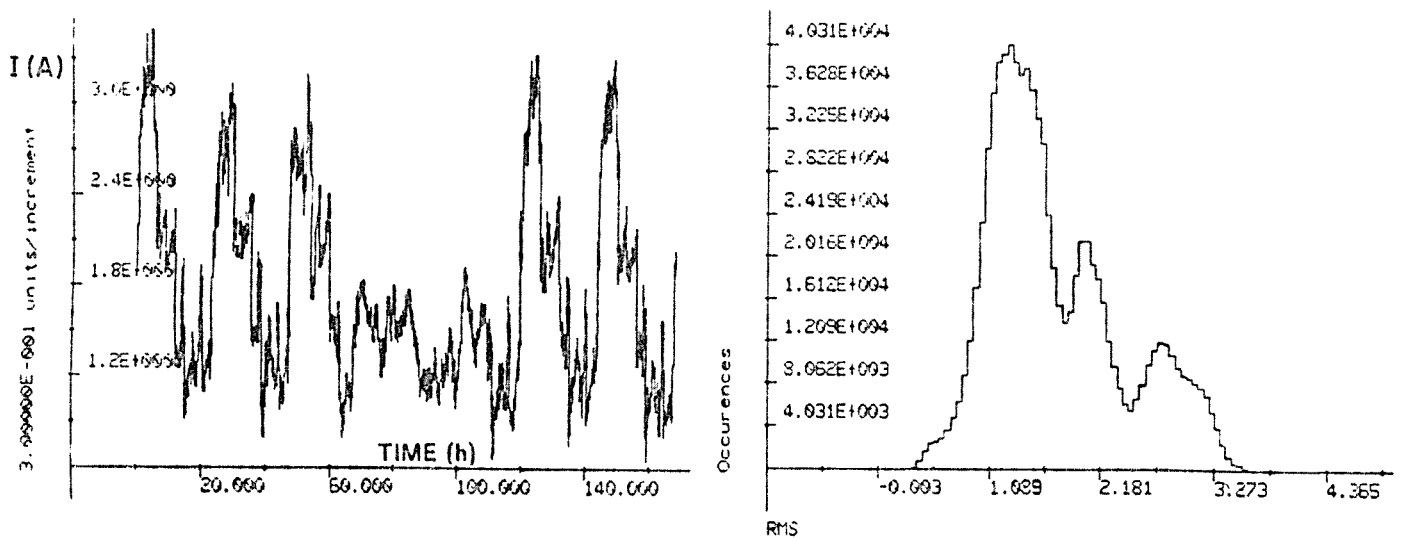


Fig.III.3 - Componente de terceiro harmônico da corrente de fase medida na subestação.

### III.3 - Medição das correntes para um sistema submetido a operações de manobra

Um dos grandes problemas na detecção de uma falta de alta impedância é a distinção entre uma falta e uma manobra normal do sistema. Portanto, para uma detecção efetiva é necessário que o algoritmo seja capaz de reconhecer uma simples saída de carga, ou mesmo manobras, como entrada e saída de bancos de capacitores.

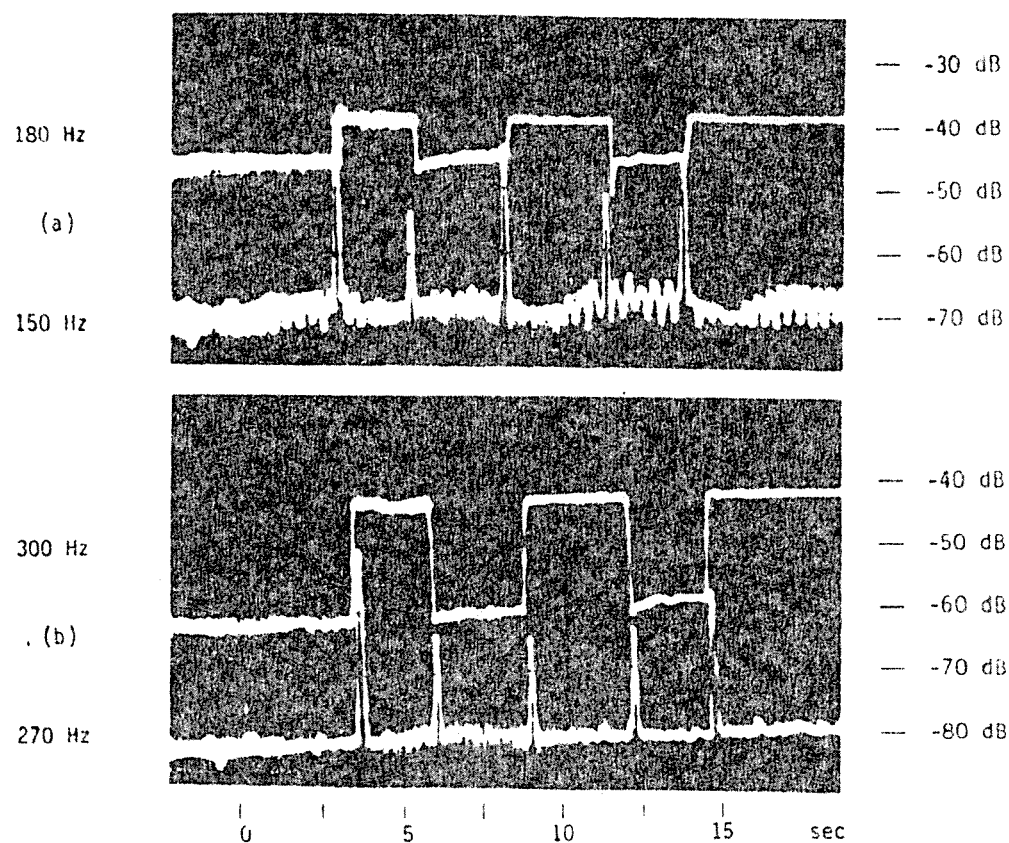


Fig. III.4 - Respostas de várias frequências para a operação de um banco de capacitores.

São mostrados, alguns resultados comparativos de medições apresentadas na literatura. Pode ser visto na fig. III.4, Aucoin<sup>6</sup> (1987), o comportamento para quatro frequências durante o chaveamento de um banco de

capacitores. Observa-se que durante a abertura ou fechamento da chave de um banco de capacitores, as frequências de 180Hz e 300Hz apresentam mudanças permanentes, enquanto as frequências de 150Hz e 270Hz apresentam apenas picos, no momento do chaveamento, de curta duração.

A comparação entre as componentes de frequência em uma rede em operação normal com e sem banco de capacitores é mostrado na fig.III.5, Russell<sup>22</sup> (1988). Observa-se que os harmônicos ímpares são muito afetados pela presença dos mesmos. Os harmônicos pares são praticamente imunes à presença do banco.

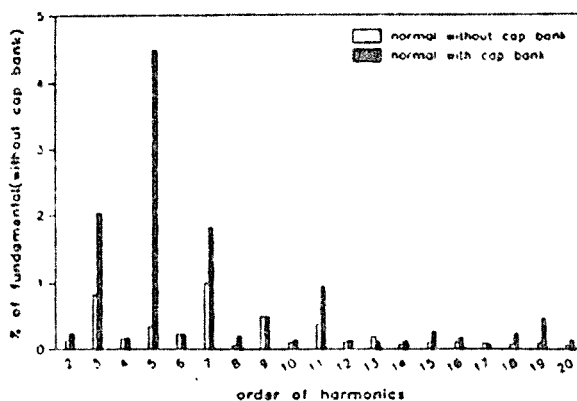


Fig.III.5 - Comparação entre as componentes de frequência para a corrente normal, com e sem banco de capacitores.

#### III.4 - Medições em um sistema submetido a faltas de alta impedância

Neste item são mostradas as componentes de frequência presentes nas correntes de linha, durante a ocorrência de uma falta de alta impedância. A existência ou não de bancos de capacitores na rede altera as amplitudes das componentes de frequência que podem ser medidos na barra da subestação provenientes da ocorrência de um arco elétrico, tornando-se

necessária a medição das duas possibilidades. Outro fator que altera o conteúdo harmônico é o tipo de solo onde ocorre a falta.

#### III.4.1 - Medições de faltas de alta impedância com arco

Aucoin e Russell<sup>6</sup> (1987) apresentam a variação de algumas componentes de frequência quando ocorre uma falta de alta impedância com arco, estando conectado à rede um banco de capacitores. A fig.III.6 mostra esta medição onde 0dB corresponde a 2400A de corrente de fase. Pode ser observado que a variação da componente de 60Hz no tempo não chega a 10dB (205A) após a ocorrência da falta. Porém a componente de 30Hz apresenta uma variação considerável, de -80 para -40dB (0,8 para 44A).

Comparando a forma de onda da componente de 60Hz com a de 30Hz verifica-se que entre 3 e 13s a componente de 60Hz permanece inalterada enquanto que o 30Hz apresenta uma variação substancial. Pode-se dizer assim que é difícil estabelecer uma relação direta entre o nível total da corrente de falta e o nível do sinal das componentes não harmônicas.

A componente de 150Hz apresenta o mesmo comportamento que a de 30Hz. Embora a componente de 180Hz tenha apresentado uma boa variação durante a falta de alta impedância este não é um bom indicador uma vez que a mesma varia substancialmente para vários tipos de cargas.

Dois outros artigos de Russell<sup>22,26</sup> (1988) tratam de análise estatística do comportamento das frequências que compõem o sinal quando da ocorrência de uma falta desta natureza.

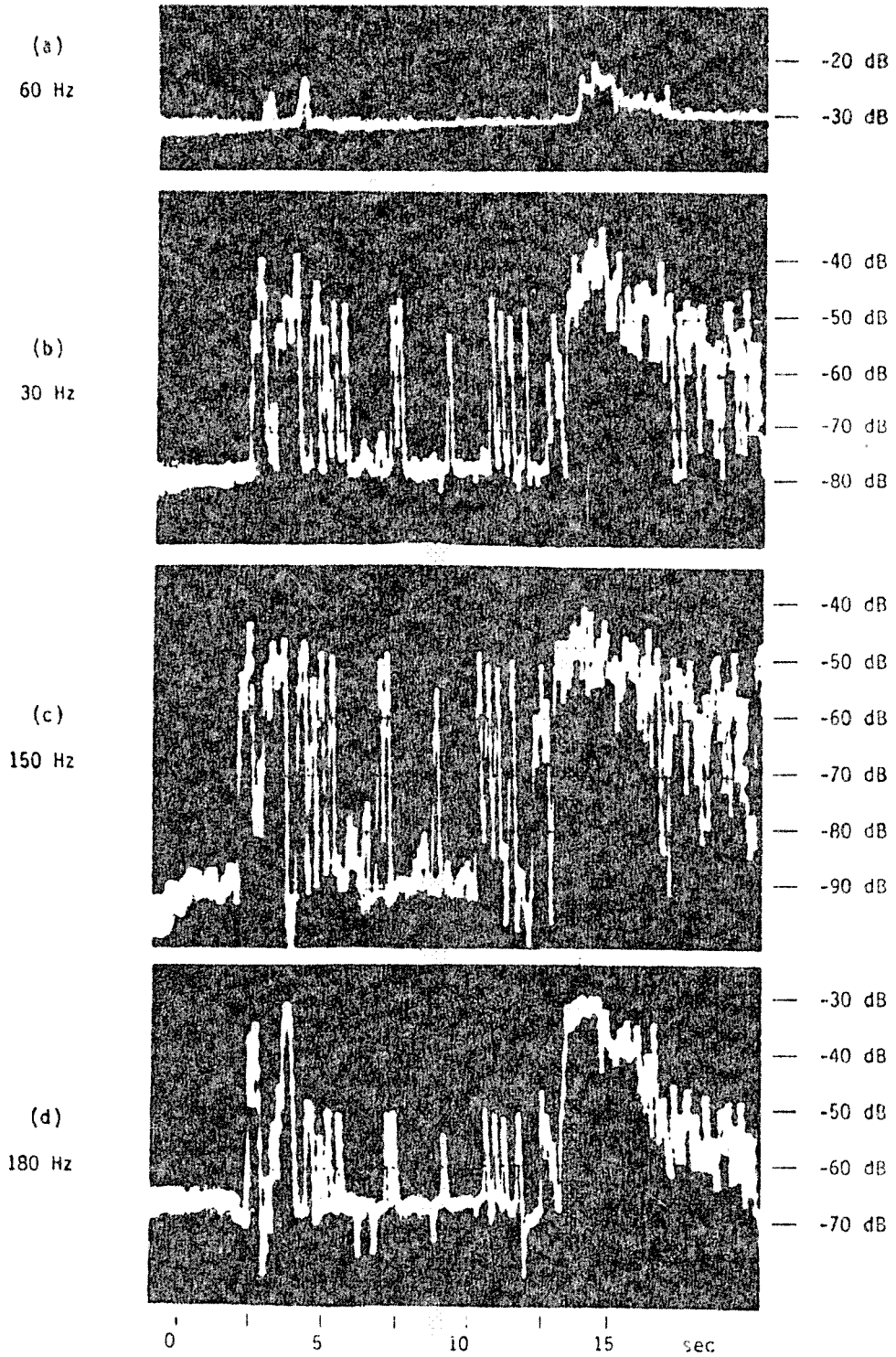


Fig.III.6 - Resposta de algumas componentes de frequências durante a ocorrência de uma falta de alta impedância com banco de capacitores conectado.

Russell<sup>22</sup> (1988) apresenta testes em dois campos de provas onde foram realizados 80 faltas com arco e cuja medição foi realizada com uma frequência de amostragem de 3840Hz significando 64 amostras por ciclo da fundamental. Os dois campos de testes possuem grau de poluição harmônica diferentes e a posição dos bancos de capacitores também é diferente. O campo de teste 1 simula falta em solo úmido enquanto o 2 em solo seco.

As figs.III.7 e III.8 apresentam medições realizadas nos dois campos de testes para faltas com arco, sem banco de capacitores. Pode-se observar nas figs.III.7b e III.8b que os harmônicos pares entre os

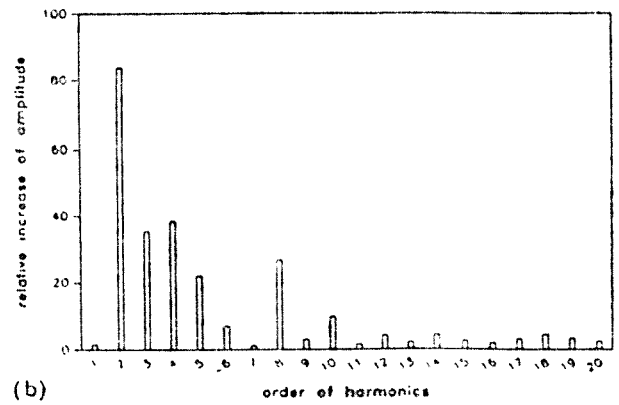
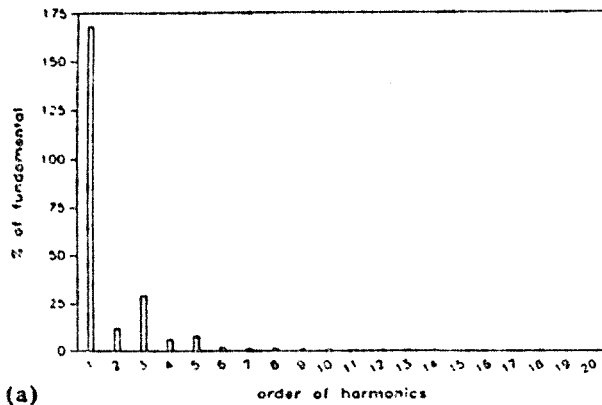


Fig.III.7 - Falta com arco, sem banco, em solo úmido (a)Amplitude de cada harmônico; (b)Acréscimo relativo de cada harmônico.

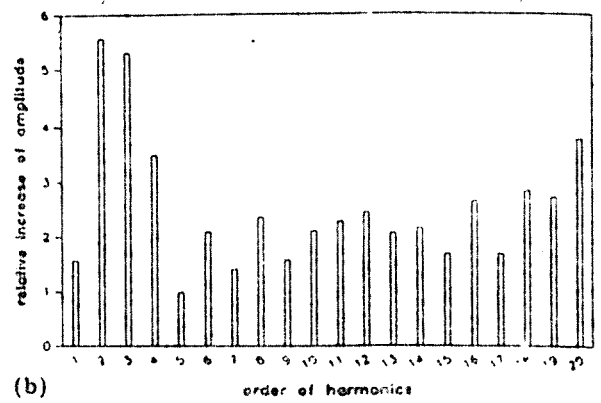
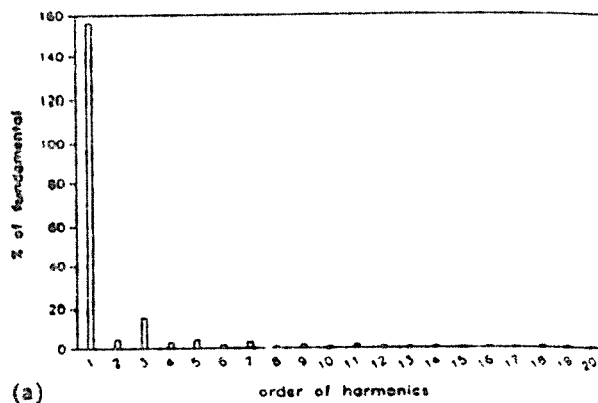


Fig.III.8 - Falta com arco, sem banco, em solo seco; (a)Amplitude de cada harmônico; (b)Acréscimo relativo de cada harmônico.

de ordem 7 ao de ordem 14 apresentam um acréscimo relativo aos harmônicos ímpares imediatamente antes.

Faltas com arco e com o banco de capacitores conectado são mostradas nas figs.III.9 e III.10 . Na presença do banco de capacitores verifica-se que o mesmo comportamento dos harmônicos ocorre porém, com os harmônicos de 1 a 8.

Russell conclui que na ocorrência de uma falta de alta impedância o acréscimo relativo dos harmônicos pares são maiores que os

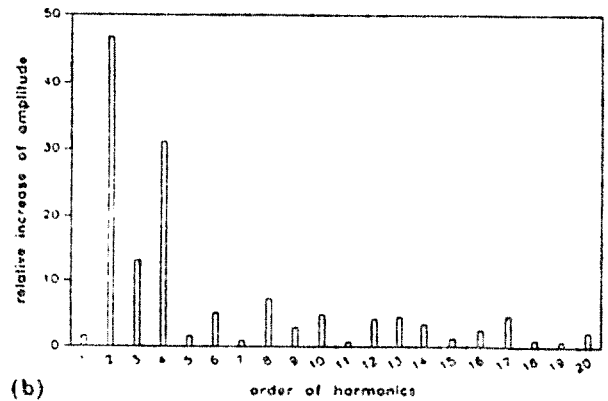
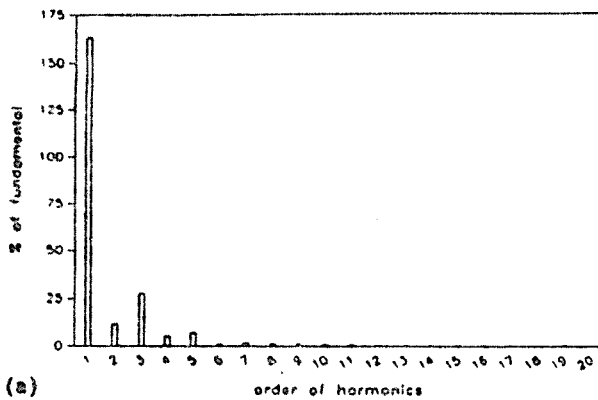


Fig.III.9 - Falta com arco, com banco, em solo úmido; (a)Amplitude de cada harmônico; (b)Acréscimo relativo de cada harmônico.

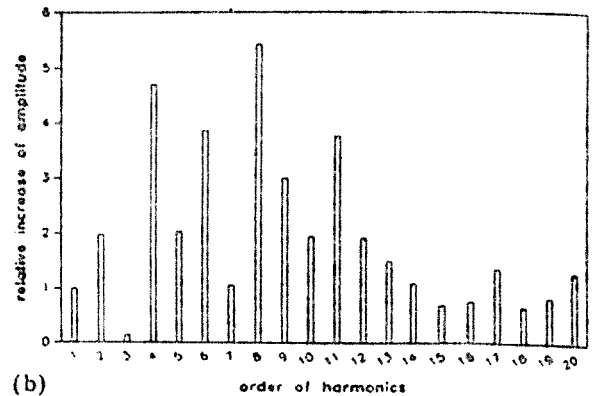
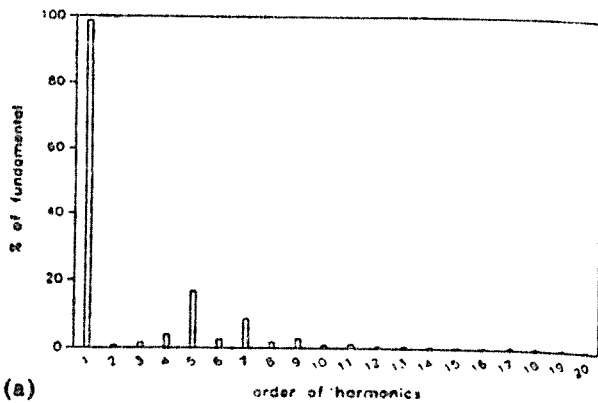


Fig.III.10- Falta com arco, com banco, em solo seco; (a)Amplitude de cada harmônico; (b)Acréscimo relativo de cada harmônico

ímpares. Como vários equipamentos geram harmônicos ímpares, é melhor utilizar os pares para indicar uma falta de alta impedância.

Em outro artigo Russell<sup>26</sup> (1988) apresenta medições com a variação do tipo de solo e duração da falta. As faltas foram realizadas em três tipos diferentes de solo, sendo eles: úmido, seco e arenoso. A duração do arco também foi dividida em três: curta (1 a 3 ciclos), média (5 a 20 ciclos) e longa duração (maior que 20 ciclos). Foram 150 eventos para cada campo de teste.

As figs. III.11a e III.12a apresentam o acréscimo médio relativo da amplitude das frequências que compõem o sinal para um arco de curta duração em solo úmido e seco respectivamente. As frequências não harmônicas indicam variações da ordem de 20 a 50 vezes maior sob condições de falta. Porém, esta mudança é bastante aleatória como é indicado pelo desvio padrão. Os gráficos apresentam duas barras, uma com o valor médio e a outra com o desvio padrão que indica a dispersão da amplitude do valor médio.

Arcos de média duração apresentam menores desvios para as frequências entre harmônicas indicando menor dispersão, figs. III.11b, 12b e 13a. Arcos de longa duração são mostrados na fig. III.13b. A dispersão também é pequena.

Observando as figuras supracitadas pode-se dizer que as frequências entre harmônicas possuem espectro aleatório com grande variação na magnitude sob condições de falta. A variação da magnitude é mais consistente para arcos de média duração. Para as frequências harmônicas a

variação da amplitude é mais consistente independentemente do tempo de duração do arco.

Para faltas em solos úmidos e secos, figs. III.11 e III.12, a componente de 120Hz apresenta acréscimos relativos de amplitude maior que a componente de 180Hz. Para solos arenosos acontece o inverso. Esta mesma característica para os solos úmidos e secos pode ser observada nas figs. III.7 e III.8.

Russell<sup>26</sup> apresenta testes correlacionando o tipo de solo com o tempo de duração do arco e conclui que para solos úmidos a maior porcentagem dos arcos são de curta duração. Solos secos apresentam, na sua maioria, eventos de média duração e solos arenosos apresentam eventos de longa duração.

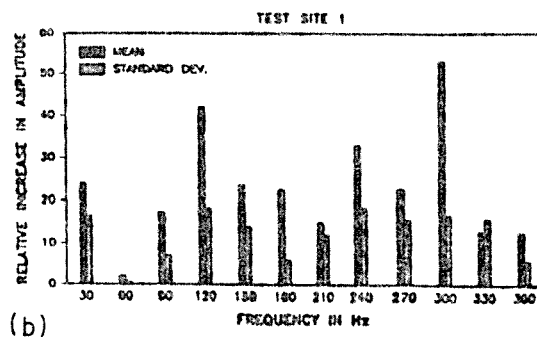
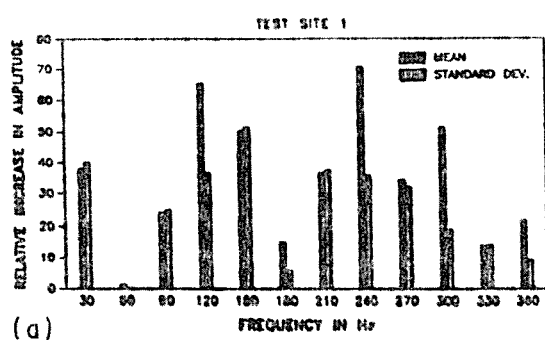


Fig. III.11- Solo úmido: (a) Arco de curta duração; (b) Arco de média duração.

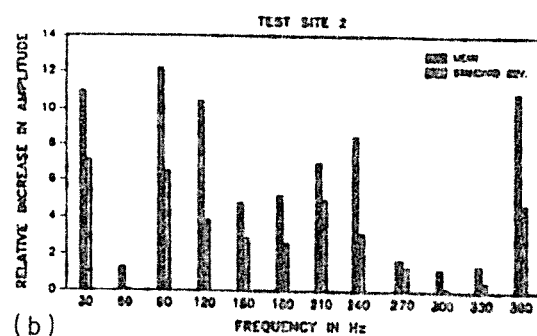
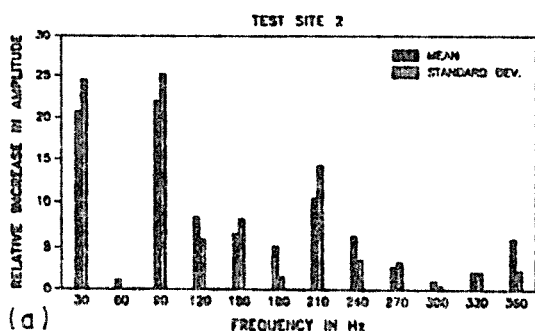


Fig. III.12- Solo seco: (a) Arco de curta duração. (b) Arco de média duração.

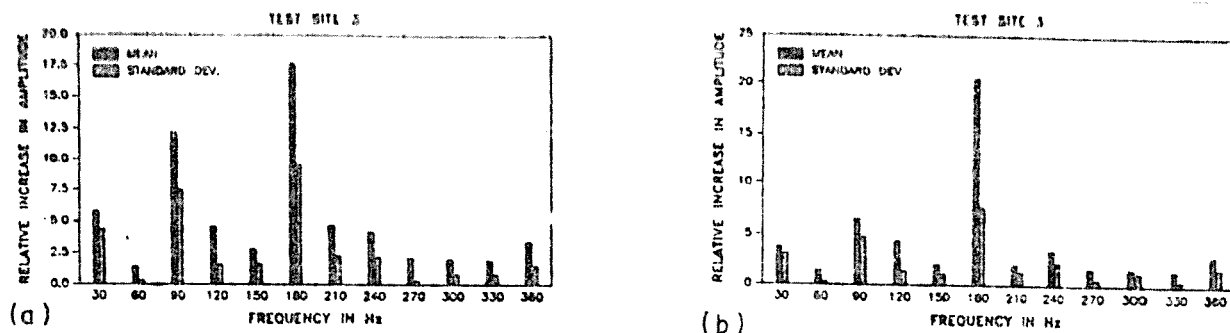


Fig. III.13- Solo arenoso: (a) Arco de média duração; (b) Arco de longa duração.

Outras conclusões a que chegou Russell: O período de duração entre arcos consecutivos para solos úmidos é curto. Para solos secos é de média duração e solos arenosos longa duração. A dependência da magnitude das frequências harmônicas com as condições do solo é a seguinte: Solos úmidos apresentam variações maiores no acréscimo de amplitude pois a sua condutividade inicial é maior.

## CAPÍTULO IV

## TÉCNICAS BASEADAS NO DESBALANÇO DE CORRENTE GERADO PELA FALTA

## IV.1- Introdução

A ocorrência de uma falta introduz um desbalanço de correntes no sistema. Este desbalanço pode ser utilizado na detecção da falta utilizando-se técnicas diferentes. A seguir são apresentadas algumas das técnicas que se baseiam nesta característica.

## IV.2- Relé de Razão de Terra

O conceito do relé de razão de terra (RGR- Ratio Ground Relay) foi inicialmente investigado através de um estudo conjunto da Pennsylvania Power and Light Company (PP&L) e a Westinghouse Advanced Systems Technology. Este estudo foi iniciado em 1977, Elmore<sup>14</sup>.

Após se concluir que havia viabilidade técnica, o RGR foi implementado em um relé protótipo, dando "trip" quando a razão entre  $3I_0$  (corrente de sequência zero) e  $I_1$  (corrente de sequência positiva), excedesse um nível pré estabelecido. Desta forma a sensibilidade do relé varia proporcionalmente para correntes de fase desbalanceadas.

Este conceito foi implementado usando um relé do tipo indução com duas janelas. A janela de operação produz um torque proporcional a  $|3I_0|^2$  e a janela de restrição produz um torque proporcional a  $|I_1|^2 - |I_2|^2$ . Os dois torques em oposição produzem a característica de operação desejada.

Através de testes realizados, observou-se que a "performance" do RGR para uma falta fase-terra depende do nível da carga, localização da falta ao longo do alimentador e da impedância da falta. A fig.IV.1 mostra a característica do relé. Como o elemento restritivo depende do nível de carga, o seu limite de operação varia ao longo do tempo. O relé RGR possui maior sensibilidade que o convencional até 50% da carga (ou seja, 2A no secundário do TC)

Um sistema de distribuição real possui correntes desbalanceadas. Desta forma o relé foi feito para operar em três níveis de desbalanço diferentes, porém fixos. Como o nível de desbalanço da corrente é variável ao longo do tempo existe a possibilidade de falsa operação do relé.

Em um sistema equilibrado cada fase carrega uma corrente  $I$ . Em um sistema em falta, a fase afetada carregará uma corrente  $RI$  onde  $R$  irá

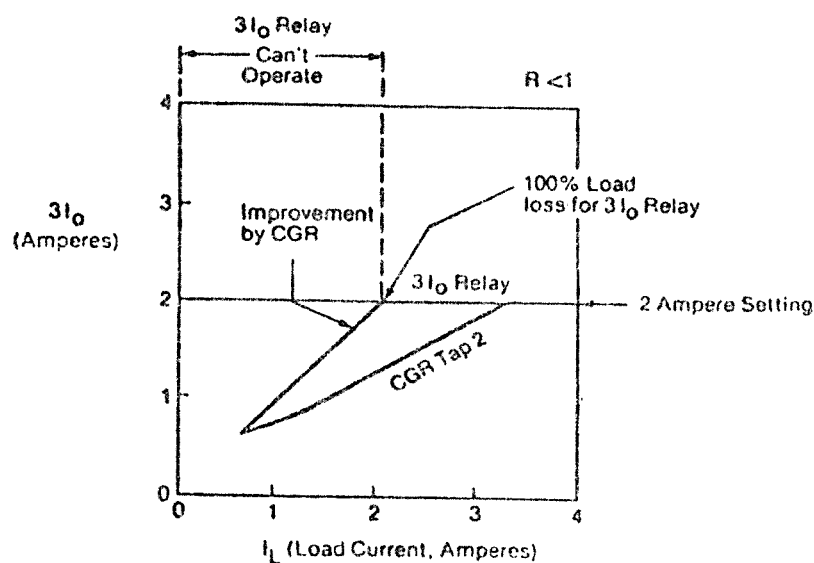


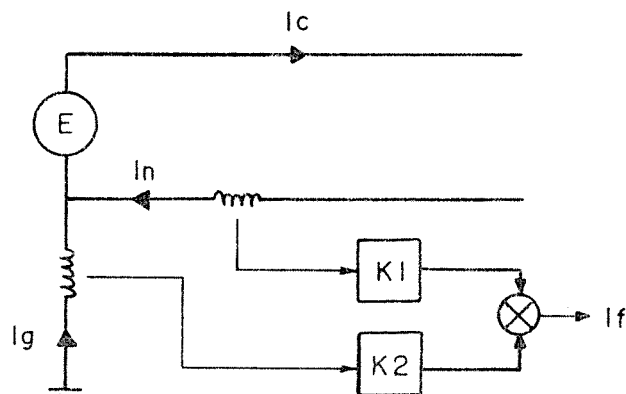
Fig. IV.1 - Característica dos relés RGR e o convencional.

caracterizar o tipo de falta. Se a falta for fase neutro então a corrente será maior que  $I_e$ , então,  $R > 1$ . Se a falta for de alta impedância  $R < 1$ .

#### IV.3 - Relé Proporcional

O início da falta altera o balanço existente sob condições normais entre as correntes de linha, neutro e terra. A falta pode ser detectada anotando-se a modificação ocorrida no balanço.

Este método faz medição de pares de correntes e os somam de tal forma que o resultado é apenas a corrente de falta. As correntes utilizadas são as de neutro, fase e terra. Cada uma destas correntes amostradas é multiplicada por um fator adequado e posteriormente somada. O resultado desta conta é a corrente de falta. Um exemplo é mostrado na fig. IV.2.



$I_c$  CORRENTE DE CARGA  
 $I_n$  CORRENTE DE NEUTRO  
 $I_g$  CORRENTE DE TERRA  
 $I_c = I_n + I_g$   
 $I_f$  CORRENTE DE FALTA

Fig. IV.2 - Relé proporcional

Cada uma das correntes da fig.IV.2 possui componentes de ambas as correntes: corrente de carga  $I_L$  (monofásica) ou corrente de desbalanço de carga  $I_L$  (trifásica) e a corrente de falta  $I_F$ . A partir das figs. II.2 e IV.2 pode-se tirar as seguintes equações:

$$I_C = I_L + I_F$$

Se

$$I_N = x I_L + y I_F$$

Então

$$I_G = (1-x) I_L + (1-y) I_F$$

Ou seja, a corrente de neutro é decomposta por parte da corrente de carga e parte da corrente de falta. As outras parcelas destas correntes retornam pela terra. Após a manipulação das equações anteriores chega-se à seguinte expressão:

$$I_F = K_1 I_G + K_2 I_N$$

onde

$$K_1 = \frac{x}{x-y} \quad \text{e} \quad K_2 = \frac{x-1}{x-y}$$

Retomando as equações (2,3 e 4) apresentadas em Carr<sup>10</sup>(1981)

tem-se:

$$I_{NL} = \left[ \frac{Z_1 + Z_2}{D} + \frac{R_G}{Z_2 + R_G} \cdot \frac{Z_N}{D} \right] I_L$$

onde

$$x = \frac{Z_1 + Z_2}{D} + \frac{R_G}{Z_2 + R_G} \cdot \frac{Z_N}{D}$$

$$y = \frac{Z_2 + Z_N}{D} \cdot \frac{R_G}{Z_2 + R_G} + \frac{Z_1}{D}$$

$$Z_2 = \frac{2R}{n}, \quad Z_1 = \frac{2RR_G}{nR_G + 2R} \quad \text{e} \quad D = Z_1 + Z_2 + Z_N$$

então

$$K_1 = \frac{Z_1 Z_2 + Z_2^2 + R_G D}{Z_2^2} \quad \text{e} \quad K_2 = - \frac{Z_N}{Z_2}$$

R - resistência de pé de torre;

$R_G$  - resistência de malha da subestação;

n - número de postes;

$Z_N$  - impedância série do neutro.

Outras combinações de correntes são possíveis. Para o RGR, a variação da resistência de terra com a unidade não é significativa, uma vez que os fatores proporcionais são razões destas resistências.

#### IV.4 - Tratamento Estatístico do Desbalanço de Corrente

Este método foi desenvolvido pela Power Technologies, Inc. e financiado pelo Electric Research Institute (EPRI), Balser<sup>7,8</sup>.

Uma falta de alta impedância envolve normalmente uma ou duas das três fases do sistema de distribuição. Desta forma, a falta provoca um desbalanço de corrente nas mesmas. O algoritmo apresentado por Balser<sup>7,8</sup> (1986) trata de forma estatística este desbalanço.

Como foi apresentado no Capítulo III no item III.2.1, Balser optou pela análise do desbalanço de corrente através das componentes de sequência. Ele optou em trabalhar apenas com a frequência fundamental, o terceiro e o quinto harmônicos, porque estes apresentaram amplitude suficiente permitindo a medição com equipamentos não muito sofisticados.

#### IV.4.1 - Testes Estatísticos

Um campo de testes foi montado na Rochester Gas and Electric (RG&E) para se estudar faltas de alta impedância. Neste campo de testes seis tipos de superfícies foram avaliados. São eles: asfalto, grama, cascalho, terra arada, concreto reforçado e não reforçado. Dois tipos de cabos também foram testados: alumínio nu e alumínio coberto. Quatro diferentes condições foram investigadas:

- Sem carga e sem falta;
- Carga linear resistiva e sem falta;
- Sem carga e falta de alta impedância com arco
- Carga linear resistiva e falta de alta impedância com arco

Com estes testes foi montado um banco de dados posteriormente analisado de forma estatística. Foram feitos três tipos de tratamento estatístico com os dados, a fim de obter a melhor forma de tratamento para estes dados.

- Estatística Global

Neste teste, os dados utilizados como parâmetros foram a média normalizada da magnitude e fase dos harmônicos e a variância dos mesmos. Observando a variância da magnitude e da fase do terceiro harmônico

Harm.	A	$\sigma( A )$	B	$\sigma( B )$	C	$\sigma( C )$
1	0.00000	0.00000	-.00196	.00639	.08915	.12940
3	.00169	.01929	.01412	.02278	.39024	.69355
5	-.00765	.20315	.09036	.16445	.69355	.48296

Harm.	$\angle A$	$\sigma(\angle A)$	$\angle B$	$\sigma(\angle B)$	$\angle C$	$\sigma(\angle C)$
1	0.00000	0.00000	-.00049	.00142	-.01386	.01441
3	-.00128	.00590	-.00097	.00453	-.03114	.08373
5	.00338	.02836	.00270	.01141	-.00221	.04030

Tabela IV.1- Média individual e desvio padrão das correntes de fase. Correntes de fase normalizadas em relação à corrente da fase A. (Pré-falta - falta)/Pré - falta.

e comparando com a mudança que ocorre antes da falta e depois, pode-se notar que a variância é grande em relação à mudança média, tabela IV.1. Desta forma torna-se difícil utilizar este método. A fase em falta é a fase C.

#### - Estatística Individual

Ao contrário do teste anterior que apresenta valores antes e depois da falta, este apresenta apenas um valor que é dado pelas equações abaixo:

$$\text{Magnitude} = \frac{|I|_{\text{Falta}} - |I|_{\text{PreFalta}}}{|I|_{\text{PreFalta}}}$$

$$\text{Ângulo} = \frac{\angle I_{\text{Falta}} - \angle I_{\text{PreFalta}}}{\angle I_{\text{PreFalta}}}$$

As figs.IV.3, IV.4 e IV.5 mostram os histogramas das correntes de fase. Este método apresenta maior variação que o anterior. É um bom indicador de falta.

#### - Estatística dos Componentes Simétricos

Quando um sistema está completamente balanceado, cada harmônico ao ser decomposto em componentes simétricas apresenta apenas a sua componente característica, Cap.III. Ou seja, decompondo a frequência fundamental em componentes de sequência obtem-se apenas a componente de sequência positiva, o terceiro harmônico é composto apenas pela componente de sequência zero e o quinto harmônico apenas pela sequência negativa. Quando o sistema não é balanceado isto não ocorre e, o primeiro, terceiro e quinto harmônicos são compostos por todas as componentes de sequência diferentes de zero.

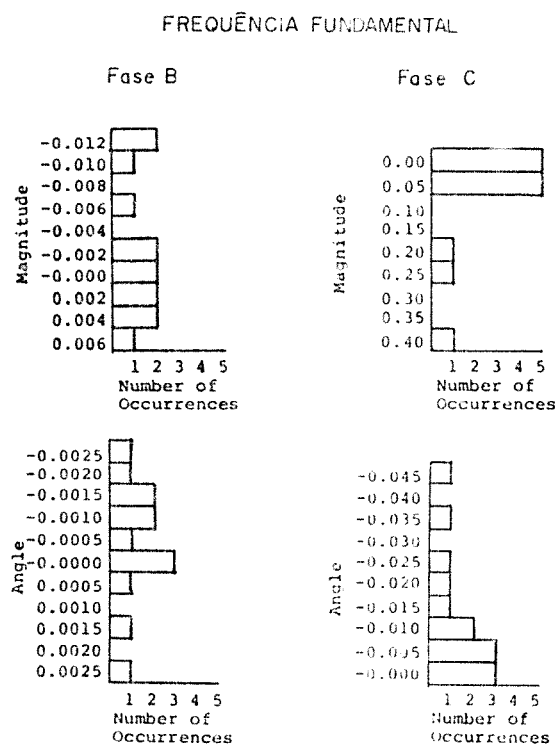


Fig.IV.3- Histogramas para as correntes fundamentais de fase. Correntes normalizadas em relação à fase A.

## TERCEIRO HARMÔNICO

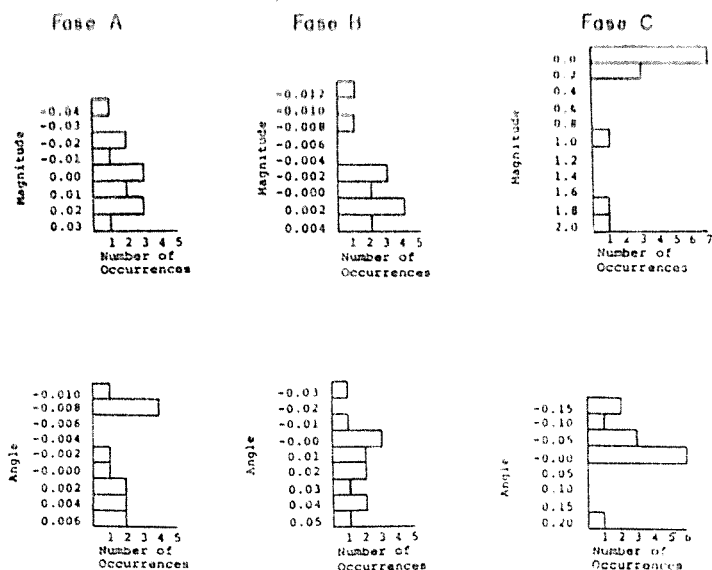


Fig. IV.4- Histogramas para as correntes de terceiro harmônico das fases. Correntes normalizadas em relação à fase A.

## QUINTO HARMÔNICO

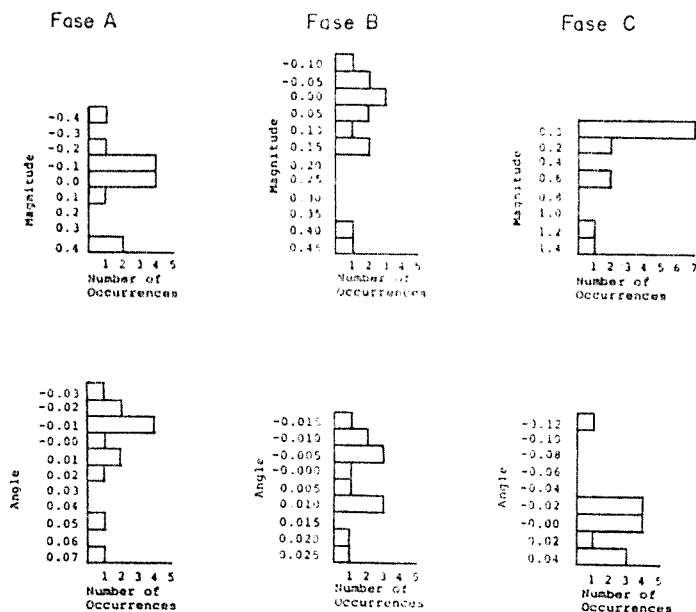


Fig. IV.5- Histogramas para as correntes de quinto harmônico das fases. Correntes normalizadas em relação à fase A.

O desbalanceamento real do sistema se dá devido à sua configuração desbalanceada e cargas desequilibradas. Embora os acréscimos observados por este método sejam expressivos, existe uma grande dispersão associada, o que reduz a confiabilidade para se usá-lo como indicador de falta. Assim, usar

as componentes simétricas como um indicador simples da presença de uma falta de alta impedância, não apresenta uma melhora significativa em relação ao método anterior, figs.IV.6 e IV.7 e IV.8.

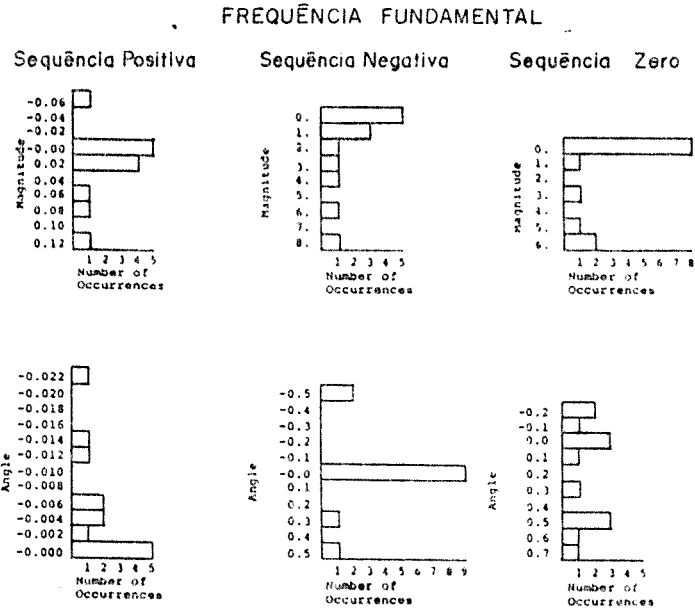


Fig.IV.6- Histogramas das componentes de seqüência da corrente fundamental, normalizadas em relação à fase A.

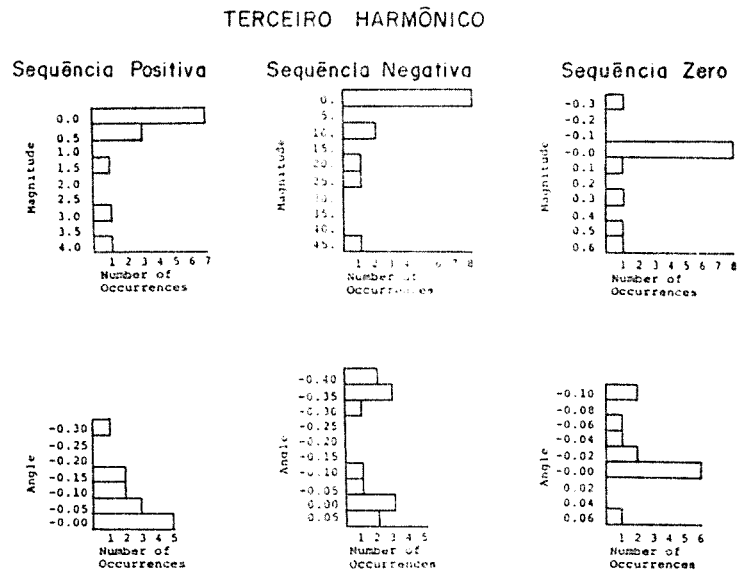


Fig.IV.7- Histogramas das componentes de seqüência da corrente de terceiro harmônico, normalizadas em relação à fase A.

## QUINTO HARMÔNICO

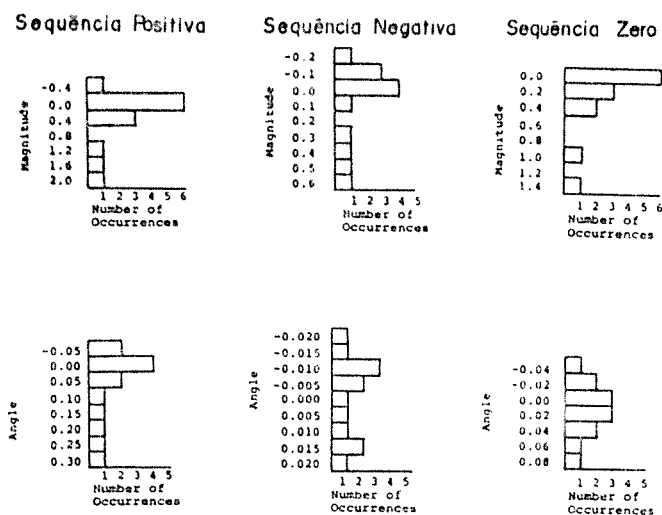


Fig.IV.8- Histogramas das componentes de seqüência da corrente de quinto harmônico. Correntes normalizadas em relação à fase A.

#### - Tratamento Estatístico

É extremamente laborioso fazer uma modelagem determinística para a falta de alta impedância, uma vez que existe uma grande diversidade de parâmetros e condições para o seu comportamento. Assim um tratamento estatístico aproximado se apresenta mais promissor. É utilizado o teste estatístico Qui-quadrado.

A função densidade Qui-quadrada é calculada a partir dos valores medidos, valor médio e variância. O grau de liberdade da função qui-quadrada é dada pelo número de variáveis que são medidas. Como são doze variáveis a serem medidas, tem-se uma função qui-quadrada com doze graus de liberdade (conforme tab.III.1). Quanto maior o grau de liberdade maior a

sensibilidade do teste estatístico e a probabilidade de cometer erros decresce.

Quando o processo aleatório tem parâmetros estatísticos estacionários (isto é, não variáveis no tempo), então é possível selecionar  $K$  amostras sequenciais e formular uma estimativa da média através de um simples cálculo. Isto não garante que as estatísticas das correntes de sequência normalizadas sejam estacionárias. De fato seria uma surpresa se elas o fossem, uma vez que a mudança de características da carga é considerável ao longo de um período de 24 horas.

Para o caso não estacionário é necessário construir estimativas da média e variância com pesos mais fortes para dados recentes do que para dados antigos. Assim foi utilizada uma estimativa que se adapta ao comportamento variável no tempo. O peso das amostras foi implementado no algoritmo utilizando o amortecimento exponencial.

Quando uma falta de alta impedância ocorre, seu efeito muda os valores médios das correntes de sequência normalizados causando um acréscimo na variável de comparação com o valor limite. Caso o acréscimo supere o limite tem-se a indicação da falta.

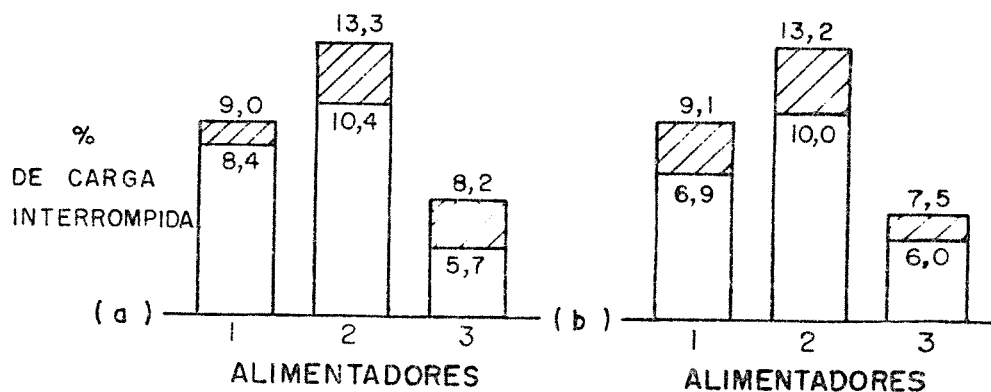


Fig. IV.9- Falta Passiva: (a) Falta monofásica; (b) Falta bifásica.

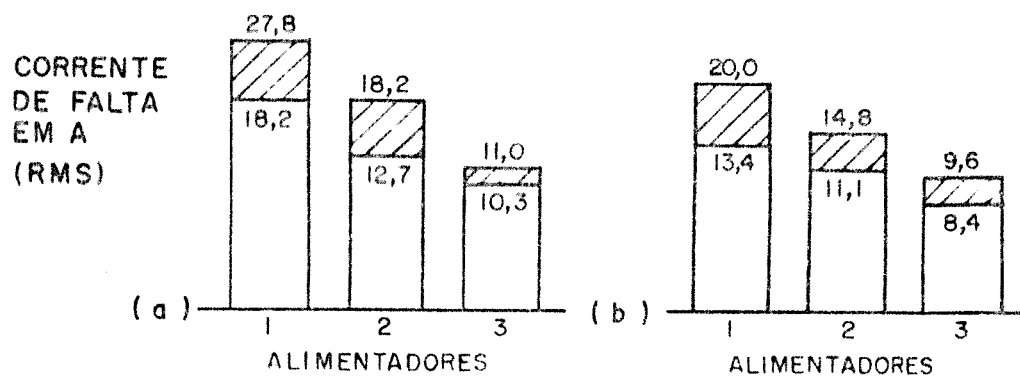


Fig. IV.10- Falta Ativa: (a)Falta monofásica; (b)Falta bifásica.

As figs.IV.9 e IV.10 apresentam o resultado do esquema de detecção para faltas monofásicas e bifásicas, passivas e ativas respectivamente. Segundo Balser, a técnica apresentada identifica a presença de uma falta de alta impedância passiva quando o nível de corrente de carga interrompida for maior que 5% da carga nominal, com 90% de probabilidade de detecção. As faltas ativas, ou seja, com arco, são identificadas para correntes de 10A ou mais com 90% de probabilidade de detecção.

CAPÍTULO V  
DETECÇÃO UTILIZANDO AS FREQUÊNCIAS  
GERADAS DURANTE A FALTA

V.1 - Introdução

Em faltas para terra e particularmente em faltas com arco, são geradas frequências diferentes da fundamental. Isto ocorre devido à razão não linear entre a tensão e a corrente do arco e da terra<sup>10</sup>. A expressão matemática que descreve o comportamento não linear é da forma:

$$V = K I^n$$

Para correntes que circulam na terra,  $n$  está entre 0 e 0,5, ou seja, introduzem harmônicos de baixa ordem na rede. Para o arco  $n$ , varia entre -2 e 0, introduzindo harmônicos de alta ordem.

Na falta de alta impedância a resistência da terra e do arco estão em série e a resistência equivalente é a soma delas. A fig.V.1 apresenta a curva de variação da resistência com a corrente. Observa-se que para pequenas correntes a resistência do arco predomina e para grandes

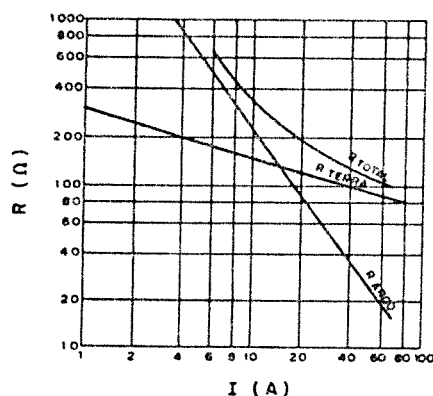


Fig.V.1- Dependência da resistência de falta com a corrente.

correntes a resistência da terra predomina. A partir desta análise, alguns grupos de pesquisadores na área desenvolveram dois tipos de técnicas distintas, apresentadas neste capítulo e divididas em: detecção utilizando altas frequências e detecção utilizando frequências próximas à frequência fundamental.

## V.2- Detecção Utilizando Altas Frequências

Esta linha de pesquisa se iniciou em 1976 na Texas A&M University. A técnica inicialmente proposta de utilizar as altas frequências foi estudada ao longo de 11 anos, Aucoin<sup>1,3,4 e 5</sup>, Narendorf<sup>20</sup> e Russell<sup>23</sup>.

O algoritmo utilizando as altas frequências foi apresentado por Aucoin e Russell<sup>5</sup> (1978). O algoritmo proposto é dividido em duas partes: detecção do evento e detecção da característica de frequência. A detecção do evento só indica uma ocorrência no alimentador mas, não distingue uma falta de uma operação normal do sistema. Após a detecção do evento passa-se para a rotina de detecção da característica de frequência na qual a falta é diferenciada de uma operação normal.

### - Detecção do Evento

O objetivo desta fase da detecção da falta é identificar alguma mudança na corrente de regime. A técnica para esta identificação é baseada na comparação entre dois ciclos consecutivos de 60Hz, ponto a ponto. Para esta comparação o sinal de corrente é filtrado e apenas a frequência fundamental é comparada. A comparação é feita de forma bastante

simples utilizando um contador para que ruídos espúrios e mudança gradual de carga não sejam identificados como evento.

#### -Detecção da Característica de Frequência

O objetivo desta rotina é uma vez estabelecido o evento identificar se o mesmo é uma falta de alta impedância. Nesta rotina a energia contida na corrente da faixa de altas frequências é comparada com a energia contida na componente de frequência fundamental (60Hz) e seus harmônicos de baixa ordem. Neste momento o tempo passa a ser um critério importante uma vez que tanto as operações normais quanto as faltas de alta impedância possuem ruídos de alta frequência e somente o tempo de duração destes ruídos é que diferem.

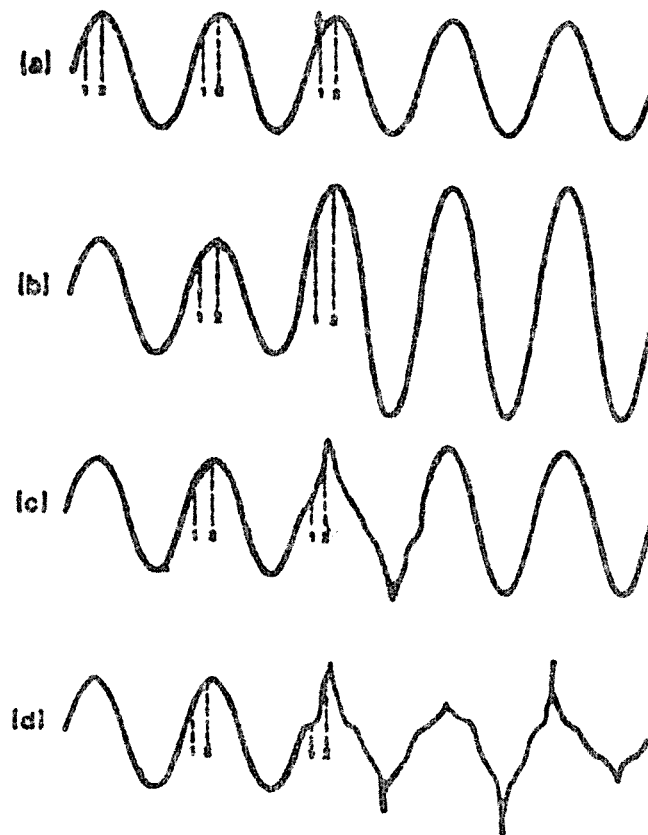


Fig.V.2- Forma de onda do sistema.

A fig.V.2 apresenta algumas ondas para análise segundo o método. A fig.V.2a mostra o regime permanente para o 60Hz. Ela apresenta um pico de corrente no terceiro ciclo que não é identificado como evento. A fig.V.2b mostra uma falta de baixa impedância que é identificada como evento mas, por possuir pouco ruído em altas frequências, não é identificada como falta de alta impedância. A fig.V.2c apresenta um chaveamento. Como se trata de um fenômeno de curta duração apenas o evento é identificado. Em V.2d tem-se uma falta de alta impedância. Neste caso, tanto o evento quanto a falta são identificados.

Esta técnica foi implementada em microprocessador e o primeiro protótipo instalado na Public Service Company of New Mexico (PNM) em 1981. A partir dos testes em campo, as seguintes considerações sobre o método foram levantadas:

- A técnica apresentada foi testada com êxito em vários alimentadores, porém todos eles estavam com os seus bancos de capacitores (ligados em estrela com neutro aterrado) desconectados. Para a implementação desta técnica em alimentadores onde existem bancos conectados é necessário a instalação de indutores sintonizados no neutro dos mesmos.
- Através de testes de campo observou-se que os ruídos gerados pela falta de alta impedância aparecem nos alimentadores adjacentes por acoplamento indutivo. Apesar de aparecerem atenuados é necessário que os relés sejam direcionais ou que haja algum tipo de comunicação entre eles.
- O detector de falta deve coordenar com a proteção de sobrecorrente existente na rede.
- Esta técnica só detecta falta de alta impedância com arco, uma vez que a característica não linear deste é que gera as altas frequências.
- Somente faltas com corrente superior a 10A são detectadas por este método.

Posteriormente, o detector de falta de alta impedância (AFD- Arcing Fault Detector) foi implementado juntamente com o relé de sobrecorrente (OVC- Overcurrent Relay) dando origem ao FPMS (Feeder Protection and Monitoring System), Aucoin<sup>3 e 4</sup> (1985). Este equipamento foi instalado em julho de 1983 na Houston Lighting and Power e outros dois, em agosto, na Public Service Company of New Mexico (PNM). As considerações sobre detecção de faltas de alta impedância permaneceram as mesmas anteriormente colocadas. Devido às considerações feitas anteriormente, esta técnica necessita ser associada a outras que possam cobrir as suas falhas e tornar a detecção deste tipo de falta mais confiável.

### V.3- Detecção Utilizando Frequências Próximas À Frequência Fundamental

A utilização de frequências próximas à fundamental, como parâmetro na detecção de faltas de alta impedância, foi introduzida na literatura em meados da década de oitenta, Aucoin<sup>6</sup> e Russell<sup>22,24 e 26</sup>. A opção por esta faixa de frequência se deu porque a atenuação é pequena e o problema da existência de bancos de capacitores é minimizada.

Como o fenômeno gerado pelo arco é aleatório, não existe nenhum padrão de comportamento destas frequências, porém, é evidente a sua alteração quando da ocorrência de um falta.

#### -Sinais não Síncronos

Russell e Aucoin<sup>6</sup> (1987) propõem uma técnica para detecção de faltas de alta impedância monitorando frequências próximas da frequência fundamental, mas que não sejam síncronas. A existência de cargas geradoras de harmônicos, ligadas à rede sugere que não sejam utilizados, para

identificar a falta, os sinais síncronos, uma vez que variações normais de carga podem mascarar variações decorrentes de uma falta desta natureza.

Filtros digitais do tipo Comb<sup>26</sup> são utilizados com o objetivo de eliminar os sinais síncronos. Observando a fig.III.4 (Cap.III) pode-se dizer que durante uma falta de alta impedância as componentes de frequência síncronas ou não, variam de forma aleatória e que durante a simulação de abertura e fechamento de chave do banco de capacitores, as componentes de frequência síncronas de ordem ímpar apresentam variações permanentes, enquanto as não síncronas apresentam variações de curtíssima duração. Desta forma monitorando os sinais não síncronos pode-se dizer que variações rápidas são consideradas como uma operação de manobra e variações aleatórias de duração maior que 10s, podendo chegar a minutos, são considerados faltas de alta impedância.

Aucoin e Russell<sup>6</sup> (1987) sugerem a utilização desta técnica juntamente com a técnica de altas frequências, com o objetivo de que o sistema de detecção se torne mais confiável.

#### - Algoritmo Hierárquico

Russell<sup>24</sup> (1988) apresenta um algoritmo mais elaborado onde duas frequências são utilizadas na detecção de falta de alta impedância. O algoritmo é hierárquico com características adaptativas.

O sinal de entrada é filtrado para eliminar as frequências superiores a 400Hz. Este sinal é digitalizado e utilizado como dado de entrada para o algoritmo de detecção. A técnica é baseada no cálculo, para cada ciclo de 60Hz, da energia do sinal. O significado de energia neste

algoritmo é a somatória dos quadrados da amplitude de cada amostra. Uma vez que o sistema de distribuição de energia elétrica é um sistema dinâmico, existe a necessidade de que o algoritmo seja adaptativo às mudanças de carga. Para isto são utilizados dois limites, o dinâmico e o estático. Os limites são usados para ajustar as mudanças de carga em base contínua.

A natureza hierárquica do algoritmo é dividida em três níveis: distúrbio, evento e falta. Russell define os três níveis da seguinte forma:

- Distúrbio: Um ciclo de dados que apresenta um acréscimo percentual de energia acima do valor da energia por ciclo, cuja média é calculada com alguns períodos de tempo anteriores, constitui um distúrbio. Se a energia presente no ciclo atual é aproximadamente igual à média anterior, então uma nova média é calculada e a detecção se reinicia.
- Evento: Quando o distúrbio é detectado, uma série de ciclos de dados são testados. Se o patamar percentual destes ciclos apresentar uma certa porcentagem de acréscimo por ciclo maior que a média de energia por ciclo, então é dito que o evento ocorreu.
- Falta: O tempo de análise nesta fase é que dá sensibilidade para diferenciar uma falta de uma operação normal. O limite dinâmico não se modifica nesta rotina.

Dois frequências foram escolhidas para serem utilizadas na validação deste algoritmo. A frequência harmônica 180Hz indica a variação dinâmica máxima para as frequências harmônicas. A frequência não harmônica 210Hz indica a variação dinâmica máxima da energia durante faltas com arco.

Em um algoritmo adaptativo a variação de energia corresponde a um acréscimo do limite dinâmico. A fig.V.3a apresenta a variação do sinal

de 180Hz filtrado. A variação de energia deste sinal é apresentado na fig.V3b. Pode-se observar que nos momentos em que o sinal apresenta acréscimos na amplitude tem-se um equivalente acréscimo de energia. A tab.V.1 apresenta o relatório de saída do algoritmo de detecção utilizando como dados de entrada o sinal de 180Hz filtrado.

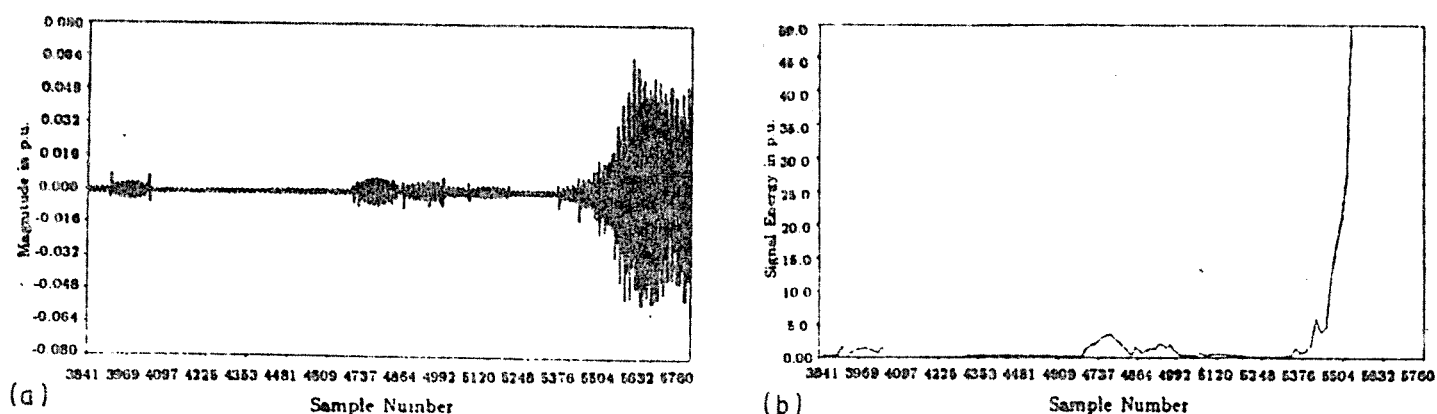


Fig.V.3 (a) Variação do sinal de 180Hz filtrado (b)Variação da energia do sinal de 180Hz.

```

Disturbance found at 3920
Disturbance found at 3936
Disturbance found at 3952
Disturbance found at 3968
Disturbance found at 3984
Event found with 5 counts at 3984
Event starts at 3904
Disturbance found at 4352
Disturbance found at 4448
Disturbance found at 4528
Disturbance found at 4544
Disturbance found at 4560
Disturbance found at 4576
Disturbance found at 4592
Event found with 5 counts at 4592
Event starts at 4512
Disturbance found at 4928
Disturbance found at 4944
Disturbance found at 4960
Disturbance found at 4976
Disturbance found at 4992
Event found with 5 counts at 4992
Event starts at 4912
Disturbance found at 5328
Disturbance found at 5344
Disturbance found at 5360
Disturbance found at 5376
Disturbance found at 5392
Event found with 5 counts at 5392
Fault starts at 5312

```

Tab.V.1- Relatório de saída do algoritmo de detecção.

O mesmo algoritmo utilizando como dados de entrada a simulação de abertura e fechamento da chave do banco de capacitores indica a ocorrência de um evento na análise da frequência de 180Hz e nada indica na análise da frequência de 210Hz. As figs.V.4 e V.5 apresentam a variação de energia para 180 e 210Hz durante o chaveamento do mesmo. A fig.V.6 mostra a variação de energia durante uma manobra com chave a ar para 180 e 210Hz respectivamente.

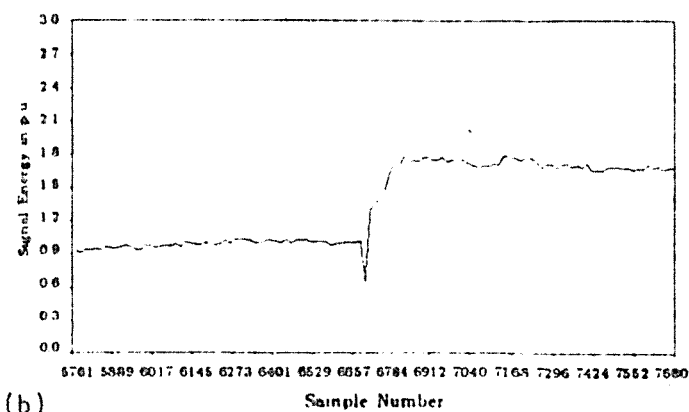
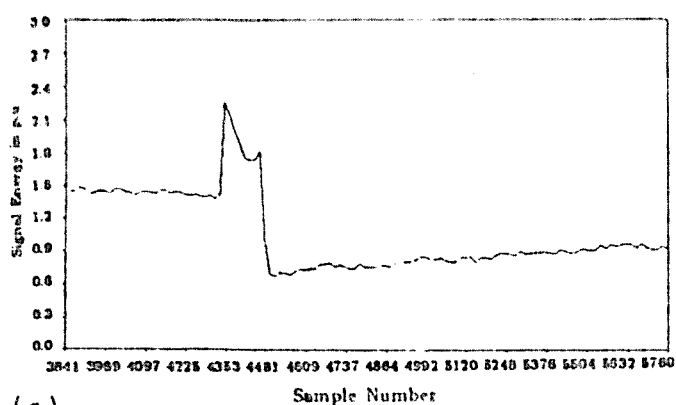


Fig.V.4- (a) e (b) Variação da energia da frequência de 180Hz na saída e na entrada do banco de capacitores.

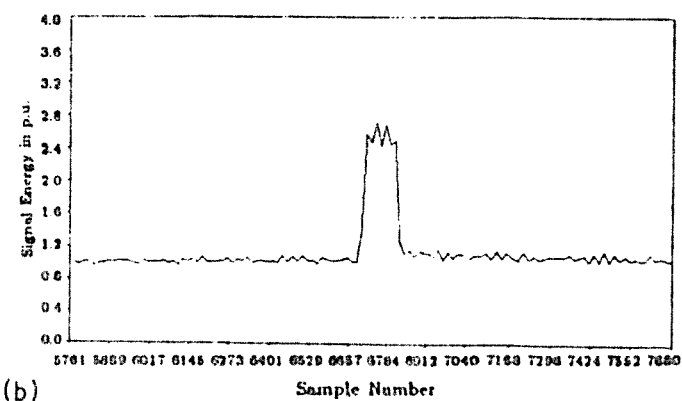
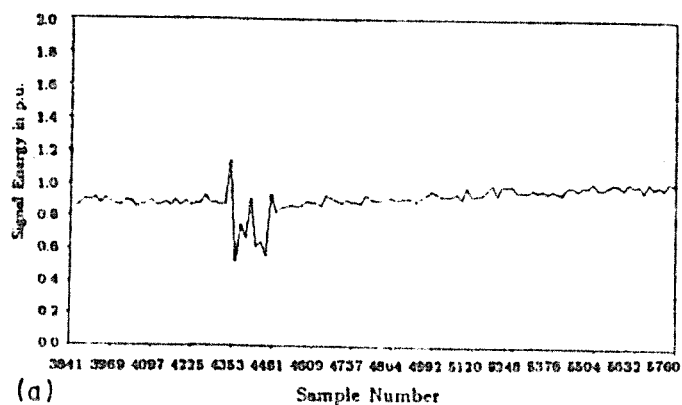


Fig.V.5- (a) e (b) Variação da energia da frequência de 210Hz na saída e na entrada do banco de capacitores.

O algoritmo se mostrou bastante satisfatório na detecção da falta, distinguindo operações de manobras das faltas.

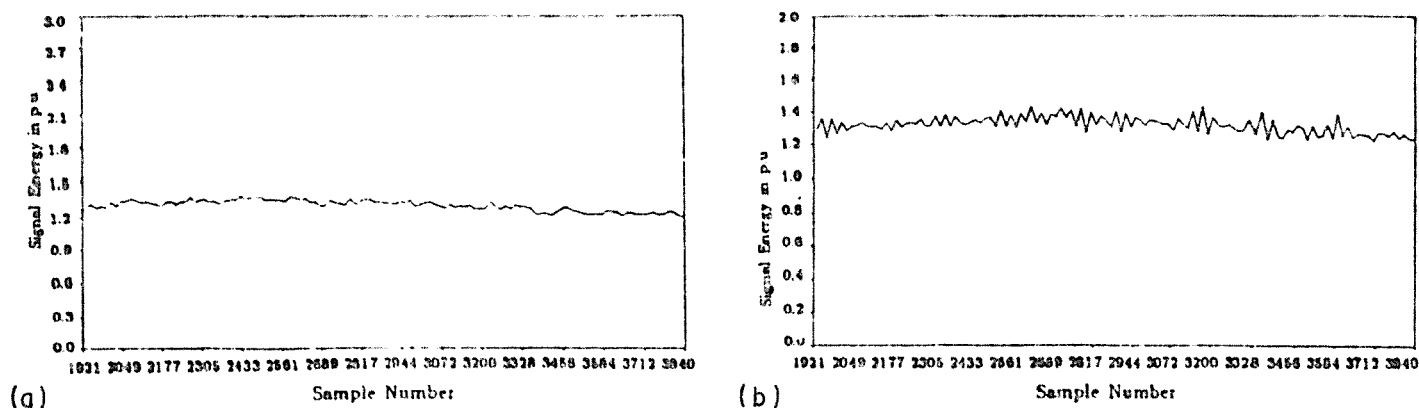


Fig.V.6- (a) e (b)Variação da energia das frequências de 180Hz e de 210Hz na operação de uma seccionadora a ar

- Detecção utilizando o 2<sup>o</sup> e o 3<sup>o</sup> harmônicos

Emanuel<sup>15</sup> (1990) apresenta um trabalho composto de quatro etapas, sendo elas: medição de faltas de alta impedância em alimentador real, monitoramento de corrente de uma subestação em operação normal, testes realizados em laboratório e modelo teórico.

A medição de faltas em alimentador real foi realizada em um ramal tipicamente residencial. Foi observado durante estes testes que faltas com correntes superiores a 1A possuem arco estável, com valores RMS aproximadamente constantes durante longos períodos de tempo. Correntes menores que 1A são caracterizados por curtos períodos de arco estável e, por ignição e reignição aleatória do arco. Outro dado observado foi que para correntes acima de 10A a componente de terceiro harmônico fica entre 5 e 15% da fundamental e o segundo entre 3,7 e 6,7% da fundamental. Para correntes abaixo de 1A a porcentagem cai para 0 e 2,4%, para o terceiro harmônico e, 0 e 3% para o segundo. A corrente monitorada durante uma semana na subestação foi apresentada no Cap.III, figs.III.2 e III.3 .

Os testes de laboratório foram realizados em uma cuba cheia de areia. O esquema é mostrado na fig.V.7. Observando a fig.V.8, verifica-se que o semiciclo positivo é maior que o negativo. Esta característica se deve ao fato da existência da histerese da curva  $v \times i$  do arco elétrico e, pode ser observada na fig.V.9. Os valores de  $V_p$  e  $V_n$  são afetados pela porosidade e umidade do solo arenoso. Solos menos densos apresentam maiores tensões de início,  $V_p$  e  $V_n$ . Emanuel<sup>15</sup> apresenta algumas considerações a respeito da formação do arco.

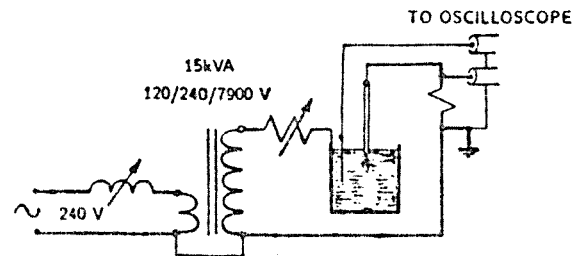


Fig.V.7 Esquema utilizado em teste de laboratório.

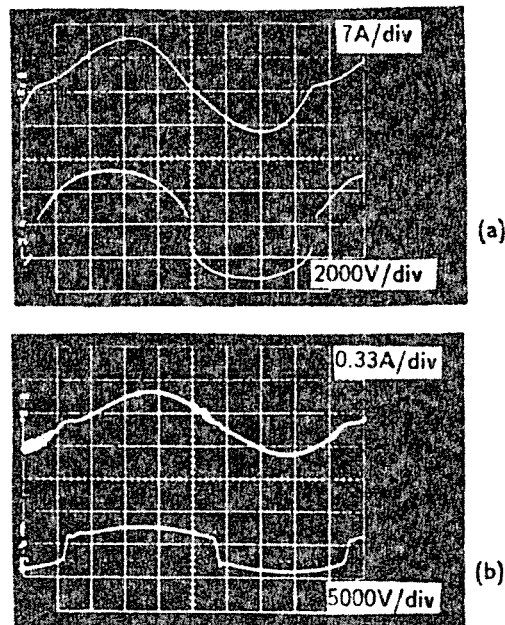


Fig.V.8 Oscilogramas das correntes com arco. (a) corrente de média amplitude (b) corrente de pequena amplitude.

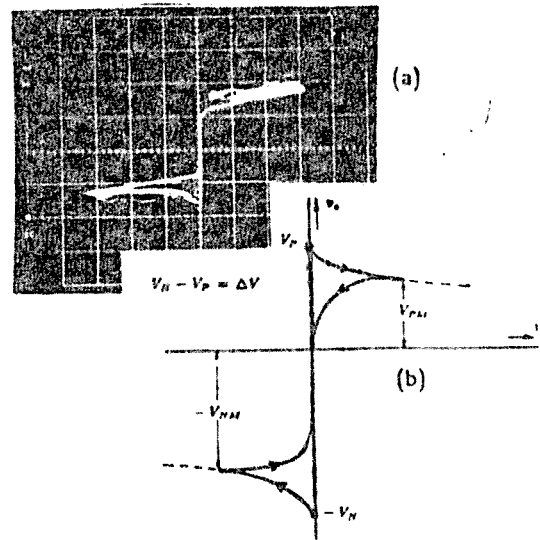


Fig.V.9 - Característica  $v \times i$  do arco (a) oscilograma medido no laboratório (b) descrição teórica.

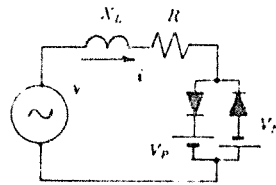


Fig.V.10 - Modelo teórico para falta de alta impedância com arco.

Neste artigo, Emanuel tenta reproduzir através de um modelo determinístico simples o comportamento do arco. A fig.V.10 mostra este modelo. O segundo e o terceiro harmônicos são apresentados como função de  $\Delta V$  ( $V_n - V_p$ ) e  $\tan\theta = X_L/R$  na fig.V.11. Pode-se observar que  $\Delta V$  afeta com maior intensidade o segundo harmônico enquanto o terceiro harmônico é mais afetado pela  $\tan\theta$ . Os resultados acima foram confirmados através de trabalhos experimentais. As figs.V.12 e V.13 apresentam o valor das componentes de 120 e 180Hz respectivamente, versus a corrente de falta em comparação com o gráfico de probabilidade de ocorrência pela corrente da componente.

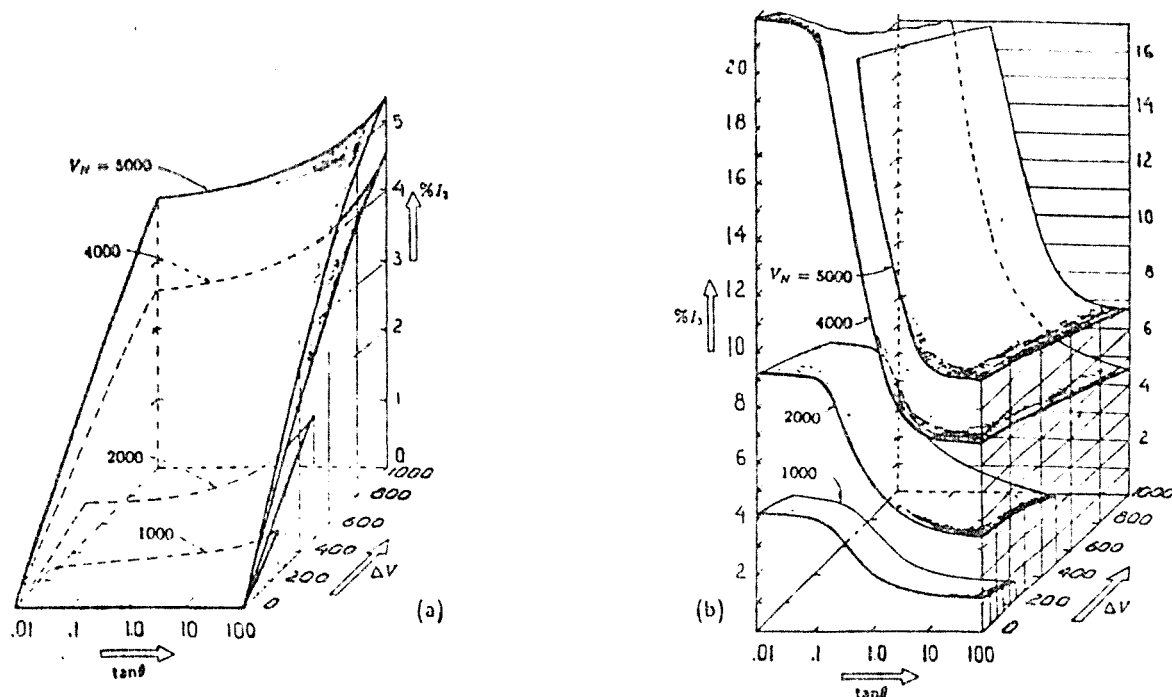


Fig.V.11 - Corrente harmônica versus ângulo de fase  $\theta$  e tensão  $\Delta V$ ;  
 (a) Segundo harmônico; (b) Terceiro harmônico.

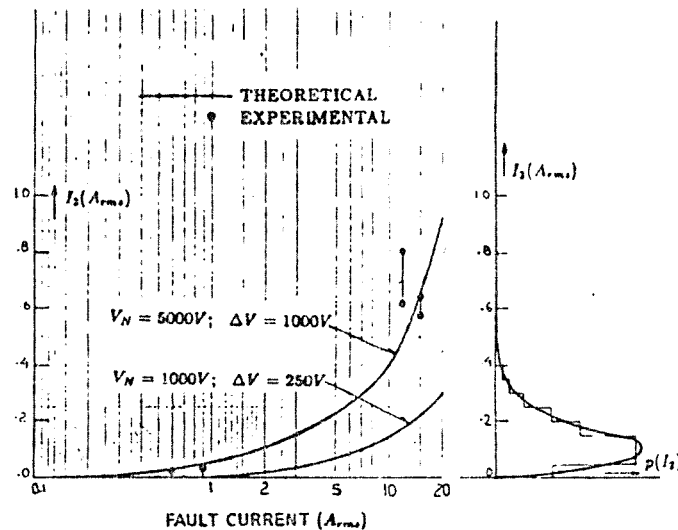


Fig.V.12 - Comparação entre a corrente de segundo harmônico do arco e da rede. Esquerda: corrente de segundo harmônico versus corrente total do arco; Direita: Distribuição de corrente de segundo harmônico.

A fig.V.12 mostra que o segundo harmônico possibilita a detecção de arco de pequenas amplitudes. A fig.V.13 mostra que para o terceiro harmônico é mais indicado monitorar a corrente de linha, com probabilidade de ocorrência de correntes de menor valor. Observa-se, porém, que mesmo a corrente de linha é da ordem daquelas medidas durante a falta.

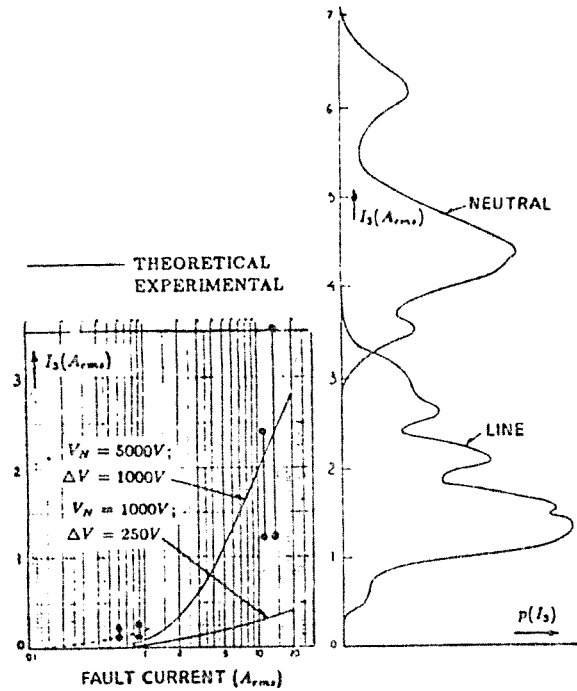


Fig.V.13 - Comparação entre a corrente de terceiro harmônico do arco e da rede. Esquerda: corrente de terceiro harmônico versus corrente total do arco; Direita: Distribuição de corrente de terceiro harmônico de linha e neutro.

## CAPÍTULO VI

### TÉCNICAS BASEADAS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

#### VI.1- Introdução

Como foi visto nos capítulos anteriores existem várias propostas de técnicas para detecção de faltas de alta impedância. Entretanto, em sua maioria, não possuem boa confiabilidade, sendo mais recomendadas para funcionarem como um indicativo de falta. Para contornar este problema iniciou-se a aplicação da técnica chamada inteligência artificial. Existem dois tipos de trabalho nesta área: o primeiro tipo utiliza a combinação de vários parâmetros na identificação e, o segundo utiliza a teoria "connectionist".

A principal exigência de um sistema especialista é "a priori" a formulação das regras para a sua aplicação em uma planta. Em outras palavras, a solução por um sistema especialista de um dado problema presume que um engenheiro especialista possa resolver o problema. Esta não é uma séria limitação para muitas aplicações, desde que as regras heurísticas possam ser derivadas em muitos casos. No entanto, sistemas especialistas podem raramente ser aplicados a problemas onde poucos homens peritos existem, como é o caso da falta de alta impedância.

#### VI.2- Combinação de parâmetros

Como os alimentadores possuem níveis de ruído diferentes e que variam com a carga, o detector de falta de alta impedância deve ser adaptativo a estas variações e ao mesmo tempo ele deve evitar o complicado procedimento para calibração dos níveis de "pick up". Por esta razão, a

necessidade de um sistema de proteção associado com a inteligência artificial é requerido. A inteligência pode ser criada dentro da base do conhecimento que o sistema pode comunicar/interagir com o microprocessador digital de sinais, Russell<sup>25</sup>(1989).

O esquema de detecção pode utilizar vários parâmetros como dados para a detecção:

- Frequências entre harmônicos;
- Frequências harmônicas pares;
- Frequências harmônicas ímpares;
- Banda de altas frequências;
- Componente de sequência zero na frequência fundamental;
- Componente de sequência negativa na frequência fundamental;
- Componente de sequência positiva na frequência fundamental;

O algoritmo utilizado é de natureza hierárquica. O sistema começa identificando o distúrbio e a partir daí ele tenta verificar se este qualifica um evento. Reconhecido o evento verifica-se se o episódio caracteriza uma falta ou um chaveamento normal. A decisão é finalmente tomada com níveis de segurança e, os fatores probabilísticos associados qualificam se o episódio é um distúrbio, evento ou falta.

Na progressão, o tempo é utilizado como um fator discriminativo. Em ambiente de distribuição típico, a adaptabilidade para variações periódicas de carga é desejável no esquema de detecção. A característica de adaptabilidade pode ser incorporada no algoritmo com a utilização de dois níveis -o limite dinâmico e o estático. Esta técnica também possui um critério de direcionalidade similar aos relés de sobrecorrente convencionais.

### VI.3- Teoria "Connectionist"

Segundo Ebron 1990, a teoria "connectionist" é uma ciência emergente que busca o modelo do paralelismo e interconecção do cérebro humano. Este modelo tem sido desenvolvido através da análise de um modelo conhecido e é chamado de "Rede Neural Artificial". O processamento de redes neurais é diferenciado dos processamentos de sinais, pela capacidade de interpolação não linear.

A falta de alta impedância resulta em correntes que exibem certas características peculiares, tais como, longos transitórios e desbalanço de fases. Para implementar o esquema de rede neural, o alimentador é simulado por computador que fornece amostras de corrente de fase da subestação. A biblioteca de correntes medidas, associadas com vários transitórios de faltas e chaveamentos, deve ser utilizada. É feito um pré-processamento para produzir algumas características da corrente de interesse, para efetuar a Transformada de Fourier. A rede neural é configurada adequadamente e treinada com estes parâmetros, para simular ou medir formas de onda. A rede é então capaz de processar alimentadores com dados de corrente em tempo real e se baseia nos exemplos passados apresentados a ela, podendo determinar assim a presença de uma falta de alta impedância.

#### -Descrição de redes neurais

A rede neural consiste de um conjunto de nós conectados e regras de propagação. O nó ou neurônio recebe suas entradas através de conexões com pesos determinados. Estas entradas vem de outros nós da rede ou de um estímulo externo. A função ativante, usualmente uma somatória,

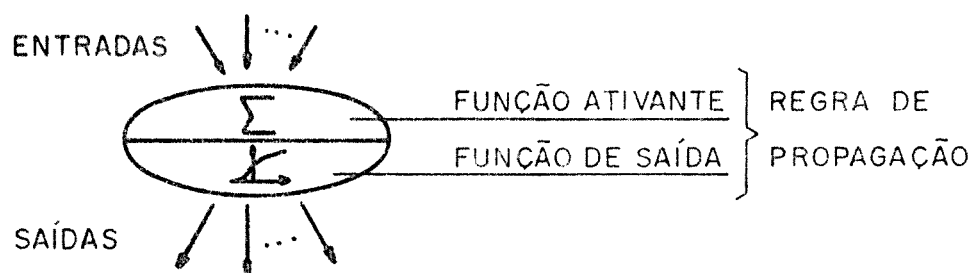


Fig. VI.1- Neurônio

adiciona as entradas atribuindo pesos diferenciados às mesmas. O resultado é chamado nó ativante. A regra de propagação consiste nas funções ativante e de saída. A rede neural é composta de várias camadas destes nós. Os nós são conectados por elos de pesos variados.

#### -Pré-processamento

A utilização de uma rede neural para a detecção de uma falta de alta impedância consiste em três tarefas: coleta de conjuntos de amostras, processamento das correntes de linha do alimentador e uso destes conjuntos para treinar a rede através da propagação de erros e testar a rede em conjuntos separados, processando as correntes de linha. O pré-processador é parte integrante desta estratégia. Normalmente amostram-se correntes das três fases. Na prática, não são usadas estas correntes diretamente como dados de entrada. Assim, algumas características das ondas são identificadas reduzindo a quantidade e a ordem das redes, para distinguir entre um alimentador normal e outro anormal. Para ser bem sucedido o esquema deve ser capaz de distinguir entre os harmônicos normais da corrente e os possíveis harmônicos gerados pela falta. Fontes de harmônicos e capacitores para chaveamentos são incluídos na simulação. A

falta de alta impedância é simulada por fechamento e abertura aleatória de chaves no EMTP.

Certos aspectos da falta de alta impedância podem ser observados através da inspeção das formas de onda associadas com certas faltas. Alimentadores típicos apresentam constantemente mudanças de "taps" de transformadores, mudanças de cargas, chaveamento de capacitores e cargas especiais. Desta forma vários transitórios associados com a propagação de correntes harmônicas e outros fenômenos variáveis no tempo são normalmente observados.

-Treinando a rede neural

Para que a rede neural aprenda as regras para resolver o problema, são necessários conjuntos de dados de descrição do problema. Neste treino, os vetores de entrada são impostos e, atua-se na rede para que o vetor de saída seja o desejado. Para tanto os valores dos pesos atribuídos aos vetores de entrada são modificados até que a resposta desejada seja alcançada. Um treino completo para uma rede neural traz todos os limites das entradas esperadas, associadas às saídas desejadas.

O algoritmo de treino forma a rede neural com 200 entradas e pesos aleatórios. Para cada vetor entrada/saída do conjunto de treino, o algoritmo computa mudanças nos pesos, para minimizar a diferença entre a saída esperada e o resultado da propagação dos sinais de entrada. O treino é repetido até que os pesos escolhidos minimizem o erro para todas as entradas/saídas. Após o treino coloca-se 200 entradas que não foram utilizadas no mesmo. Se o resultado não for o esperado este vetor passa a ser utilizado no treino.

## CAPÍTULO VII

### TÉCNICA ALTERNATIVA

#### VII.1-Identificação do Sistema

O sistema formado por um alimentador de uma rede de distribuição é um sistema cujas características são conhecidas. Entretanto, a ocorrência de uma falta altera as características do alimentador, devendo assim ser identificado. Para se identificar um sistema linear através da teoria de modelagem de sistemas basta escrever a sua função de transferência. Para tanto um impulso é injetado na entrada da fase do sistema sob teste, e a sua resposta é medida. Através destes dois sinais (entrada e saída) calcula-se a função de transferência, que é uma expressão matemática que descreve o sistema. Com ela em mãos, qualquer que seja a função excitação, pode-se calcular a resposta do sistema. Porém, se o sinal de entrada for sempre o mesmo, a identificação se dá apenas observando a resposta. Caso esta não coincida com a esperada, significa que alguma alteração ocorreu no sistema sob teste.

No caso de um alimentador, esta alteração poderá significar dois grupos de eventos distintos: alteração na configuração decorrente de abertura e fechamento de chaves ou a ocorrência de uma falta. A abertura de chaves pode significar a saída de um simples banco de capacitores, ou a retirada de ramais do alimentador. Faltas poderão ser de baixa ou alta impedância.

A abertura de chaves é um evento que leva à alteração do sistema, porém, uma alteração previsível uma vez que se conhece a localização das chaves ao longo do alimentador. Desta forma, pode-se

definir o alimentador como um sistema que possui várias funções de transferência, operando com qualquer uma delas aleatoriamente como é mostrado na fig.VII.1. As funções de  $G_1$  a  $G_N$  representam a resposta padrão e as respostas para eventos de abertura e fechamento de chaves. O ponto de interrogação representa a função de transferência do alimentador quando este está submetido a uma falta.

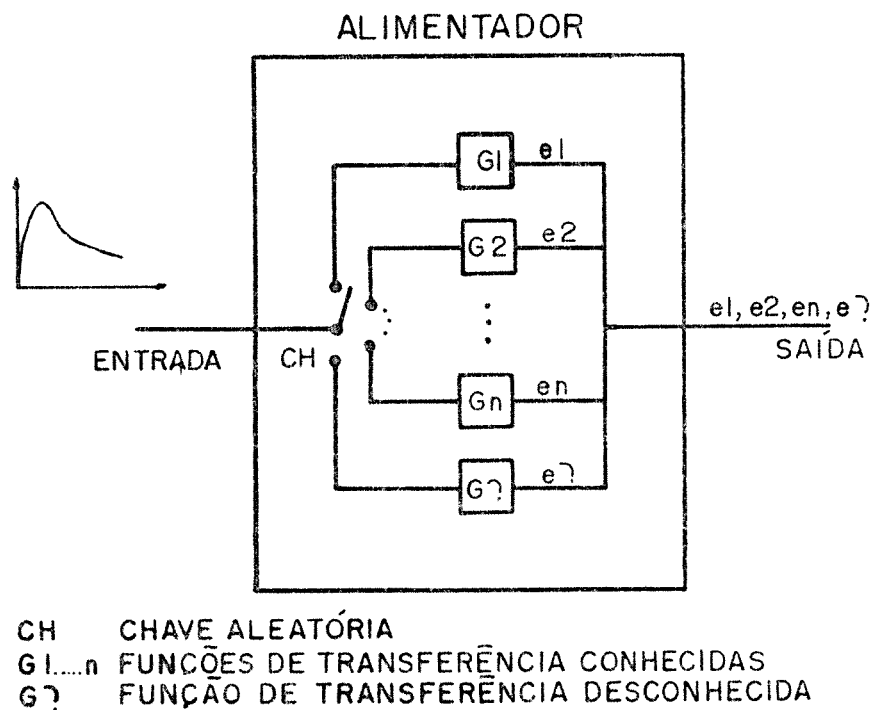


Fig.VII.1-Representação do alimentador.

Portanto, para identificar uma falta basta criar um banco de dados com as respostas esperadas  $e_1, e_2 \dots e_N$  e comparar a resposta encontrada com as armazenadas neste banco. Caso a diferença entre a resposta encontrada e a padrão seja maior que o erro máximo admissível, então conclui-se que é uma falta. Uma etapa importante na detecção é a montagem deste banco de dados, pois o sistema é identificado através dele.

## VII.2-Modelagem do Alimentador para Simulação Digital

A montagem do banco de dados é feita através de simulação digital da linha de distribuição. Uma correta modelagem desta linha implica em uma detecção eficiente e confiável. Como o comprimento de onda do sinal injetado é muito menor que o comprimento do alimentador a linha pode ser modelada pelas leis de propagação de ondas viajantes, Bewley (1933). Segundo a teoria de ondas viajantes a onda trafega no sentido das extremidades da linha, sendo transmitidas e refletidas a cada ponto de descontinuidade, conforme mostrado na fig.VII.2.

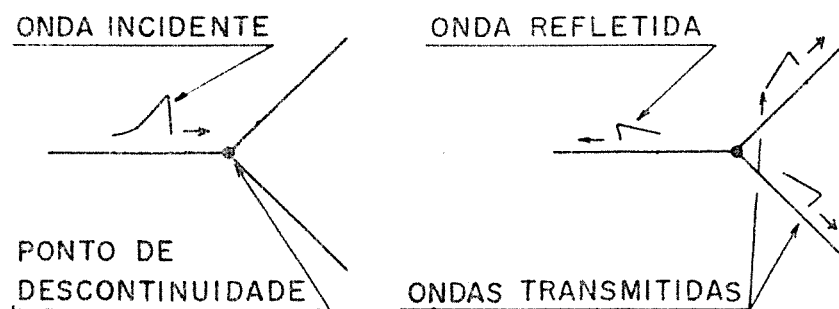
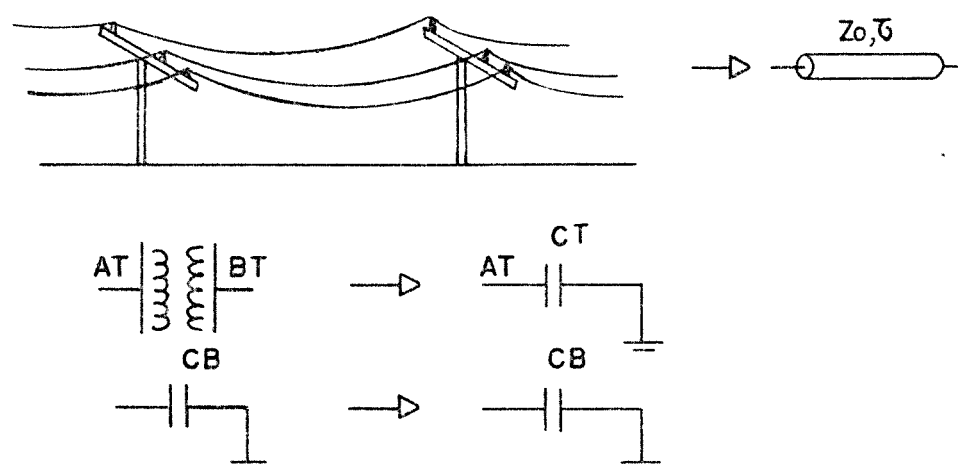


Fig.VII.2-Ondas viajantes.

Segundo Naidu (1983), entende-se por descontinuidade um ponto de transição no qual há uma súbita mudança nos parâmetros do circuito, tais como num terminal aberto ou em curto-circuito ou em uma junção com outras linhas.

A rede de distribuição é composta por linhas, transformadores e bancos de capacitores. A modelagem destes componentes para a faixa de frequência utilizada é mostrada na fig.VII.3. As linhas são modeladas desconsiderando as perdas e a distorção. Sendo assim, são

representadas por sua impedância característica e o seu tempo de trânsito. No transformador, para esta faixa de frequências, as capacitâncias dominam fortemente podendo assim ser modelados por um capacitor cuja capacitância é calculada através de testes de laboratório. O banco de capacitores permanece com as mesmas características.



- $Z_0$  IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA  
 $\tau$  TEMPO DE TRÂNSITO NA LINHA  
 AT ALTA TENSÃO  
 BT BAIXA TENSÃO  
 CT CAPACITÂNCIA DO TRANSFORMADOR  
 CB CAPACITÂNCIA DO BANCO DE CAPACITORES (POR FASE)

Fig.VII.3-Modelagem utilizada.

O cálculo das tensões ao longo da linha de distribuição é feito utilizando o método de ondas viajantes, Bewley (1933), e método de Bergeron, Dommel (1973).

### VII.3-Análise da Resposta Encontrada

Uma vez definida a montagem dos parâmetros do alimentador e os métodos utilizados no cálculo da tensão de saída para a onda injetada, o próximo passo é definir o tratamento dado a esta resposta.

A resposta encontrada para uma dada configuração é comparada com as respostas armazenadas no banco de dados. O banco de dados é composto das respostas esperadas do alimentador, ou seja, as respostas para as diversas topologias possíveis da rede. Entretanto estas respostas não serão armazenadas no domínio do tempo e sim no domínio da frequência, ou seja, algumas componentes do espectro de frequências serão armazenadas, sendo que estas são suficientes para se fazer a comparação. O espectro de frequências da resposta encontrada também será calculado e a amplitude de algumas frequências serão comparadas facilitando em muito o número de informações que devem ser gravadas no banco de dados. O cálculo do espectro de frequências é feito através da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Como a onda analisada não é periódica, uma janela de amostragem deve ser estabelecida, fig.VII.4. A escolha da janela de amostragem segue as regras do método, a saber: o início da observação deve ser o mesmo do momento da aplicação da onda e o término deve ser tal que a informação do ponto mais distante da subestação retorne. Na saída do alimentador da subestação existem ramificações e transformadores. Assim informações sobre a abertura/fechamento de chaves ou a saída de transformadores próximos chegarão à mesma, ainda durante o início da cauda da onda injetada. Portanto, iniciar a observação junto com a injeção é uma regra obrigatória. O início da informação que chega do ponto mais distante corresponde a quando o tempo for igual a duas vezes a distância deste em relação ao ponto de injeção, dividido pela velocidade de trânsito destas ondas, considerada igual à da luz. Assim, o tempo de observação deve ser maior do que o calculado acima, permitindo que o final da rede forneça informações da sua configuração.

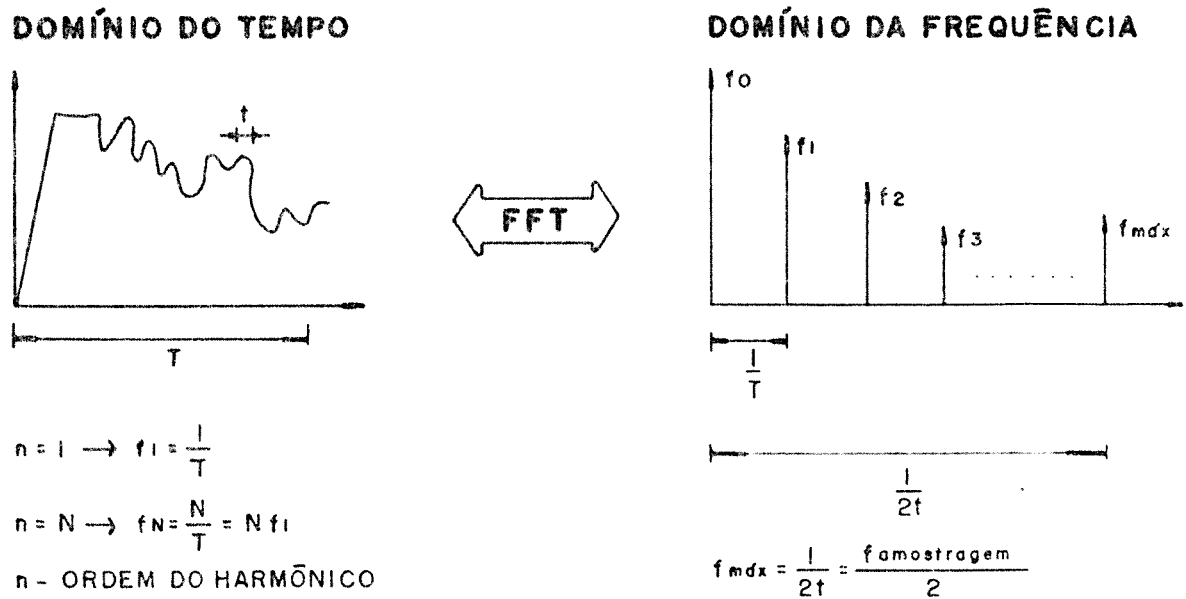


Fig.VII.4-Ilustração da FFT

Pela regra da FFT a frequência fundamental do espectro é dada pelo inverso do tempo de duração da janela de observação. Quanto maior o tempo de observação menor a frequência fundamental do espectro de frequências. Recomenda-se que o tempo de duração da janela seja no mínimo 1,5 vezes o tempo para chegar a primeira informação do ponto mais distante. O intervalo de amostragem do sinal está relacionado com a máxima frequência desejada do espectro.

Se a comparação realizada, entre a resposta encontrada e o banco de dados, não der nenhuma coincidência isto significa a existência de uma falta. Para distinguir se a falta é de baixa ou alta impedância o algoritmo entrará em um "looping" de tempo. Todo o processo é repetido até que o tempo máximo seja alcançado. Este é o tempo necessário para que a proteção de sobrecorrente opere. Caso tenha ocorrido um ruído ou uma falta temporária, comuns em dias de chuva, estes não serão detectados no "looping", pois antes disto retornarão ao regime normal. Se, decorrido o

tempo de operação da proteção convencional esta não atuar, significa que a falta é de alta impedância (ou o relé/elo fusível está em estado de falta).

Identificada a falta como de alta impedância, o algoritmo passa para a etapa do cálculo da distância da falta até a subestação. Se o sistema antes de iniciar a monitoração, que levou à detecção da falta, estava em seu funcionamento padrão, então a distância é determinada pelo cálculo da diferença entre a resposta padrão e a encontrada. Quando esta diferença superar o erro admitido, o tempo em que isto ocorre é o tempo gasto para a primeira informação da falta chegar até a subestação. A distância é dada pela equação VII.1.

$$\text{Distância} = \frac{t}{2} \times v \quad (\text{VII.1})$$

onde  $v$  - velocidade da luz, aproximadamente;

$t$  - tempo gasto para a informação do ponto da falta chegar até a subestação.

Se a última identificação foi de uma chave aberta, no cálculo da distância, a resposta padrão é trocada pela resposta do alimentador para a chave aberta. Este procedimento deve ser tomado porque a distância calculada é aquela do evento mais próximo à subestação. Assim se a chave aberta estiver mais próxima da subestação que a falta, a distância calculada será a da chave, porém trocando as duas respostas a distância calculada será a da falta. O fluxograma da fig.VII.5 mostra a sequência do cálculo.

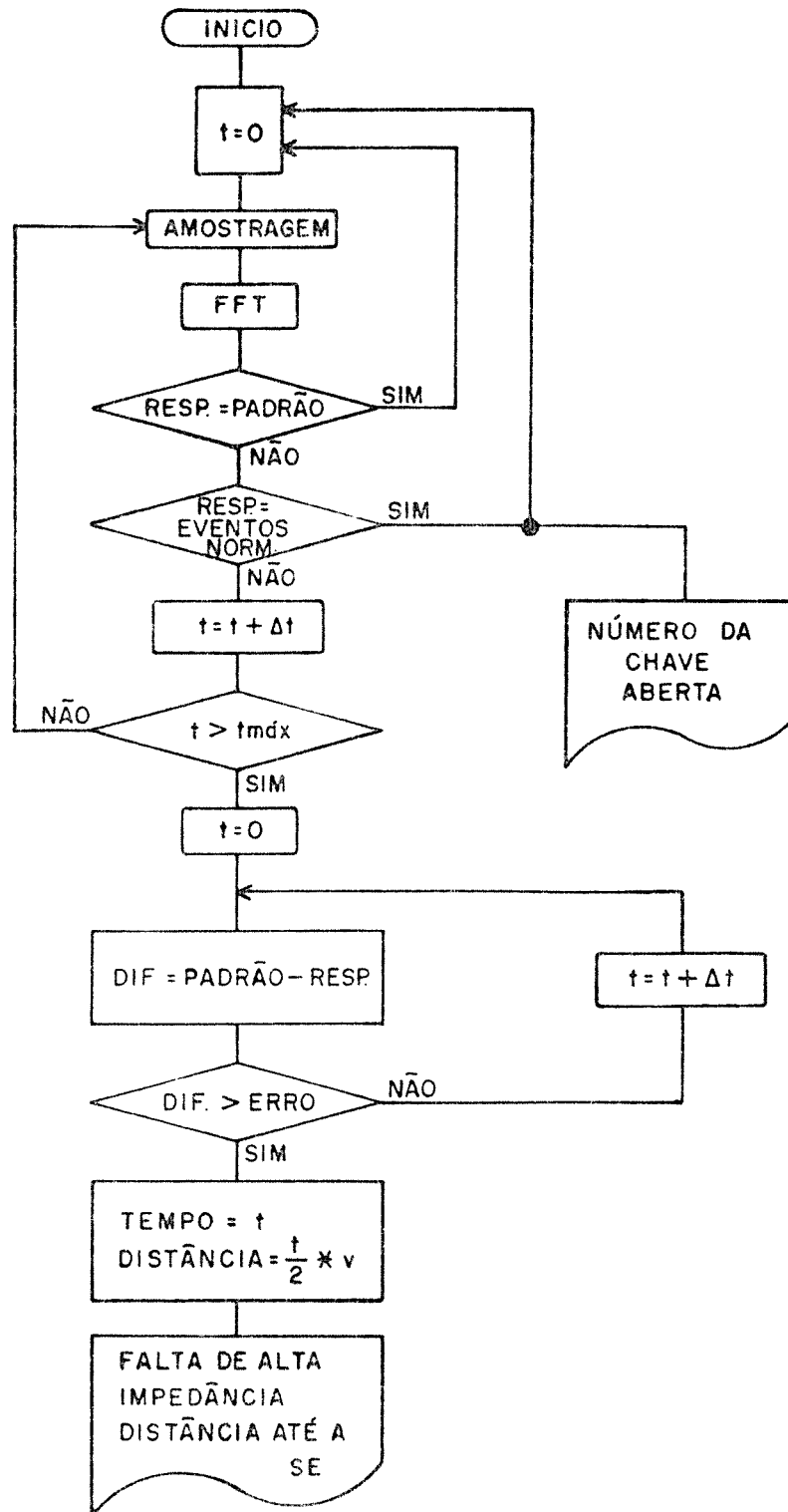


Fig.VII.5- Fluxograma do método.

## CAPÍTULO VIII

## VALIDAÇÃO DO MÉTODO PARA UM ALIMENTADOR EXPERIMENTAL

## VIII.1- Introdução

Como foi visto no capítulo anterior, o método é baseado em uma comparação entre o banco de dados previamente montado e a resposta encontrada para cada impulso injetado. Desta forma, a montagem do banco de dados é o ponto principal do esquema de detecção. Como este é montado a partir de simulações digitais, é necessário que estas simulações sejam validadas na prática. Para tanto, foram feitas medições em uma linha de distribuição experimental. As medições realizadas para algumas variações na configuração da linha são comparadas com as simulações.

## VIII.2- Comparação entre casos medidos e calculados

A linha utilizada está localizada no campus da Universidade, possui 600m de comprimento e um transformador a 150m do ponto de injeção do sinal, um croqui é apresentado na fig.VIII.1. O sinal injetado foi um impulso de  $1,2\mu\text{s}$  de frente para  $50\mu\text{s}$  de semi-cauda, com 2kV de pico e, a medição foi feita com um osciloscópio digital de 60MHz.

A resposta da linha aberta sem transformador foi medida através do osciloscópio e é apresentada na fig.VIII.1a. A mesma configuração da linha foi simulada digitalmente utilizando a modelagem desenvolvida no capítulo anterior e é apresentada na fig.VIII.2b. Pode-se observar que a modelagem retrata de forma adequada a linha nesta faixa de frequências.

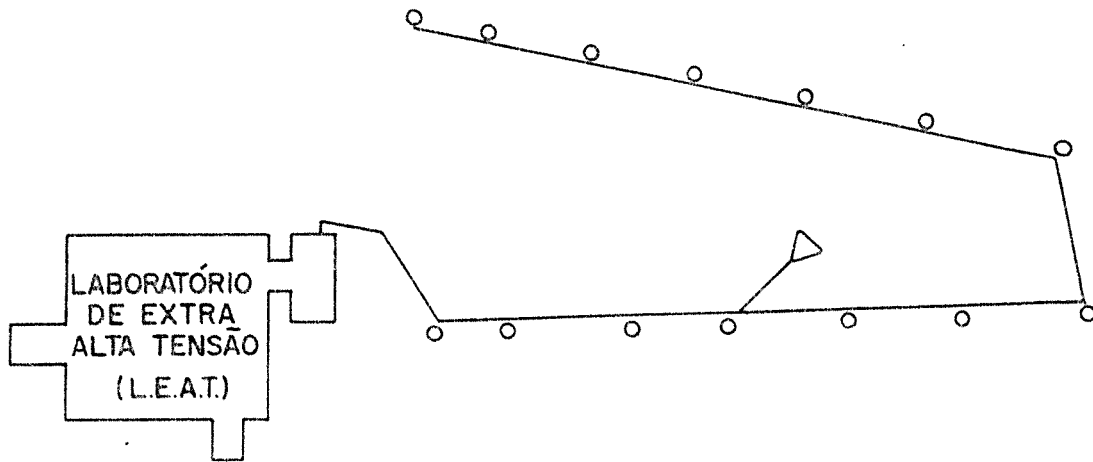


Fig.VIII.1- Croqui da linha experimental

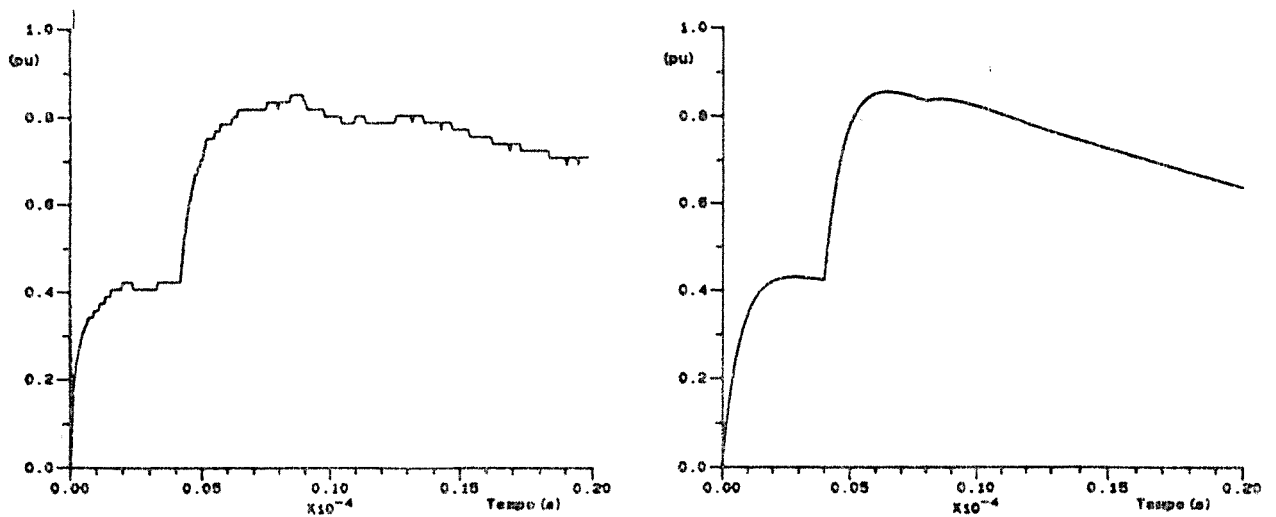


Fig.VIII.2- Resposta para a linha aberta: a) Medida; b) Simulada.

A falta franca é realizada em escala real aterrando a fase sob análise. A sua resposta é apresentada nas figs.VIII.3a e VIII.4a. A fig.VIII.3a apresenta a falta ocorrida a 600m do ponto de injeção do sinal, sem transformador. Em VIII.3a se apresenta a mesma medição com o transformador conectado a 150m deste ponto. Nesta simulação o transformador foi representado por um capacitor de capacitância igual a 1,4nF. Este valor foi levantado através de teste em transformador de distribuição em laboratório. Observa-se que a colocação do transformador introduz um pico

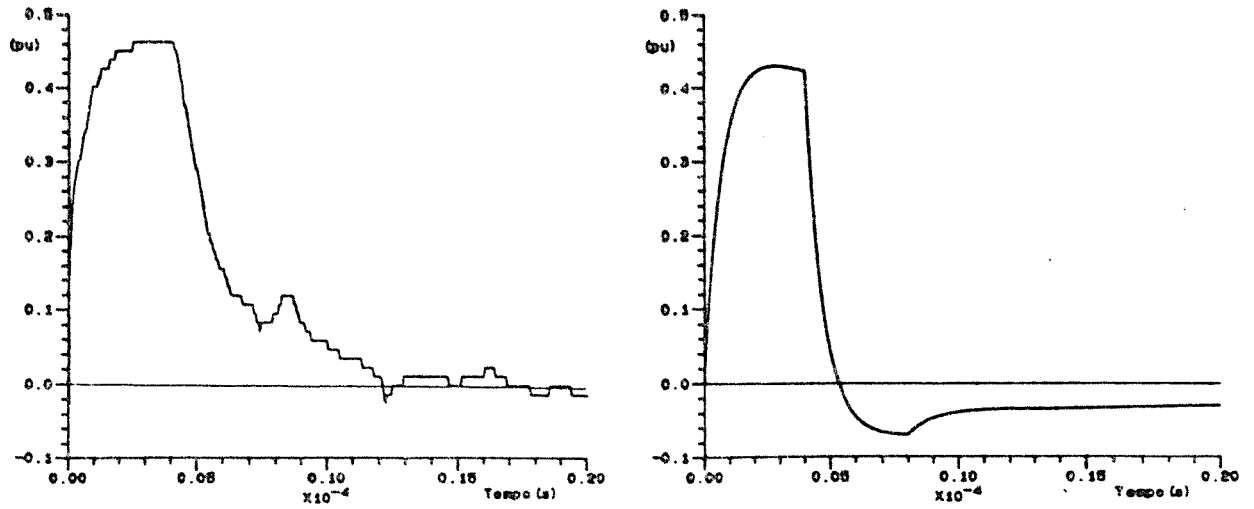


Fig. VIII.3- Falta franca sem transformador: (a) Medido; (b) Calculado.

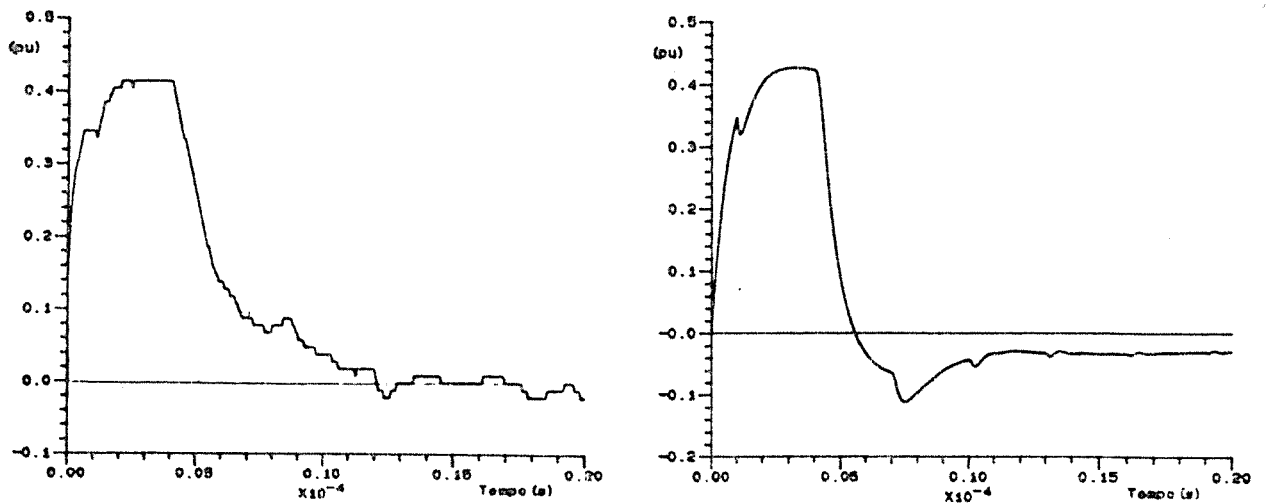


Fig. VIII.4- Falta franca com transformador: (a) Medido; (b) Calculado.

no sinal, medido no tempo correspondente à distância do transformador ao ponto de medição. A simulação dos dois casos é mostrada nas fig. VIII.3b e VIII.4b.

Duas medições de falta de alta impedância foram realizadas em solo coberto por pedras e são mostradas na fig. VIII.5a e VIII.6a. Observa-se que o fenômeno é aleatório e a resistência do ponto de falta

varia ao longo do tempo. Verifica-se, porém, que a resposta permanece entre a falta franca e o circuito aberto.

Devido à natureza aleatória do fenômeno não existe uma modelagem adequada para representá-lo. Como o método proposto não identifica a falta, comparando a forma de onda com nenhuma simulação deste fenômeno, e sim, com a diferença dela em relação aos fenômenos facilmente representados por um modelo matemático, não há dúvida da sua identificação.

Simulações de uma falta de alta impedância, através da combinação de um capacitor com uma resistência são mostrados nas figs.VIII.5b e VIII.6b. A falta da fig.VIII.5b foi simulada por um capacitor de 10nF em paralelo com um resistor de 1300 $\Omega$  enquanto a falta da fig.VIII.6b foi simulada por um capacitor de 20nF e um resistor de 100 $\Omega$ . Observa-se que os parâmetros alteram os resultados de forma considerável. Torna-se então, muito complexo a modelagem precisa do fenômeno físico completo, ligado às faltas de alta impedância.

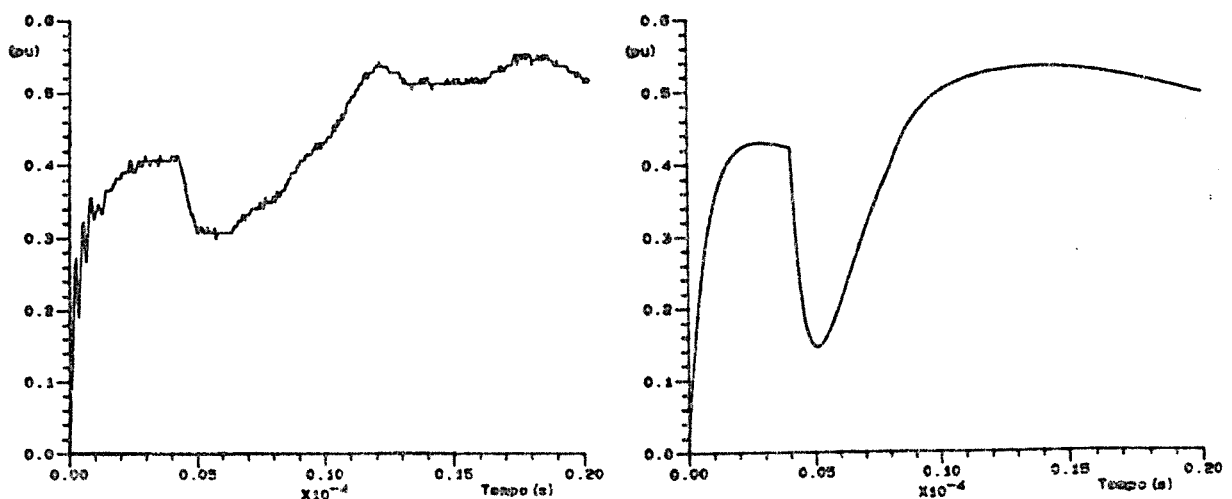


Fig. VIII.5- Falta de Alta Impedância (1o caso) (a)Medida; (b)Calculada.

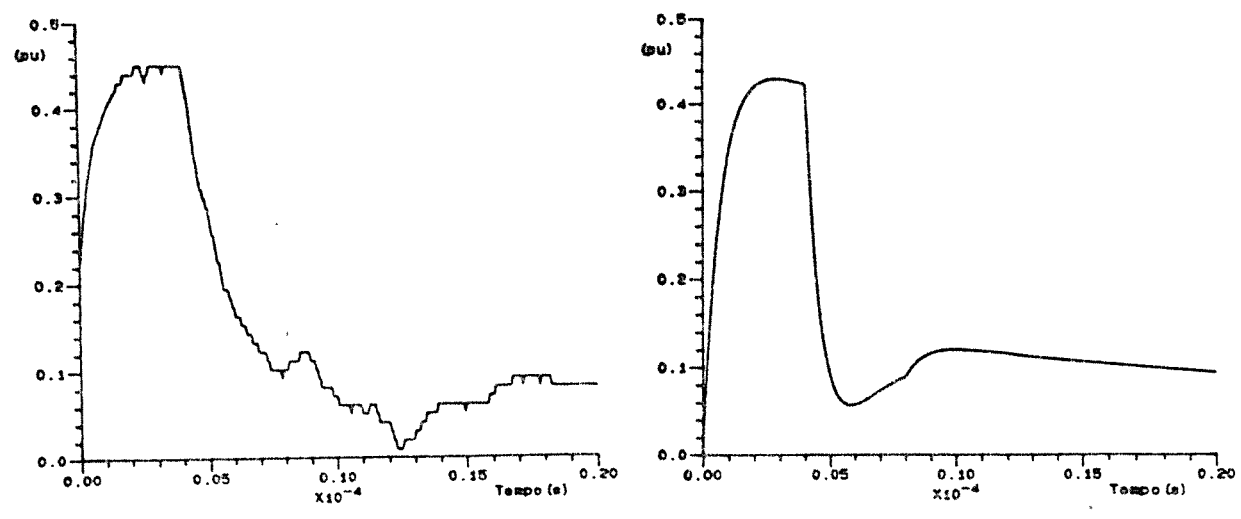


Fig.VIII.6- Falta de Alta Impedância (2o caso): (a)Medida; (b)Calculada.

## CAPÍTULO IX

## RESULTADOS OBTIDOS PARA UM ALIMENTADOR REAL

## IX.1- Alimentador Real

Após realizadas as medições em uma rede experimental validando a modelagem e o método de simulação utilizados, foram feitas simulações digitais com um alimentador real da cidade de Bocaiúva-MG (CEMIG). Trata-se de um alimentador de 13,8kV, de aproximadamente 6km e com 30 transformadores de distribuição. A fig.IX.1 apresenta a configuração.

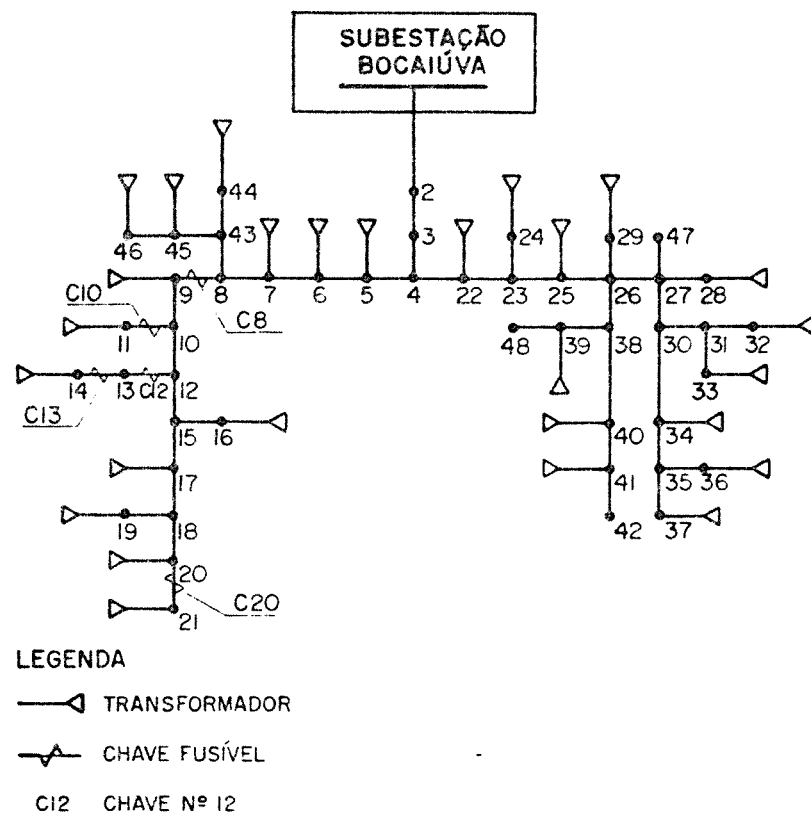


Fig. IX.1- Configuração do alimentador de Bocaiúva

A fig. IX.2 apresenta a resposta temporal e o seu espectro de frequências, do alimentador de Bocaiúva para um impulso injetado de 1us de frente por 50us de semi-cauda com valor de pico de 40pu. Para que não haja reflexão entre o ponto de injeção do sinal e a linha, esta é casada através de uma impedância de 400 ohms. A metade do sinal injetado fica nesta impedância de casamento. Foram feitas simulações para a metade esquerda do alimentador identificado por alimentador Bocaiúva simplificado. A fig. IX.3 apresenta a sua resposta padrão.

Para comprovar o funcionamento da técnica proposta foi necessária a simulação de vários eventos normais, ou não, no alimentador.

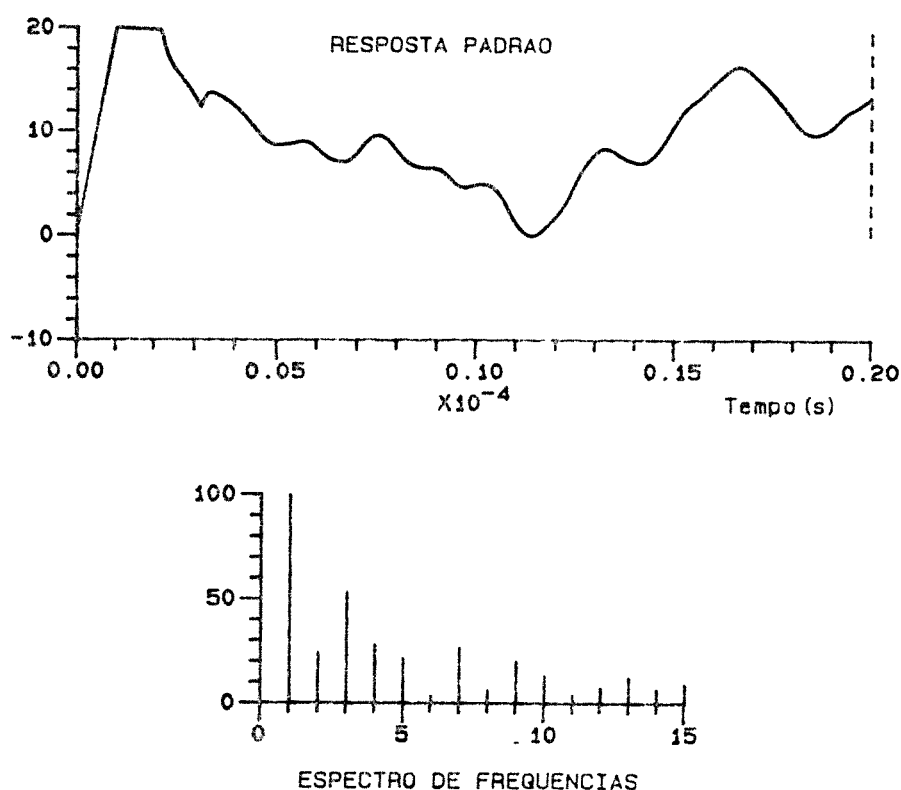


Fig. IX.2- a)Resposta Padrão do alimentador completo; b)Espectro de frequência; eixo y - % em relação à frequência fundamental, eixo x - ordem dos harmônicos da fundamental.

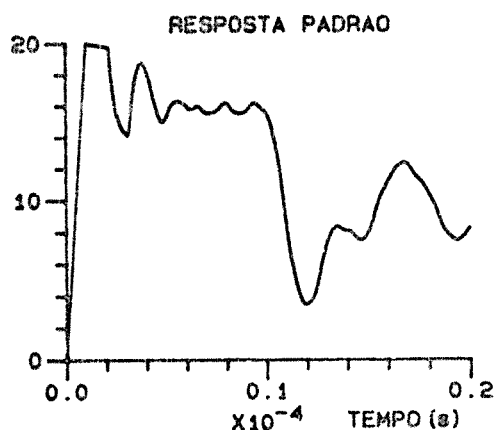


Fig. IX.3-Resposta Padrão do alimentador Bocaiúva simplificado

#### .Chaves

Para verificar se as aberturas de chaves próximas entre si poderiam ser diferenciadas umas das outras, foram feitas várias simulações. A fig. IX.4a mostra a abertura de duas chaves localizadas à mesma distância da subestação, porém abrindo ramais diferentes (trechos 8-43 e 8-9). Pode-se verificar que apesar de estarem no mesmo ponto em relação à subestação, os ramais retirados são bastante diferentes, influenciando assim fortemente nas respostas para as novas configurações. A tabela IX.1 mostra a variação percentual de cada componente de frequência em relação à mesma componente para a resposta padrão. Assim a componente de 50kHz da

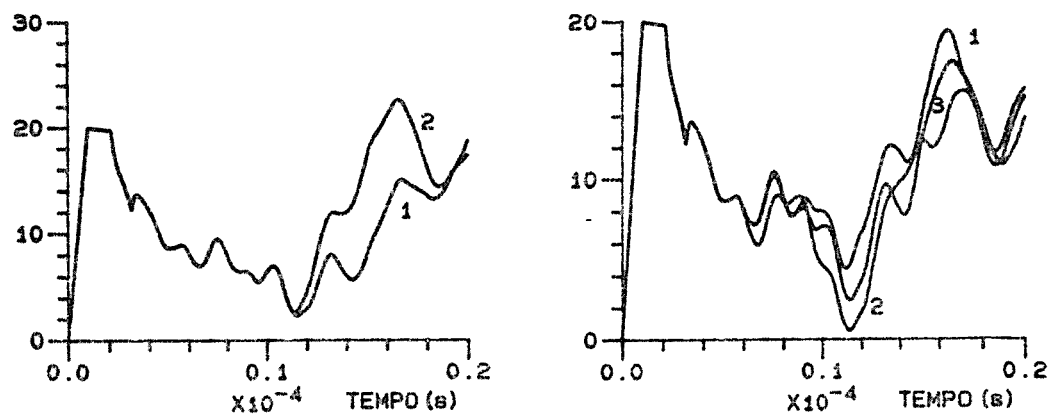


Fig. IX.4- a) Abertura das chaves dos trechos 8-43 e 8-9; b) Abertura das chaves dos trechos 26-27, 26-29 e 26-38.

kHz	R.P. (pu)	Variação percentual (%)				
		8-9	8-43	26-27	26-29	26-38
50	5,22	19,61	4,75	-21,46	-0,25	7,49
100	1,27	65,25	-65,33	33,12	-25,02	-41,00
150	2,79	-3,30	-44,83	0,65	2,15	-8,39

R.P. - Resposta Padrão

Tabela IX.1- Variação percentual de cada componente de frequência após a abertura de um trecho.

resposta padrão é de 5,22 pu para 20 pu injetado na linha, enquanto para a abertura da linha 8-43, a variação percentual da componente de 50kHz é de 4,75%. O mesmo ocorre para as chaves localizadas nos trechos 26-27, 26-29 e 26-38, mostradas na fig.IX.4b e na tabela IX.1. As chaves são colocadas no início do trecho, com a referência na subestação.

Assim, como a localização das chaves são conhecidas, através de simulações pode-se obter a resposta do alimentador quando da abertura de uma chave. Todas as simulações de chaves foram feitas no alimentador completo.

#### .Transformadores

Os transformadores de distribuição são conectados na rede primária através de chaves fusíveis. Quando ocorre uma sobrecarga as chaves operam interrompendo o fluxo de corrente da rede primária para a secundária. Muitas vezes o fusível de apenas uma das fases opera, levando o transformador a trabalhar sobrecarregado nas demais fases. Portanto, a identificação da saída de um transformador em uma das fases ou em todas é de grande importância para o sistema. A fig.IX.5 mostra a comparação entre

a resposta padrão e a saída de um transformador a 540m e a 1990m da subestação. A tabela IX.2 apresenta a comparação entre a saída de vários transformadores e a resposta padrão. Estas simulações foram feitas no alimentador Bocaiúva simplificado.

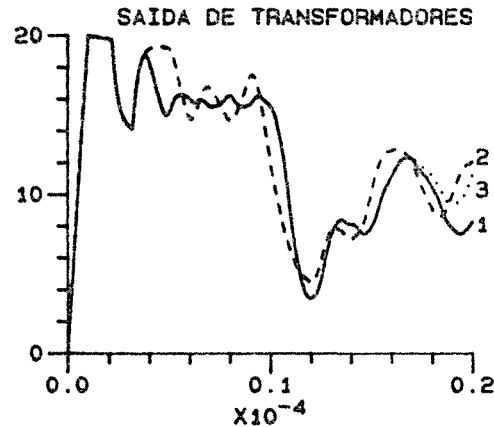


Fig.IX.5- Saída de transformadores; 1-Resposta padrão; 2-Saída do trafo 5; 3- Saída do trafo 19.

kHz	R. P. (pu)	Variação percentual (%)				
		T5	T6	T12	T19	T20
50	4,85	5,07	4,59	-3,87	-1,54	-1,56
100	0,95	60,36	61,13	8,84	8,48	8,28
150	2,93	-14,26	-19,25	-10,45	-9,77	-9,66

R. P. - Resposta Padrão

Tabela IX.2- Comparação entre a resposta padrão e a resposta mediante a saída de um transformador.

#### .Eventos Simultâneos

A saída simultânea de um transformador e um trecho da linha apresenta uma resposta bastante característica, diferente das respostas de cada evento ocorrendo separadamente. O alimentador utilizado também foi o simplificado e a comparação das respostas no tempo pode ser visto na fig.IX.6. A tabela IX.3 apresenta a comparação no domínio da frequência

eventos simultâneos de abertura de chaves, saída de transformadores e falta franca.

kHz	R. P. (pu)	Chave-Chave		Chave-Trafo		Chave-Falta	
		C8C22	C12C13	C5T5	C20T20	C8F22	C10F12
50	4,85	121,70	1,26	80,28	-3,86	46,72	13,58
100	0,95	20,57	390,40	484,90	35,69	16,32	2,17
150	2,93	19,33	-25,65	-12,30	-18,24	-9,11	22,16

R.P. - Resposta Padrão

C8C22- Abertura simultâneas das chaves 8 e 22

C5T5 - Abertura da chave 5 e saída do transformador 5

C8F22- Abertura da chave 8 e falta franca no ponto 22

Tabela IX.3- Comparação entre eventos simultâneos.

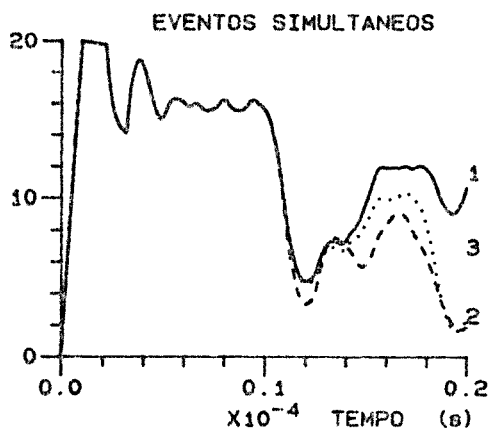


Fig. IX.6- Eventos simultâneos: 1- Chave no trecho 10-11 aberta; 2- Falta no ponto 12; 3- Trecho 10-11 interrompido e falta no pto 12.

.Falta Passiva e Ativa

A abertura de uma chave apresenta a mesma resposta que uma falta passiva naquele ponto. A fig. IX.7 apresenta a comparação entre uma chave aberta ch12 e faltas passivas ao longo do trecho 12-13. Observa-se que apesar da terminação ser a mesma (circuito aberto), o comprimento varia causando um atraso da resposta neste trecho o que modifica a onda na subestação. Verifica-se que a falta de alta impedância passiva só poderá

ser detectada se esta não ocorrer no mesmo ponto de uma chave. A curva 2 da fig.IX.7 é a resposta de uma falta passiva a 200m de uma chave (a curva 1 apresenta a resposta da chave aberta). A proximidade da falta a uma chave dificulta a identificação.

A resposta de um sistema submetido a uma falta ativa é completamente diferente de uma falta passiva ou da abertura ou fechamento de chaves não importando assim a proximidade deste a uma chave. Falta ativa simuladas como uma resistência de  $100\Omega$  nos mesmos pontos que a falta passiva acima, são mostrados na fig.IX.8.

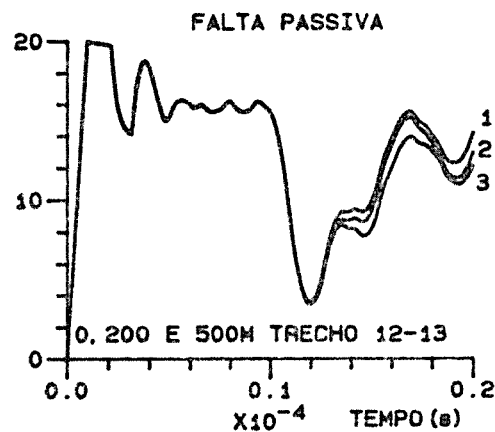


Fig.IX.7- Falta passiva ao longo do trecho 12-13.

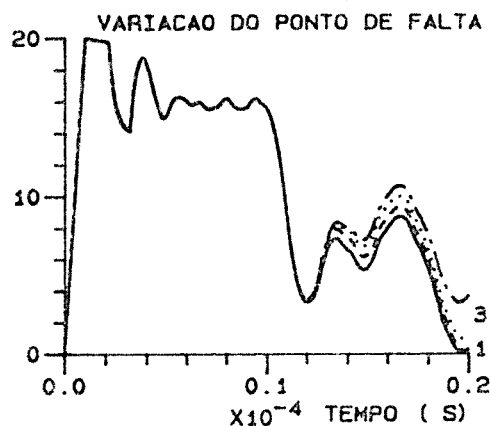


Fig.IX.8- Falta ativa ( $100\Omega$ ): 1- Ponto 12; 2 e 3- Trecho 12-13 aumentando-se gradativamente a distância; 4- Ponto 13.

A localização de uma falta de alta impedância está entre uma falta passiva (=chave aberta) e uma falta franca. Estes são os dois extremos da falta, fig.IX.9.

Como foi visto nos casos apresentados para cada evento normal que ocorre na rede (abertura de chaves) esta apresenta uma resposta diferente para o mesmo sinal de excitação, ou seja cada nova configuração do alimentador possui uma função de transferência.

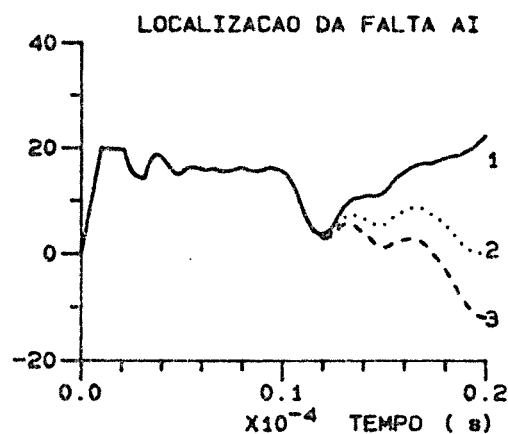


Fig.IX.9- Comparação entre: 1- Linha aberta; 2- Falta de alta impedância ativa ( $100\Omega$ ); 3- Falta franca.

kHz	R. P. (pu)	8-9		8-43		12-13		12-15	
		FAI	FF	FAI	FF	FAI	FF	FAI	FF
50	5,22	19,61	1,09	4,75	5,68	3,56	-10,73	14,50	-9,46
100	1,27	65,25	16,50	-65,33	-24,31	13,70	19,20	10,01	14,91
150	2,79	-3,30	7,53	-44,83	-4,59	-0,29	15,05	-17,39	11,95

R.P. - Resposta padrão

FAI - Falta de Alta Impedância; FF - Falta Franca.

Tabela IX.4- Comparação entre uma falta de alta impedância e uma falta franca ocorrida no mesmo ponto do alimentador (valores percentuais).

Tomando apenas as três primeiras frequências do espectro pode-se diferenciá-las como é mostrado na tabela IX.4. Nesta tabela vários casos simulados são colocados para facilitar a comparação. Estes casos foram simulados na rede simplificada. Todos os valores são percentuais tomando como base o caso padrão de cada rede em estudo.

#### .Bancos de capacitores

Em redes de distribuição longas a existência de bancos de capacitores ao longo do alimentador se torna necessária. Como existe, normalmente, um banco de capacitores na barra das subestações os bancos colocados no alimentador são geralmente localizados no seu final. O sinal injetado no alimentador é de alta frequência, existindo a necessidade de se colocar um filtro entre o ponto de injeção e a barra da subestação. Trata-se de um filtro série para barrar as altas frequências e deixar passar as baixas. O mesmo ocorre entre a fonte impulsiva e o ponto de injeção impedindo que as baixas frequências passem. A existência de bancos de transformadores no final de um alimentador não impede a identificação da falta.

Caso o banco seja colocado e retirado constantemente da linha, a resposta desta irá se modificar, a não ser que o banco seja colocado em paralelo com um transformador não alterando, portanto, a terminação existente.

Se o banco for colocado no meio do alimentador, este não permitirá que o sinal injetado passe por ele, comportando-se como se curto-circuitasse o restante da linha. Neste caso deve ser colocado um filtro passa baixa no neutro do banco, funcionando como circuito aberto

para as altas frequências. Assim a resposta volta a ser a padrão sem o banco.

### IX.2- Validação do Método para Ramais Longos

Apesar do alimentador de Bocaiúva ser real ele possui uma extensão de apenas 6km. Para testar o alcance do método, foi utilizado um alimentador fictício com 34km. Este alimentador é composto de um tronco de 20km e quatro ramais de 4km cada. Para tornar o teste mais crítico os ramais foram casados (casamento, através de  $Z=R=400\Omega$ ) nas suas extremidades. O casamento de uma linha faz com que não haja reflexão do sinal no final da mesma, ou seja, o casamento simula uma linha infinita. O objetivo é verificar se para alimentadores longos uma alteração ocorrida no final desta pode ser detectada. O alimentador simulado é mostrado na fig.IX.10.

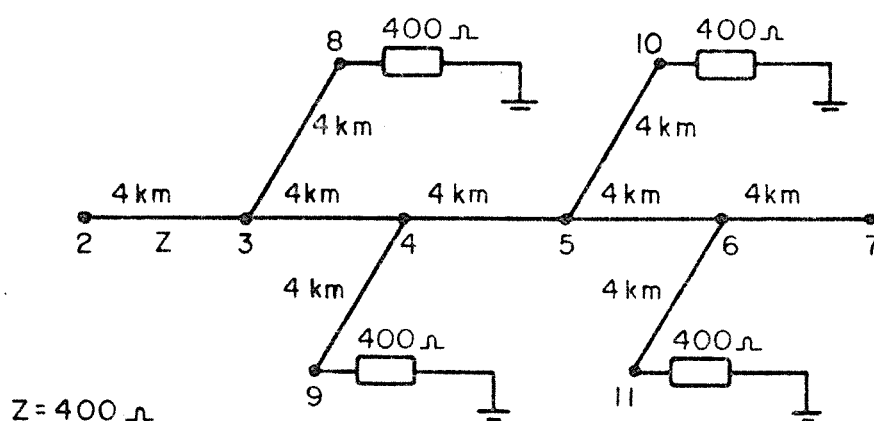


Fig.IX.10- Configuração do alimentador utilizado.

O trecho 6-7 foi escolhido para ser alterado de 4km para 1km, significando uma falta de alta impedância passiva. Para todos os ramais casados e o trecho 6-7 com 4km, obtem-se a resposta apresentada na

fig.IX.11a. Se ocorrer uma falta de alta impedância a 1km do ponto 6, no trecho 6-7, obtem-se a resposta apresentada na fig.IX.11b. Observa-se que a diferença entre as respostas ocorre a partir do tempo de  $113,3\mu\text{s}$  correspondendo à distância de 34km percorrido pelo sinal, ou seja, 17km da subestação.

Se o ramal 6-11 for descasado, as respostas para o trecho 6-7 com 4 e 1km são mostradas na fig.IX.12a e b. A distância da falta é a mesma calculada na figura anterior.

Se o ramal 3-8 for descasado e os demais permanecerem casados, as respostas encontradas serão as apresentadas na fig.IX.13a e b.

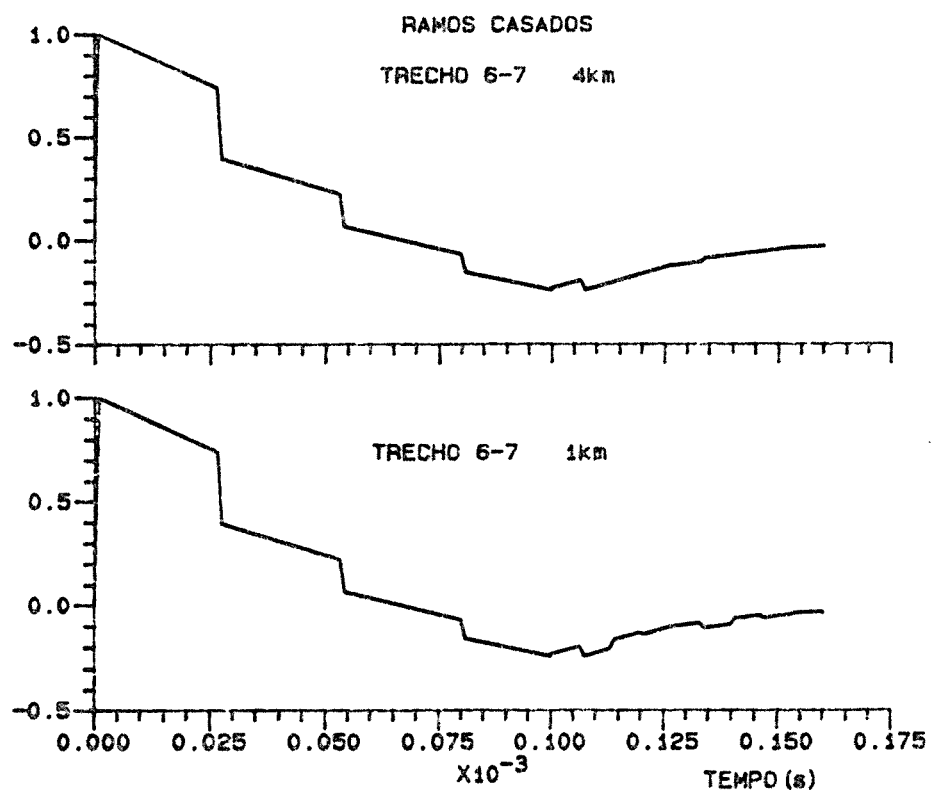


Fig.IX.11- Resposta do alimentador para todos os ramos casados a) Resposta padrão b) Falta de alta impedância passiva a 1km do ponto 6 no trecho 6-7.

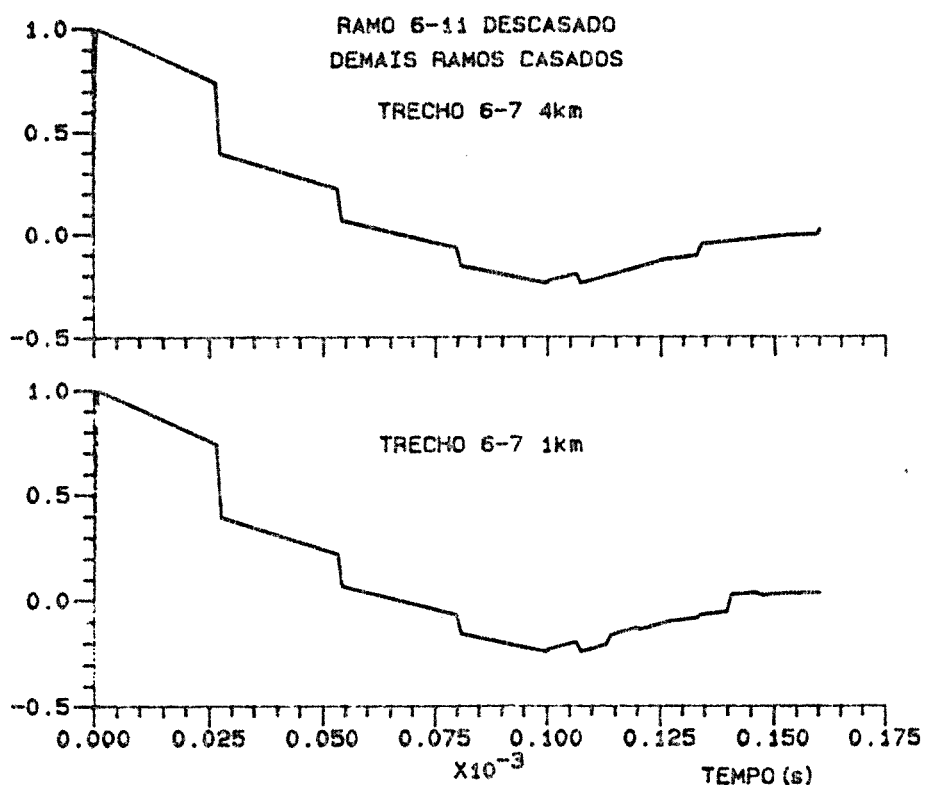


Fig.IX.12- Resposta do alimentador para todos os ramos casados exceto o ramal 6-11: a) Resposta padrão b) Falta de alta impedância passiva a 1km do ponto 6 no trecho 6-7.

É importante salientar que qualquer alteração detectada no tempo é facilmente detectada na frequência.

Assim, pode-se afirmar que para que o método possa monitorar um determinado alimentador basta que a janela de amostragem seja compatível com o comprimento do mesmo. O comprimento típico é de 15km, sendo assim possível determinar anormalidades em qualquer ponto do mesmo, com absoluta precisão.

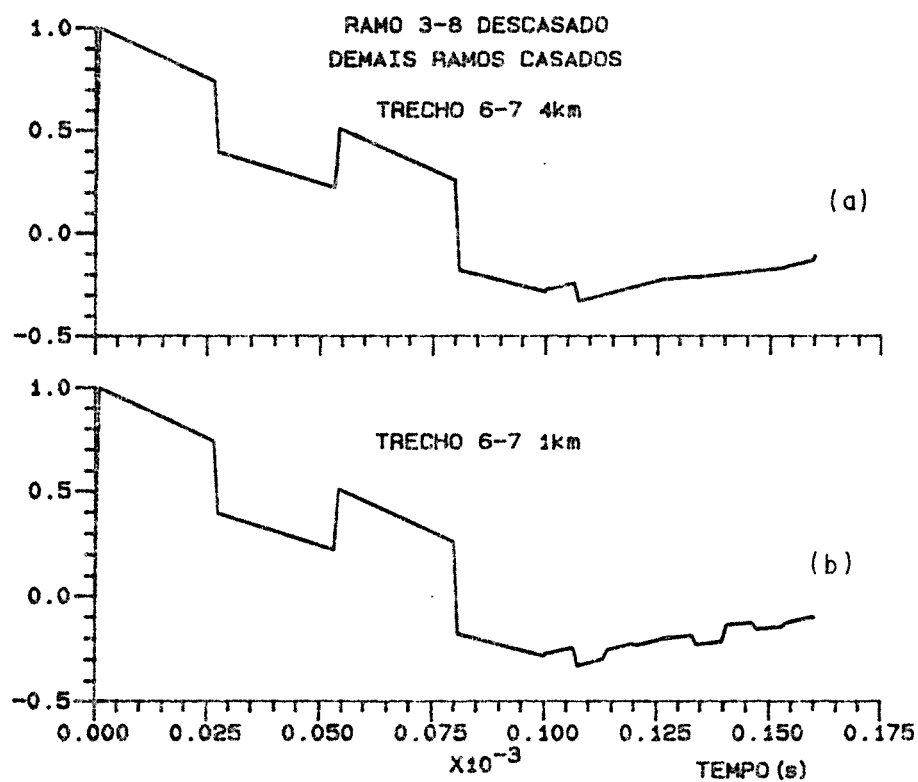


Fig. IX.13- Resposta do alimentador para todos os ramos casados exceto o ramal 3-8: a) Resposta padrão b) Falta de alta impedância passiva a 1km do ponto 6 no trecho 6-7.

## CAPÍTULO X

## CONCLUSÕES

Como foi mostrado através de simulações, a identificação de uma falta de alta impedância pela técnica proposta passa pela identificação de chaves abertas ao longo do alimentador e, pela coordenação com a proteção convencional que opera para faltas de baixa impedância. Após estas etapas, se a falta permanecer então ela é identificada como uma falta de alta impedância e, sua distância em relação à subestação é calculada.

Enquanto o método apresentado monitora a rede para verificar a existência de uma falta de alta impedância, este também identifica a saída de fases de transformadores ou mesmo trechos completos. Assim, o mesmo pode ser utilizado para facilitar a manutenção de linhas, emitindo relatórios com o número da chave aberta, facilitando e acelerando o serviço.

Observa-se que a existência de banco de capacitores na barra da subestação e no final de rede não afeta o funcionamento da técnica. Quando porém, um banco de capacitores estiver instalado no meio de algum trecho do alimentador, um filtro passa baixa deve ser instalado no neutro do mesmo, para evitar que este impeça que a técnica proposta possa detectar anormalidades após ele.

As vantagens deste método sobre os demais existentes na literatura são muitas. Os métodos baseados no desbalanço de corrente consideram em sua maioria valores fixos para este desbalanço, o que não é verdade, podendo levar à operação indevida. Os métodos baseados nas frequências geradas pelo arco não identificam faltas passivas, ou correntes

menores que 10A. Medições comprovam que a corrente envolvida neste tipo de falta decresce com o tempo, dificultando a identificação. Na técnica aqui proposta várias medições da resposta do alimentador são feitas até se tomar a decisão pelo desligamento. Qualquer tipo de falta de alta impedância é identificada, seja ela passiva ou ativa.

Os métodos anteriores, até agora apresentados, não dão nenhuma informação a respeito da distância da falta até a subestação, porém, o método proposto fornece com bastante precisão esta distância.

A única função desenvolvida pelos demais métodos é a identificação da falta, enquanto o método proposto monitora a rede como um todo, informando a saída de transformadores, trechos de linha ou banco de capacitores.

É importante salientar que apesar de todo o raciocínio, no método proposto, ter sido feito através de simulação digital, o método e sua implementação foram validados através de teste em uma rede experimental.

Para se dar prosseguimento a este trabalho alguns procedimentos devem ser seguidos: Levantamento de padrões de uma rede real através de medição; Implementação de técnicas de inteligência artificial; Implementação do software e hardware e montagem do gerador e dos filtros necessários.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Aucoin, B.M. and Russell, B.D.

"Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Components"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-101, No. 6, June 1982

[2] Aucoin, Mike

"Status of High Impedance Fault Detection"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-104, No. 3, March 1985

[3] Aucoin, B.M. et all

"Feeder Protection and Monitoring System, Part I : Design, Implementation and Testing"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-104, No. 4, April 1985

[4] Aucoin, B.M. et all

"Feeder Protection and Monitoring System, Part II : Staged Fault Test Demonstration"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-104, No. 6, June 1985

[5] Aucoin, B.M. and Russell, B.D.

"Algorithms for the Detection of Noise Frequencies Generated by High Impedance Faults"

Control of Power Systems Conference

CH1282-3, No. 78, pp. 120, March 1978

[6]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, April 1987

[7]Balser, S.J.; Clements, K.A.; 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

[8]Balser, S.J. et all

"Detection of High Impedance Faults"

EPRI Report, EL2413, preparada pela Power Technologies, Inc., June 1982

[9]Burke, James J. and Lawrence, David J.

Characteristics of Fault Currents on Distributin Systems"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-103, No. 1, January 1984

[10]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, April 1981

[11]Calhoun, Howard et all

"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, June 1982

[12]Ching-Lien Huang et all

"Algorithm Comparison for High Impedance Fault Detection Based on Staged  
Fault Test"

IEEE Transactions on Power Delivery

Vol. PWRD-3, No. 4, October 1988

[13]Ebron, Sonja; 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. PWRD-5, No. 2, April 1990

[14]Elmore, W.A.

"Application Considerations of CGR Broken Conductor Detection  
Relay"

Westinghouse Electric Corporation Relay - Instrument Division,  
Coral Springs, Florida, RPL 81-1, May 1981

[15]Emanuel, A.E. and Gulachenski, E.M.

"High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15kV Distribution Feeders:  
Contributions to the Evaluation of Low Frequency Spectrum"

IEEE Transactions on Power Delivery

Vol. PWRD-5, No. 2, April 1990

[16]Kim, C.J.; Russell, B.D. and Watson, K.

"A Parameter-Based Process for Selecting High Impedance Fault Detection Using Decision Making Under Incomplete Knowledge"

IEEE Transactions on Power Delivery

Vol. PWRD-5, No. 3, July 1990

[17]Landucci, A.J.

"Estudo sobre Falhas Fase-Terra de Alta Impedância em Alimentadores de Distribuição"

Tese de Mestrado - EESC - USP - 1991

[18]Lee, Robert E. and Bishop, M.T.

"Performance Testing of the Ratio Ground Relay on a Four-Wire Distribution Feeders"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-102, No. 9, September 1983

[19]Lee, Robert 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, October 1985

[20]Narendorf, M.; Russell, B.D.; Aucoin, M.

"Microcomputer Based Feeders Protection and Monitoring System - Utility Experience"

IEEE Transactions on Power Delivery

Vol. PWRD-2, No. 4, October 1987

[21]Phadke, A.G. et all

"A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-102, No. 5, May 1983

[22]Russell, B.Don and Kim, C.J.

"Harmonic Behavior during Arcing Faults on Power Distribution Feeders"

Electric Power Systems Research

Vol. 14, No. 3, June 1988

[23]Russell, B.D.

"High Impedance Faults can now be Detected"

Transmission & Distribution

February 1982

[24]Russell, B.D.; Chinchali, R.P. and Mehta, K.

"An arcing Fault Detection Technique Using Low Frequency Current Components - Performance Evaluation Using Recorded Field Data"

IEEE Transactions on Power Delivery

Vol. PWRD-3, No. 4, October 1988

[25]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, January 1989

[26]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, October 1988

[27]Silva, P.R. et all

"Localização de Faltas em SEP utilizando FFT"

The First International Conference on Power Distribution

Vol.2, Novembro 1990

[28]Stewart, James R.

"Distribution System Reability is the Goal of Research on Fault Characteristics"

Transmission & Distribution

December 1979

[29]Wolff, Robert F.

"It's Tough to Relay High Impedance Faults"

Transmission & Distribution

August 1979