

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE

ARYFRANCE ROCHA ALMEIDA

**Localização de Falhas em Sistemas de  
Transmissão de Alta Tensão usando ICA**

São Luís  
2007

ARYFRANCE ROCHA ALMEIDA

**Localização de Falhas em Sistemas de  
Transmissão de Alta Tensão usando ICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Mestre, na área de Automação e Controle.

Orientador: Prof.Dr. Allan Kardec Barros

São Luís  
2007

ARYFRANCE ROCHA ALMEIDA

## **Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão usando ICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do grau de Mestre, na área de concentração de Automação e Controle.

Orientadores: Prof.Dr. Allan Kardec Barros

Aprovada em / /

### **BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros Filho (Orientador)**

Departamento de Engenharia de Eletricidade  
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Vicente Leonardo Paucar**

Departamento de Engenharia de Eletricidade  
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire**

Universidade Federal de Campina Grande

A meus pais, “Seu” Arimatéia e  
“Dona” Francilene.

# Agradecimentos

---

A Deus, que me deu força, saúde e sabedoria para a minha vitória.

Aos meus pais, José de Arimatéia Silva Almeida e Francisca das Chagas Rocha Almeida, que com trabalho, honestidade e ajuda de Deus promoveram a minha educação.

Ao Prof. Allan Kardec Duailibe Barros Filho e ao Eng<sup>o</sup> Maxwell Borges de Sousa pela orientação segura.

Ao meu irmão Arylson, pelo incentivo.

Aos que fazem a Universidade Federal do Maranhão, onde tive a oportunidade de adquirir os conhecimentos necessários para ser um bom profissional.

A todos os membros do PIB e NEA do DEE UFMA pela amizade e companheirismo.

A todos aqueles que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta tese de mestrado.

“Seja quem você for, seja qualquer posição que você tenha na vida, no nível altíssimo ao mais baixo social, tenha sempre como meta: muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá, de alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

# Resumo

---

Vários métodos de localização de faltas em linhas de transmissão têm sido propostos na literatura, dos quais podemos destacar os métodos baseados na correlação cruzada, na transformada wavelet e no uso de redes neurais. O objetivo deste trabalho é mostrar um método alternativo baseado na utilização de análise de componentes independentes (ICA) para localizar a distância de faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas em um sistema de transmissão de 500 kV, a partir de diferentes ângulos de incidência de falta em diferentes distâncias ao longo da linha de transmissão e com os sinais de faltas ou ondas viajantes submetidas a outras perturbações não correlacionadas com o sinal de falta desejado na localização da distância da falta. De acordo com os resultados obtidos com a simulação de um sistema de transmissão de 500 kV de alta tensão pelo software ATP (Alternative Transient Program) mostram que a metodologia proposta implementada através do software Matlab é uma ferramenta bastante eficiente na localização de faltas para todos os tipos de faltas.

**Palavras-chave:** Localização de faltas, ICA, Sistemas de transmissão.

# Abstract

---

Some methods of fault location in transmission lines have been considered in literature, of which we detach the methods based on the crossed correlation, transformed wavelet and the use of neural networks. This work presents an alternative method based upon of independent components analysis (ICA) to localize the distance at which single-phase, two-phase, two-phase grounding and three-phase faults occur in a 500 kV transmission systems starting from different angles of fault incidence at different distances along the line together with fault signals or traveling waves subject to other perturbations unrelated with the desired fault signal at the fault distance placement. Simulations results of a 500 kV high voltage transmission system got with the software Alternative transients program (ATP) show that the proposed methodology implemented with Matlab is a rather efficient tool for various fault types location.

**Keywords:** Fault location, ICA, transmission system.

# Sumário

---

<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Estado da Arte.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Solução Proposta.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Organização do documento.....</b>	<b>3</b>
<b>2 Métodos de Localização de Faltas.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Métodos baseados nos componentes de frequência     fundamental.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1 Algoritmos que utilizam dados de mais de um terminal de         linha.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Métodos baseados nos componentes de alta frequência.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1 Algoritmos que utilizam dados de um terminal local.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 Algoritmos que utilizam dados de múltiplos terminais de         linha.....</b>	<b>17</b>
<b>3 Ondas Viajantes – Fundamentação Teórica.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Ondas viajantes em sistemas de transmissão.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Reflexões sucessivas e Diagrama de Lattice.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3 Atenuação e Distorção das ondas viajantes.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 Transformação modal.....</b>	<b>21</b>
<b>3.5 Princípio básico do método de localização de faltas.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 Método de localização de faltas proposto.....</b>	<b>24</b>
<b>3.7 Conclusão.....</b>	<b>25</b>
<b>4 Análise de Componentes Independentes - Fundamentação Teórica.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Objetivo.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Histórico.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 Separação cega de fontes.....</b>	<b>30</b>

<b>4.4</b>	<b>Análise de Componentes Independentes.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5</b>	<b>Medidas de não-gaussianidade.....</b>	<b>34</b>
4.5.1	Kurtose.....	34
4.5.2	Negentropia.....	35
4.5.3	Aproximações da negentropia.....	35
<b>4.6</b>	<b>Medidas de informação mútua.....</b>	<b>36</b>
<b>4.7</b>	<b>Estimação da máxima probabilidade.....</b>	<b>37</b>
<b>4.8</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Sistemas Adaptativos – Fundamentação Teórica.....</b>	<b>38</b>
5.1	Objetivo.....	38
5.2	Áreas de aplicação.....	38
5.3	Propriedades gerais.....	39
5.4	Filtros adaptativos.....	40
5.4.1	Módulos do filtro.....	40
5.5	Filtro de Wiener.....	42
5.6	Conclusão.....	58
<b>6</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>49</b>
6.1	Sistema de transmissão proposto.....	49
6.2	Variações nas simulações das condições de faltas aplicadas ao sistema de transmissão proposto.....	51
<b>7</b>	<b>Discussões e conclusões.....</b>	<b>57</b>
7.1	Proposta de Continuidade e Sugestões.....	58
	<b>Referências.....</b>	<b>59</b>
	<b>Apêndice A: Implementação no ATP.....</b>	<b>66</b>
	<b>Apêndice B: Implementação da técnica ICA.....</b>	<b>70</b>
	<b>Apêndice C: Resultados Complementares.....</b>	<b>71</b>

# Lista de Figuras

---

3.1	Diagrama de Lattice representando as sucessivas reflexões de um sinal qualquer.....	20
3.2	Diagrama de Lattice.....	23
3.3	Diagrama de blocos do sistema proposto na implementação da técnica de ICA para encontrar a localização da falta.....	25
5.1	Módulos de um filtro adaptativo.....	40
5.2	Identificação de Sistemas.....	41
5.3	Predição de Sinais.....	42
5.4	Cancelamento de Interferências.....	42
5.5	Diagrama de blocos representando o problema da filtragem adaptativa.....	43
5.6	Forma geral do combinador linear adaptativo.....	44
5.7	Superfície de Erro.....	47
6.1	Sistema de Transmissão de 500 kV.....	50
6.2	Modelo da torre de transmissão de 500 kV.....	50
6.3	Situações de faltas sobre o sistema .....	51
6.4	Sinal de falta com ângulo de incidência de 30°.....	53
6.5	Sinal de falta adicionado com SNR de 10 dB .....	53
6.6	Sinal de falta adicionado com SNR de 20 dB .....	53
6.7	Sinal de falta adicionado com SNR de 40 dB .....	54
6.8	Sistema de Transmissão modelado no programa ATP.....	66
6.9	Implementação da Técnica de ICA pelo Matlab.....	70

# Lista de Tabelas

---

1	Distribuição de faltas em um sistema de transmissão de 500 kV.....	1
2	Matriz de transformação modal para cada tipo de fase.....	23
3	Localização de uma falta monofásica (AT) a uma distância de 50 km.....	55
4	Localização de uma falta monofásica (AT) a uma distância de 90 km.....	55
5	Localização de uma falta monofásica (AT) a uma distância de 150 km .....	56
6	Erro médio (%) para todos os tipos de faltas estudados.....	56
7	Localização de uma falta bifásica (AB) a uma distância de 50 km.....	71
8	Localização de uma falta bifásica (AB) a uma distância de 90 km.....	72
9	Localização de uma falta bifásica (AB) a uma distância de 150 km.....	72
10	Localização de uma falta bifásica (BC) a uma distância de 50 km.....	73
11	Localização de uma falta bifásica (BC) a uma distância de 90 km.....	73
12	Localização de uma falta bifásica (BC) a uma distância de 150 km.....	74
13	Localização de uma falta bifásica (AC) a uma distância de 50 km.....	74
14	Localização de uma falta bifásica (AC) a uma distância de 90 km.....	75
15	Localização de uma falta bifásica (AC) a uma distância de 150 km.....	75
16	Localização de uma falta bifásica-terra (ABT) a uma distância de 50 km.....	76
17	Localização de uma falta bifásica-terra (ABT) a uma distância de 90 km.....	76
18	Localização de uma falta bifásica-terra (ABT) a uma distância de 150 km.....	77
19	Localização de uma falta bifásica-terra (BCT) a uma distância de 50 km.....	77
20	Localização de uma falta bifásica-terra (BCT) a uma distância de 90 km.....	78

21	Localização de uma falta bifásica-terra (BCT) a uma distância de 150 km.....	78
22	Localização de uma falta bifásica-terra (ACT) a uma distância de 50 km.....	79
23	Localização de uma falta bifásica-terra (ACT) a uma distância de 90 km.....	79
24	Localização de uma falta bifásica-terra (ACT) a uma distância de 150 km.....	80
25	Localização de uma falta trifásica (ABC) a uma distância de 50 km.....	80
26	Localização de uma falta trifásica (ABC) a uma distância de 90 km.....	81
27	Localização de uma falta trifásica (ABC) a uma distância de 150 km.....	81

# 1 Introdução

---

Os sistemas elétricos de potência devem garantir um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Contudo, interrupções no fornecimento de energia elétrica podem ser provocadas pela ocorrência de diferentes tipos de fenômenos eletromagnéticos no sistema elétrico que podem afetar classes de consumidores distintas.

Faltas podem ocorrer nos diversos componentes de um sistema elétrico de potência, dentre os quais podemos destacar as linhas de transmissão como o elemento mais susceptível, especialmente se considerarmos suas dimensões físicas, complexidade funcional e o ambiente que se encontram, apresentando assim, maior dificuldade para manutenção e monitoramento. Pode-se ilustrar a predominância de faltas em linhas de transmissão, observando a Tabela 1, que segundo a qual mostra o registro da distribuição de faltas, em um sistema de 500 kV, em um período de 10 anos.

Tabela 1 – Distribuição de Faltas em um sistema de transmissão de 500 kV

Equipamentos Faltosos	Número de Faltas %
Linhas de Transmissão	82
Circuitos Disjuntores	4
Autotransformadores	7
Barramentos	1
Geradores	1
Erro Humano	5

Fonte: CORY (1987)

De acordo com observações práticas entre 70% e 80% das faltas nas linhas de transmissão ocorrem entre um só condutor e a terra (STEVENSON, 1978). Um menor número de faltas refere-se as que envolvem todas as fases, em torno de 5%.

Considerável atenção tem sido dada à utilização de ondas viajantes para detectar e estimar a localização de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica. Este assunto é muito importante nos dias de hoje por reduzir o tempo de interrupção do sistema no caso de faltas, contribuindo assim para a qualidade na continuidade do fornecimento de energia elétrica. Relés de proteção normalmente atenuam os efeitos das ondas viajantes ou transitórios de alta frequência que surgem no momento de uma falta e concentram-se nos conteúdos dos sinais de baixa frequência, representando deste modo a mudança entre o estado de pré e pós-falta, para estimar a distância da falta (SHEHAB-ELDIN; MACLAREN, 1988).

Uma falta em uma linha de transmissão introduz sinais de alta frequência denominada de ondas viajantes, que contêm informação única sobre sua localização e propagam-se em ambas as direções da linha de transmissão (DUTTA; DUTTAGUPTA, 1993). Quando a onda viajante encontra uma descontinuidade, ela pode ser refletida ou refratada, gerando transitórios de tensão de alta frequência. Além disso, a forma e a amplitude da onda viajante dependem do coeficiente de reflexão e refração. A onda viajante refletida retorna e a refratada segue adiante na linha de transmissão. Este fenômeno continuará até o completo amortecimento ou até a atuação de alguma proteção do sistema elétrico.

O principal problema na localização de falta é encontrar a segunda onda viajante reversa que reflete no ponto de incidência da falta e retorna ao ponto de medição a partir de diferentes ângulos de faltas e submetidas a muitos sinais relacionados com os distúrbios não correlacionados com o sinal de falta desejado.

Técnicas em processamento digital de sinais têm sido aplicadas para extrair das ondas viajantes informações necessárias para estimar a distância da falta (DUTTA; DUTTAGUPTA, 1993; SHEHAB-ELDIN; MACLAREN, 1988).

## **1.1 Estado da Arte**

Alguns métodos foram propostos na bibliografia, dos quais podemos destacam-se os métodos baseados na correlação cruzada (SHEHAB-ELDIN; MACLAREN, 1988), na Transformada Wavelet (MAGNAGO; ABUR, 1998) e no uso de Redes Neurais (JORGE; COURY; CARVALHO, 1999). Entretanto, o desempenho do processo de correlação cruzada depende da impedância de falta, configuração do sistema elétrico, ângulo de incidência da falta e do modo de propagação em sistemas trifásicos (LIANG; ELANGO VAN; DEVOTTA, 1998; SHEHAB-ELDIN; MACLAREN, 1988).

Além disso, a Transformada Wavelet é muito sensível a sinais não correlacionados com o sinal de falta desejado (SILVEIRA; SEARA; ZURN, 2001). A aplicação de redes neurais está baseada no uso de componentes na frequência fundamental do sistema elétrico extraídas dos períodos de pré e pós falta (JORGE; COURY; CARVALHO, 1999). Com isso uma das metas deste trabalho é propor uma metodologia baseada na técnica de análise de componentes independentes na tentativa de encontrar a distância de faltas monofásicas, bifásica-terra, bifásica e faltas trifásicas em uma linha de transmissão de energia elétrica de

tensão de 500 kV, a partir de diferentes ângulos de incidência em diferentes distâncias ao longo da linha de transmissão e com os sinais de faltas ou ondas viajantes submetidas a outras perturbações não correlacionadas com o sinal desejado na localização da falta.

## **1.2 Solução Proposta**

Este trabalho tem por objetivo abordar o problema da localização de faltas através da implementação prática de um algoritmo computacional de localização de faltas para todos os tipos de faltas, recorrendo à teoria da análise de componentes independentes – ICA. A implementação do algoritmo é baseada no método das componentes de alta frequência dos sinais transitórios de faltas registradas em um terminal de medição.

Tal algoritmo é implementado através do software Matlab e posteriormente testado usando-se o banco de dados de faltas obtidos através do software ATP (Alternative Transients Program) (PRIKLER; HOIDALEN, 1998). Através da técnica de ICA é construído um subespaço no qual são projetadas as ondas viajantes. Desse modo qualquer outro sinal que não seja projetado neste subespaço será descartado pelo algoritmo. Nas simulações de faltas aplicadas ao algoritmo, para um sistema de transmissão de 500 kV, foi analisado o comportamento do algoritmo sobre a influência de alguns fatores. Dentre estes podemos destacar: a influência do ângulo de incidência de falta, a influência da variação da distância da linha de transmissão, da variação da resistência de falta, da variação da taxa de amostragem do sinal quando submetidas a vários distúrbios não correlacionados com o sinal de falta desejado. Os resultados alcançados mostram que a técnica de ICA é uma ferramenta bastante eficiente no desempenho e precisão da localização de faltas.

## **1.3 Organização do Documento**

O texto deste trabalho está dividido em sete capítulos:

No capítulo 2, são abordados os principais métodos e trabalhos relacionados sobre a localização de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica.

No capítulo 3, são abordada a teoria da localização de faltas, a partir de um terminal de medição, e a estrutura proposta do algoritmo de ICA implementado através do software

Matlab para recuperação das frentes de ondas necessárias para a localização da distância da falta.

No capítulo 4, constam um histórico e uma fundamentação teórica da análise de componentes independentes – ICA usada para obter as funções bases, e um resumo dos princípios de estimação do modelo de ICA.

No capítulo 5, apresentam-se a definição, as áreas de aplicações, as características e propriedades gerais dos filtros adaptativos usado na recuperação dos sinais originais de faltas.

No capítulo 6, apresentam-se os resultados alcançados com a implementação da técnica de ICA proposto na localização da distância de uma falta em sistemas de transmissão de energia elétrica, através de simulações com sinais de faltas monofásicas.

No capítulo 7, apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Métodos de Localização de Faltas

---

O desenvolvimento de novos métodos de localização digital de faltas para linhas de transmissão utilizando dispositivos baseados em microprocessadores é questão de interesse de pesquisadores e engenheiros de potência nos últimos anos, com um número muito grande de propostas de novas metodologias e aperfeiçoamento de outras já existentes, visando melhorar a precisão das localizações de faltas em linhas de transmissão.

O estudo da bibliografia sugere duas diferentes categorias em que podem ser classificados os métodos de localização de falta: os métodos baseados em componentes de frequência fundamental e o método das ondas viajantes. Neste capítulo são referenciados ambos os métodos de localização, os quais se subdividem em dois grupos segundo a obtenção e utilização de dados de um ou de mais terminais da linha.

### 2.1 Métodos baseados nos componentes de frequência fundamental

Os algoritmos baseados nos componentes de frequência fundamental registrados em um único terminal geralmente fazem uso da impedância aparente calculada em relação ao ponto de falta e das correntes de pré-falta para calcular a localização da falta. Entretanto, os mesmos estão sujeitos a erros devido à contribuição de correntes provenientes dos alimentadores remotos e também devido à resistência de falta (GAUTIER, 1996). Nesses métodos, é necessário que se identifique o tipo de falta ocorrida, pois o equacionamento para cada tipo é diferente dos demais.

Saint e Paithankar (apud GAUTIER, 1996) propuseram uma técnica de localização de faltas baseada no cálculo da razão entre a reatância de falta da linha ( $X_{LS}$ ) a partir do terminal onde se encontra o localizador de falta até o ponto da falta e a reatância total da linha de transmissão ( $X_n$ ), ou seja,  $X_{LS}/X_n$ . Como  $X_n$  é um valor conhecido, a razão  $X_{LS}/X_n$  determina a posição da falta. Do cálculo dessa razão pode ser derivada a seguinte expressão:

$$\frac{X_{LS}}{X_n} = \frac{\text{sen}\theta_3 \text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} \quad (2.1)$$

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{I_R X_n}{V_S}\right) \quad (2.2)$$

$$\theta_2 = -\frac{V_S}{I_R X_n - V_S} \quad (2.3)$$

$$\theta_3 = 180^\circ - (\theta_1 + \theta_2) \quad (2.4)$$

Sendo que  $I_R$  é a corrente de pós-falta no terminal R e  $V_S$  a tensão de pós-falta no terminal local.

A equação (2.1) denota que a posição da falta pode ser determinada pela medida de dois quaisquer dos três ângulos  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ . A técnica proposta é baseada na medição destes ângulos por dois contadores digitais. O localizador de faltas é analisado somente sob condições de fonte conectada em um único terminal. Contudo, as estimativas da localização de falta não são precisas se existe uma contribuição à corrente de falta pelas fontes conectadas em ambos os terminais da linha e se for levada em conta a resistência de falta (GAUTIER, 1996).

Takagi et al. (1981a) apresentaram um algoritmo de localização baseado no uso de sinais de tensão e corrente apenas de um terminal, os quais são posteriormente filtrados através da técnica da transformada discreta de Fourier, a fim de obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. O algoritmo utiliza componentes superpostos e modais de tensão e corrente, ao invés dos valores totais para o cálculo da distância. Isso permite que um sistema trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos independentes, simplificando consideravelmente os cálculos necessários. O equacionamento deste algoritmo também faz uso de quadripólos e do método de Newton-Raphson.

Para uma linha monofásica, aplicando-se a teoria da superposição em redes lineares, isto é, separando a rede faltosa em duas redes derivadas (uma rede de pré-falta e uma rede em que a falta foi isolada), obteremos o vetor  $V_F$  no ponto de falta:

$$V_F = R_F I_F = -R_F (I_{SF} + I_{RF}) \quad (2.5)$$

Onde  $V_F$  e  $I_F$  são estimados por vetores medidos no terminal local da linha:

$$V_F = A(d) V_S - B(d) I_S \quad (2.6)$$

$$I_{SF} = C(d) V_S - D(d) I_S \quad (2.7)$$

A, B, C e D são as constantes do quadripólo representativo da linha de transmissão expresso por:

$$A(d) = D(d) = \cosh(\lambda d) \quad (2.8)$$

$$B(d) = Z_0 \sinh(\lambda d) \quad (2.9)$$

$$C(d) = \sinh(\lambda d) \quad (2.10)$$

A partir de uma série de manipulações algébricas envolvendo as Equações (2.6, 2.7 e 2.8), chega-se a:

$$R_F [1 + K(d)] = - \frac{A(d)V_S - B(d)I_S}{C(d)V_S - D(d)I_S} \quad (2.11)$$

Dadas as equações acima, temos que  $V_F$  e  $I_F$  é a tensão e corrente no ponto de falta respectivamente;  $V_S$  e  $I_S$  representam a tensão e corrente de pré-falta no terminal local,  $R_F$  a resistência de falta;  $I_{SF}$  é o componente superposto da corrente de falta do terminal local ao ponto de falta;  $I_{RF}$  é o componente superposto da corrente de falta do terminal remoto ao ponto de falta;  $Z_0$  a impedância característica da linha e  $K(d)$  é a relação entre  $I_{RF}$  e  $I_{SF}$ .

Considerando-se as seguintes hipóteses:

- $R_F$  é puramente resistiva;

-Relação  $K(d)$  é um número real.

Esta segunda hipótese só é válida se os equipamentos nos terminais da linha de transmissão forem puramente indutivos e a linha sem perdas, o que em determinados casos pode ser uma boa aproximação.

A equação básica do localizador é definida como:

$$I_m \left[ \frac{A(d)V_S - B(d)I_S}{C(d)V_S - D(d)I_S} \right] = 0 \quad (2.12)$$

Onde  $I_m$  representa a parte imaginária de uma variável complexa. A solução  $d$  da Equação (2.12) corresponde à distância do ponto de falta ao terminal local. A Equação (2.12) é uma equação não linear, sendo necessária a técnica iterativa de Newton-Raphson para resolvê-la.

Em Takagi et al. (1981b), foi apresentada uma outra possível solução para o problema de localização de faltas baseado na transformada de Laplace. Este método também utiliza o princípio da superposição aplicado à análise do estado transitório de uma rede faltosa. A equação fundamental do localizador é não linear, portanto, se faz necessário o uso de uma técnica de solução interativa como o método de Newton Raphson.

Richards e Tan (1982) apresentaram um método de localização de faltas por estimação de parâmetros de um sistema dinâmico. O sistema de equações diferenciais é baseado no modelo de linha de parâmetros concentrados, nos equivalentes de Thévenin para transitórios em ambos os terminais e na desconhecida resistência de falta. As equações são simplificadas usando componentes simétricos. A estimação do algoritmo não exige filtragem dos componentes CC, nem dos componentes de alta frequência.

O problema da localização de faltas consiste na estimação de parâmetros do sistema dinâmico, a qual a resposta do sistema físico é comparada com o modelo de parâmetros concentrados. Os parâmetros do modelo são variados, até que uma combinação adequada seja obtida com a resposta física do sistema (RICHARDS; TAN, 1982).

Erickson, Saha e Rockefeller (1985) descreveram uma técnica de localização de faltas usando o Fator de Distribuição de Corrente (FDC), na qual determinam o ângulo da tensão no ponto de falta e a distância de falta. Esta técnica apresenta maiores benefícios se comparada ao método proposto por Takagi et al. (1981a), uma vez que considera a influência introduzida pelo terminal remoto da linha usando para isso, o modelo completo da rede. Além disso, valores representativos para a impedância da fonte são também armazenados, para compensar as variações nos ângulos das impedâncias e determinar uma correta descrição da rede. O valor de  $R_F$  desconhecido não é necessário, sendo usado somente o ângulo de  $R_F \times I_F$  da tensão, no ponto de falta.

O cálculo da localização determina a impedância aparente da falta com uma compensação para a queda de tensão na resistência de falta, eliminando erros na medição convencional. Como a impedância da seqüência positiva não depende da resistência do pé de torre e nem da resistência do solo, as componentes da corrente de seqüência zero foram eliminadas e somente da corrente de seqüência positiva e negativa foram usadas.

Morrison e Yang (1987) também desenvolveram um método de localização de faltas baseado na equação diferencial da linha. A equação da falta é baseada na tensão e na corrente

instantânea de um dos terminais do sistema. A técnica despreza o efeito da capacitância em paralelo.

Ranjbar, Shirani e Fathi (1992) apresentaram uma técnica baseada em modelos de linhas de parâmetros distribuídos que leva em consideração o efeito da capacitância da linha. A abordagem utilizada baseia-se no cálculo da tensão ao longo da linha de transmissão. No ponto de falta, a tensão assume seu valor mínimo e, assim, uma comparação dos valores das tensões em diferentes pontos da linha fornece uma base para localização da falta. Para isso os autores desenvolveram uma função  $G(x)$ , proporcional à integral do valor absoluto da tensão sobre um intervalo de tempo limitado. Esta função, por sua vez, faz uso das ondas de tensão ao longo da linha calculadas por meio de equações telegráficas,  $G(x)$  é calculada para diversos pontos sobre a linha e possui seu valor mínimo no local de ocorrência da falta, o método determina a localização mesmo para uma falta com ângulo de incidência igual a zero.

Girgis e Fallon (1992) elaboraram duas técnicas de localização de faltas baseada no conceito de impedância aparente e uso dos fasores trifásicos de tensão e corrente. O primeiro método utiliza dados de apenas um terminal da linha e o segundo utiliza dados de dois terminais, sendo esses dados obtidos por registradores digitais de falta. Ambas as técnicas foram testadas utilizando registros de faltas em uma linha de 69 kV e 115 kV, respectivamente. Tais técnicas apresentaram alto grau de precisão nos testes avaliados. Segundo os autores, as imprecisões constatadas nas técnicas são devidas à imprecisão de parâmetros da linha, da carga do sistema e comprimento da linha.

Purushothama et al. (2000) apresentaram um algoritmo de localização de faltas para linhas paralelas utilizando sinais de tensão e corrente provenientes do terminal local. O algoritmo faz uso de componentes simétricos. As correntes e tensões de fase em ambas as linhas, com e sem falta, são utilizados pelo localizador. O algoritmo é capaz de localizar falta quando ambas as linhas estão em operação e não requer conhecimento das impedâncias das fontes e o uso de sinais de pré-falta. As incertezas com respeito à impedância de seqüência zero da linha são parcialmente limitadas, pois a queda de tensão gerada pela falta ao longo da linha é determinada excluindo-se a componente de seqüência zero.

Yibin, Wai, Keerthipala (1997) propuseram uma técnica de localização de faltas usando a Transformada Wavelet. Este método faz uso das componentes de frequência fundamental do sistema, extraídas com o auxílio da Transformada Wavelet, para promover a localização da falta. Com base na Análise Multiresolução (AMR) usando Wavelet, sendo os sinais amostrados à frequência de 5 kHz, os autores afirmam que as componentes

fundamentais estão inclusas na sexta escala, que compreende a faixa de frequência de 39,06 à 78,13 Hz. Porém, nesta escala os sinais são representados por menos de duas amostras/ciclo, o que pode ser considerado insuficiente para representar o sinal. Portanto, considera-se o emprego do algoritmo de codificação por sub-bandas de tempo invariante que mantêm o mesmo número de amostras em todas as escalas. O algoritmo proposto apresentou melhores resultados quando comparado a um algoritmo baseado na extração de fasores fundamentais por meio da Transformada de Fourier.

Soares, Carvalho e Oliveira (2002) descreveram uma outra aplicação da teoria Wavelet ao problema de localização de faltas em linhas de transmissão seguindo o princípio apresentado em (YIBIN; WAI; KEERTHIPALA, 1997). O método faz uso das componentes de frequência fundamental dos sinais de tensão e corrente para promover a localização da falta. A partir dos sinais de tensão e corrente, suas versões aproximadas e detalhadas são obtidas através da implementação do algoritmo de codificação por sub-bandas na AMR. Porém, neste método, são consideradas as aproximações de terceira escala dos sinais de tensão e corrente para se obter as componentes na faixa de frequência de 0 a 480 Hz. Para a implementação deste método, considera-se que as componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente são obtidos ao extrair as componentes dos sinais de terceira escala, sendo a distância estimada considerando o método da impedância aparente.

### **2.1.1 Algoritmos que utilizam dados de mais de um terminal de linha**

Com a finalidade de melhorar a precisão dos algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão, muitos autores propõem o uso de dados observados em ambos os terminais da linha. Essas técnicas geralmente são independentes da impedância de falta e de mudanças na configuração das fontes dos sistemas de potência. Por outro lado, torna-se necessário um meio de comunicação entre os terminais, bem como um método para determinação dos ângulos de fase das tensões e correntes, em relação a um eixo de referência comum. A localização da falta só poderá ser determinada precisamente se as medições em ambos os terminais forem sincronizadas.

Sachdev e Agarwal (1985) propuseram uma técnica de localização de faltas não interativas que é adequada para estimar localizações de faltas para terra. O método faz uso da impedância aparente local da linha, da corrente de sequência positiva medida localmente por

relés e também de dados correspondentes ao terminal remoto. A partir dessas informações, diferentes tipos de faltas foram analisados e testados usando a teoria de componentes simétricos, a fim de obter a distância da falta para cada caso. Impedâncias das fontes, fatores de distribuição e correntes pré-falta não foram usados no processo de estimação.

A técnica foi testada para dados simulados de faltas monofásicas e bifásicas-terra. Os resultados indicaram que os erros de estimação são menores que 5% do comprimento da linha, exceto para uma porção da linha próxima do seu ponto médio, onde as contribuições das correntes de faltas dos dois terminais da linha são iguais. As medidas realizadas nos dois terminais não necessitam ser sincronizadas. O efeito da capacitância em paralelo é desprezado (SACHDEV; AGARWAL, 1985).

Jeyasurya e Rahman (1989) fizeram uso de um método para determinar o ângulo de fase entre as correntes dos relés relativos a um eixo de referência comum. Para linhas EAT (Extra Alta Tensão) longas, onde corrente de carga é substancial, os autores afirmam que o método resultará em uma estimação altamente precisa para a localização da falta, visto que os transitórios de alta frequência, originados pela capacitância em paralelo, são eliminados através de filtros adequados.

Uma estimativa precisa da posição da falta é obtida com um ciclo de dados pós-falta, quando a capacitância da linha é desprezada. Levando-se em conta essa capacitância, foi observado que quase dois ciclos de dados pós-falta são necessários para obter a mesma estimativa.

Johns e Jamali (1990) descreveram uma técnica precisa de localização de faltas em linhas de transmissão, a qual envolve monitoramento e filtragem das ondas de tensões e corrente medidas em ambos os terminais da linha, de maneira a produzir uma medida dos fasores de tensão e corrente fundamentais em regime permanente. Eles usaram a Equação (2.14 e 2.15) para uma avaliação exata da distância à falta, calculando-a pela teoria de modos naturais e teoria da função matricial. A expressão final para o cálculo da distância da falta para o modelo em uma única etapa é dada pela Equação (2.13):

$$d = \frac{\operatorname{arctanh}(-B/A)}{\lambda} \quad (2.13)$$

Onde:

$$A = I_R \cosh(\lambda L) Z_0 - V_R \sinh(\lambda L) + Z_0 I_S \quad (2.14)$$

$$B = V_R \cosh(\lambda L) - Z_O V_R \sinh(\lambda L) + V_S \quad (2.15)$$

A localização da falta independe da resistência de falta e não exige qualquer conhecimento da impedância da fonte. O método mantém um alto grau de precisão para linhas não transpostas e nenhuma identificação do tipo de falta é exigida. Em todos os casos testados, o erro produzido pelo algoritmo foi satisfatório (JOHNS; JAMALI, 1990).

Kalam e Johns (1991) descreveram um novo método de localização de faltas para linhas de transmissão com três terminais, fundamentado nas idéias de Johns e Jamali (1990). Entretanto, a aplicação é estendida a dados de tensão e corrente medidos nos três terminais, os quais são filtrados de maneira a produzir uma medida dos fasores fundamentais em regime permanente. O algoritmo é independente da resistência de falta e não exige qualquer conhecimento da impedância da fonte e do tipo de falta. O algoritmo também não requer um pré-conhecimento da seção na qual a falta ocorreu.

Aggarwal et al. (1993) apresentaram um método para computar a localização das faltas nas linhas de transmissão de três terminais, o qual foi desenvolvido especificamente para uma linha de dois terminais. A técnica é baseada na utilização das formas de ondas de tensão e corrente em todos os terminais de uma típica linha de três terminais de EAT, sendo as formas dos fasores de tensão e corrente em regime permanente. Essa técnica faz uso da teoria da superposição e de componentes modais, ao invés de valores totais e valores de fase para calcular a distância da falta. Alguns artifícios são também desenvolvidos para efetivamente sincronizar os dados provenientes dos três terminais e identificar exatamente o ramo faltoso, ambos os requisitos necessários para se obter um alto grau de exatidão. A técnica é também virtualmente independente da resistência de falta e insensível a variações na impedância da fonte, configuração da linha, incluindo uma linha não transposta. O método em questão apresenta uma boa precisão para as condições analisadas.

Novosel et al. (1995) desenvolveram um método baseado no equacionamento com matrizes trifásicas da linha. Por ser um método off-line, não requer sincronização dos dados nos terminais, de forma a permitir a comunicação desses dados por um canal de comunicação simples, permitindo até mesmo a utilização de modem.

Gong et al. (2000) apresentaram um algoritmo de localização de faltas que faz uso de sinais de tensão e corrente proveniente de dois ou três terminais. O algoritmo utiliza um modelo matemático expresso por equações diferenciais, onde o efeito da resistência de falta é eliminado completamente. Os autores propõem o uso de GPS (Sistema de Posicionamento

Global) para uma ideal sincronização dos dados e o uso de modem e linha telefônica para transferência dos mesmos.

Sollero et al. (2001) descreveram um novo método de localização de faltas em linhas de transmissão a ser incorporado ao Sistema Integrado de Apoio à Análise de Perturbações (SINAPE – CEPEL). Este método faz uso dos fasores de tensão e corrente de falta de ambas as extremidades da linha, obtidos pelo processamento, via SINAPE, das amostras armazenadas por oscilógrafos digitais. O SINAPE é uma ferramenta que integra uma ampla variedade de funções para análise de eventos oscilográficos. Para utilização do novo algoritmo proposto no SINAPE é necessária uma estrutura de comunicação para transferência dos dados. Os resultados indicam que o módulo de localização de falta apresentado resolve, simultaneamente, vários problemas não triviais para se estabelecer o ponto de ocorrência de falta, além de apresentar resultados mais consistentes e precisos.

## **2.2 Métodos baseados nos componentes de alta frequência gerados por uma falta**

Os algoritmos baseados nas componentes de alta frequência dos sinais transitórios gerados por uma situação de falta são fundamentais nas teorias de ondas viajantes em um sistema de transmissão. Estes algoritmos baseiam-se geralmente na determinação do tempo de viagem da onda do ponto de falta ao terminal de monitoramento e na velocidade de propagação da onda viajante na linha em questão, para estimar, o mais precisamente quanto possível, o ponto de ocorrência de uma falta.

Os algoritmos fundamentais na teoria de ondas viajantes podem ser classificados em duas categorias quanto à aquisição de dados: em um ou múltiplos terminais. A seguir são apresentados alguns trabalhos referentes a esses métodos (BEWLEY, 1963).

### **2.2.1 Algoritmos que utilizam dados somente do terminal local da linha**

Gale et al. (1993) descreveram diversos e distintos tipos de equipamentos que foram desenvolvidos na década de 50, para localização de faltas em linhas de transmissão, baseados em ondas viajantes. Esses tipos foram classificados de acordo com o seu modo de operação em A, B, C e D. Apesar da eficácia apresentada pelos resultados obtidos por essas técnicas serem encorajadoras, o custo de instalação, operação e manutenção era alto e suas aplicações foram limitadas. Todavia, em meados dos anos 60, diversas linhas de 275 a 400 kV do Reino Unido foram equipadas com o localizador tipo C, que ainda pode ser encontrado comercialmente nos dias de hoje.

Os localizadores do tipo A e D não incluem circuitos geradores de pulso. Utilizam os transitórios de ondas viajantes produzidos pela falta para poder determinar a localização da falta. Os tipos B e C necessitam de um circuito gerador de pulso para efetuar a localização.

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

Localizador de falta tipo D: utiliza dados dos dois terminais e detecta o tempo de chegada da primeira onda viajante gerada por uma falta para o cálculo da distância dos mesmos. Esse método necessita de sincronização dos dados.

Localizador de faltas tipo B: estes utilizam dados provenientes de ambos os terminais e, o envio de um sinal de sincronização no tempo aos detectores de onda em cada terminal da linha. Há três variações do tipo B, sendo elas:

Tipo B1: utiliza um pulso de rádio enviado por um canal de microondas;

Tipo B2: faz uso de um sistema carrier de linha de potência;

Tipo B3: usa a injeção de um pulso CC sobre a linha;

Os três tipos detectam a chegada dos transitórios em seus terminais. Quando a onda inicial atinge o terminal mais próximo, esta dispara um contador eletrônico que será passado por um sinal enviado pelo terminal remoto, assim que o transitório inicial da falta alcançá-lo. Conhecendo-se o tempo de propagação para todo o comprimento da linha e o valor contado, determina-se a distância como tipo D.

Localizador tipo C: utiliza dados de um terminal e opera usando o princípio do radar. Um pulso é aplicado na linha e o tempo de viagem ao ponto de falta e deste ao terminal local é determinada e usada para calcular a distância de ocorrência.

Os autores apresentaram também resultados alcançados por um localizador de faltas baseado nos modos de operação do tipo A, D e B3, implementados utilizando-se da tecnologia atual (microprocessadores, GPS, etc). Os autores concluem que idéias antigas de localização de faltas podem ser implementadas hoje em dia, com menores custos e resultados promissores.

Vittins (1978) apresentou um método de proteção de distância para linhas de transmissão baseado nas equações de onda da linha. Neste método, a localização da falta é considerada como um problema de determinação do tempo de viagem das ondas entre o terminal local e o ponto de falta. O tempo de viagem é extraído das formas de ondas fundamentais de tensão e correntes na presença de transitórios superpostos, por meio de uma técnica de correlação. O método foi testado por simulações numéricas e dados experimentais, apresentando resultados satisfatórios.

Crossely e Maclaren (1983) elaboraram uma técnica para uma rápida medida da distância da falta usando o princípio das ondas viajantes. A localização da falta é determinada pelo intervalo de tempo entre a primeira onda que atinge o relé e a correspondente onda refletida do ponto de falta que chega ao relé. A onda refletida é reconhecida através da correlação cruzada do sinal refletido contra o sinal armazenado. A máxima saída de função de correlação cruzada ocorre quando o atraso da seção do sinal inicial corresponde a duas vezes a distância para a falta. A precisão da localização da falta depende do local da falta, do tipo de falta e do ângulo de incidência.

Ancell e Pahalawaththa (1994) descreveram uma aplicação para o problema da localização de faltas baseada na estimação da máxima verossimilhança dos tempos de chegada das ondas refletidas. O método da máxima verossimilhança, na maioria dos testes realizados, apresentou resultados menores que dos métodos de correlação convencional. Para ângulos de incidência de falta próximos a zero, nenhum dos esquemas apresenta bons resultados.

Bo e Johns (1997) descreveram uma nova técnica para uma precisa localização de faltas. Um equipamento projetado especialmente para o registro de transitórios de falta é usado para extrair os sinais de tensão transitórios gerados por uma falta em um sistema de

transmissão ou distribuição. O tempo de viagem dos sinais de alta frequência foi usado para determinar a localização da falta. O algoritmo é insensível ao tipo de falta, resistência de falta e ângulo de incidência de falta e as configurações da fonte. A precisão da localização é proporcional à taxa de amostragem.

Magnago e Abur (1998) descreveram o uso da Transformada Wavelet na análise de transitórios de faltas em sistemas elétricos de potência, a fim de determinar a localização da falta. Usando a teoria das ondas viajantes, os sinais registrados são principalmente decompostos em seus componentes modais, que por sua vez, são transformados do domínio do tempo para o domínio tempo-frequência através da Transformada Wavelet. Esta informação relata o tempo de viagem dos sinais transitórios para localizar a falta. Os coeficientes wavelets nas duas menores escalas (detalhes um e dois) dos sinais do modo aéreo 1 e do modo terra são usados pelo algoritmo. Os coeficientes wavelets do modo aéreo 1 são utilizados para o cálculo da distância da falta, enquanto os do modo terra em ambas as escalas são utilizados para determinar a presença de conexão à terra e a metade da linha em que uma falta aterrada se encontra. O método proposto é independente da resistência de falta e mostrou-se também adequada para aplicação em linhas com compensação série. Pode também ser usado tanto para dados de um terminal ou de dois terminais. A precisão do algoritmo é proporcional à taxa de amostragem para o registro dos sinais transitórios de falta (MAGNAGO; ABUR, 1998).

Liang, Elangovan e Devotta (2000) apresentaram uma técnica para localização de faltas em linhas de transmissão com três terminais usando a transformada Wavelet e Redes Neurais. As formas de ondas das tensões e correntes são decompostas em 6 níveis utilizando a Transformada Wavelet. O padrão de treinamento rede Radial Basis Function (RBF) usa três tipos de informações estatísticas de todos os seis detalhes wavelets e para todas as formas de ondas de corrente e tensão, perfazendo uma rede com 108 entradas. Na análise Wavelet são usadas duas Wavelets-mãe diferentes (bior4.4 e coif4), constituindo assim dois padrões de treinamentos diferentes. Nos testes foi apresentada apenas falta monofásica (A-terra) com baixa resistência de falta. Os melhores resultados foram utilizados quando utilizados a wavelet mãe coif4.

Chen et al. (2000) tomaram por base o método proposto em Liang, Elangovan e Devotta (2000), aliando este ao uso da Transformada Wavelet, usada para decompor os sinais transitórios de falta e desta maneira revelar o tempo de viagem destes sinais, necessário para

localizar a falta em cabos de distribuição. O método proposto é insensível ao tipo de falta, resistência de falta, ângulo de incidência de falta e configuração das fontes do sistema.

Magnago e Abur (2000) apresentaram um aperfeiçoamento do método de localização de faltas baseado na teoria das ondas viajantes e uso da Transformada Wavelet. O novo método requer o registro dos transitórios de falta em apenas um terminal da linha de transmissão. Os sinais são desacoplados em seus componentes modais e então transformados no domínio tempo-frequência usando a Transformada Wavelet, fornecendo o tempo entre as reflexões de onda para a estimação da distância da falta. O novo método faz uso da diferença entre os tempos dos modos terra e aéreo para determinar a localização de faltas na primeira e segunda metade da linha de transmissão. São apresentados dois algoritmos diferentes para linhas com e sem acoplamento mútuo. Neste método, a precisão da localização da falta não é afetada pela impedância da falta, acoplamento mútuo, compensação série e transitórios produzidos por eventos que não caracterizam uma falta.

### **2.2.2 Algoritmos que utilizam dados de múltiplos terminais da linha**

A técnica proposta por Ibe e Cory (1986) para linhas de dois terminais, baseada nos princípios das ondas viajantes, também é empregada para determinar a localização de faltas em linhas de três terminais. Para linhas de dois terminais, dados amostrados somente no terminal local são suficientes para localizar a falta. No entanto, para as linhas de três terminais, um registro adicional em qualquer um dos terminais remotos pode ser necessário para confirmar o ramo faltoso. Uma localização precisa entre 0,07 e 3,2% é encontrada para um sistema de 33 kV.

Em Galé et al. (1993) também foram apresentadas duas técnicas de localização por ondas viajantes, que fazem uso de dois terminais. Essas técnicas são classificadas de acordo com o seu modo de operação em tipos D e B, os quais foram detalhados anteriormente.

Lee e Mousa (1996) descreveram a aplicação e operação prática de um novo sistema de localização de faltas baseado em ondas viajantes utilizado no sistema de 500 kV da British Columbia Hydro (Burnaby, British Columbia, Canadá). Este sistema mede o tempo de chegada da onda viajante gerada por uma falta nos dois terminais do sistema sincronizados por meio de GPS. A experiência com este localizador de faltas, tanto em caso de faltas

permanentes como em descargas atmosféricas, indica uma alta precisão na maioria dos casos. Somente em alguns casos devido a descargas atmosféricas, o sistema apresentou anomalia.

O método descrito por Magnago e Abur (1998), apresentado anteriormente pode ser utilizado com dados de dois terminais. Neste caso, o algoritmo baseado em ondas viajantes e uso da Transformada Wavelet é mais simples, porém necessita de um meio de comunicação entre os terminais e sincronização dos dados obtidos, sendo neste caso indicado, o uso de GPS. O método proposto é independente da falta, do tipo de falta e da posição da falta.

Lai et al. (2000) descreveram uma técnica para localizarem faltas em linhas de transmissão com três terminais usando a Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais. Todas as formas de ondas das tensões e correntes são decompostos em seis níveis de resolução utilizando Wavelets. Para o treinamento da rede neural utilizaram dados de seis níveis das Wavelets, constituindo assim os padrões de treinamento.

Chanda, Kishore e Sinhá (2003) propuseram um método de localização baseado na análise multiresolução wavelet combinada com uma técnica de interpolação cúbica. Este método utiliza sinais de correntes obtidos em ambos os terminais da linha. Os resultados obtidos por meio de extensivas simulações demonstram que o método proposto apresenta uma elevada precisão.

Mais recentemente Sousa (2005) descreveu um método de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando codificação eficiente, para localizarem faltas monofásicas em uma linha de transmissão, a partir de diferentes ângulos de incidência e sujeitas a distúrbios não-correlacionados com o sinal desejado.

É importante ressaltar que, estudos aliando a teoria de ondas viajantes e wavelets, também são encontrados em outras sub-áreas da proteção de sistemas elétricos, como por exemplo, para as situações de detecção e classificação de faltas em algoritmos de proteção de distância.

## 3 Ondas Viajantes – Fundamentação Teórica

---

### 3.1 Ondas Viajantes em Sistemas de Transmissão

Quando falamos em ondas viajantes, estamos nos referindo à propagação da energia sobre um sistema, em nosso caso, a propagação da energia elétrica sobre uma linha de transmissão. Se uma variação qualquer de corrente ou de tensão ocorre em um terminal de uma linha de transmissão, o outro terminal só irá sentir tal variação quando a onda referente ao sinal elétrico percorrer todo o comprimento da linha. Portanto, o terminal remoto da linha de transmissão, não pode influenciar nas decisões sobre o sistema, até que a onda tenha viajado da fonte do terminal local ao terminal remoto, onde, através da interação deste com a linha de transmissão, seja produzida uma resposta que viaja de volta para a fonte local. Desta maneira, os sinais elétricos tendem a se propagar para frente e para trás, como ondas viajantes, normalmente dissipando energia com perdas no material (HEDMAN, 1983).

Do exposto acima, temos que qualquer distúrbio em uma linha de transmissão (tal como os provocados por descargas atmosféricas, curtos-circuitos, ou uma alteração da condição de regime permanente) dá origem a ondas viajantes. Estas por sua vez deslocam-se no sentido das extremidades da linha de acordo com a velocidade de propagação da linha, onde encontram descontinuidades físicas do sistema que provocam a sua reflexão ou refração, dependendo das características dessas descontinuidades. Estes sucessivos processos continuam até que as ondas sejam extintas devido as atenuações causadas por perdas na linha, alcançando o regime permanente do distúrbio.

Salienta-se que o objetivo deste trabalho é apenas de apresentar de forma simples clara e objetiva a teoria fundamental sobre ondas viajantes. Para informações mais detalhadas sobre o assunto, recomendam-se as seguintes bibliografias: Bewley (1963), Greenwood (1971), Hedman (1983) e Naidu (1985).

### 3.2 Reflexões Sucessivas e Diagrama Lattice

Em muitos problemas (tais como os referentes aos cabos guarda, o efeito de cabos com pouca extensão, processo de carga e descarga em linhas e de redes extensas com muitas conexões e uma variedade de terminações) é necessário considerar as reflexões sucessivas das ondas viajantes. Para simplificar o que seria um problema complexo, (BEWLEY, 1963) optou por utilizar uma técnica gráfica, de suma importância na análise de problemas relacionados a ondas viajantes em linhas de transmissão, denominada diagrama Lattice ou diagrama espaço-tempo. Tal diagrama mostra a posição e direção de cada onda viajante (incidente, refletida e refratada) em cada instante de tempo. Além disso, o diagrama Lattice facilita o cálculo da forma de todas as ondas refletidas e refratadas. O diagrama de Lattice também mostra uma visão ampla do histórico de cada onda. Conhecendo-se as funções de atenuação e distorção, tais efeitos podem ser incluídos no diagrama (NAIDU, 1985).

A finalidade do diagrama Lattice é propiciar um meio gráfico simples que denote as relações tempo-espaço dos sinais em análise de redes de transmissão com múltiplas descontinuidades. Por exemplo, no cálculo de surtos de descargas atmosféricas em linhas de transmissão com muitos pontos de aterramentos, torna-se difícil o conhecimento de todas as ondas refletidas e refratadas ao longo da linha, especialmente após um intervalo de tempo relativamente longo. Isto é devido ao fato de que, à medida que cada onda atinge uma descontinuidade, uma nova onda refletida e refratada é geralmente naquele ponto. A Figura 3.1 ilustra um diagrama Lattice onde temos três junções de linhas com diferentes comprimentos.

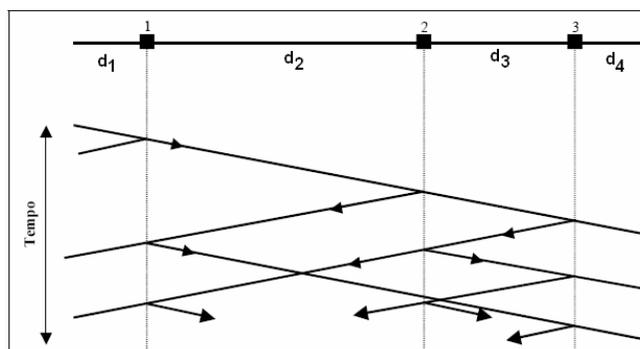


Figura 3.1 – Diagrama de Lattice representando as sucessivas reflexões de um sinal qualquer

Quando temos linhas em conexão a pequenos trechos de cabos, como por exemplo, na entrada de subestações, a influência destes deve ser considerada. Geralmente, um cabo tem

uma impedância de surto de aproximadamente um décimo da impedância de surto de uma linha aérea e a velocidade de viagem é aproximadamente metade da velocidade de propagação da onda em uma linha (NAIDU, 1985). Para simplificar o diagrama Lattice, emprega-se uma escala de distância diferente em cada seção, uma para a linha e outra para cabo.

### 3.3 Atenuação e Distorção das Ondas Viajantes

As ondas viajantes em uma linha de transmissão são passíveis de sofrerem três diferentes alterações: (i) o valor de crista da onda decresce em amplitude, ou seja, é atenuado; (ii) as ondas mudam de forma, tornam-se mais alongadas, suas irregularidades são alisadas, e sua inclinação é reduzida; (iii) os términos das ondas de tensão e corrente tornam-se similares. Estas duas últimas mudanças ocorrem juntas e são chamadas de distorções. As distorções e atenuações das ondas ao longo da linha são causadas por perdas de energia, e estas são ligadas à resistência da linha, ao efeito skin (pelicular), à dispersão sobre isoladores, às perdas dielétricas, e principalmente ao efeito corona (BEWLEY, 1963).

### 3.4 Transformação modal

Em linhas de transmissão trifásicas, as fases são mutuamente acopladas e, por conseguinte, as perturbações de alta frequência geradas durante uma falta podem também aparecer nas fases não faltosas. Por tanto, para implementar o método das ondas viajantes em sistemas trifásicos, os sinais no domínio do tempo são primeiramente decompostos em seus componentes modais.

A transformação modal permite que o sistema trifásico seja tratado como um sistema com três circuitos monofásicos independentes. Os valores de fase são transformados em três modos desacoplados: um modo terra (modo 0) e dois modos aéreos (modo  $\alpha$  e modo  $\beta$ ), também conhecido como modo aéreo 1 e modo aéreo 2. O modo zero apresenta impedância característica e velocidade de propagação distinta em relação aos modos aéreos.

Uma vez que, na modelagem do sistema, as linhas de transmissão são totalmente transpostas, podem ser utilizadas as bem conhecidas transformações modais de Clarke ou de Wedepohl.

Neste trabalho foi utilizada a matriz de transformação de Clarke (1943) dada por,

$$T = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{vmatrix} \quad (3.1)$$

Os sinais de fase (tensão e/ ou corrente) são transformados em seus componentes modais pelo uso da matriz de transformação como segue:

$$\begin{vmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{vmatrix} = T \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

Onde  $V_{0,\alpha,\beta}$  são os vetores modais de tensão e  $V_{a,b,c}$  são os vetores de fase da tensão.

A velocidade de propagação do modo terra ( $v_0$ ) e do modo aéreo 1 ( $v_1$ ) são dadas respectivamente por:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (3.3)$$

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3.4)$$

Onde  $L_0, C_0, L_1, C_1$  são as indutâncias e capacitâncias de seqüência zero e positiva das linhas de transmissão.

Neste trabalho a transformação modal é utilizada para desacoplar o sinal trifásico de tensão, sendo que a velocidade de propagação do modo aéreo 1 e modo aéreo 0 respectivamente são  $2,9316 \times 10^5$  km/s e  $2,228 \times 10^5$  km/s. Como os sinais do modo 1 estão presentes em todos os tipos de falta, este será essencialmente utilizado para a determinação dos tempos de viagem dos sinais e conseqüentemente para o cálculo da distância da falta. Sendo que para cada tipo de falta temos uma matriz de transformação modal conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de transformação modal pra cada tipo de falta

Tipo de falta	Matriz de Transformação modal, com relação a fase:
Falta monofásica-AT	A
Falta bifásica - AB	A
Falta bifásica - BC	B
Falta bifásica - AC	C
Falta bifásica-terra-ABT	A
Falta bifásica-terra-BCT	B
Falta bifásica-terra-ACT	C
Falta trifásica-ABC	A

Uma vez separados, utiliza-se a velocidade do modo aéreo para o cálculo da distância da falta. Esses modos de propagação têm diferentes velocidades e atenuações e conseqüentemente conduzem a efeitos de dispersão sobre frentes de ondas descritas pelas componentes de fase. Para sistemas com linhas transpostas, os dois modos aéreos têm a mesma velocidade de propagação.

### 3.5 Princípio básico do método de localização das faltas

A teoria das ondas viajantes mostra que a ocorrência de uma falta produz ondas de tensão que se propagam a partir do ponto de defeito nos dois sentidos da linha. Ao encontrar uma descontinuidade, essas ondas refletem-se e retornam ao ponto de defeito, onde haverá novas reflexões. Uma maneira prática de abordar o problema é através do diagrama de Lattice, como mostrado na Figura 3.2.

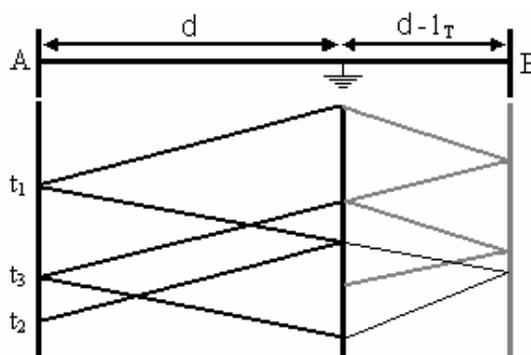


Figura 3.2 – Diagrama de Lattice

À distância  $d$  de uma falta pode ser calculada, a partir de um terminal A, chamado de referência ou ponto de medição, pela Equação (3.5).

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

Em que  $v$  é a velocidade de propagação das ondas a qual é função dos parâmetros da linha de transmissão,  $t_1$  o tempo de propagação da primeira frente de onda originada no ponto de falta até o terminal A;  $t_2$  é o tempo de propagação, considerando-se o tempo de retorno dessa primeira onda até o ponto de falta e desse ponto novamente ao terminal A.

A Equação (3.5) é usada para faltas não aterradas como, por exemplo, faltas bifásicas e trifásicas, pois nesse caso, as ondas refratadas no ponto de defeito, provenientes do terminal remoto, podem ser desprezadas. Sabe-se que por causa do acoplamento mútuo nas linhas de transmissão, existirão diferentes modos de propagação das ondas.

No caso das faltas aterradas como, por exemplo, bifásica-terra e monofásica, as ondas refletidas no terminal remoto e refratadas no ponto de falta não podem ser mais desprezadas e duas diferentes condições devem ser consideradas:

1- Faltas na primeira metade da linha: a distância  $d$  pode ser calculada pela Equação (3.5), após a obtenção do intervalo de tempo entre duas primeiras ondas que chegam ao terminal de medição.

2- Faltas na segunda metade da linha: nestes casos, a primeira onda refletida no terminal remoto e refratada no ponto de falta chegará antes da segunda onda direta refletida no ponto de falta, como mostrado no diagrama de Lattice da Figura (3.2). Sendo assim a distância  $d$  pode ser calculada pela Equação (3.6).

$$d = l_T - \frac{v(t_2 - t_3)}{2} \quad (3.6)$$

Sendo  $l_T$  o comprimento da linha de transmissão. A metade faltosa da linha pode ser determinada a partir de medições e comparações dos intervalos de tempos das duas primeiras frentes de ondas que chegam à barra de medição A e na barra remota B.

### 3.6 Método de Localização de faltas proposto

A Figura 3.3 ilustra o diagrama de blocos do procedimento proposto na implementação da técnica de análise de componentes independentes na localização de faltas. A fase 1 representa a extração das funções bases ou padrões dos sinais originais de faltas

monofásica, bifásica-terra, bifásica e trifásicas, considerando diferentes distâncias ao longo da linha de transmissão, considerando diferentes ângulos de incidência e perturbações. A Fase 2 representa a recuperação do sinal original de falta, a partir do uso de um sistema adaptativo baseado no gradiente estocástico e no subespaço dos sinais de falta gerados pelas funções bases. A Fase 3 representa a localização da distância da falta, através da análise das ondas viajantes recuperadas ou sinais transitórios de alta frequência.

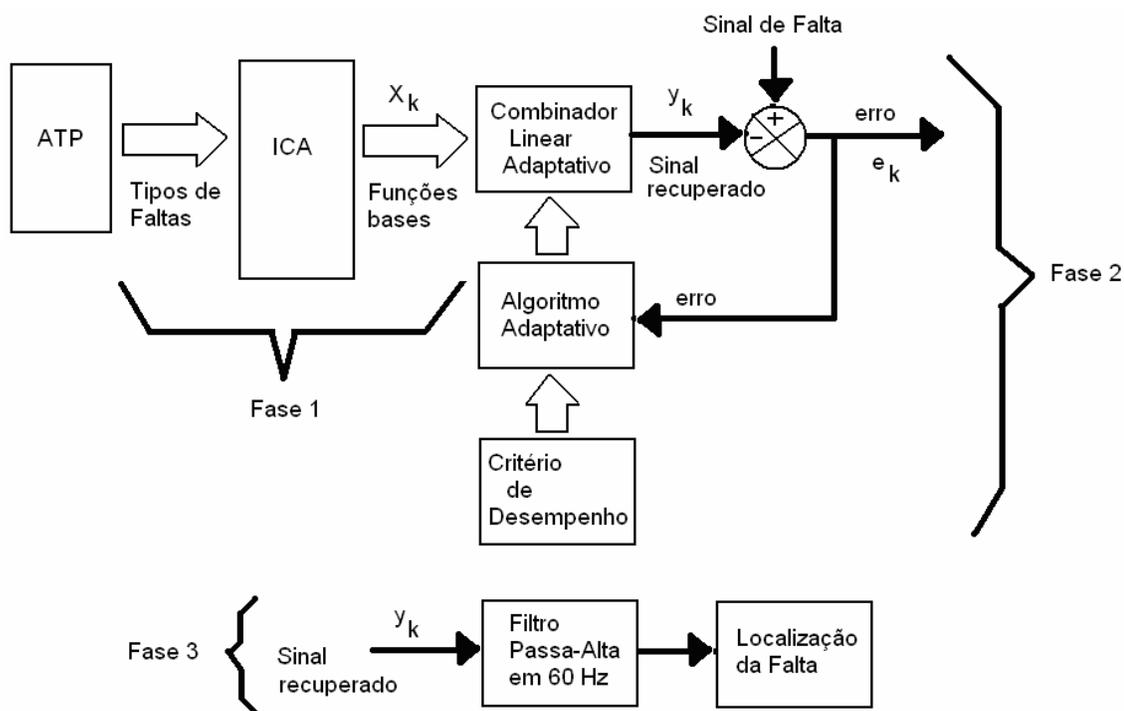


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do sistema proposto na implementação da técnica de ICA para encontrar a localização da falta

### 3.7 Conclusão

Este capítulo apresentou o princípio de localização de faltas, a partir da técnica das ondas viajantes ou sinais transitórios de alta frequência gerados no momento da ocorrência de uma falta, bem como o diagrama de blocos da técnica de análise de componentes independentes usando o software Matlab, a qual terá a fundamentação teórica de suas fases comentadas nos próximos capítulos.

## 4 Análise de Componentes Independentes – Fundamentação Teórica

---

### 4.1 Objetivo

Este capítulo tem por objetivo mostrar um histórico e definição da Análise de Componentes Independentes (Independent Component Analysis - ICA) e um resumo dos princípios de estimação do modelo ICA, o qual é usado na primeira fase do algoritmo implementado, para extração das funções bases dos sinais originais de faltas monofásicas, bifásicas, bifásica-terra e trifásicas.

### 4.2 Histórico

A análise de componentes independentes (ICA) foi introduzida internacionalmente na década de 80 por Héroult, Jutten, e Ans, através de apresentações nas conferências internacionais de redes neurais (ANS; HÉRAULT, JUTTEN, 1985; HERAULT; JUTTEN; ANS, 1985). Estas pesquisas tinham como base um modelo recorrente de rede neural e um algoritmo de aprendizagem baseado numa versão da regra de aprendizagem de Hebb. Esta foi uma das primeiras metodologias que surgiram na tentativa de separar misturas de sinais estatisticamente independentes.

Estes autores também demonstraram por esta abordagem que a separação de dois sinais misturados é possível e mencionaram a possibilidade de separação de sinais visuais com quatro misturas. Estas pesquisas abriram um capítulo notável na história de processamento de sinais, que tem cerca de 20 anos de idade.

O problema de separação cega de fontes é bastante conhecido. Existem muitos algoritmos cuja eficácia depende da natureza dos sinais misturados. O problema da separação cega de fontes é muito difícil, visto que, sem conhecimento dos sinais que foram misturados, não é possível projetar o pré-processamento apropriado para fazer a separação ótima dos mesmos.

Nas pesquisas feitas por Héroult, Jutten e Ans, a suposição básica era a independência estatística dos sinais, mas não foi feita nenhuma restrição adicional sobre a distribuição probabilística das fontes. Se for feita uma suposição cotidiana, como feito freqüentemente, os sinais serão gaussianos. Então este problema não terá solução geral.

Uma pesquisa subsequente mostrou que o melhor desempenho foi obtido pela rede de Héroult-Jutten quando os sinais da fonte eram sub-gaussianos (JUTTEN; HERAULT, 1991). Isto é, para os sinais cuja curtose era menor do que aquela de uma distribuição gaussiana.

No campo de redes neurais, este modelo de rede foi substituído naquele tempo pela popular rede de Hopfield, que seria logo também substituída pelo algoritmo *backpropagation* para *perceptrons* de multicamadas. Sem dúvida, à medida que as pesquisas foram iniciadas, a verdadeira natureza do problema ficou mais clara.

Freqüentemente, o que é importante não são os algoritmos específicos, mas a maneira como o problema é formulado. A estrutura geral para a análise de componentes independentes que foi introduzida por Héroult e Jutten é indicada mais claramente dentro do trabalho de Comon (1994).

A implementação de algoritmos mais sofisticados foi sendo desenvolvida gradualmente pela comunidade de processamento de sinais. Tais algoritmos generalizavam a não-linearidade de terceira ordem (BELL; SEJNOWSKI; 1995, CARDOSO, 1997), inicialmente proposta por Héroult, Jutten e Ans.

Em torno de 1994, o campo de batalha das redes neurais tinha se movido dos algoritmos de aprendizagem supervisionados para os não-supervisionados. Um algoritmo rápido e eficiente de ICA era necessário e este deveria resolver os problemas em escalas maiores como o algoritmo *backpropagation*, que neste tempo era usado em redes com vários pesos.

Bell e Sejnowski (1995) começaram a trabalhar em uma aproximação do algoritmo *Infomax*, dando assim os primeiros passos de ICA. Sejnowski em sua versão de algoritmo, utilizou a inversão da matriz e também colaborou à distância com Tee Won Lee, na separação cega de fontes de misturas acústicas gravadas levando em consideração o atraso (LEE; BELL, 1997).

Em 1997, Amari, Cichoki e Yang cogitaram que o algoritmo do *Infomax ICA* poderia ser melhorado usando o gradiente natural, aumentando a velocidade de convergência e posteriormente eliminando o problema da inversão de matriz. Esta melhoria, que foi

descoberta independentemente também por Cardoso em 1997, permitindo que o *Infomax ICA* seja mais rápido assim, tornando-o um algoritmo prático para uma variedade de problemas no mundo real.

Entretanto, o algoritmo original do *Infomax ICA* é somente apropriado para fontes supergaussianas. Então, Lee, Girolami e Sejnowski (1999) atentaram para este detalhe e procuram uma chave para generalizar o algoritmo *Infomax* também para fontes não-gaussianas arbitrárias. Para tal, devia estimar os momentos dos sinais da fonte e trabalhar apropriadamente os sinais no algoritmo. Na colaboração de Girolami que trabalhou em algoritmos similares no contexto, logo desenvolveu uma eficiente versão estendida do algoritmo do *Infomax ICA* que é apropriada para sinais não-gaussianos gerais.

Diversas aproximações diferentes foram feitas em relação à análise de separação cega de fontes. Estas incluem métodos da probabilidade máxima, os métodos de Busgang com ênfase em cumulantes, o método de procura da projeção e métodos de negentropia (entropia negativa). Todos eles são relacionados com a estrutura do *Infomax* (LEE, 1998). Assim, um grande número de pesquisadores que estudaram ICA de uma variedade de abordagens tão diferentes está convergindo a um princípio comum e, finalmente, uma classe bem compreendida de algoritmos.

Embora a separação cega das misturas de sinais seja um *benchmark* útil, um problema mais apropriado à aplicação de ICA é a gravação dos sinais do mundo real em que as fontes próximas aos sinais emanados do coração, do piscar de olhos. É um desafio difícil eliminar estes artefatos sem alterar os sinais originais oriundos do cérebro. ICA é uma alternativa para esta tarefa (LEE, 1998). O algoritmo estendido do *Infomax ICA* provou ser um método para separar tais artefatos, que incluem fontes sub-gaussianas, tais como o ruído de linha de 60 Hz e os sinais dos músculos (LEE; GIROLAMI; SEJNOWSKI, 1999). Estes são geralmente supergaussianos. Este algoritmo tem várias aplicações biomédicas, incluindo a análise de grande volume de dados, como as experiências de ressonância magnética funcional (FMRI) (MCKEOWN et al., 1998).

Diferentes das transformações de correlação, tais como a *Análise de Componentes Principais (PCA)*, ICA não somente descorrelaciona os sinais (estatística de segunda ordem), mas também reduz as dependências estatísticas de altas ordens, tentando fazer com que os sinais sejam tão independentes quanto possíveis (HYVARINEN, 1999). Ou seja, ICA é uma maneira de encontrar um sistema de coordenadas lineares e não necessariamente ortogonais em todos os dados envolvidos. Os sentidos dos eixos deste sistema são determinados pela

estatística de segunda ordem e também as de ordem mais elevada. ICA tem como objetivo executar uma transformação linear que faça as variáveis resultantes o mais estaticamente independentes das outras quanto possível.

Algoritmos de ICA também podem ser aplicados a muitos problemas em que as misturas não são ortogonais, nem gaussianas os sinais da fonte. A maioria das informações tem estas características. Existem também muitos problemas teóricos que podem ser resolvidos aplicando-se ICA e há várias aplicações novas, tais como as extrações de padrões e também conforme o presente trabalho.

Os atuais algoritmos de ICA podem ser divididos em duas categorias. Os algoritmos da primeira categoria baseiam-se em computação “*batch*” minimizando ou maximizando alguns relevantes critérios de funções (CARDOSO, 1990; COMON, 1994). Os problemas com estes algoritmos requerem operações matriciais complexas. A segunda categoria inclui algoritmos adaptativos freqüentemente baseados no método do gradiente estocástico, o qual pode ter implementação em redes neurais (AMARI; CICHORI; YANG, 1997). Os principais problemas com esta categoria são a lenta convergência, e o fato de a convergência depender crucialmente da correta escolha da taxa de aprendizagem.

A transformação tem que ser ortogonal, para manter a condição de não-correlação obtida após o branqueamento. Hyvarinem e Oja desenvolveram em 1999 o algoritmo *FastICA* para ICA. O referido algoritmo pode ser usado para a separação cega de fontes e extração de características, e mostraram que as regras de aprendizagem neurais podem ser transformadas em um ponto fixo de interação, proporcionando um algoritmo simples, que não depende de nenhum parâmetro usualmente definido, e é rápido para convergir a solução.

O algoritmo *FastICA* encontra as componentes independentes não-gaussianas, sem se importar com sua probabilidade de distribuição. O cálculo pode ser realizado em modo *batch* ou semi-adaptativo. A velocidade de convergência desse algoritmo é cúbica. Cardoso, em 1999, fez uma análise de métodos algébricos baseados em *cumulantes*, mostrando que as correlações de alta ordem podem ser eficientemente exploradas para encontrar componentes independentes. Este algoritmo é chamado de Algoritmo de Jacobi, devido ao fato de se procurar maximizar as medidas de independência através do método da diagonalização de Jacobi. A vantagem em relação a outros algoritmos é que se pode modificar os parâmetros de treinamento em passos grandes sem haver problemas de convergência.

Quando comparado com outros métodos baseados em gradientes este método não possui parâmetros a serem sintonizados na implementação básica e não são necessários algoritmos complexos de aprendizagem. Em 2001, foi proposto por Barros e Cichocki o algoritmo “*Robust ICA*”, para ser aplicado em casos onde os sinais observados aparecem contaminados por ruídos como em eletroencefalograma (EEG/MEG), por exemplo.

Este método, ao contrário dos outros algoritmos, permite trabalhar apenas com estatística de segunda ordem e também a separação de sinais com baixa medida de *kurtose*, ou seja, sub-gaussianos (BARROS; CICHOCKI, 2001). A abordagem é de desenvolver um algoritmo que permite extrair as fontes potencialmente interessantes. A proposta do “*Robust ICA*” é a de extrair as fontes sequencialmente, uma de cada vez, para cada etapa de execução do algoritmo um sinal é extraído e excluído da mistura. Assim na próxima etapa um outro sinal será obtido.

### 4.3 Separação cega de fontes - BSS

Separação cega de fontes (Blind source Separation – BSS) consiste na recuperação de sinais não-observados, ou fontes, de misturas com outros sinais. Imagine uma sala em que duas pessoas estão conversando simultaneamente, onde existem dois microfones em diferentes localizações. Os microfones gravam dois sinais, os quais podem ser denotados por  $\mathbf{x}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{x}_2(\mathbf{t})$ , em que  $t$  é o índice de tempo. Cada um desses sinais gravados é uma soma ponderada dos sinais de fala emitidos pelos dois locutores, os quais são denotados por  $\mathbf{s}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{s}_2(\mathbf{t})$ . Poderíamos expressar isto pelas seguintes equações lineares:

$$\mathbf{x}_1(\mathbf{t}) = a_{11}\mathbf{s}_1 + a_{12}\mathbf{s}_2 \quad (4.1)$$

$$\mathbf{x}_2(\mathbf{t}) = a_{21}\mathbf{s}_1 + a_{22}\mathbf{s}_2 \quad (4.2)$$

Sendo que  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$  e  $a_{22}$  são os parâmetros que dependem da distância entre os microfones e locutores. Seria muito útil se fosse possível estimar os dois sinais originais da fala  $\mathbf{s}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{s}_2(\mathbf{t})$ , usando somente os sinais gravados  $\mathbf{x}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{x}_2(\mathbf{t})$ . Isto é o famoso problema do “*cocktail-party*”. Se os parâmetros  $a_{ij}$  são conhecidos, as equações lineares poderiam ser resolvidas pelos métodos clássicos de resolução de sistemas lineares, mas se os parâmetros  $a_{ij}$  são desconhecidos, o problema torna-se difícil. Uma forma de resolver este problema consiste em usar alguma informação das propriedades estatísticas do sinal  $\mathbf{s}_i(\mathbf{t})$  para estimar os coeficientes  $a_{ij}$   $i, j = 1, 2$ .

Atualmente, é suficiente assumir que  $\mathbf{s}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{s}_2(\mathbf{t})$  são estatisticamente independentes. Isto não é uma suposição realística na maioria dos casos. Porém, ela não precisa ser verdadeira na prática. As recentes técnicas desenvolvidas de ICA podem ser usadas para estimar os coeficientes  $a_{ij}$  baseados em informações de suas independências, os quais mostram ser capazes de separar as duas fontes originais de sinais  $\mathbf{s}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{s}_2(\mathbf{t})$  a partir de suas misturas  $\mathbf{x}_1(\mathbf{t})$  e  $\mathbf{x}_2(\mathbf{t})$ . ICA foi originalmente desenvolvido para problemas relacionados com o “cocktail-party”. Desde então houve um aumento recente da pesquisa sobre ICA, a qual tem se tornado claramente muito importante em outras aplicações (HYVARINEN, 1999).

O princípio estatístico da separação de fontes consiste em recuperar sinais ou fontes desconhecidas de diversas misturas observadas. Tipicamente, as observações são obtidas na saída de sensores. Cada sensor recebe uma combinação diferente da fonte. O problema da separação de fontes pode ser postulado como: identificar uma matriz de mistura  $\mathbf{A}$  e estimar os sinais de fontes baseados somente nas observações de  $\mathbf{x}$ , supondo a independência estatística das fontes e a independência linear das colunas da matriz  $\mathbf{A}$ .

A falta de conhecimento a priori sobre a mistura é compensada por suposições estatísticas. Frequentemente, é admitida a independência entre os sinais da fonte. O modelo mais simples de BSS supõe a existência de  $n$  sinais independentes  $\mathbf{s} = [s_1(t) \dots s_n(t)]^T$  e a observação das misturas  $\mathbf{x} = [x_1(t) \dots x_n(t)]^T$ , que são lineares e instantâneas e podem ser representadas de forma compacta pela equação de mistura.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s} \quad (4.3)$$

Sendo  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \dots s_n(t)]^T$  um vetor coluna  $\mathbf{n} \times \mathbf{1}$  que contém os sinais da fonte, o vetor  $\mathbf{x}(t)$  contém similarmente  $n$  sinais observados e a matriz quadrada de mistura  $\mathbf{A}$  de dimensão  $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$  contém os coeficientes de mistura.

O problema de BSS consiste em recuperar o vetor  $\mathbf{s}(t)$ , usando somente o vetor  $\mathbf{x}(t)$  observado e suposições de independência entre as componentes do vetor  $\mathbf{s}(t)$  e possivelmente alguma informação a priori sobre a distribuição de probabilidade das entradas. Este problema pode ser formulado como a computação de uma matriz  $\mathbf{B}$  de dimensão  $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$  que recupera  $\mathbf{s}(t)$  na saída  $\mathbf{y}(t)$ . Isto é uma estimativa do vetor  $\mathbf{s}(t)$  dos sinais originais da fonte e pode ser representado de forma compacta pela Equação (4.4). O referido problema será melhor elaborado na próxima seção.

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{y}(t) = \mathbf{B}\mathbf{x}(t) \quad (4.4)$$

## 4.4 Análise de Componentes Independentes

O objetivo da utilização da técnica de ICA neste trabalho é de encontrar um conjunto de funções bases que possam representar os padrões dos sinais de faltas desejados ou, equivalentemente, um conjunto de funções bases que irá formar um subespaço ou subconjunto dos sinais originais das faltas monofásicas, bifásica, bifásica-terra e trifásicas, no qual poderão ser projetados os sinais desejados ou, em outras palavras, um subespaço vetorial onde se pode exprimir, a partir de uma combinação linear, os sinais desejados para localização da falta.

Neste trabalho, os sinais desejados são os transitórios de tensão ou ondas viajantes geradas na ocorrência da falta. A estimação dos modelos dos dados da ICA é executada geralmente por meio de uma função objetivo (ou de contraste) e algoritmo de otimização, ou seja:

$$\text{ICA} = \text{função objetivo} + \text{algoritmo de otimização}$$

Em que as propriedades estatísticas (por exemplo consistência, robustez e variação assintótica) do método de ICA dependem da escolha da função objetivo e, as propriedades algorítmicas (por exemplo, velocidade, capacidade de memória e estabilidade numérica) dependem do algoritmo de otimização.

A fundamental restrição do modelo é que pode-se somente estimar componentes independentes não-gaussianas (com exceção de somente uma das componentes independentes é gaussiana). Além disso, nem as energias nem os sinais das componentes independentes podem ser estimados, porque nenhuma constante multiplicando uma componente independente na Equação (4.3) pode ser cancelada por dividir a correspondente coluna da matriz de mistura  $\mathbf{A}$  pela mesma constante. Por conveniência matemática, define-se aqui que a componente independente  $s_i$  tem variância unitária. Isto faz as componentes independentes não-gaussianas únicas, até seus sinais. Nenhuma ordem é definida entre as componentes independentes.

O problema de estimar a matriz  $\mathbf{A}$  na Equação (4.3) pode ser um pouco simplificada ao se executar um pré-embranquecimento do dado  $\mathbf{x}$ , segundo Cardoso (1990). O vetor observado  $\mathbf{x}$  é linearmente transformado para o vetor  $\mathbf{v}=\mathbf{M}\mathbf{x}$  tal que seus elementos  $v_i$  são mutuamente descorrelacionados e todos têm variância unitária. Assim, a matriz de correlação de  $\mathbf{v}$  é igual à unidade.

$$E\{\mathbf{v}\mathbf{v}^T\} = \mathbf{I} \quad (4.5)$$

Em geral, esta transformação sempre é possível e pode ser realizada pela clássica *Análise de Componente Principal (PCA)*. Ao mesmo tempo, a dimensionalidade dos dados é reduzida de forma que a dimensão do vetor transformado  $\mathbf{v}$  igualar-se-ia ao número de componentes independentes,  $n$ . Isto também tem o efeito de reduzir ruído. Depois da transformação, tem-se:

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{M}\mathbf{A}\mathbf{s} = \mathbf{B}\mathbf{s} \quad (4.6)$$

Em que  $\mathbf{B}=\mathbf{M}\mathbf{A}$  é uma matriz ortogonal devido às suposições sobre componentes  $\mathbf{s}_i$ , tal que:

$$E\{\mathbf{v}\mathbf{v}^T\} = \mathbf{B}E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^T\}\mathbf{B}^T = \mathbf{B}\mathbf{B}^T = \mathbf{I} \quad (4.7)$$

Assim, reduz-se o problema de encontrar uma matriz arbitrária  $\mathbf{A}$  de rank completo para o problema de encontrar uma matriz ortogonal  $\mathbf{B}$ . Neste caso tem-se que:

$$\mathbf{s} = \mathbf{B}^T\mathbf{v} \quad (4.8)$$

Se a  $i$ -ésima coluna de  $\mathbf{B}$  é denotada  $\mathbf{b}_i$ , então a  $i$ -ésima componente independente ou funções bases podem ser calculadas pela observação de  $\mathbf{v}$  como  $\mathbf{s}_i=(\mathbf{b}_i)^T\mathbf{v}$ .

Uma maneira de estimar o modelo de ICA é encontrar uma transformação que minimize a informação mútua entre as componentes, em que a informação mútua é uma medida da dependência entre as variáveis aleatórias (HYVARINEN, 1999). O uso da informação mútua pode ser motivado pela divergência de *Kullback-Leibler*. Para usar a não gaussianidade em estimação de ICA, tem-se que ter uma medida quantitativa de maximização da não gaussianidade de uma variável aleatória qualquer. Para simplificar as coisas, assume-se que uma variável aleatória é centrada (média zero) e tem variância unitária.

Os métodos clássicos para medidas de não-gaussianidade são *kurtose*, *negentropia* e *aproximação da negentropia*. Uma aproximação muito popular para estimar o modelo de ICA é a estimação de máxima probabilidade, que é representada pelo princípio *Infomax*; estas aproximações são essencialmente equivalentes à minimização da informação mútua.

Após escolher um princípio de estimação para ICA, necessita-se de um método prático para sua execução. E muitos são os algoritmos para ICA com características distintas, baseadas em estabilidade, velocidade de convergência, dentre outros. Neste trabalho usa-se um algoritmo de interação de ponto-fixa (HYVARINEN, 1999). Alguns exemplos de algoritmos de ICA são: algoritmo Heráult-Jutten, algoritmo de decorrelação não-linear,

algoritmo para máxima probabilidade ou estimação *Infomax*, algoritmos não lineares para *PCA*, algoritmos adaptativos, *FastICA* algoritmo, algoritmos baseados em tensor, algoritmo de Comon, algoritmo de Jacobi, dentre vários outros.

## 4.5 Medidas de não-gaussianidade

### 4.5.1 Kurtose

Kurtose é um cumulante de quarta ordem. É uma medida clássica de não-gaussianidade definida da forma:

$$\text{kurt}(\mathbf{y}) = E[\mathbf{y}^4] - 3(E[\mathbf{y}^2])^2 \quad (4.9)$$

Assumindo que  $\mathbf{y}$  possui variância unitária, ou seja,  $E[\mathbf{y}^2] = 1$ , pode-se simplificar a Equação (4.9) da seguinte maneira.

$$\text{kurt}(\mathbf{y}) = E[\mathbf{y}^4] - 3 \quad (4.10)$$

Não-gaussianidade é medida para kurtose de valor absoluto. Para uma variável aleatória gaussiana a kurtose é zero e para uma variável aleatória não-gaussiana a kurtose é diferente de zero (HYVARINEN, 1999).

A simplicidade matemática para cumulantes baseados na aproximação de ICA se deve à propriedade da linearidade dos cumulantes: se  $\mathbf{x}_1$  e  $\mathbf{x}_2$  são duas variáveis aleatórias independentes, podemos assegurar que:

$$\text{kurt}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) = \text{kurt}(\mathbf{x}_1) + \text{kurt}(\mathbf{x}_2) \quad (4.11)$$

e

$$\text{kurt}(\alpha \mathbf{x}_1) = \alpha^4 \text{kurt}(\mathbf{x}_1) \quad (4.12)$$

Em que  $\alpha$  é um escalar.

### 4.5.2 Negentropia

Negentropia pode ser descrita como um conceito que se baseia na quantidade de diferença de entropia. A entropia de uma variável aleatória pode ser considerada como um grau de informação da observação de uma variável dada. Devido à complexidade ou aleatoriedade das variáveis que podem envolver um processo, mais difícil será a sua predição e conseqüentemente maior será a sua entropia. Em uma visão mais ampla, a entropia é relatada como tamanho da codificação da variável aleatória, que para uma variável pode ser escrita na forma:

$$H(y) = - \sum_i P(y=a_i) \log P(y=a_i) \quad (4.13)$$

Em que  $a_i$  são os possíveis valores de  $y$ ,  $P$  a função densidade de probabilidade e  $\log$  uma função logarítmica. Também pode-se expressar a entropia de variáveis aleatórias para a Equação (4.14) para valores contínuos da seguinte forma:

$$H(y) = - \int f(y) \log f(y) dy \quad (4.14)$$

Em que  $y_{\text{gauss}}$  é a variável aleatória gaussiana de matriz de correlação (e covariância) de  $y$ . Devido às propriedades discutidas acima, a negentropia será sempre não-negativa e com média zero, se a distribuição de  $y$  for gaussiana.

As vantagens da negentropia, ou equivalentemente, da entropia diferencial, é que a mesma pode ser considerada como um estimador ótimo de não-gaussianidade. Contudo existe uma grande dificuldade computacional no processamento que motiva a utilização de aproximações mais simples.

### 4.5.3 Aproximação da negentropia

A estimação da negentropia é uma tarefa difícil. Aqui são apresentadas algumas aproximações que possuem propriedades bastante úteis. A primeira forma é a utilização de uma técnica conhecida que é a utilização dos cumulantes de alta ordem. Tal aproximação pode ser escrita por:

$$J(y) = \frac{1}{12} E[y^3]^2 + \frac{1}{48} \text{kurt}(y)^2 \quad (4.15)$$

Considerando-se que a média de  $y$  é zero e a sua variância unitária. Esta abordagem não é tão robusta devido à presença da kurtose em seus membros. Então outras aproximações são sugeridas na literatura como uma baseada no princípio da entropia máxima, ou seja:

$$J(y) = \sum_{i=1}^p K_i \left( E[G_i(y)] - E[G_i(v)] \right)^2 \quad (4.16)$$

Em que  $K_i$  é a kurtose positiva,  $y$  e  $v$  são variáveis gaussianas de média zero e variância unitária, e  $G_i$  é uma função não-quadrática. Em alguns casos, tal aproximação pode fornecer resultados não muito precisos. Então, aqui pode-se pensar em uma abordagem que envolva somente a função quadrática  $G_i$ , portanto:

$$J(y) \propto \left( E[G(y)] - E[G(v)] \right)^2 \quad (4.17)$$

Considerando esta generalização, como baseada em um momento simétrico de  $y$  e assumindo  $G(y) = y^4$ , tem-se uma aproximação por kurtose.

Em geral podemos afirmar que uma boa escolha de  $G$  pode definir a qualidade e eficácia das aproximações de negentropia. Assim, as estimações acima dão um bom enfoque nas propriedades clássicas de medidas de não-gaussianidade oferecidas pela kurtose e negentropia.

## 4.6 Medidas de informação mútua

A informação mútua ( $I$ ) é uma medida de dependência entre as variáveis aleatórias. A entropia diferencial  $H$  de um vetor aleatório  $y$  com densidade  $f(y)$  é definida por:

$$H(y) = - \int f(y) \log f(y) dy \quad (4.18)$$

Define-se a informação mútua,  $I$ , entre  $m$  variáveis aleatórias,  $y_i$ ,  $i=1, \dots, m$ , como:

$$I(y_1, y_2, \dots, y_m) = \sum_{i=1}^m H(y_i) - H(y) \quad (4.19)$$

Em que  $H$  é a entropia diferencial. A informação mútua é sempre não-negativa ou zero se as variáveis forem estatisticamente independentes. A informação mútua leva em conta toda a estrutura de dependência para as variáveis, não só a covariância como *PCA* e outros métodos.

A informação mútua tem uma propriedade importante para a transformação linear  $y=Bx$  que é:

$$I(y_1, y_2, \dots, y_m) = \sum_i H(y_i) - H(x) - \log|\det B| \quad (4.20)$$

Em que se considera  $y_i$  como sendo não-correlacionada e de variância unitária, tem-se que  $E[yy^T] = BE[xx^T]B^T = I$ , o que implica

$$\det I = 1 = (\det BE[xx^T]B^T) = (\det B)(\det E[xx^T])(\det B^T), \text{ resultando em } \det B \text{ constante.}$$

## 4.7 Estimação da máxima probabilidade

Princípio de *Infomax* é uma função de contraste derivada de redes neurais e baseada na entropia de saída (ou informação corrente) de uma rede neural de saídas não-lineares. Se for assumido que  $x$  é a entrada de uma rede neural com saídas não-lineares da forma  $g_i(B_i^T x)$ , em que  $g_i$  é uma função escalar não-linear e  $B_i$  são os vetores dos pesos de neurônios, então o princípio de estimação de ICA chamado de *Infomax* é maximizar a entropia de saída  $y$ , dada por:

$$H(y) = H(g_1(B_1^T x), \dots, g_n(B_n^T x)) \quad (4.21)$$

Dependendo da escolha de  $g_i$  a estrutura permite a estimação do modelo de ICA. Vários autores obtiveram resultados promissores com o princípio de maximização da entropia das redes ou princípio de “*Infomax*”.

## 4.8 Conclusão

Este capítulo apresentou um histórico e a definição da Análise de Componentes Independentes, usada no presente trabalho para extração das funções bases, as quais foram utilizadas na recuperação dos sinais de faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas. O próximo capítulo mostra a segunda fase do Algoritmo implementado na localização de faltas, que é o filtro adaptativo.

# 5 Sistemas Adaptativos-Fundamentação Teórica

---

Um sistema adaptativo apresenta uma estrutura alterada ou ajustada de tal forma que o comportamento ou desempenho satisfaça algum critério desejado. Um exemplo de um sistema adaptativo é o controle automático de ganho, usado em rádios e televisores, para ajuste de sensibilidade. Eles têm algumas características em comum (WIDROW; STEARNS, 1985):

- Podem automaticamente se adaptar, alterando os parâmetros do sistema requerido;

- Podem ser treinados para executar uma filtragem específica e tomar decisões;

- São usualmente descritos em sistemas com parâmetros variando no tempo;

- Geralmente, são mais complexos e de difícil análise que os sistemas não-adaptativos, mas eles melhoram o desempenho do sistema e quando o sinal de entrada tem características que variam no tempo.

## 5.1 Objetivo

Este capítulo tem por objetivo mostrar a definição, as áreas de aplicações, as características e propriedades gerais dos sistemas adaptativos, bem como a descrição geral do filtro de Wiener usado no processamento adaptativo de sinais. O filtro de Wiener é utilizado no presente trabalho na recuperação dos sinais desejados para localização da distância das faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas.

## 5.2 Áreas de Aplicação

Com o progresso no desenvolvimento e produção dos circuitos microeletrônicos, surgiram os processadores digitais de sinais com tamanhos bastante reduzidos e com alta velocidade de processamento. Os sistemas adaptativos são aplicados em sistemas de comunicações, tais como radar, sonar, sistemas de navegação, modems e nos instrumentos biomédicos. Como exemplo pode-se citar o eletroencefalograma (EEG), em que

os movimentos dos olhos ou das pálpebras podem contaminar as medidas das atividades elétricas do cérebro, e eletrocardiogramas, que demandam filtragem da interferência na aquisição dos sinais cardíacos causados pelos 60 Hz da rede elétrica.

### 5.3 Propriedades Gerais

A essencial e principal propriedade dos sistemas adaptativos é que eles se ajustam automaticamente seus parâmetros, de forma a conseguir um melhor desempenho na estimação do sinal desejado (HAYKIN, 2001; WIDROW; STEARNS, 1985). Já em um sistema não-adaptativo existem implicações em seu planejamento, no que diz respeito a obter um ótimo desempenho, pois o planejamento deve prever todas as possíveis condições de entrada. No desenvolvimento de um sistema não adaptativo, deve-se selecionar um critério de estabilidade onde os parâmetros são ajustados e mantidos constante durante a operação normal do sistema.

Em certos momentos, entretanto, o completo domínio das condições de entrada pode não ser alcançado com precisão; ou as condições podem mudar de tempos em tempos. Neste caso, os sistemas adaptativos têm desempenho superior, se comparado com os sistemas de parâmetros fixos (WIDROW; STEARNS, 1985).

Muitos processos encontrados no mundo real, que requeiram algum tipo de controle, são de natureza não-linear, tendo seus parâmetros alterados de acordo com a variação do ambiente em que se encontram.

As características dos sistemas adaptativos dependem entre outras coisas, de seus sinais de entrada (WIDROW; STEARNS, 1985). Se um sinal  $x_1$  é aplicado na entrada de um sistema adaptativo, o sistema produzirá uma saída  $y_1$ . Se outro sinal  $x_2$  é aplicado, o sistema produzirá uma saída  $y_2$ . Geralmente, a resposta dos sistemas adaptativos é diferente para duas entradas diferentes. Se a soma de  $x_1$  e  $x_2$  é aplicada ao sistema adaptativo, este irá se adaptar aos sinais de entrada, mas geralmente não produzirá uma saída  $y_1 + y_2$ , que corresponderia à saída para as respectivas entradas  $x_1$  e  $x_2$ , caso o sistema fosse linear. Os sistemas adaptativos têm duas características que os diferenciam dos outros sistemas. A primeira é que os sistemas adaptativos são automaticamente ajustáveis e seus ajustes dependem de um tempo proporcional às características do sinal. A segunda característica, é que os ajustes dos sistemas

adaptativos são modificados com o propósito de melhorar o desempenho. Certas estruturas de sistemas adaptativos tornam-se sistemas lineares, quando são ajustados e considerados constantes depois da adaptação. Estes sistemas adaptativos podem ser chamados de “sistemas lineares adaptativos”, sendo práticos e geralmente úteis, para desenvolver outras formas de sistemas adaptativos.

## 5.4 Filtros Adaptativos

Existem diversas aplicações práticas que não podem ser resolvidas com sucesso utilizando filtros com parâmetros fixos, seja porque não há informação suficiente para projetar o filtro com coeficientes fixos, seja porque os critérios do projeto mudam durante a operação. Uma boa parte destas aplicações pode ser resolvida por um tipo especial de estrutura matemática chamada filtro adaptativo, o qual foi usado no presente trabalho para recuperar os sinais transitórios de tensão de alta frequência ou ondas viajantes gerada pela falta, bem como para eliminar a frequência fundamental do sistema elétrico obtendo como resposta os sinais transitórios. A característica dos filtros adaptativos que os distingue dos filtros digitais convencionais é que eles podem modificar sua resposta automaticamente para melhorar seu desempenho durante a operação.

### 5.4.1 Módulos do Filtro

Os filtros adaptativos são formados por três módulos, que são ilustrados na Figura 5.1.

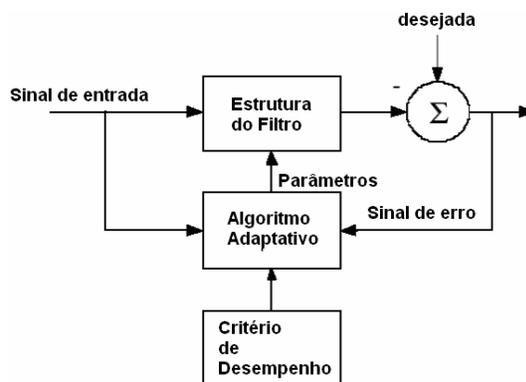


Figura 5.1 – Módulos de um filtro adaptativo ( Fonte: WIDROW 1985)

(a) **Estrutura do filtro.** Esse módulo produz a saída do filtro a partir de medições do sinal de entrada. A estrutura é fixa e seus parâmetros são ajustados pelo algoritmo.

(b) **Critério de desempenho.** A saída do filtro adaptativo e a resposta desejada são processadas pelo módulo de critério de desempenho para avaliar sua qualidade em relação aos requisitos da aplicação.

(c) **Algoritmo adaptativo.** O algoritmo adaptativo utiliza o valor do critério de desempenho, ou alguma função dele, e medições da entrada e da resposta desejada, para decidir como modificar os parâmetros do filtro para melhorar o seu desempenho.

Existem várias aplicações onde os filtros adaptativos podem ser empregados. Estas aplicações podem ser classificadas em três categorias gerais: identificação de sistemas, predição de sinal e cancelamento de interferências (WIDROW, STEARNS, 1985).

1. **Identificação de sistemas:** Essa classe de aplicação é também conhecida como modelagem de sistemas. Algumas aplicações típicas dessa classe incluem o cancelamento de eco e a identificação de sistemas em aplicação de controle.

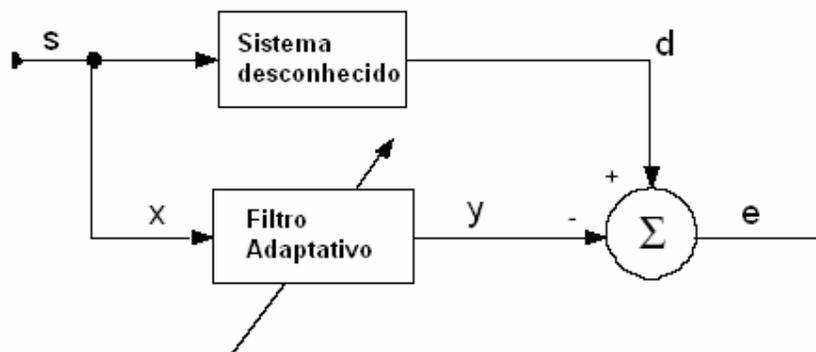


Figura 5.2 – Identificação de sistemas ( Fonte: WIDROW 1985)

2. **Predição de sinais:** Na aplicação de predição o objetivo do filtro adaptativo é prever o sinal de entrada atual.

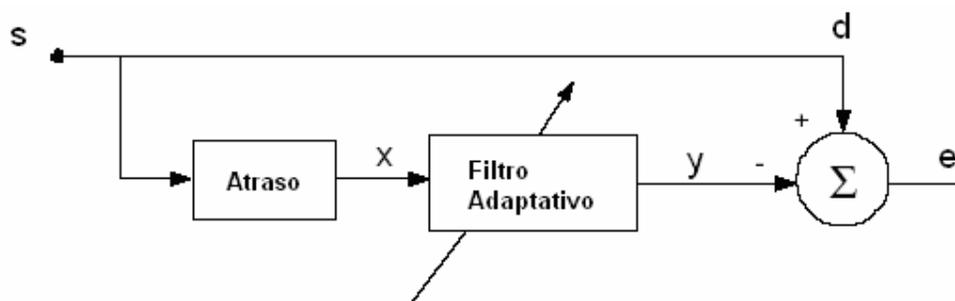


Figura 5.3 – Predição de sinais ( Fonte: WIDROW 1985)

3. **Cancelamento de interferências:** Nessa aplicação o objetivo do filtro adaptativo é produzir um sinal o mais parecido possível com um sinal corrompido por um ruído aditivo.

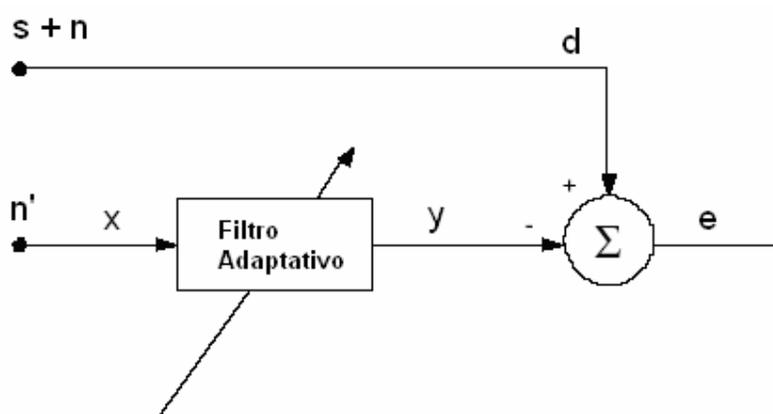


Figura 5.4 – Cancelamento de interferências ( Fonte: WIDROW 1985)

## 5.5 Filtro de Wiener

Utiliza-se o termo filtro para descrever um dispositivo em hardware ou software que se aplica a um conjunto de dados contaminados com ruído por forma a extrair a informação de interesse. O filtro diz-se linear se a quantidade de interesse à saída do sistema é uma função linear das observações apresentadas à sua entrada (WIDROW; STEARNS, 1985).

Considera-se a Figura 5.5 ilustrando o diagrama de blocos do problema em questão. O filtro tem como entrada o sinal desejado contaminado com ruído branco aditivo com ele não

correlacionado, constituindo a seqüência  $x(0), x(1), x(2), \dots$  e caracteriza-se pela resposta impulsional  $w_0, w_1, w_2, \dots$  num determinado instante  $k$ , o filtro produz a saída  $y_k$ . Esta é usada como estimativa da resposta desejada  $d_k$ . Sendo os dois sinais concretizações de processos estocásticos, a estimativa produz o sinal de erro  $e_k$  com características estatísticas próprias. O objetivo é minimizar o erro de estimativa segundo algum critério estatístico.

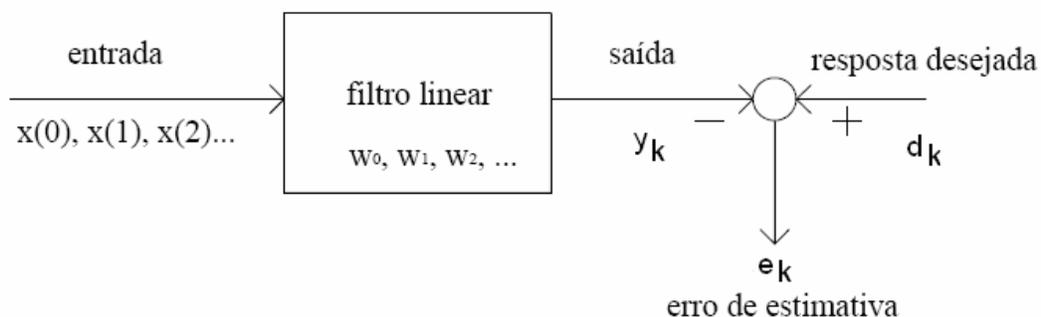


Figura 5.5 – Diagrama de blocos representando o problema de filtragem estatística

O filtro linear não-recursivo ou combinador linear adaptativo é fundamental em processamento de sinais. Ele aparece em diferentes formas em muitos filtros e sistemas adaptativos. É um dos mais importantes elementos no processo adaptativo. Por causa da estrutura não-recursiva, o combinador linear é fácil de se compreender e de analisar o seu funcionamento.

Um diagrama da forma geral do combinador linear adaptativo é mostrado na Figura 5.6. Existe um vetor  $\mathbf{X}_k$  com os elementos  $x_0, x_1, \dots, x_n$ , que corresponde ao vetor sinal de referência ou sinal de entrada, um correspondente vetor  $\mathbf{W}_k$  de pesos ajustáveis,  $w_0, w_1, \dots, w_n$ , uma unidade de soma e um sinal de saída  $y_k$ . O processo para ajuste ou adaptação dos pesos é chamado de linear porque para um ajuste fixo dos pesos, tem-se a saída como uma combinação linear do vetor sinal de referência ou sinal de entrada com os pesos.

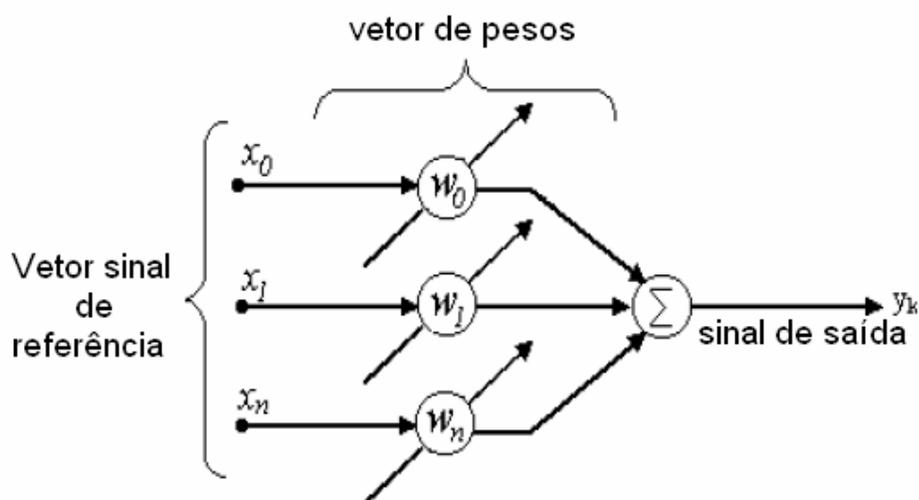


Figura 5.6 – Forma geral do combinador linear adaptativo ( Fonte: WIDROW 1985)

Os elementos  $[x_0, \dots, x_n]$ , como visto na Figura 5.6, correspondem ao vetor sinal de referência ou sinal de entrada, que no presente trabalho correspondem às funções bases das faltas monofásicas, bifásicas-terra, bifásicas e trifásicas; podem ser considerados como entradas simultâneas de fontes de sinais diferentes, mas alternativamente podem ser uma amostra seqüencial de um mesma fonte de sinal. No caso de amostras paralelas, a representação algébrica do vetor sinal de entrada é mostrada na Equação 5.1.

$$W_k = [w_k \ w_{1k} \ \dots \ w_{Lk}]^T \quad (5.1)$$

O vetor  $X_k$  é um vetor-coluna e o subscrito  $k$  é o índice de tempo, neste caso do combinador linear adaptativo de entrada paralelas, todos os elementos são amostrados ao mesmo tempo.

Para o caso de uma entrada simples, o processo adaptativo pode ser implementado com um combinador linear e uma unidade de atraso entre os elementos. A esta estrutura dá-se o nome de filtro transversal adaptativo e a Equação (5.2) mostra a expressão algébrica do vetor sinal de referência ou vetor de entrada, que no presente trabalho são formados pela funções bases dos sinais de faltas. O filtro transversal adaptativo é uma forma temporal do filtro adaptativo não-recursivo, o qual tem uma larga aplicação nos campos de modelagem adaptativa e em processamento adaptativo de sinais.

$$\mathbf{X}_k = [x_k \ x_{k-1} \ \dots \ x_{k-L}]^T \quad (5.2)$$

Equivalente às Equações (5.1) e (5.2) tem-se o vetor de pesos igual a :

$$\mathbf{W}_k = [w_k \ w_{1k} \ \dots \ w_{Lk}]^T \quad (5.3)$$

A partir das Equações (5.1) e (5.3), pode-se obter a relação vetorial entre a entrada e saída do combinador linear adaptativo, usando a notação a seguir:

$$y_k = \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k = \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \quad (5.4)$$

O combinador linear adaptativo pode ser usado em sistemas adaptativos, com ou sem realimentação. O ajuste do vetor peso em sistemas adaptativos sem realimentação não depende da saída, mas somente da entrada e de propriedade do ambiente. Em sistemas adaptativos com realimentação, o ajuste do vetor peso depende da comparação entre o sinal de saída ou sinal recuperado  $y_k$  e o sinal ou resposta desejada  $d_k$ . Obtendo-se, como resultado desta comparação, o sinal erro  $e_k$ , o qual é minimizado a partir do ajuste do vetor de pesos.

Com o que foi descrito da operação do combinador linear adaptativo, permite-se proceder ao estudo de como ocorre o ajuste do combinador linear adaptativo, a partir do vetor peso e da função de desempenho, a qual é uma função do sinal de erro.

Pretende-se reduzir os efeitos do ruído à saída de acordo com algum critério estatístico. Uma aproximação para este problema consiste em minimizar o valor quadrático médio do sinal de erro. Definindo sinal de erro como a diferença entre a resposta desejada e o resultado obtido.

O sinal de erro instantâneo com índice de tempo  $k$  é dado por:

$$e_k = d_k - y_k \quad (5.5)$$

Substituindo a Equação (5.4) na Equação (5.5) tem-se uma nova expressão:

$$e_k = d_k - \mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_k = d_k - \mathbf{W}_k^T \mathbf{X}_k \quad (5.6)$$

O vetor de pesos, para simplificar a demonstração da função desempenho do sistema adaptativo, não possui o índice  $k$ , pois nesta demonstração não necessitamos ajustar o vetor de pesos. Fazendo o quadrado da Equação (5.6), obtém-se o erro quadrático instantâneo na recuperação do sinal desejado na localização da falta:

$$e_k^2 = d_k^2 + \mathbf{W}^T \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T \mathbf{W} - 2d_k \mathbf{X}_k^T \mathbf{W} \quad (5.7)$$

Assumindo que as variáveis  $e_k$ ,  $d_k$  e  $\mathbf{X}_k$  são estatisticamente estacionários e tomando o valor esperado da Equação (5.7), obtém-se o erro médio quadrático, expresso pela Equação (5.8) (WIDROW; STEARNS, 1985):

$$E[e_k^2] = E[d_k^2] + \mathbf{W}^T E[\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T] \mathbf{W} - 2E[d_k \mathbf{X}_k^T] \mathbf{W} \quad (5.8)$$

Devemos observar que o valor esperado da soma é a soma do valor esperado, mas o valor esperado do produto é o produto do valor esperado, somente se as variáveis forem estatisticamente independentes. Sendo que  $\mathbf{X}_k$  e  $d_k$  não são geralmente independentes, o erro médio quadrático por conveniência através da matriz covariância de  $\mathbf{X}_k$ , designada pela letra  $\mathbf{R}$  e pelo vetor-coluna, designado por  $\mathbf{P}$ .

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T] = E \begin{bmatrix} X_{0k}^2 & X_{0k} X_{1k} & \dots & X_{0k} X_{Lk} \\ X_{1k} X_{0k} & X_{1k}^2 & \dots & X_{1k} X_{Lk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{Lk} X_{0k} & X_{Lk} X_{1k} & \dots & X_{Lk}^2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{P} = E[d_k \mathbf{X}_k] = E[d_k X_{0k} \ d_k X_{1k} \ \dots \ d_k X_{Lk}]^T \quad (5.10)$$

Os elementos de  $\mathbf{R}$  e  $\mathbf{P}$  são todos estatisticamente constantes de segunda ordem, quando  $\mathbf{X}_k$  e  $d_k$ , são estacionários. Agora tem-se o erro médio quadrático em termos das Equações (5.9) e (5.10), podendo ser reescrito da seguinte forma:

$$\text{MSE} = E[e_k^2] = E[d_k^2] + \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} - 2\mathbf{P}^T \mathbf{W} \quad (5.11)$$

A superfície de erro é um parabolóide multidimensional com concavidade orientada no sentido positivo, ou seja, uma superfície com um único mínimo. Para determiná-lo, calcula-se o gradiente da função:

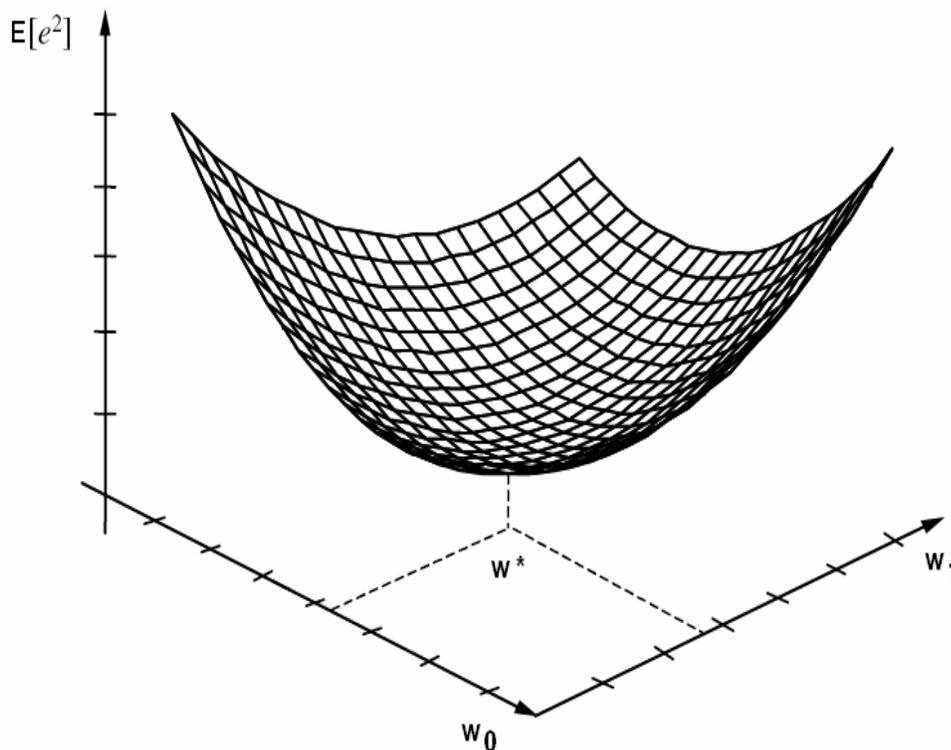


Figura 5.7 – Superfície de erro ( Fonte: WIDROW 1985)

Em muitos processos adaptativos o ajuste do vetor peso na procura do mínimo erro médio quadrático é feito pelo método do gradiente. A partir da Equação (5.12), observa-se que o gradiente  $\nabla$  é obtido a partir do erro e da amostra de dados de entrada, que no presente trabalho são as funções bases das faltas monofásicas, bifásicas-terra, bifásicas e trifásicas geradas pela técnica da Análise de Componentes Independentes. Sendo que o objetivo do gradiente  $\nabla$  é ajustar o vetor de peso, de modo a encontrar o mínimo erro médio quadrático entre o sinal de falta recuperado e o sinal de falta original.

$$\nabla = \frac{\partial E[e_k^2]}{\partial W} = 2RW - 2P \quad (5.12)$$

O vetor de pesos ótimo  $W^*$  é aquele para o qual se anula o gradiente:

$$\nabla = \frac{\partial E[e_k^2]}{\partial W} = 0 \quad (5.13)$$

Para sinais de entrada estacionários a solução resulta no vetor de coeficientes  $W^*$ , solução conhecida como filtro de Wiener e que será ótima no sentido quadrático médio:

$$W^* = R^{-1}P \quad (5.14)$$

O mínimo erro médio quadrático é agora obtido, por substituição de  $W$  na Equação (5.11) por  $W^*$  (WIDROW; STEARNS, 1985).

$$E[e_k^2] = E[d_k^2] - P^T W^* \quad (5.15)$$

A Equação 5.15 representa o mínimo erro médio quadrático entre o sinal de falta recuperado pela técnica ICA e o sinal original de falta.

O filtro de Wiener é inadequado para situações em que não existe estacionaridade, requerendo conhecimento a priori da estatística dos dados a processar. Este só será ótimo se as estatísticas dos dados de entrada coincidirem com as que se usaram no desenho do filtro. Quando não se dispõe dessa informação, não será possível desenhar o filtro de Wiener ou, pelo menos, não terá um desempenho ótimo. Uma aproximação nesta situação poderá consistir na separação do processamento em duas etapas: primeiro estimam-se os parâmetros estatísticos dos sinais; em seguida aplicam-se ao cálculo dos parâmetros do filtro. Nas aplicações em tempo real, este processo poderá ser muito dispendioso, devido às suas exigências computacionais.

## 5.6 Conclusão

Este capítulo apresentou a definição, as áreas de aplicações, as características e propriedades gerais dos filtros adaptativos, bem como uma descrição geral do filtro de Wiener, usado no presente trabalho para recuperar as frentes de ondas viajantes, necessárias para estimar a distância da falta. No próximo capítulo serão mostrados os resultados alcançados com a implementação do método de ICA proposto e representado pelo diagrama de blocos da Figura 3.3.

## 6 Resultados

---

Este capítulo tem por objetivo mostrar os resultados alcançados com a implementação da técnica de análise de componentes independentes na localização de faltas em sistema de transmissão de energia elétrica, através de simulações com sinais de faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas.

### 6.1 Sistema de transmissão proposto

Com o objetivo de testar e validar a aplicabilidade do algoritmo de localização de faltas proposto utilizou-se da simulação de um sistema de transmissão em condição faltosa. Para tal, o software ATP (Alternative Transient Program) foi empregado para obtenção das situações de faltas analisadas. Deve ser mencionado que a técnica descrita é baseada em simulações computacionais e que considerações práticas foram incluídas na simulação, fazendo com que os dados obtidos aproximem-se dos reais. Foram usadas 400 diferentes situações para cada tipo de falta, utilizadas para extração das funções bases que parte-se da hipótese que estes sinais de falta são suficientemente homogêneos, de modo que se possa obter um padrão usando amostras desses sinais, e então usar estes padrões ou as funções bases para processar os sinais de falta observados e assim localizar a distância da falta usando a Análise de Componentes Independentes (ICA) para obter os padrões ou as funções bases dos sinais de faltas desejados.

Nas simulações usou-se o modelo de uma linha real de transmissão de 500 kV (ONS, 2000). O modelo de linha dependente da frequência de Marti (1982) foi usado para modelar a linha em estudo devido à precisão na análise de transitórios eletromagnéticos, conforme trabalhos realizados por J. K. Snelson (1972).

A Figura 6.1 ilustra o diagrama unifilar do sistema elétrico analisado submetido à faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas e Figura (6.2) ilustra os dados para a obtenção dos parâmetros da estrutura da torre de transmissão de 500 kV:

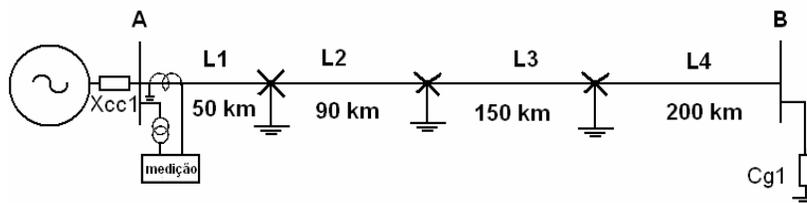


Figura 6.1 – Sistema de Transmissão de 500 kV

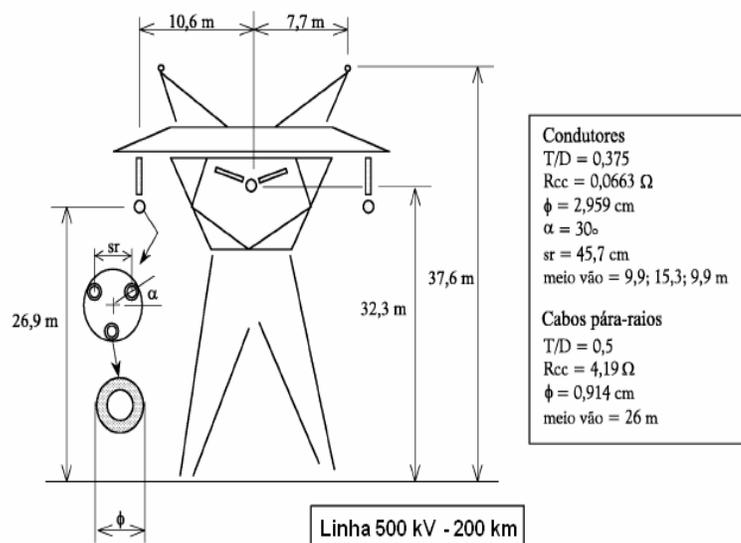


Figura 6.2 – Modelo da Torre de Transmissão de 500 kV

Considerando-se os diferentes tipos de faltas que podem ocorrer sobre as linhas de transmissão, as simulações sobre o sistema apresentado foram geradas tomando-se as faltas entre:

Algum condutor a terra (faltas monofásicas);

Entre dois condutores a terra (faltas bifásicas-terra);

Entre dois condutores (faltas bifásicas) ou

Faltas trifásicas;

Tais situações de faltas foram configuradas no software ATP conforme as combinações apresentadas na Figura 6.3.

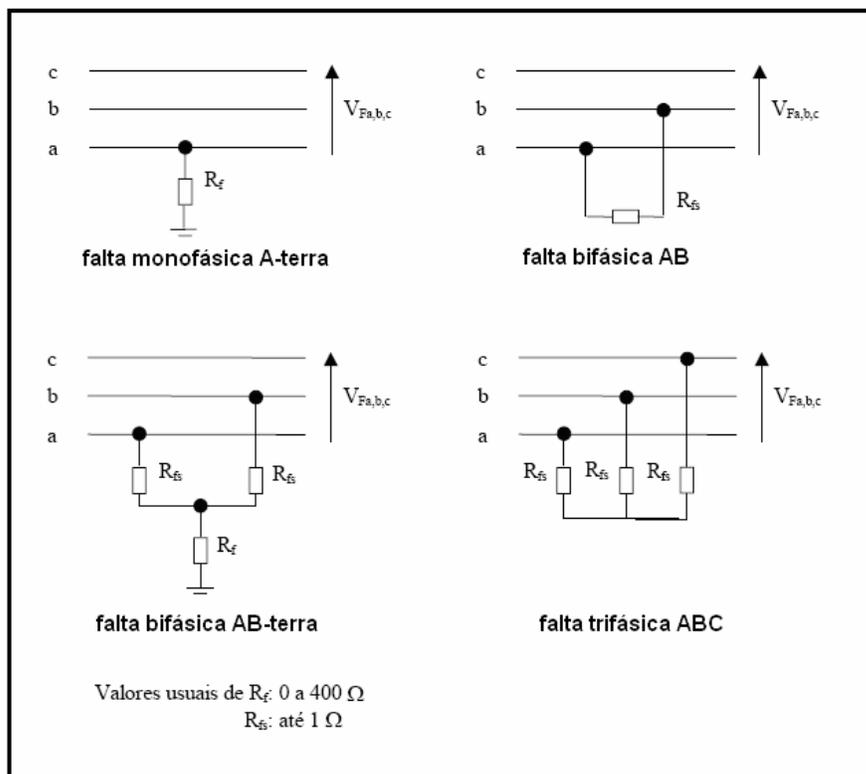


Figura 6.3 – Situações de faltas sobre o sistema

## 6.2 Variações nas simulações das condições de faltas aplicadas ao sistema de transmissão proposto

Nas simulações realizadas sobre um sistema de transmissão real utilizando-se o software ATP, foram analisados alguns fatores para avaliar o desempenho e a precisão da técnica proposta, dentre eles podemos destacar:

(a)-Influência do ângulo de incidência de falta variando-se o número de funções bases e relações sinal ruído (*SNR*), definida por (OPPENHEIM; SHARPER, 1989):

$$SNR = 10 \log \left( \frac{\sigma_s^2}{\sigma_r^2} \right) \quad (6.1)$$

Onde  $\sigma_s^2$  é a variância do sinal e  $\sigma_r^2$  é a variância do ruído.

(b)-Influência dos tipos de faltas aplicadas:

-Monofásica (A-terra);

-Bifásica-terra (AB-terra, AC-terra, BC-terra);

-Bifásica (AB, AC e BC);

-Trifásicas (ABC);

(c)-Influência das distâncias em que as faltas foram aplicadas entre os barramentos A e B: 50 km, 90 km e 150 km.

(d)-Influência das resistências de faltas consideradas; 0 ohm, 50 ohm e 100 ohms.

Como resposta da simulação de cada situação de falta no software ATP, obtém-se os valores de tensões trifásicos amostrados em relação aos barramentos A e B. O arquivo de dados descrevendo cada situação de falta é apresentado pelo software ATP a uma taxa de amostragem de 100 kHz, 200 kHz e 400 kHz respectivamente.

Com os resultados obtidos através da rotina *Line Constant Cable (LCC)*, considerando a linha com transposição, modelo Marti (1982) e os barramentos A e B, elaborou-se um arquivo de dados de entrada a ser executado pelo software ATP, o qual descreve a situação em que se encontra o sistema de transmissão. Neste arquivo de entrada, todas as conexões do sistema estão representadas, bem como as condições referentes ao tipo de falta aplicada (localização, resistência, ângulo de incidência, fluxo de energia no sistema, informações sobre os valores de seqüência zero e positiva das grandezas referentes a resistências, reatâncias e susceptâncias, efeito corona e efeito skin) e demais considerações adotadas, as quais são ilustradas pela Figura 6.8 no Apêndice A, sendo que a implementação no Matlab com a técnica de ICA na localização de faltas é ilustrada na Figura (6.9) no Apêndice B.

A Figura 6.4 ilustra os valores amostrados de tensão do sinal de uma falta trifásica a 50 km da barra de medição com um ângulo de incidência de 30°, sendo que na Figura 6.5 ilustra o sinal de falta trifásico adicionado com uma relação sinal-ruído *SNR* de 10 dB e na Figura 6.6 e 6.7 com uma *SNR* de 20 dB e 40 dB respectivamente.

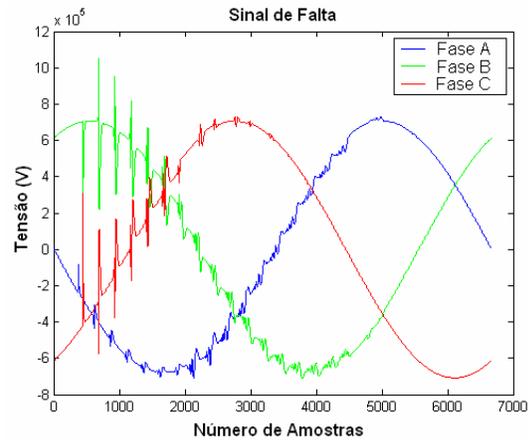


Figura 6.4 – Sinal de falta com ângulo de incidência de  $30^\circ$

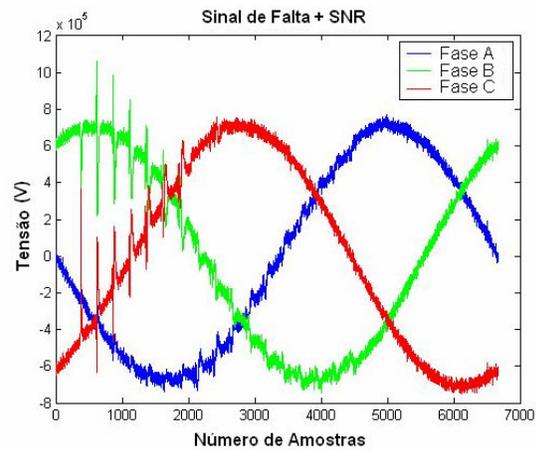


Figura 6.5 – Sinal de falta adicionado com  $SNR$  de 10 dB

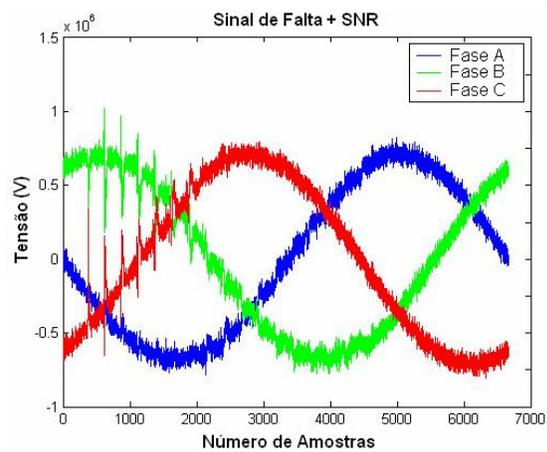


Figura 6.6 – Sinal de falta adicionado com  $SNR$  de 20 dB

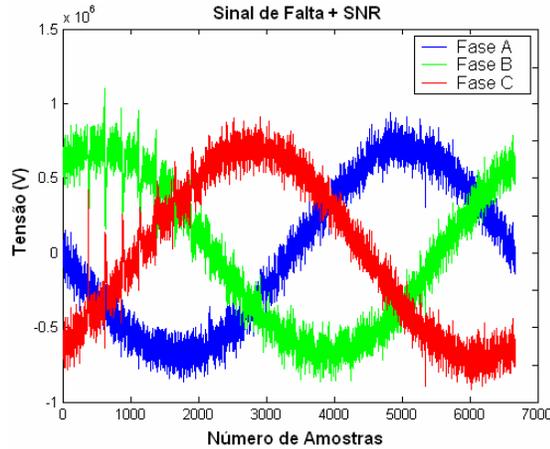


Figura 6.7 – Sinal de falta adicionado com *SNR* de 40 dB

Mostra-se nas tabelas (3-6) o resultado da técnica de ICA na localização da falta quando submetidas a diferentes funções bases, diferentes ângulos de incidência de falta submetida a diferentes valores de *SNR*, diferentes valores de resistência de falta e diferentes valores da distância da linha de transmissão de 500 kV para uma falta monofásica AT, sendo que a precisão da técnica de ICA é avaliada através do cálculo do erro percentual relativo e erro médio total, dados pelas Equações (6.2) e (6.3) respectivamente:

$$\text{Erro}\% = \left| \frac{d_{\text{estimada}} - d_{\text{real}}}{l_{LT}} \right| \times 100\% \quad (6.2)$$

$$\text{Erro médio} = \frac{\sum_1^N \text{Erro}\%}{N} \quad (6.3)$$

Onde  $N$  é o número de situações consideradas e  $l_{LT}$  o comprimento da linha de transmissão entre as barras A e B (200 km).

Embora extensivos testes tenham sido realizados para se verificar e comprovar o desempenho do algoritmo localizador de faltas proposto, somente uma parte destes testes com seus respectivos comentários serão apresentados no corpo deste documento. Resultados complementares serão apresentados nas Tabelas (7-27) no Apêndice C.

Tabela 3 – Localização de um falta monofásica (AT) a uma distância de 50 km

SNR	Rf (Ω)	Ângulo de incidência	Tipo de falta	12	8	3	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções bases	Funções bases	Funções bases			
10dB	0	0°	AT	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				45 km	46 km	47 km	2,5	2	1,5
20dB	50	0°	AT	45 km	46 km	47 km	2,5	2	1,5
40dB	100	0°	AT	45 km	46 km	47 km	2,5	2	1,5
10dB	0	30°	AT	45 km	48,25 km	49 km	2,5	0,875	0,5
20dB	50	30°	AT	45 km	48,25 km	49 km	2,5	0,875	0,5
40dB	100	30°	AT	45 km	49 km	49 km	2,5	0,875	0,5
10dB	0	60°	AT	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
20dB	50	60°	AT	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
40dB	100	60°	AT	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
10dB	0	90°	AT	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
20dB	50	90°	AT	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	90°	AT	50 km	50 km	50 km	0	0	0
Erro médio (%)							1,583	0,885	0,541

Tabela 4 – Localização de um falta monofásica (AT) a uma distância de 90 km

SNR	Rf (Ω)	Ângulo de incidência	Tipo de falta	12	8	3	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções bases	Funções bases	Funções bases			
10dB	0	0°	AT	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				80 km	80,25 km	80,25 km	5	4,875	4,875
20dB	50	0°	AT	80 km	80,25 km	80,25 km	5	4,875	4,875
40dB	100	0°	AT	80 km	80,25 km	80,25 km	5	4,875	4,875
10dB	0	30°	AT	80 km	80,5 km	88,5 km	5	4,75	0,75
20dB	50	30°	AT	80 km	80,5 km	88,5 km	5	4,75	0,75
40dB	100	30°	AT	80 km	80,5 km	88,5 km	5	4,75	0,75
10dB	0	60°	AT	80 km	85 km	89,5 km	5	2,5	0,25
20dB	50	60°	AT	80 km	85 km	89,5 km	5	2,5	0,25
40dB	100	60°	AT	80 km	85 km	89,5 km	5	2,5	0,25
10dB	0	90°	AT	78 km	78,75 km	90 km	6	5,625	0
20dB	50	90°	AT	78 km	78,75 km	90 km	6	5,625	0
40dB	100	90°	AT	78 km	78,75 km	90 km	6	5,625	0
Erro médio (%)							5,250	4,437	1,468

Tabela 5 – Localização de um falta monofásica (AT) a uma distância de 150 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	Ângulo de incidência	Tipo de falta	12	8	3	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções bases	Funções bases	Funções bases			
10dB	0	0°	AT	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz	20	17,5	10
20dB	50	0°	AT	110 km	115 km	130 km	20	17,5	10
40dB	100	0°	AT	110 km	115 km	130 km	20	17,5	10
10dB	0	30°	AT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
20dB	50	30°	AT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
40dB	100	30°	AT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
10dB	0	60°	AT	130 km	148 km	150 km	10	1	0
20dB	50	60°	AT	130 km	148 km	150 km	10	1	0
40dB	100	60°	AT	130 km	148 km	150 km	10	1	0
10dB	0	90°	AT	150 km	150 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	AT	150 km	150 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	AT	150 km	150 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							13,750	8,500	2,750

Tabela 6 – Erro médio (%) para todos os tipos de faltas estudados

Tipo de Falta	50 km	90 km	150 km
Falta Monofásica	0,54%	1,46%	2,75%
Falta Bifásica	6,50%	2,97%	1,51%
Falta Bifásica-Terra	7,05%	4,33%	1,43%
Falta Trifásica	1,50%	1,46%	2,75%

## 7 Discussões e Conclusões

---

Sobre o método implementado, as Tabelas (3-27), mostram que foram simuladas diversas situações de falta para faltas monofásicas, bifásicas-terra, bifásicas e trifásicas nas distâncias de 50 km, 90 km e 150 km da linha de transmissão. Pode-se verificar que a distância da falta não tem tanta influência na precisão desta técnica, visto que, geralmente, a localização de falta apresenta maiores erros para faltas distantes aos terminais de medição e excelente precisão próximo ao terminal de medição e ao meio da linha de transmissão.

Nas Tabelas (3-27) foram verificadas a influência do ângulo de incidência quando submetida a diferentes valores de *SNR* e da influência da resistência de falta. Os testes demonstraram que são alcançados menores valores de erro médio quando da inserção da falta a valores próximos de tensão a um ângulo de 90°, mesmo quando submetido a poucas funções bases numa alta relação *SNR* de 40 dB.

Nas Tabelas (3-27), foi verificada a influência da taxa de amostragem na precisão do algoritmo visto que é muito importante, pois o método de localização abordado é baseado no tempo de viagem das ondas viajantes, portanto verificou-se que a precisão do algoritmo é diretamente proporcional à frequência utilizada e inversamente proporcional ao número de funções bases, ou seja, quanto maior a taxa de amostragem maior será a precisão do algoritmo para uma menor quantidade de funções bases.

É imprescindível verificarmos se os diferentes tipos de falta (falta monofásica, falta bifásica-terra, falta bifásica e trifásica) influenciam no desempenho do algoritmo principalmente visto que as faltas monofásicas são predominantes nos diferentes tipos de configurações da linha de transmissão. Analisando a Tabela 6 de um modo geral foi realizada uma série de testes com o intuito de se verificar a influência dos diferentes tipos de falta.

Pode-se verificar que o erro médio total ficou dentro de uma margem de erro de 4% para altas taxas de amostragem de 400 kHz na maioria dos casos teste para faltas localizadas a 150 km distante do barramento de medição, sendo que o algoritmo se comportou um pouco melhor na presença de faltas trifásicas e monofásicas apresentando erro médio inferior a 4% para distâncias de 50 km, 90 km e 150 km, mas para faltas bifásicas e bifásicas-terra não teve um desempenho muito satisfatório, apresentando erro médios situados na faixa de 6% a 7%

para distâncias de 50 km próximo ao barramento de medição, sendo que este erro deve-se ao fato de que em sistemas de transmissão de alta tensão, os grandes espaçamentos entre os condutores da linha de transmissão, dificultam o surgimento destes tipos de faltas.

Analisando as Tabelas (3-27), de um modo geral podemos observar que o algoritmo se mostrou pouco sensível a sinais com *SNR* de até 40 dB e que os baixos erros médios verificados pelos diferentes tipos de faltas quando submetidas a altas taxas de amostragem comprovam a validade e a precisão da técnica de ICA na localização de faltas em sistemas de transmissão.

Esta tese deu origem a um artigo cujo título “**Faults Location in High Voltage Transmission System using ICA**” foi aceito na “**International Conference on Electrical Engineering 2007**”, sendo organizado pelo “**Department of Electrical Engineering University of Engineering and Technology, Lahore (Pakistan)** ISBN Number for the Conference is: **1-4244-0893-8**.”

## **7.1 Proposta de Continuidade e Sugestões**

A análise de componentes independentes é uma ferramenta importante e poderosa, mas cuja teoria ainda não está totalmente desenvolvida. Apesar disso, muitas aplicações práticas estão surgindo. Com a realização deste trabalho, vários pontos de discussão foram levantados e que constituem em propostas de continuidade e sugestões para trabalhos futuros. A seguir, serão apresentados alguns temas:

- Aplicação da técnica de ICA na localização de faltas em sistemas de transmissão em tempo real com a utilização de um DSP (Processador Digital de Sinais).
- Aplicação da técnica de ICA na monitoração, qualidade de energia e proteção de sistemas elétricos de potência.
- Aplicação da técnica de ICA na classificação de faltas em sistema de transmissão.

## Referências

---

AGGARWAL, R. K. et al. A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.8, n.3, p. 874-883, jul, 1993.

AMARI, S. -I.; CICHOKI, A.; YANG, J. A new learning algorithm for blind source separation. In: **Symposium on System Identification Proceedings**, SYSID-97, p. 11., 1997, Kitakyushi, Japan.

ANCELL, G. B., PAHAKAWATHTHA, N. C. Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.9, n.2, p.680-686, Apr 1994.

ANS, B.; HÉRAULT, J.; JUTTEN, C. Adaptive neural architectures: detection of primitives. In: **COGNITIVA'85**, Paris, France. **Proceedings...**, 1985.p. 593-597.

BARROS, A. K.; J; JUTTEN, C. A. Extraction of Specific Signals with Temporal Structure, **Neural Computation**, v. 13, n.9, p. 1995-2003, 2001.

BELL, A. J.; SEJNOWSKI, T. J. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. **Neural Computation**, v. 7, p.1129-1159, 1995.

BELL, A.; SEJNOWSKI, T. Learning higher-order structure of a natural sound. **Net-work**, v. 7, p.261-266, 1996.

BEWLEY, L. V. **Travelling waves on transmission systems**. New York: John Wiley e Sons, 1963.

BO, Z. Q.; JOHNS, A.T.; AGGARWAL, R. K. A novel fault locator base on the detection of fault generated high frequency transients. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION**, 6, 1997, Nottingham, UK. **Proceedings...**, Stevenage: IEE, 1997. p. 197-200.

CARDOSO, J-F. Eigen-structure of fourth-order cumulant tensor with application to the blind source separation problem. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING**, 1990. Albuquerque, Novo México. **Proceedings-ICASSP**. Piscataway: IEEE, 1990. v.5, p. 2655-2658.

CARDOSO, J.-F. Informax and maximum likelihood for source separation. **IEEE Letters on Signal Processing**, v. 4, n.4, p.112-114, Apr. 1997.

CHANDA, D.; KISHORE, A. K. A Wavelet multiresolution analysis for location of faults on transmission lines. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 25, n.1, p. 59-69, Jan. 2003.

CHEN, Z. et al. Wavelet transform based accurate fault location and protection technique pro cable circuits. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT, 5., 2000, Hong Kong. **Proceedings...**, 2000. p. 59-63.

CLARKE, E. **Circuit analysis of A-C power systems**. New York: John Wiley, 1943.

COURY, D. V. **Estimador ótimo aplicado à proteção dos sistemas elétricos de potência**. 1987. 138f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

COMON, P. Independent component analysis: a new concept?. **Signal Processing**, v. 36, p.287-314, 1994.

CROSSLEY, P. A.; MCLAREN, P. G. Distance protection based on travelling waves. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, n.9, p.2971-2983, Sept. 1983.

DUTTA, P. K.; DUTTAGUPTA, P. B. Novel Signal Processing Techniques for Fault Detection and Location in HV Subtransmission and Transmission Lines, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCE IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT, 2. 1993, Hong Kong. **Proceedings...**, 1993. v.2, p. 673-678.

ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKEFELLER, G. D. An accurate fault location with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, n.2, p. 424-435, Feb. 1985.

GALLE, P. F. et al. Fault location base don travelling waves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 5., 1993, New York. **Proceedings...**, 1993. p. 54-59.

GALTIER, L. R. **Localizadores digitais de faltas para linhas de transmissão de alta tensão**. 1996. 88f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

GIRGIS, A. A.; FALLON, C. M. Fault location techniques for radial and loop transmission systems using digital fault recorded data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.7, n.4, p. 1396-1945, Out.1992.

GREENWOOD, A. **Electrical transients in power systems**. New York: Wiley-Interscience, 1971.

GONG, Q. et al. A study of the accurate fault location system for transmission line using multi-terminal signals. In: IEEE POWER SOCIETY WINTER MEETING, Jan. 2000. **Proceedings...** 2000. v.4, p. 2539-2544.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e prática**. 2.ed, Porto Alegre: Bookman, 2001.

HEDMAN, D. E. **Teoria das linhas de transmissão II**. 2.ed. Santa Maria: Ed. UFSM, 1983.

HÉRAULT, J; ANS, B. Circuits neuronaux à synapses modifiables: décodage de messages composites par apprentissage non supervisé. **C.-R. de l'Académie des Sciences**, v. 299, III-13, p. 525-528, 1984.

HÉRAULT, J. ; JUTTEN, C. ; ANS, B. Détection de grandeurs primitives dans messages composite par une architecture de calcul neuromimétique en apprentissage non supervisé. **In: Actes du Xème colloque GRETSI**, pages 1017-1022, Nice, France, 1985.

HYVARINEN, A. Survey on independent component analysis. **Neural Computing Surveys**, v. 2, p. 94-128, 1999.

IBE, A.; CORY, B. J., A travelling wave-based fault locator for two-three- terminal networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. PWRD-1, n.2, p. 283-288, Apr. 1986.

JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. **IEEE Proceedings C**, v.137, n. 6, p. 395-402, Nov. 1990.

JORGE, D. C.; COURY, V.; CARVALHO, A.C. Redes Neurais Artificiais Aplicada a Localização de Faltas em linhas de Transmissão de Energia, CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAIAS, 4., 1999, São José dos Campos. **Anais...**, 1999. p. 555-999.

JUTTEN, C.; HÉRAULT, J. Blind separation of sources, part I: An adaptative algorithm based on neuromimetic architecture. **Signal Processing**, v.24, p.1-10, 1991.

JEYASURYA, B.; RAHMAN, M. A. Accurate fault location of transmission lines using microprocessors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN

POWER SYSTEM PROTECTION, 4<sup>th</sup>, 1989, Edinburgh. **IEE conference publication.** London; IEE, 1989. p. 13-17.

KALAM, A.; JOHNS, A. T. Accurate fault location technique for Multi-terminal EHV lines. In: IEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL OPERATION AND MANAGEMENT, Hong Kong. **Proceedings...**, London: IEE, 1991. p. 420-424.

LAI, L. L. et al. Fault location of a teed-network with Wavelet transform and neural networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2000, London. **Proceedings...**, Londres: IEEE, 2000. p-505-509.

LEE, H.; MOUSA, A. M. GPS Travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.11, n.3, p.1214-1223, July 1996.

LEE, T-W.; BELL, A.I.; LAMBERT, R. Blind separation of delayed and convolved sources. In: MOZER, M. C; JORDAN, M. I.; PETSCHKE, T. (Ed.). **Advances in Neural Information Processing Systems**. Cambridge: MIT Press, 1997. p. 758-764.

LEE, T-W. **Independent components analysis: Theory and Applications**, Kluwer, 1998.

LEE, T-W.; GIROLAMI, M.; SEJNOWSKI, T. J. Independent Component analysis using an extended infomax algorithm for mixed sub-gaussian and super-gaussian sources. **Neural Computation**, v. 11, n.2, p.417-441, 1999.

LIANG, J.; ELANGO VAN, S.; DEVOTTA J. B. X. Pattern Recognition Technique for Travelling wave protection. **Electric Machines and Power Systems**, v.26, p.1007-1018, 1998.

LIANG, J.; ELANGO VAN, S.; DEVOTTA, J. B. X. Application of wavelet transform in travelling wave protection. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 22, n.8, p. 537-542, Nov. 2000.

MARTI, J. R. Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-101, no.1, p. 1475-155, jan, 1982.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault Location Using Wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n.4, p. 1475-1480, Oct. 1998.

MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. **International Journal of Electrical Power and Energy System**, v.22, n.6, p.397-403, Aug. 2000.

MCKEOWN, M. et al. Blind separation of functional magnetic resonance imaging (Fmri) data. **Human Brain Mapping**, v.6, n. 5-6, 1998.

MORRISON, I. F.; YANG, Q.; GALE, P. F. Fault location on high voltage transmission lines using solid state disturbance recorders. In: IEEE/CSEE JOINT CONFERENCE ON HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION SYSTEM IN CHINA, 1987, Beijing. **Proceedings...**, New York: IEEE, 1997. p. 154-160

NAIDU, S. R. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. Campina Grande: Grafset, 1985.

NOVOSEL, D. et al. Fault location using digital relay data. **IEEE Computer Applications in Power**, v.8, n.3, p. 45-50, July 1995.

OJA, E.; KARHUNEN, J. Signal separation by nonlinear hebbian learning. In: PALANISWAMI, M., et al. (ed). **Computational Intelligence – a dynamic system perspective**, New York: IEEE Press, 1995. p. 83-97.

ONS. **Requisitos mínimos para linhas de transmissão**: Procedimentos de rede, sub-módulo 24, Brasília-DF, 2000. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. acesso em : 22 fev. 2006.

OPPENHEIN, A. V.; SHARFER; R. W. **Digital Signal Processing**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.

PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. Kr. **ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT**: version 1.0. Release n. 1.0.1. NOV. 1998.

PURUSHOTHAMA, G. K. et al. ANN applications in fault locators, **ELSEVIER Electrical Power and Energy Systems**, v.23, p.491-506, Jan. 2000.

RANJBAR, A. M.; SHIRANI, A. R.; FATHI. A new approach for location problem on power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery** v.7, n.1, p. 146-151, Jan.1992.

RICHARDS, G. G.; TAN, O. T. An accurate fault location for transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.PAS-101, n.4, p.945-949, Apr.1982.

SACHDEV, M. S.; AGGARWAL, R. Accurate fault location estimate from digital impedance relay measurements. In.: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER-SYSTEM PROTECTION, 3., 1985, London. **IEE Conference Publication**. London.: IEE, 1985. p.180-184.

STEVENSON JUNIOR, W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

SILVEIRA, P. M.; SEARA, R.; ZURN, H. H. Localização de Faltas Por Ondas Viajantes – Uma Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet, **XVI SNPTEE**, não paginado, Outubro 2001, Campinas, São Paulo-Brasil.

SHEHAB-ELDIN, E. H.; MACLAREN, P. G. Travelling Wave Distance Protection-Problem Areas e Solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.3, n.3, p. 894-902, July 1988.

SNELSON, J. K. Propagation of traveling waves on transmission lines: frequency-dependent parameters. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-91, n.1, p. 85-91, Jan. 1972.

SOARES, L. R.; CARVALHO JR., M. A.; OLIVEIRA, H. M. Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a representação wavelet multiresolução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 16., 2002, Natal. **Anais...** 2002. p. 2683-2688.

SOLLERO, R. B. et al. Localização de faltas em sistemas de transmissão a partir de sinais oscilografados em ambas as extremidades da linha. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16.,2001. Campinas. **Anais...CTEEP: EPTE**. 2001. GPC/025.

SOUSA, M. B. **Localização de faltas em linhas de média e alta tensão utilizando codificação eficiente**. 2005. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2005.

TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV Transmission lines – 1: Fourier Transformation method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n.3, p. 1316-1323, Mar. 1981a

TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV Transmission lines – 2. Laplace Transform method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-101, n.3, p.564-573, Mar. 1981.b

VITINS, M. A correlation method for transmission line protection. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-97, n.5, p. 1607-16015, Sept/Oct.1978.

WIDROW, B.; STEARNS, S. D. **Adaptative signal processing**. New Jersey: Prentice-Hall , 1985.

YIBIN, X; WAI, D. C. T.; KEERTHIPALA, W.W.L. A new techninique using wavelet analysis for fault location. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPLENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 6., 1997, Nottingham. **Proceedings...** Stevenage : IEE, 1997. p. 231-234.

## Apêndice – A: Implementação no ATP

Este apêndice tem por objetivo ilustrar outros resultados referentes a simulações sobre o sistema de transmissão de 500 kV implementado no ATP (*Alternative Transient Programs*), com o intuito de confirmar a aplicabilidade, confiabilidade e precisão do algoritmo de localização de faltas proposto.

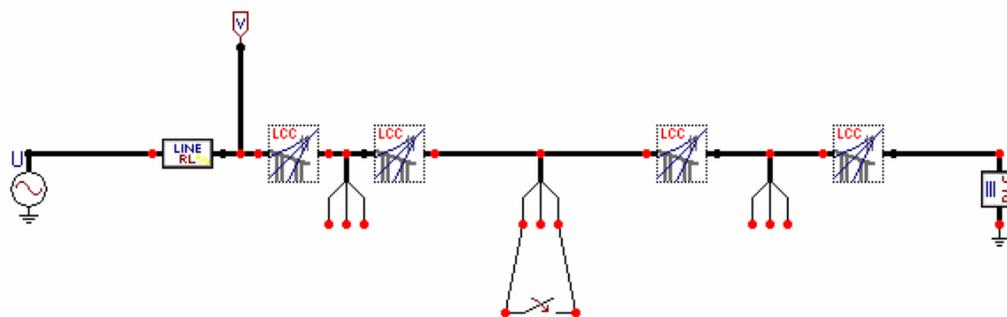


Figura 6.8 – Sistema de Transmissão modelado no programa ATP

### **Dados da Linha de transmissão para geração do arquivo de entrada da rotina LCC do ATP:**

Nome da Linha de Transmissão: Majestic-Monroe

Modelo da linha: Modelo J. Marti (modelo de linha com os seus parâmetros distribuídos variando com a frequência, adequado para estudos de transitórios).

Tensão Nominal: 500 kV

Comprimento: 200 km

Condutores-Fase:

Tipo: ACSR

Nome: Grebe (mergulhão)

Diâmetro externo: 2,563 cm

RMG: 1,018 cm

$R_{AC(100^\circ)}$ : 0,1064  $\Omega$ /km

Nº de condutores por fase: 4

Espaçamento: 45,72 cm

Vão médio: 243,8 m

Cadeia de isoladores:

Tamanho do isolador:  $5 \frac{1}{4} = 13,335$  cm

Nº de isoladores: 17

Tamanho cadeia:  $17 \times 0,013 = 2,27$  m

Condutores Pára-raios:

Número: 2

Tipo: aço galvanizado

Diâmetro externo: 0,9144 cm

RMG: 0,3317 cm

$R_{AC}$ (baixas correntes): 3,3748  $\Omega$ /km

Flexa máxima: 4,24 m

Estruturas:

Tipo: 3L1

**Rotina LCC do ATP para a configuração da Linha de transmissão:****Arquivo de entrada para Modelagem de uma Linha de 50 km:**

```

BEGIN NEW DATA CASE
JMARTI SETUP
$ERASE
LINE CONSTANTS
METRIC
  1 .364 .032404 4      4.06908 -6.3246  15.24  15.24
  1 .364 .032404 4      4.06908 -5.8674  15.24  15.24
  2 .364 .032404 4      4.06908 -0.2286  23.622  23.622
  2 .364 .032404 4      4.06908  .2286  23.622  23.622
  3 .364 .032404 4      4.06908  5.8674  15.24  15.24
  3 .364 .032404 4      4.06908  6.3246  15.24  15.24
  0 .51.621778 4      .98044-3.93192  30.02  30.02
  0 .51.621778 4      .98044 3.93192  30.02  30.02
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
  100.  .01  1      50.  0  1
  100.  60.  1      50.  0  1
  100. 5000. 1      50.  0  9 10  1 0
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
DEFAULT
$PUNCH
BLANK JMARTI
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

**Arquivo de entrada para Modelagem de uma Linha de 90 km:**

```

BEGIN NEW DATA CASE
JMARTI SETUP
$ERASE
LINE CONSTANTS
METRIC
  1 .364 .032404 4      4.06908 -6.3246  15.24  15.24
  1 .364 .032404 4      4.06908 -5.8674  15.24  15.24
  2 .364 .032404 4      4.06908 -0.2286  23.622  23.622
  2 .364 .032404 4      4.06908  .2286  23.622  23.622
  3 .364 .032404 4      4.06908  5.8674  15.24  15.24
  3 .364 .032404 4      4.06908  6.3246  15.24  15.24
  0 .51.621778 4      .98044-3.93192  30.02  30.02
  0 .51.621778 4      .98044 3.93192  30.02  30.02
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
  100.  .01  1      90.  0  1
  100.  60.  1      90.  0  1
  100. 5000. 1      90.  0  9 10  1 0
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
DEFAULT
$PUNCH
BLANK JMARTI
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

Arquivo de entrada para Modelagem de uma Linha de 150 km:

```

BEGIN NEW DATA CASE
JMARTI SETUP
$ERASE
LINE CONSTANTS
METRIC
  1 .364 .032404 4      4.06908 -6.3246  15.24  15.24
  1 .364 .032404 4      4.06908 -5.8674  15.24  15.24
  2 .364 .032404 4      4.06908 -0.2286  23.622  23.622
  2 .364 .032404 4      4.06908  .2286  23.622  23.622
  3 .364 .032404 4      4.06908  5.8674  15.24  15.24
  3 .364 .032404 4      4.06908  6.3246  15.24  15.24
  0 .51.621778 4      .98044-3.93192  30.02  30.02
  0 .51.621778 4      .98044 3.93192  30.02  30.02
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
  100.  .01  1      150.  0  1
  100.  60.  1      150.  0  1
  100. 5000. 1      150.  0 9 10 1 0
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
DEFAULT
$PUNCH
BLANK JMARTI
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

Arquivo de entrada para Modelagem de uma Linha de 200 km:

```

BEGIN NEW DATA CASE
JMARTI SETUP
$ERASE
LINE CONSTANTS
METRIC
  1 .364 .032404 4      4.06908 -6.3246  15.24  15.24
  1 .364 .032404 4      4.06908 -5.8674  15.24  15.24
  2 .364 .032404 4      4.06908 -0.2286  23.622  23.622
  2 .364 .032404 4      4.06908  .2286  23.622  23.622
  3 .364 .032404 4      4.06908  5.8674  15.24  15.24
  3 .364 .032404 4      4.06908  6.3246  15.24  15.24
  0 .51.621778 4      .98044-3.93192  30.02  30.02
  0 .51.621778 4      .98044 3.93192  30.02  30.02
BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
  100.  .01  1      200.  0  1
  100.  60.  1      200.  0  1
  100. 5000. 1      200.  0 9 10 1 0
BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
DEFAULT
$PUNCH
BLANK JMARTI
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

## Apêndice – B: Implementação da técnica ICA

Implementação do programa de localização de faltas utilizando o software Matlab:

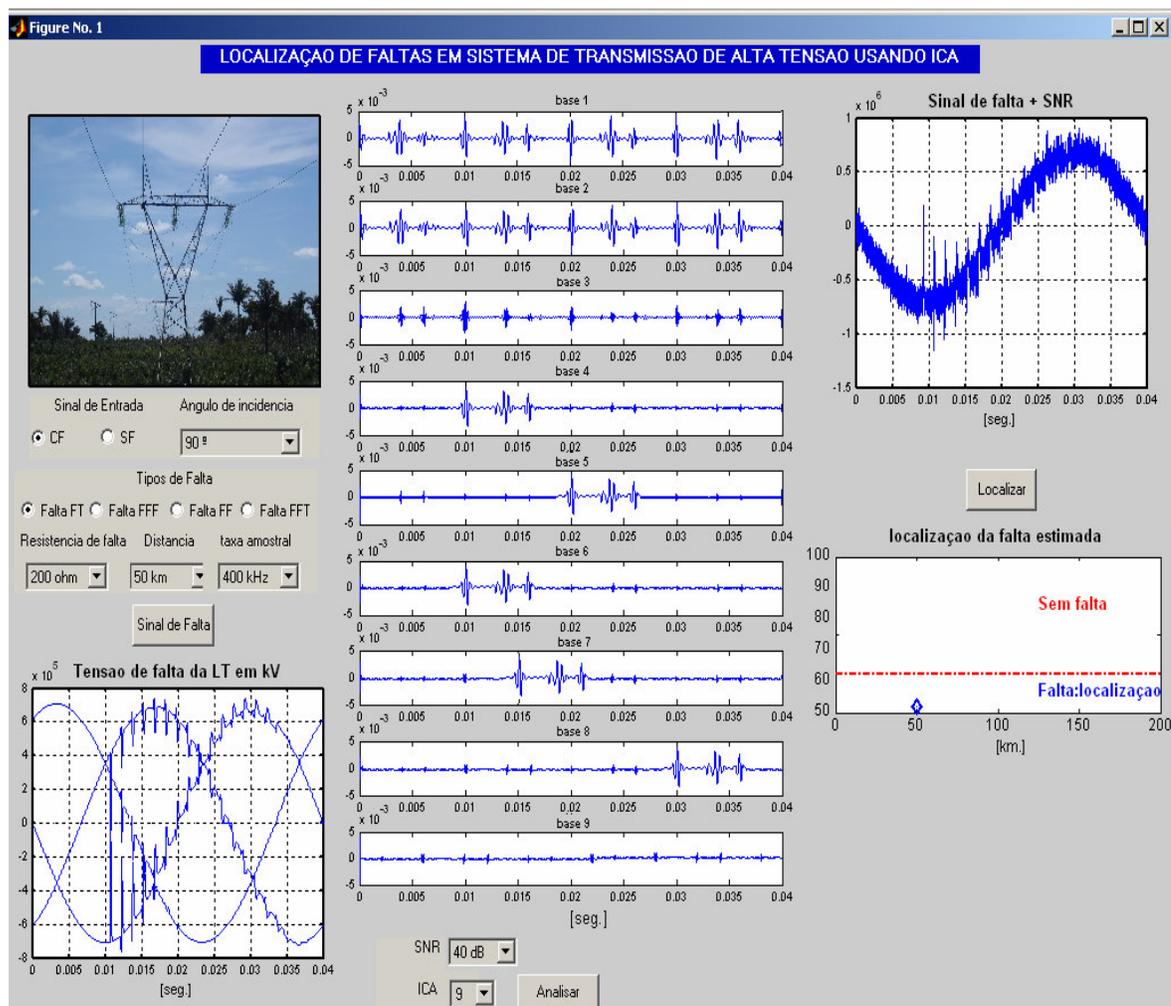


Figura 6.9 – Implementação da Técnica de ICA pelo Matlab

## Apêndice – C: Resultados Complementares

As Tabelas (7-27) ilustram os resultados obtidos pelo algoritmo em situações faltosas onde foram variados os seguintes parâmetros: distância, tipo, ângulo de incidência, resistência de falta e taxa de amostragem.

Tabela 7 – Localização de um falta bifásica (AB) a uma distância de 50 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	16	11	6	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	AB	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz	25	25	25
20dB	50	0°	AB	0 km	0 km	0 km	25	25	25
40dB	100	0°	AB	0 km	0 km	0 km	25	25	25
10dB	0	30°	AB	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
20dB	50	30°	AB	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
40dB	100	30°	AB	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
10dB	0	60°	AB	50 km	50 km	50 km	0	0	0
20dB	50	60°	AB	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	60°	AB	50 km	50 km	50 km	0	0	0
10dB	0	90°	AB	50 km	50 km	50 km	0	0	0
20dB	50	90°	AB	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	90°	AB	50 km	50 km	50 km	0	0	0
Erro médio (%)							6,500	6,375	6,281

Tabela 8 – Localização de um falta bifásica (AB) a uma distância de 90 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	16	11	6	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	AB	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				70 km	75,5 km	76 km	10	7,25	7
20dB	50	0°	AB	70 km	75,5 km	76 km	10	7,25	7
40dB	100	0°	AB	70 km	75,5 km	76 km	10	7,25	7
10dB	0	30°	AB	78 km	75 km	75 km	6	7,5	7,5
20dB	50	30°	AB	78 km	75 km	75 km	6	7,5	7,5
40dB	100	30°	AB	78 km	75 km	75 km	6	7,5	7,5
10dB	0	60°	AB	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
20dB	50	60°	AB	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
40dB	100	60°	AB	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
10dB	0	90°	AB	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	90°	AB	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	90°	AB	90 km	90 km	90 km	0	0	0
Erro médio (%)							5,875	5,312	3,875

Tabela 9 – Localização de um falta bifásica (AB) a uma distância de 150 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	16	11	6	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	AB	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
20dB	50	0°	AB	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
40dB	100	0°	AB	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
10dB	0	30°	AB	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
20dB	50	30°	AB	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
40dB	100	30°	AB	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
10dB	0	60°	AB	130 km	148 km	150 km	10	1	0
20dB	50	60°	AB	130 km	148 km	150 km	10	1	0
40dB	100	60°	AB	130 km	148 km	150 km	10	1	0
10dB	0	90°	AB	150 km	150 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	AB	150 km	150 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	AB	150 km	150 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							12,916	3,375	0,416

Tabela 10 – Localização de um falta bifásica (BC) a uma distância de 50 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	14	10	5	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	BC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
20dB	50	0°	BC	0 km	0 km	0 km	25	25	25
40dB	100	0°	BC	0 km	0 km	0 km	25	25	25
10dB	0	30°	BC	44 km	46 km	48 km	3	2	1
20dB	50	30°	BC	44 km	46 km	48 km	3	2	1
40dB	100	30°	BC	44 km	46 km	48 km	3	2	1
10dB	0	60°	BC	45 km	48 km	48,25 km	2,5	1	0,875
20dB	50	60°	BC	45 km	48 km	48,25 km	2,5	1	0,875
40dB	100	60°	BC	45 km	48 km	48,25 km	2,5	1	0,875
10dB	0	90°	BC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
20dB	50	90°	BC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	90°	BC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
Erro médio (%)							7,625	7,000	6,718

Tabela 11 – Localização de um falta bifásica (BC) a uma distância de 90 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	14	10	5	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	BC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
20dB	50	0°	BC	60,25 km	70 km	80 km	14,875	10	5
40dB	100	0°	BC	60,25 km	70 km	80 km	14,875	10	5
10dB	0	30°	BC	70 km	80,25 km	75 km	10	4,875	7,5
20dB	50	30°	BC	70 km	80,25 km	75 km	10	4,875	7,5
40dB	100	30°	BC	70 km	80,25 km	75 km	10	4,875	7,5
10dB	0	60°	BC	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
20dB	50	60°	BC	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
40dB	100	60°	BC	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
10dB	0	90°	BC	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	90°	BC	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	90°	BC	90 km	90 km	90 km	0	0	0
Erro médio (%)							8,093	5,343	3,375

Tabela 12 – Localização de um falta bifásica (BC) a uma distância de 150 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	14	10	5	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	BC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
20dB	50	0°	BC	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
40dB	100	0°	BC	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
10dB	0	30°	BC	135 km	144 km	148 km	7,5	3	1
20dB	50	30°	BC	135 km	144 km	148 km	7,5	3	1
40dB	100	30°	BC	135 km	144 km	148 km	7,5	3	1
10dB	0	60°	BC	143,55km	145km	147 km	3,225	2,5	1,5
20dB	50	60°	BC	143,55km	145 km	147 km	3,225	2,5	1,5
40dB	100	60°	BC	143,55km	145 km	147 km	3,225	2,5	1,5
10dB	0	90°	BC	150 km	148 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	BC	150 km	148 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	BC	150 km	148 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							8,931	3,250	1,375

Tabela 13 – Localização de um falta bifásica (AC) a uma distância de 50 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	15	10	7	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	AC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
20dB	50	0°	AC	0 km	0 km	0 km	25	25	25
40dB	100	0°	AC	0 km	0 km	0 km	25	25	25
10dB	0	30°	AC	47 km	48 km	49 km	1,5	1	0,5
20dB	50	30°	AC	47 km	48 km	49 km	1,5	1	0,5
40dB	100	30°	AC	47 km	48 km	49 km	1,5	1	0,5
10dB	0	60°	AC	48 km	49 km	49,25 km	1	0,5	0,375
20dB	50	60°	AC	48 km	49 km	49,25 km	1	0,5	0,375
40dB	100	60°	AC	48 km	49 km	49,25 km	1	0,5	0,375
10dB	0	90°	AC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
20dB	50	90°	AC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	90°	AC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
Erro médio (%)							6,875	6,791	6,458

Tabela 14 – Localização de um falta bifásica (AC) a uma distância de 90 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	15	10	7	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	AC	70 km	70 km	80 km	10	10	5
20dB	50	0°	AC	70 km	70 km	80 km	10	10	5
40dB	100	0°	AC	70 km	70 km	80 km	10	10	5
10dB	0	30°	AC	75 km	85 km	88 km	7,5	2,5	1
20dB	50	30°	AC	75 km	85 km	88 km	7,5	2,5	1
40dB	100	30°	AC	75 km	85 km	88 km	7,5	2,5	1
10dB	0	60°	AC	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
20dB	50	60°	AC	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
40dB	100	60°	AC	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
10dB	0	90°	AC	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	90°	AC	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	90°	AC	90 km	90 km	90 km	0	0	0
Erro médio (%)							5,625	3,750	1,750

Tabela 15 – Localização de um falta bifásica (AC) a uma distância de 150 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	15	10	7	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	AC	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
20dB	50	0°	AC	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
40dB	100	0°	AC	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
10dB	0	30°	AC	140 km	144 km	148 km	5	3	1
20dB	50	30°	AC	140 km	144 km	148 km	5	3	1
40dB	100	30°	AC	140 km	144 km	148 km	5	3	1
10dB	0	60°	AC	144 km	145 km	147 km	3	2,5	1,5
20dB	50	60°	AC	144 km	145 km	147 km	3	2,5	1,5
40dB	100	60°	AC	144 km	145 km	147 km	3	2,5	1,5
10dB	0	90°	AC	150 km	148 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	AC	150 km	148 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	AC	150 km	148 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							8,250	3,250	1,375

Tabela 16 – Localização de uma falta bifásica-terra (ABT) a uma distância de 50 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	ângulo de incidência	Tipo de falta	15	8	4	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	ABT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
20dB	50	0°	ABT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
40dB	100	0°	ABT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
10dB	0	30°	ABT	45 km	45 km	45 km	2,5	2,5	2,5
20dB	50	30°	ABT	45 km	45 km	45 km	2,5	2,5	2,5
40dB	100	30°	ABT	45 km	45 km	45 km	2,5	2,5	2,5
10dB	0	60°	ABT	49,25 km	49,25 km	49,25 km	0,375	0,375	0,375
20dB	50	60°	ABT	49,25 km	49,25 km	49,25 km	0,375	0,375	0,375
40dB	100	60°	ABT	49,25 km	49,25 km	49,25 km	0,375	0,375	0,375
10dB	0	90°	ABT	50 km	50 km	50 km	0	0	0
20dB	50	90°	ABT	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	90°	ABT	50 km	50 km	50 km	0	0	0
Erro médio (%)							6,968	6,968	6,968

Tabela 17 – Localização de uma falta bifásica-terra (ABT) a uma distância de 90 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	ângulo de incidência	Tipo de falta	15	8	4	Erro 100 kHz	Erro 200 kHz	Erro 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	ABT	70 km	75,5 km	76 km	10	7,25	7
20dB	50	0°	ABT	70 km	75,5 km	76 km	10	7,25	7
40dB	100	0°	ABT	70 km	75,5 km	76 km	10	7,25	7
10dB	0	30°	ABT	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
20dB	50	30°	ABT	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
40dB	100	30°	ABT	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
10dB	0	60°	ABT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	60°	ABT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	60°	ABT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
10dB	0	90°	ABT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	90°	ABT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	90°	ABT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
Erro médio (%)							3,750	2,437	2,000

Tabela 18 – Localização de um falta bifásica-terra (ABT) a uma distância de 150 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	15	8	4	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	ABT	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
20dB	50	0°	ABT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
40dB	100	0°	ABT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
10dB	0	30°	ABT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
20dB	50	30°	ABT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
40dB	100	30°	ABT	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
10dB	0	60°	ABT	130 km	148 km	150 km	10	1	0
20dB	50	60°	ABT	130 km	148 km	150 km	10	1	0
40dB	100	60°	ABT	130 km	148 km	150 km	10	1	0
10dB	0	90°	ABT	150 km	150 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	ABT	150 km	150 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	ABT	150 km	150 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							12,916	3,375	0,416

Tabela 19 – Localização de um falta bifásica-terra (BCT) a uma distância de 50 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	13	8	5	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	BCT	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
20dB	50	0°	BCT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
40dB	100	0°	BCT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
10dB	0	30°	BCT	41 km	41 km	41 km	4,5	4,5	4,5
20dB	50	30°	BCT	41 km	41 km	41 km	4,5	4,5	4,5
40dB	100	30°	BCT	41 km	41 km	41 km	4,5	4,5	4,5
10dB	0	60°	BCT	44 km	47 km	48 km	3	1,5	1
20dB	50	60°	BCT	44 km	47 km	48 km	3	1,5	1
40dB	100	60°	BCT	44 km	47 km	48 km	3	1,5	1
10dB	0	90°	BCT	49,25 km	50 km	50 km	0,375	0	0
20dB	50	90°	BCT	49,25 km	50 km	50 km	0,375	0	0
40dB	100	90°	BCT	49,25 km	50 km	50 km	0,375	0	0
Erro médio (%)							8,218	7,750	7,625

Tabela 20 – Localização de um falta bifásica-terra (BCT) a uma distância de 90 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	13	8	5	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	BCT	60,25km	70 km	70 km	14,875	10	10
20dB	50	0°	BCT	60,25km	70 km	70 km	14,875	10	10
40dB	100	0°	BCT	60,25km	70 km	70 km	14,875	10	10
10dB	0	30°	BCT	70 km	80,25km	75 km	10	4,875	7,5
20dB	50	30°	BCT	70 km	80,25km	75 km	10	4,875	7,5
40dB	100	30°	BCT	70 km	80,25km	75 km	10	4,875	7,5
10dB	0	60°	BCT	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
20dB	50	60°	BCT	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
40dB	100	60°	BCT	75 km	77 km	88 km	7,5	6,5	1
10dB	0	90°	BCT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	90°	BCT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	90°	BCT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
Erro médio (%)							8,093	5,343	4,625

Tabela 21 – Localização de um falta bifásica-terra (BCT) a uma distância de 150 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	13	8	5	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	BCT	100 km	135 km	135 km	25	7,5	7,5
20dB	50	0°	BCT	100 km	135 km	135 km	25	7,5	7,5
40dB	100	0°	BCT	100 km	135 km	135 km	25	7,5	7,5
10dB	0	30°	BCT	135 km	144 km	148 km	7,5	3	1
20dB	50	30°	BCT	135 km	144 km	148 km	7,5	3	1
40dB	100	30°	BCT	135 km	144 km	148 km	7,5	3	1
10dB	0	60°	BCT	143,55km	145 km	147 km	3,225	2,5	1,5
20dB	50	60°	BCT	143,55km	145 km	147 km	3,225	2,5	1,5
40dB	100	60°	BCT	143,55km	145 km	147 km	3,225	2,5	1,5
10dB	0	90°	BCT	150 km	148 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	BCT	150 km	148 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	BCT	150 km	148 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							8,931	3,250	2,500

Tabela 22 – Localização de um falta bifásica-terra (ACT) a uma distância de 50 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	ângulo de incidência	Tipo de falta	14	8	6	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	ACT	0km	0 km	0 km	25	25	25
20dB	50	0°	ACT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
40dB	100	0°	ACT	0 km	0 km	0 km	25	25	25
10dB	0	30°	ACT	45 km	47 km	49 km	2,5	1,5	0,5
20dB	50	30°	ACT	45 km	47 km	49 km	2,5	1,5	0,5
40dB	100	30°	ACT	45 km	47 km	49 km	2,5	1,5	0,5
10dB	0	60°	ACT	47 km	47,25 km	47,625km	1,5	1,375	1,1875
20dB	50	60°	ACT	47 km	47,25 km	47,625km	1,5	1,375	1,1875
40dB	100	60°	ACT	47 km	47,25 km	47,625km	1,5	1,375	1,1875
10dB	0	90°	ACT	48 km	48,25 km	50 km	1	0,875	0
20dB	50	90°	ACT	48 km	48,25 km	50 km	1	0,875	0
40dB	100	90°	ACT	48 km	48,25 km	50 km	1	0,875	0
Erro médio (%)							7,500	7,187	6,671

Tabela 23 – Localização de um falta bifásica-terra (ACT) a uma distância de 90 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	ângulo de incidência	Tipo de falta	14	8	6	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
				Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
10dB	0	0°	ACT	70 km	70 km	70 km	10	10	10
20dB	50	0°	ACT	70 km	70 km	70 km	10	10	10
40dB	100	0°	ACT	70 km	70 km	70 km	10	10	10
10dB	0	30°	ACT	75 km	80 km	85 km	7,5	5	2,5
20dB	50	30°	ACT	75 km	80 km	85 km	7,5	5	2,5
40dB	100	30°	ACT	75 km	80 km	85 km	7,5	5	2,5
10dB	0	60°	ACT	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
20dB	50	60°	ACT	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
40dB	100	60°	ACT	80 km	85 km	88 km	5	2,5	1
10dB	0	90°	ACT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
20dB	50	90°	ACT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
40dB	100	90°	ACT	90 km	90 km	90 km	0	0	0
Erro médio (%)							5,625	4,375	3,375

Tabela 24 – Localização de um falta bifásica-terra (ACT) a uma distância de 150 km

SNR	Rf (Ω)	ângulo de incidência	Tipo de falta	14	8	6	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções Bases	Funções Bases	Funções Bases			
10dB	0	0°	ACT	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
20dB	50	0°	ACT	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
40dB	100	0°	ACT	100 km	135 km	144 km	25	7,5	3
10dB	0	30°	ACT	140 km	144 km	148 km	5	3	1
20dB	50	30°	ACT	140 km	144 km	148 km	5	3	1
40dB	100	30°	ACT	140 km	144 km	148 km	5	3	1
10dB	0	60°	ACT	144 km	145 km	147 km	3	2,5	1,5
20dB	50	60°	ACT	144 km	145 km	147 km	3	2,5	1,5
40dB	100	60°	ACT	144 km	145 km	147 km	3	2,5	1,5
10dB	0	90°	ACT	150 km	148 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	ACT	150 km	148 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	ACT	150 km	148 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							8,25	3,250	1,375

Tabela 25 – Localização de um falta trifásica (ABC) a uma distância de 50 km

SNR	Rf (Ω)	Ângulo de incidência	Tipo de falta	11	7	3	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções bases	Funções bases	Funções bases			
10dB	0	0°	ABC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				45 km	46 km	47 km	2,5	2	1,5
20dB	50	0°	ABC	45 km	46 km	47 km	2,5	2	1,5
40dB	100	0°	ABC	45 km	46 km	47 km	2,5	2	1,5
10dB	0	30°	ABC	45 km	48,25 km	49 km	2,5	0,875	0,5
20dB	50	30°	ABC	45 km	48,25 km	49 km	2,5	0,875	0,5
40dB	100	30°	ABC	45 km	49 km	49 km	2,5	0,875	0,5
10dB	0	60°	ABC	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
20dB	50	60°	ABC	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
40dB	100	60°	ABC	48 km	49 km	49,75 km	1	0,5	0,125
10dB	0	90°	ABC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
20dB	50	90°	ABC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
40dB	100	90°	ABC	50 km	50 km	50 km	0	0	0
Erro médio (%)							1,500	0,843	0,531

Tabela 26 – Localização de um falta trifásica (ABC) a uma distância de 90 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	Ângulo de incidência	Tipo de falta	11	7	3	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções bases	Funções bases	Funções bases			
10dB	0	0°	ABC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				80 km	80,25 km	80,25 km	5	4,875	4,875
20dB	50	0°	ABC	80 km	80,25 km	80,25 km	5	4,875	4,875
40dB	100	0°	ABC	80 km	80,25 km	80,25 km	5	4,875	4,875
10dB	0	30°	ABC	80 km	80,5 km	88,5 km	5	4,75	0,75
20dB	50	30°	ABC	80 km	80,5 km	88,5 km	5	4,75	0,75
40dB	100	30°	ABC	80 km	80,5 km	88,5 km	5	4,75	0,75
10dB	0	60°	ABC	80 km	85 km	89,5 km	5	2,5	0,25
20dB	50	60°	ABC	80 km	85 km	89,5 km	5	2,5	0,25
40dB	100	60°	ABC	80 km	85 km	89,5 km	5	2,5	0,25
10dB	0	90°	ABC	78 km	78,75 km	90 km	6	5,625	0
20dB	50	90°	ABC	78 km	78,75 km	90 km	6	5,625	0
40dB	100	90°	ABC	78 km	78,75 km	90 km	6	5,625	0
Erro médio (%)							5,250	4,437	1,468

Tabela 27 – Localização de um falta trifásica (ABC) a uma distância de 150 km

SNR	Rf ( $\Omega$ )	Ângulo de incidência	Tipo de falta	11	7	3	Erro (%) 100 kHz	Erro (%) 200 kHz	Erro (%) 400 kHz
				Funções bases	Funções bases	Funções bases			
10dB	0	0°	ABC	Distância estimada 100 kHz	Distância estimada 200 kHz	Distância estimada 400 kHz			
				115 km	115 km	130 km	17,5	17,5	10
20dB	50	0°	ABC	115 km	115 km	130 km	17,5	17,5	10
40dB	100	0°	ABC	115 km	115 km	130 km	17,5	17,5	10
10dB	0	30°	ABC	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
20dB	50	30°	ABC	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
40dB	100	30°	ABC	100 km	135 km	148 km	25	7,5	1
10dB	0	60°	ABC	130 km	148 km	150 km	10	1	0
20dB	50	60°	ABC	130 km	148 km	150 km	10	1	0
40dB	100	60°	ABC	130 km	148 km	150 km	10	1	0
10dB	0	90°	ABC	150 km	150 km	150 km	0	0	0
20dB	50	90°	ABC	150 km	150 km	150 km	0	0	0
40dB	100	90°	ABC	150 km	150 km	150 km	0	0	0
Erro médio (%)							13,125	8,500	2,750