

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Dissertação de Mestrado

# Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes

Felipe Vigolvino Lopes

Campina Grande – Paraíba – Brasil

©Felipe Vigolvino Lopes, Março de 2011

Felipe Vigolvino Lopes

Localização de Falhas em Linhas de  
Transmissão Baseada em Ondas Viajantes

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Março de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L864l Lopes, Felipe Vigolvino.

Localização de faltas em linhas de transmissão baseada em ondas viajantes / Felipe Vigolvino Lopes. — Campina Grande, 2011.  
76 f. : il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Prof. Ph.D. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior.

1. Faltas em Linhas de Transmissão. 2. Linhas de Transmissão. 3. Localização de Faltas. 4. Transformada de Park. 5. Transitórios Eletromagnéticos. I. Título.

CDU – 621.3.015.3(043)

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA  
EM ONDAS VIAJANTES**

**FELIPE VIGOLVINO LOPES**

Dissertação Aprovada em 01.03.2011



**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Orientador



**DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG**  
Orientador



**JOSÉ JÚLIO DE ALMEIDA LINS LEITÃO, Dr., CHESF**  
Componente da Banca



**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MARÇO - 2011

*Aos meus pais, Everaldo e Helenita, que sempre me deram suporte para perserverar na busca por este sonho. Às minhas irmãs, Raquel e Camila, que sempre me apoiaram ao longo desta jornada, DEDICO.*

*Felipe Vinícius Lopes*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus acima de tudo e de todos por sempre estar presente, dando-me forças para superar os obstáculos inesperados, concedendo-me a oportunidade de concretizar mais um sonho e abençoando-me em cada fase da vida.

Além de dedicar, agradeço a toda a minha família, especialmente aos meus pais Everaldo e Helenita, e às minhas irmãs Raquel e Camila, que sempre se disponibilizaram a ajudar e sempre acreditaram em mim. Agradeço por toda paciência, incentivo e confiança.

A meu sobrinho e afilhado Guilherme, que mesmo sem saber, colaborou diretamente nos momentos difíceis com sua alegria e descontração ajudando-me a acalmar e encontrar as soluções necessárias.

Aos professores Damásio Fernandes e Washington Neves pela amizade, pela orientação e pelos ensinamentos dignos de um verdadeiro facilitador.

Aos colegas do grupo PET pela amizade e ajuda ao longo de toda graduação.

Aos funcionários da COPELE, Suênia, Ângela e Pedro.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Célio, Karcius, Wilker, Wellinsilvio, Francisco, Ana Vitória, Alana, Paulo, Nelson, Flávio e Sonaldo pela amizade e inúmeras contribuições.

A Lilian pelo companheirismo e ajuda indiscutíveis desde os tempos de graduação.

Aos meus amigos de infância Pollianderson, Mailto, Filipe, Daniel, Luciano, Marcos, Pedro, Bruno e tantos outros amigos queridos pela colaboração direta ou indireta na concretização deste sonho e pela disposição de sempre ajudar.

*Felipe Vinícius Lopes*

# Sumário

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Lista de Figuras</b>   | <b>viii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>   | <b>x</b>    |
| <b>Glossário</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>Lista de Símbolos</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>Resumo</b>   | <b>xvi</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>1. Introdução</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivação da Dissertação.....   | 2           |
| 1.2 Objetivos da Dissertação.....   | 4           |
| 1.2.1 Objetivos Gerais.....   | 4           |
| 1.2.2 Objetivos Específicos.....  | 4           |
| 1.3 Metodologia Adotada.....  | 5           |
| 1.4 Contribuições.....  | 6           |
| 1.5 Organização da Dissertação.....   | 6           |
| <b>2. Revisão Bibliográfica</b>   | <b>8</b>    |
| 2.1 GALE <i>et al.</i> (1993).....  | 9           |
| 2.2 LIN <i>et al.</i> (2008).....   | 11          |
| 2.3 GIRGIS <i>et al.</i> (1992).....  | 12          |
| 2.4 JIAN <i>et al.</i> (1998).....  | 14          |
| 2.5 COSTA <i>et al.</i> (2010).....   | 16          |
| 2.6 FENG <i>et al.</i> (2008).....  | 19          |
| 2.7 Síntese Bibliográfica.....  | 20          |
| <b>3. Fundamentação Teórica</b>   | <b>22</b>   |
| 3.1 Faltas em Linhas de Transmissão.....  | 22          |
| 3.2 Ondas Viajantes em Sistemas de Transmissão.....   | 23          |
| 3.3 Transformada de Park (Tdq0) Aplicada à Detecção de Distúrbios em<br>Sistemas de Potência..... | 26          |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. Método Proposto</b>  | <b>30</b> |
| 4.1 Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão em Análise.....   | 32        |
| 4.2 Aquisição de Dados nos Dois Terminais da Linha de Transmissão.....   | 33        |
| 4.3 Aplicação da Tdq0 e Cálculo dos Coeficientes $[c_{dif}]^2$ .....   | 35        |
| 4.3.1 Alinhamento entre o Eixo $d$ e o Eixo da Fase A e Normalização dos Sinais.....   | 36        |
| 4.3.2 Aplicação da Tdq0.....   | 38        |
| 4.3.3 Cálculo dos Coeficientes $[c_{dif}]^2$ .....   | 39        |
| 4.4 Identificação do Instante Inicial dos Transitórios.....  | 40        |
| 4.5 Cálculo da Localização da Falta.....   | 42        |
| 4.6 Implementação do Método na MODELS do ATP.....  | 44        |
| <b>5. Avaliação e Validação do Método</b>  | <b>47</b> |
| 5.1 Linhas de Transmissão com Três Torres de Transposição.....   | 48        |
| 5.2 Sistemas Elétricos Considerados.....   | 49        |
| 5.2.1 Sistema Elétrico Fictício.....   | 50        |
| 5.2.2 Sistema Interligado Nacional .....   | 51        |
| 5.3 Avaliação do Método Proposto.....  | 52        |
| 5.4 Validação do Método Proposto.....  | 54        |
| 5.5 Síntese da Avaliação e Validação do Método Proposto.....   | 61        |
| <b>6. Conclusões</b>   | <b>62</b> |
| <b>Referências Bibliográficas</b>  | <b>66</b> |
| <b>Apêndice A – Análise da Influência das Frequências de Amostragem Sobre a Precisão dos Métodos Localizadores de Faltas</b> | <b>69</b> |
| <b>Apêndice B – Dados do Sistema Elétrico Referente à Interligação Norte-Nordeste</b>  | <b>72</b> |

# Lista de Figuras

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Sistema de transmissão brasileiro – Horizonte 2012 (Fonte: ONS, 2010).....  | 2  |
| 1.2 | Indicadores de continuidade do Serviço da Rede Básica (Fonte: ONS, 2010)..  | 3  |
| 2.1 | Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.....  | 10 |
| 2.2 | Linha de transmissão monitorada em dois terminais.....  | 12 |
| 2.3 | Diferentes velocidades de propagação das ondas viajantes.....   | 15 |
| 2.4 | Diagrama de blocos da decomposição em bandas usando um banco de filtros para implementação da TWD.....  | 17 |
| 2.5 | Diagrama de blocos da decomposição em bandas usando um banco de filtros para implementação da TWDR.....   | 17 |
| 2.6 | Identificação do instante inicial dos transitórios via TWD e TWDR: (a) sinal original; (b) coeficientes <i>wavelet</i> (TWD); (c) coeficientes <i>wavelet</i> (TWDR).....   | 17 |
| 2.7 | Verificação do efeito de borda proveniente da aplicação da TWD e da TWDR na identificação de distúrbios apresentado em COSTA <i>et al.</i> (2010): (a) Sinal original; (b) coeficientes <i>wavelet</i> de detalhe obtidos via TWD; (c) coeficientes <i>wavelet</i> de detalhe obtidos via TWDR..... | 18 |
| 2.8 | Método de 3 terminais.....  | 19 |
| 3.1 | Transitórios eletromagnéticos na tensão da fase A de um sistema trifásico simulado via ATP, devido à ocorrência da falta e da posterior eliminação do defeito.....  | 23 |
| 3.2 | Elemento Incremental de uma Linha Monofásica sem Perdas.....  | 24 |
| 3.3 | Ondas progressivas e regressivas.....   | 25 |
| 3.4 | Aplicação da Transformada de Park (Tdq0): (a) transformação realizada no estudo de máquinas elétricas; (b) transformação realizada como método de detecção de distúrbios e localização de faltas.....   | 26 |
| 3.5 | Identificação do instante inicial dos transitórios a partir da aplicação da Transformada de Park (Tdq0) às tensões de um sistema de 230 kV: (a) sistema trifásico com distúrbio; (b) coeficientes da componente de eixo direto $V_d$ ; (c) coeficientes $c_{dif}$ da componente de eixo direto..... | 27 |
| 3.6 | Layout da subestação elevadora 230 kV da UTE Camaçari Muricy I.....   | 28 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.7 | Aplicação da Transformada de Park a registros oscilográficos reais:<br>(a) Registro oscilográfico da tensão trifásica no lado de alta tensão do transformador elevador; (b) Coeficientes de eixo direto $V_d$ ; (c) Coeficientes $[c_{dif}]^2$ calculados a partir dos coeficientes $V_d$ .....                    | 29 |
| 4.1 | Esquema de funcionamento para métodos localizadores de falta de dois terminais.....  | 31 |
| 4.2 | Detecção do instante inicial dos transitórios a partir dos coeficientes $[c_{dif}]^2$ obtidos via Tdq0.....  | 40 |
| 4.3 | Detecção dos instantes iniciais dos transitórios nas subestações Campina Grande II e Tacaimbó através dos coeficientes $[c_{dif}]^2$ : (a) Tensões de fase medidas na SE CGD II; (b) coeficientes $[c_{dif}]^2$ na SE CGD II; (c) Tensões de fase medidas na SE TAC; (d) coeficientes $[c_{dif}]^2$ na SE TAC..... | 41 |
| 4.4 | Comprimento da LT considerado na localização de faltas.....  | 43 |
| 4.5 | Diagrama de blocos para localização de faltas em LTs via método proposto...  | 45 |
| 5.1 | Esquema de Transposição 1/6-1/3-1/3-1/6.....   | 49 |
| 5.2 | Sistema elétrico fictício utilizado na avaliação do método proposto.....   | 50 |
| 5.3 | Mapa eletro-geográfico do sistema elétrico considerado para validação do método proposto (Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2010).....  | 51 |
| A.1 | Gráfico comparativo entre os erros (em módulo) calculados para as faltas monofásicas simuladas e os erros admissíveis para cada frequência de amostragem utilizada.....  | 71 |
| B.1 | Diagrama Unifilar de parte do SIN referente à interligação Norte-Nordeste utilizado na etapa de avaliação do método proposto (Configuração analisada para 2009).....   | 72 |

# Lista de Tabelas

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.....  | 9  |
| 2.2  | Equações propostas para cálculo da localização da falta.....   | 20 |
| 2.3  | Resumo da revisão bibliográfica referente à detecção de transitórios e localização de faltas em linhas de transmissão..... | 21 |
| 4.1  | Transformadas de Clarke e de Park.....   | 35 |
| 5.1  | Etapas de avaliação e validação do método proposto.....  | 49 |
| 5.2  | Dados de sequência da linha de transmissão.....  | 50 |
| 5.3  | Tensão das fontes ( $V_{base} = 230$ kV).....  | 50 |
| 5.4  | Impedâncias das fontes.....  | 51 |
| 5.5  | LTs reais consideradas na avaliação e validação do método proposto.....  | 52 |
| 5.6  | Dados de sequência das LTs reais consideradas na avaliação e validação do método proposto.....                             | 52 |
| 5.7  | Parâmetros variados na simulação de faltas nas LTs MIR-COL (161,0 km), e COL-RGO (379,0 km).....                           | 53 |
| 5.8  | Resultados obtidos para a LT MIR-COL.....  | 53 |
| 5.9  | Resultados obtidos para a LT COL-RGO.....  | 53 |
| 5.10 | Resultados gerais da localização de faltas nas LTs MIR-COL e COL-RGO....   | 54 |
| 5.11 | Parâmetros variados nas simulações de faltas na LT fictícia (500 km) e na LT JDM-CMD (248,4 km).....                       | 55 |
| 5.12 | Resultados obtidos para a LT fictícia perfeitamente transposta.....  | 55 |
| 5.13 | Resultados obtidos para a LT fictícia sem transposição.....  | 56 |
| 5.14 | Resultados obtidos para a LT JDM-CMD perfeitamente transposta.....   | 56 |
| 5.15 | Resultados obtidos para a LT JDM-CMD sem transposição.....   | 57 |
| 5.16 | Resultados obtidos para a LT JDM-CMD com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.....   | 57 |
| 5.17 | Resultados gerais da localização de faltas na LT fictícia.....   | 58 |
| 5.18 | Análise dos resultados não satisfatórios para LT fictícia.....   | 58 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.19 | Resultados gerais da localização de faltas na LT JDM-CMD.....  | 60 |
| 5.20 | Resultados gerais da etapa de validação do método proposto.....  | 60 |
| 5.21 | Resultados gerais das etapas de avaliação e validação do método proposto.....  | 61 |
|      |  |    |
| A.1  | Localização de Faltas monofásicas 1A-T via Tdq0 para análise da influência das frequências de amostragem sobre os métodos localizadores de faltas..... | 70 |
|      |  |    |
| B.1  | Linhas de Transmissão de 500 kV – Parâmetros Elétricos.....  | 73 |
| B.2  | Potência Nominal e Relação $X_0/X_1$ dos reatores de linha.....  | 73 |
| B.3  | Reatância dos bancos de capacitores série.....   | 74 |
| B.4  | Cargas representadas como impedâncias constantes.....  | 74 |
| B.5  | Transformadores - Impedâncias.....   | 75 |
| B.6  | Curva de saturação dos transformadores da SE Milagres.....   | 75 |
| B.7  | Curva de saturação dos transformadores da SE S. J. do Piauí.....   | 75 |
| B.8  | Curva de saturação dos transformadores da SE Itacaiúnas.....   | 75 |
| B.9  | Potência Nominal e Relação $X_0/X_1$ dos reatores de barra.....  | 76 |
| B.10 | Impedâncias equivalentes – Configuração 2009.....  | 76 |
| B.11 | Impedâncias de transferências – Configuração 2009.....   | 76 |

# Glossário

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>ATP</b>                | <i>Alternative Transients Program.</i>                       |
| <b>CAPES</b>              | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. |
| <b>CHESF</b>              | Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.                   |
| <b>COPELE</b>             | Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.         |
| <b>DIPC</b>               | Duração da Interrupção no Ponto de Controle (em horas).      |
| <b>ELETRONORTE</b>        | Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A.                   |
| <b>EMTP</b>               | <i>Electromagnetic Transients Program.</i>                   |
| <b>FIPC</b>               | Frequência da Interrupção no Ponto de Controle.              |
| <b>GPS</b>                | <i>Global Positioning System.</i>                            |
| <b>IED(s)</b>             | <i>Intelligent Electronic Device(s).</i>                     |
| <b>LT(s)</b>              | Linha(s) de Transmissão.                                     |
| <b>MATLAB<sup>®</sup></b> | <i>Matrix Laboratory</i>                                     |
| <b>ONS</b>                | Operador Nacional do Sistema Elétrico.                       |
| <b>PET</b>                | Programa de Ensino Tutorial.                                 |
| <b>RDP</b>                | Registrador Digital de Perturbações.                         |
| <b>RTDS<sup>™</sup></b>   | <i>Real Time Digital Simulator.</i>                          |
| <b>SE</b>                 | Subestação.  |
| <b>SE CGD II</b>          | Subestação Campina Grande II.                                |
| <b>SE TAC</b>             | Subestação Tacaimbó.   |
| <b>SEP</b>                | Sistema Elétrico de Potência.                                |
| <b>SIN</b>                | Sistema Interligado Nacional.                                |
| <b>Tdq0</b>               | Transformada de Park.  |
| <b>TPC</b>                | Transformador de Potencial Capacitivo.                       |
| <b>TWD</b>                | Transformada <i>Wavelet</i> Discreta.                        |
| <b>TWDR</b>               | Transformada <i>Wavelet</i> Discreta Redundante.             |
| <b>UFCG</b>               | Universidade Federal de Campina Grande.                      |
| <b>UTE</b>                | Usina Termelétrica.  |

# Lista de Símbolos

## Capítulo 2:

### Diagramas de Reflexões para métodos de 1, 2 e 3 terminais

|                |  |
|----------------|--|
| $t_{11}$       | Instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 1.                          |
| $t_{21}$       | Instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 2.                          |
| $t_{12}$       | Instante de chegada da onda refletida no ponto da falta à Barra 1.                 |
| $t_{22}$       | Instantes de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à Barra 2.             |
| $t_{23}$       | Instantes de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à Barra 2.             |
| $t_{22r}$      | Instante de chegada da onda refratada no ponto da falta à Barra 1.                 |
| $d$            | Distância da Barra 1 ao ponto de falta.  |
| $v$            | Velocidade de propagação das ondas viajantes mais rápidas.                         |
| $l$            | Comprimento da Linha.  |
| $Z_{equiv\_A}$ | Impedância equivalente de Thévenin A.  |
| $Z_{equiv\_B}$ | Impedância equivalente de Thévenin B.  |
| $Z_{equiv\_C}$ | Impedância equivalente de Thévenin C.  |
| $v_1$          | Velocidade de propagação das ondas viajantes na direção da barra 1.                |
| $v_2$          | Velocidade de propagação das ondas viajantes na direção da barra 2.                |
| $\eta$         | Coefficiente para seleção do equacionamento proposto em JIAN <i>et al.</i> (1998). |
| $L1$           | Comprimento da linha de transmissão no trecho 1.                                   |
| $L2$           | Comprimento da linha de transmissão no trecho 2.                                   |
| $d_1$          | Distância da barra 1 ao ponto da falta.  |
| $d_2$          | Distância da barra 2 ao ponto da falta.  |
| $t_1$          | Tempo de chegada da frente de onda na barra 1.                                     |
| $t_2$          | Tempo de chegada da frente de onda na barra 2.                                     |
| $t_3$          | Tempo de chegada da frente de onda na barra 3.                                     |

### Método da Correlação.

|          |   |
|----------|---|
| $R_{xy}$ | Coefficientes de correlação entre as ondas nas extremidades da linha. |
| $x$      | Onda medida na barra 1.   |
| $y$      | Onda medida na barra 2.   |
| $\tau$   | Tempo de trânsito entre a barra 1 e o ponto de falta.                 |

### **Método Baseado nas componentes de Frequência Fundamental.**

|            |  |
|------------|--|
| $V_{abc}$  | Tensão no ponto de ocorrência da falta.              |
| $V_{abc1}$ | Fasores de tensão trifásica nas barras 1.            |
| $V_{abc2}$ | Fasores de tensão trifásica nas barras 2.            |
| $I_{abc1}$ | Fasores de corrente trifásica nas barras 1.          |
| $I_{abc2}$ | Fasores de corrente trifásica nas barras 2.          |
| $Z_{abc}$  | Matriz impedância série, por unidade de comprimento; |
| $L$        | Comprimento da linha de transmissão;                 |
| $D$        | Distância entre a barra 1 e o ponto de falta.        |

### **Deteção de transitórios via Transformada *Wavelet* Discreta.**

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| $x[n]$         | n-ésima amostra do sinal digital. |
| $\downarrow 2$ | Subamostragem de 2.               |

### **Capítulo 3:**

#### **Ondas viajantes em linhas de transmissão.**

|                   |  |
|-------------------|--|
| $e(x,t)$          | Tensão no terminal local.  |
| $e(x+\Delta x,t)$ | Tensão no terminal remoto.   |
| $i(x,t)$          | Corrente no terminal local.  |
| $i(x+\Delta x,t)$ | Corrente no terminal remoto.   |
| $l$               | Indutância série da linha por unidade de comprimento (H/m).          |
| $c$               | Capacitância <i>shunt</i> da linha por unidade de comprimento (F/m). |
| $\Delta x$        | Elemento incremental de comprimento da linha.                        |
| $Z$               | Impedância característica da linha de transmissão.                   |

#### **Transformada de Park**

|               |  |
|---------------|--|
| $\omega$      | Frequência angular nominal do sistema. |
| $V_A$         | Sinal de tensão da fase A.             |
| $V_B$         | Sinal de tensão da fase B.             |
| $V_C$         | Sinal de tensão da fase C.             |
| $V_d$         | Coefficiente de eixo direto.           |
| $V_q$         | Coefficiente de eixo em quadratura.    |
| $c_{dif}$     | Coefficiente diferença.                |
| $[c_{dif}]^2$ | Quadrado do coeficiente diferença.     |

## Capítulo 4:

### Método proposto.

|                   |  |
|-------------------|--|
| $v_m$             | Velocidade de propagação das ondas do modo $m$ .   |
| $R_m$             | Resistência série do modo $m$ por unidade de comprimento.                                |
| $L_m$             | Indutância série do modo $m$ por unidade de comprimento.                                 |
| $C_m$             | Capacitância <i>shunt</i> do modo $m$ por unidade de comprimento.                        |
| $\Delta t$        | Período de amostragem dos sinais.  |
| $ e $             | Erro admissível para as localizações de faltas.  |
| $c$               | Velocidade aproximada da luz.  |
| $V_\alpha$        | Componente do modo aéreo $\alpha$ .  |
| $V_\beta$         | Componente do modo aéreo $\beta$ .   |
| $V_0$             | Componente do modo terra.  |
| $t$               | Instantes de tempo sincronizados via GPS.  |
| $\theta$          | Ângulo de fase da componente de eixo direto $V_d$ .                                      |
| $\theta_v$        | Ângulo de fase do fasor da tensão na fase A.   |
| $V$               | Tensão de pico das fases A, B e C.   |
| $t_{transitório}$ | Instante inicial dos transitórios detectados.  |
| $F_s$             | Frequência de amostragem dos sinais.   |
| $i$               | Índice da $i$ -ésima amostra dos sinais.   |
| $t_E$             | Período de tempo entre a energização e detecção da onda refletida no terminal em aberto. |
| $R$               | Resistência série da linha de transmissão.   |
| $X$               | Reatância indutiva série da linha de transmissão.  |
| $R_0$             | Resistência série de sequência zero da linha de transmissão.                             |
| $X_0$             | Reatância indutiva série de sequência zero da linha de transmissão.                      |
| $R_1$             | Resistência série de sequência positiva da linha de transmissão.                         |
| $X_1$             | Reatância indutiva série de sequência positiva da linha de transmissão.                  |
| $\omega C$        | Reatância capacitiva <i>shunt</i> da linha de transmissão.                               |

# Resumo

Neste trabalho é apresentado um método para localização de faltas em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais. O algoritmo se baseia na detecção de transitórios por meio da aplicação da Transformada de Park aos sinais de tensão capturados nos pontos monitorados da linha. Tal transformada origina um sistema referencial girante que permite o cálculo de sinais com comportamentos distintos para os casos do sistema operando normalmente e em condições de regime transitório e, conseqüentemente, torna possível a detecção de distúrbios em sistema elétricos. A avaliação e validação do método proposto são realizadas por meio de simulações digitais fazendo uso do *software* ATP. Para tanto, linhas reais e fictícias são consideradas. Utiliza-se o MATLAB<sup>®</sup> para gerar rotinas que possibilitem a realização de simulações automáticas, tornando possível avaliar e validar o método proposto por meio de grandes quantidades de simulações. Desta forma, são analisados casos com diferentes tipos/características de falta bem como é avaliada a influência de diferentes esquemas de transposição sob o procedimento de localização dos distúrbios nas linhas de transmissão em estudo. Apresentam-se resultados das localizações de faltas nas referidas linhas de transmissão sendo estes classificados como satisfatórios ou não satisfatórios dependendo dos níveis de erro verificados. As simulações digitais realizadas comprovam que a localização de faltas por meio do algoritmo proposto pode ser utilizada para diminuir o tempo de procura do defeito, uma vez que restringe bastante o campo de busca do problema e, por fornecer a localização da falta quase que imediatamente após a ocorrência do distúrbio, evita a análise pós-falta de registros oscilográficos normalmente realizada por métodos convencionais.

**Palavras-Chave:** Faltas em linhas de transmissão; linhas de transmissão; localização de faltas; transformada de Park; transitórios eletromagnéticos.

# Abstract

In this work is presented a method for fault location on transmission lines monitored in two terminals. The algorithm is based on the detection of transients through Park Transformation application on three-phase voltage signals in both ends of the line. Such transformation generates a rotating reference system that permits the calculation of signals with different behavior for the cases of the system operating normally and in transient conditions and, consequently, it is possible to detect disturbances in electrical power systems. The evaluation and validation of the proposed method are performed by means of digital simulations using the ATP software. For this purpose, real and fictitious transmission lines are considered. The MATLAB<sup>®</sup> is used to perform the simulations automatically. So, a lot of cases with different fault conditions in transmission lines with different transposition scheme are studied. Fault location results are presented and classified as satisfactory or not satisfactory depending on the value of the calculated error. Computer simulations prove that the fault location using the proposed method may decrease the search time of the fault because restricts de search field of the problem and, due to perform the fault location almost immediately after the disturbance occurrence, avoids the post-fault analysis of oscillographic records normally carried out by conventional methods.

**Keywords:** Faults on transmission lines; transmission lines; fault location; Park transformation; electromagnetic transients.

# Capítulo 1

## Introdução

Dentre os diversos componentes de um sistema elétrico de potência (SEP), as linhas de transmissão possuem papel de extrema importância, uma vez que possibilitam a interligação da geração de energia elétrica até o seu destino final - a distribuição de energia para os consumidores. Portanto, é necessário que esta transmissão de energia ocorra sob baixos níveis de perdas e apresente boa continuidade de serviço.

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por longas linhas de transmissão que além de ligar as unidades geradoras aos grandes centros consumidores também interligam os sistemas elétricos das diferentes regiões do país. O sistema de transmissão da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), por exemplo, é composto, em boa parte, por linhas aéreas longas. Segundo dados do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), o sistema de transmissão nacional (englobando linhas de transmissão com tensão nominal de 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 600 kV CC e 750 kV) somará até o início de 2012 mais de 90.000 km de extensão. Tal dado evidencia ainda mais a importância e forte presença das linhas de transmissão nos sistemas de energia elétrica. Na Figura 1.1 é apresentada a distribuição espacial do sistema de transmissão brasileiro.

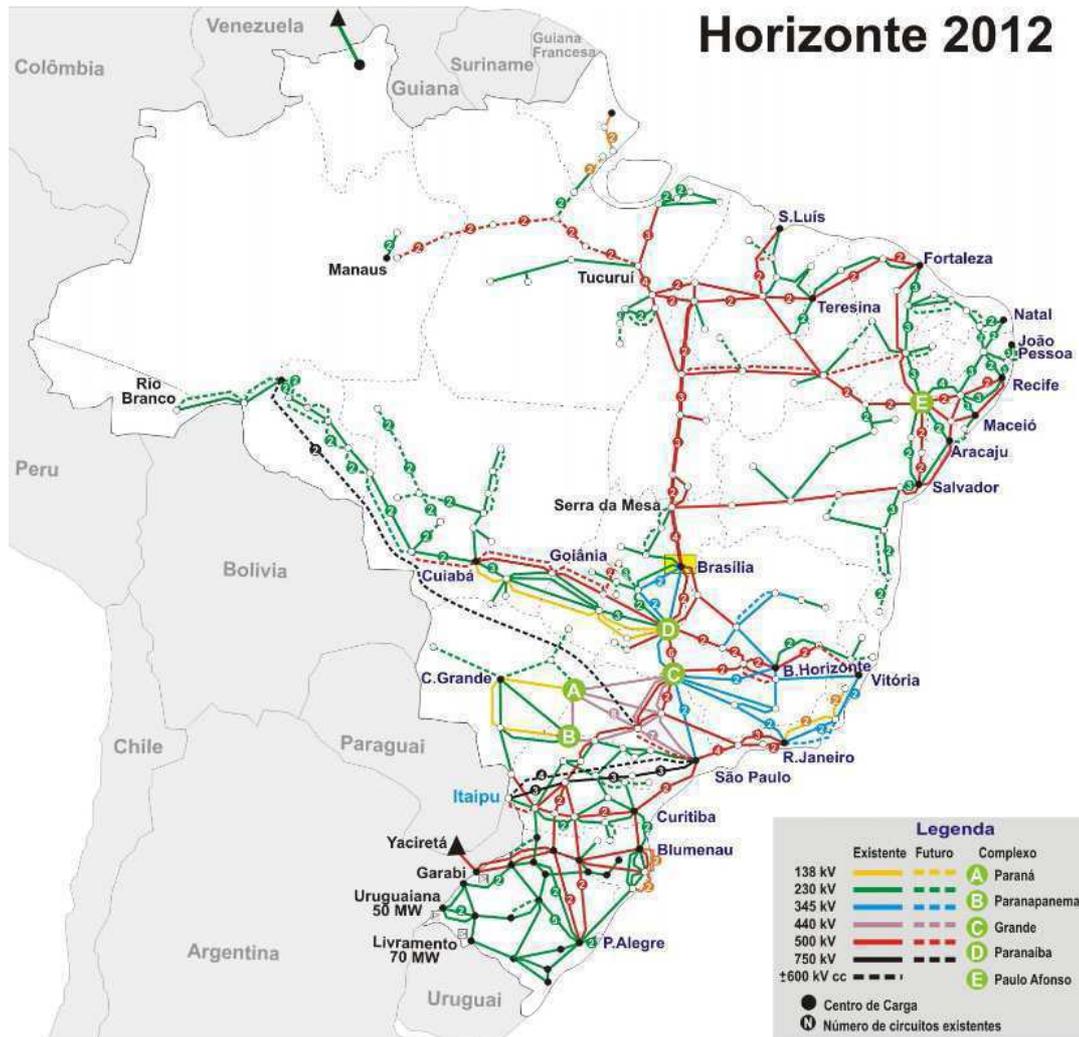


Figura 1.1 – Sistema de transmissão brasileiro – Horizonte 2012 (Fonte: ONS, 2010).

Por terem grandes extensões, as linhas de transmissão apresentam maior susceptibilidade a distúrbios provenientes da ação dos ventos, chuvas, descargas atmosféricas, entre outros. Evidentemente, a realização de um diagnóstico rápido e preciso de defeitos ocorridos no sistema de transmissão é de fundamental importância para o seu pronto restabelecimento. Neste contexto, percebe-se que a aplicação de métodos eficientes para localização de faltas se torna cada vez mais essencial, pois podem evitar interrupções de fornecimento de energia de longa duração, assegurando, conseqüentemente, boas taxas de continuidade de serviço e uma restauração rápida da linha com defeito.

## 1.1 Motivação da Dissertação

Ao longo dos anos, o desenvolvimento de técnicas capazes de fornecer a localização de faltas em linhas de transmissão tem proporcionado uma considerável

melhoria nas taxas de continuidade de serviço do sistema elétrico brasileiro, conforme apresentado na Figura 1.2.

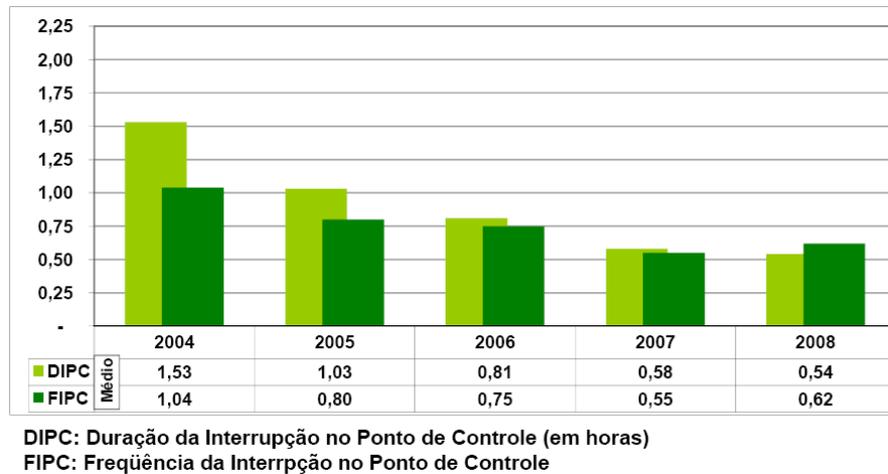


Figura 1.2 - Indicadores de continuidade do Serviço da Rede Básica (Fonte: ONS, 2010).

Segundo o ONS, Ponto de Controle é a instalação ou conjunto de instalações da rede básica que fazem fronteira com os agentes da geração, da distribuição, consumidores e demais instalações de transmissão. Então, analisando o sistema de transmissão brasileiro em todos os níveis de tensão no período de 2004 a 2008, percebe-se que o DIPC (Duração da Interrupção no Ponto de Controle) diminuiu bastante. Mesmo assim, a busca contínua por menores DPIC vem motivando cada vez mais a pesquisa e estudos de novas técnicas que possibilitem a localização de faltas de forma simples, confiável e precisa.

O estudo e implementação de localizadores de faltas tem sido considerado, nas últimas décadas, uma linha de pesquisa que vem crescendo na área da engenharia elétrica. Na literatura, são propostos diversos métodos para localização de faltas dentre os quais se destacam os algoritmos baseados na medição de impedância (WISZNIEWSKI *et al.*, 1983; ZHENG *et al.*, 2008), os algoritmos baseados nos perfis de tensão (ZAMORA *et al.*, 1996), os algoritmos baseados nos parâmetros de linha (GOPALAKRISHNAN *et al.*, 2000) e, destacados como mais eficientes e precisos, os algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes (GALE *et al.*, 1993; JAMALI; GHEZELJEH, 2003; LIN *et al.*, 2008), os quais serão considerados ao longo do presente trabalho. Para este último método, existe a necessidade de altas taxas de amostragem, fato este que é visto como uma limitação destes algoritmos. Porém, testes recentes comprovam que, com o avanço dos RDP (Registradores Digitais de Perturbações), o uso das ondas viajantes na localização de faltas pode apresentar boa precisão e confiabilidade. Portanto, a localização de faltas vem sendo considerada um

tema atual e, no âmbito do diagnóstico de distúrbios, de fundamental importância para a continuidade de serviço dos sistemas elétricos. Desta forma, diante da necessidade da restauração rápida das linhas de transmissão em situações de ocorrência de faltas, propõe-se neste trabalho um algoritmo baseado na teoria de ondas viajantes para localização de faltas em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Os objetivos dessa dissertação podem ser subdivididos em objetivos gerais e objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Como objetivos gerais tem-se a elaboração e implementação, em *software*, de um algoritmo capaz de realizar a localização de faltas em linhas de transmissão, sendo este baseado na teoria de ondas viajantes, de forma que para seu correto funcionamento seja necessária apenas a análise dos sinais de tensão sincronizados capturados nas duas extremidades da linha em questão.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar o estado da arte da localização de faltas em linhas de transmissão via algoritmos baseados em ondas viajantes;
- Desenvolver um algoritmo para localização de faltas aplicável em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais;
- Utilizar a linguagem MODELS (DUBE, 1996) do ATP - *Alternative Transients Program* (LEUVEN EMTP CENTER, 1987) para incorporar as rotinas desenvolvidas às simulações digitais;
- Avaliar o desempenho do método e validar o algoritmo proposto considerando diferentes situações de faltas em LTs reais variando os seguintes parâmetros:
  - ✓ Resistência de falta;
  - ✓ Ângulo de incidência da falta;

- ✓ Local de ocorrência da falta;
- ✓ Tipo da falta;
- ✓ Tipo da transposição utilizada na linha defeituosa.

### 1.3 Metodologia Adotada

O sistema localizador de faltas proposto é baseado em uma rotina de programação dividida em etapas, tais como: cálculo dos parâmetros da linha de transmissão em estudo, aquisição de dados de tensão nas extremidades da linha, filtragem dos sinais adquiridos, detecção de transitórios e, por fim, cálculo da localização da falta.

Para elaboração do algoritmo, são utilizadas, inicialmente, técnicas de programação em MATLAB<sup>®</sup> (HANSELMAN; LITTLEFIELD, 2003) e, posteriormente, na linguagem MODELS para incorporação das rotinas implementadas às simulações computacionais via ATP, através das quais será avaliada e validada a técnica para localização de faltas apresentada neste trabalho.

Para avaliação e validação da metodologia proposta, foram consideradas linhas de transmissão reais do SIN (Sistema Interligado Nacional) monitoradas em dois terminais e uma linha fictícia para avaliação do algoritmo. No total, foram analisadas quatro linhas de transmissão, dentre as quais três fazem parte dos sistemas de transmissão da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) e da ELETRONORTE. Tais linhas são relacionadas a seguir:

➤ Etapa de Avaliação:

- ✓ LT Miracema – Colinas, 500 kV, 161 km (ELETRONORTE);
- ✓ LT Ribeiro Gonçalves – Colinas, 500 kV, 379 km (ELETRONORTE);

➤ Etapa de Validação:

- ✓ LT 230 kV, 500 km (Sistema Fictício);
- ✓ LT 500 kV Jardim – Camaçari, 249 km (CHESF);

Visando validar o método proposto de forma confiável, foram utilizadas rotinas implementadas no ambiente MATLAB<sup>®</sup> que possibilitaram a realização automática de simulações via ATP bem como da aquisição dos resultados dos diversos casos de

localização das faltas simuladas. Tais rotinas tiveram como objetivo gerar vários casos de faltas em LTs modeladas no ATP bem como elaborar um arquivo executável para chamada das simulações. Desta forma, tornou-se possível a realização de simulações em grandes quantidades, possibilitando uma melhor avaliação do algoritmo, dando suporte para um tratamento estatístico confiável e, conseqüentemente, tornando possível a realização de uma validação robusta do método proposto para localização de faltas.

## **1.4 Contribuições**

As contribuições diretas desse trabalho estão relacionadas com:

1. Desenvolvimento de um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão, monitoradas em dois terminais, baseada em ondas viajantes;
2. Elaboração de rotinas, na linguagem MODELS do ATP, com o objetivo de implementar o algoritmo proposto para localização de faltas, utilizando apenas amostras atuais do sistema monitorado e, conseqüentemente, possibilitando o funcionamento do algoritmo em tempo de execução das simulações.

Pode-se dizer que, de uma forma geral, a contribuição deste trabalho está na elaboração de um algoritmo para localização de faltas que apresenta implementação simples, boa precisão e que possibilita o cálculo da localização da falta quase imediatamente após a ocorrência do distúrbio. Desta forma, o procedimento de localização do defeito se torna mais rápido e automático, fazendo desnecessária, para localização do problema, a análise pós-falta de registros oscilográficos, evitando interrupções de fornecimento de energia de longa duração e, conseqüentemente, melhorando os indicadores de continuidade de serviço da rede básica.

## **1.5 Organização da Dissertação**

No intuito de alcançar os objetivos propostos, além deste capítulo introdutório, esta dissertação está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica das publicações mais significativas do tema a ser desenvolvido, onde são abordadas características de métodos utilizados no âmbito da localização de faltas em linhas de transmissão.

A fundamentação teórica da localização de faltas baseada em ondas viajantes é apresentada no capítulo 3. Os conceitos fundamentais sobre ondas viajantes em linhas de transmissão provenientes de faltas e sobre o método proposto para detecção de transitórios são apresentados.

No capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento da técnica proposta para detecção de transitórios e, conseqüentemente, a elaboração do algoritmo para localização de faltas em LTs.

Em seguida, são apresentados no capítulo 5 os resultados da avaliação e validação do método proposto. Conforme mencionado na metodologia adotada, linhas de transmissão reais e fictícias foram consideradas para a realização dos estudos de caso. São apresentados dados estatísticos dos resultados obtidos, evidenciando os fatores de maior influência no método e explicitando em quais situações a localização de faltas, por meio do método proposto, se torna crítica e apresenta maiores erros.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões da dissertação e propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Por muito tempo, localizar faltas tem sido uma tarefa considerada complicada devido à longa extensão das linhas de transmissão. Em geral, são utilizados helicópteros ou carros na identificação do local do defeito, procedimento este considerado lento.

Nos últimos anos, com o avanço dos dispositivos registradores digitais de perturbações (RDP), a possibilidade de utilizar os próprios transitórios eletromagnéticos de tensão e/ou corrente provenientes da falta para detecção e localização do defeito tornou o estudo da teoria de ondas viajantes um tema importante na área de transitórios eletromagnéticos (DOMMEL; MICHELS, 1978; DOMMEL, 1996). Basicamente, os sistemas localizadores de faltas baseados na teoria de ondas viajantes detectam o início dos transitórios em pontos específicos do sistema em análise. Para tanto são utilizadas técnicas de processamento de sinais no intuito de possibilitar a filtragem dos sinais de forma adequada (COSTA *et al.*, 2010; LOPES *et al.*, 2010). Os métodos para localização de faltas mais conhecidos, sejam eles baseados em componentes de alta frequência ou de frequência fundamental, realizam o monitoramento de um, dois ou três terminais. Os algoritmos baseados nos sinais transitórios de mais de um terminal são considerados mais confiáveis e fazem necessária a utilização do GPS (*Global Positioning System*) para sincronização dos dados. Dentre as metodologias adotadas mais famosas, destacam-se as

técnicas de localização temporal de distúrbios por meio da transformada *wavelet* bem como através da análise da correlação entre sinais transitórios. Vale salientar que os métodos de localização de faltas baseados no cálculo da impedância da linha ainda são largamente utilizados, mas as fontes de erro tradicionais a estas técnicas são consideradas mais impactantes sobre a precisão da localização da falta do que as fontes de erro dos métodos baseados em componentes de alta frequência (MOUTINHO *et al.*, 2010).

## 2.1 GALE *et al.* (1993)

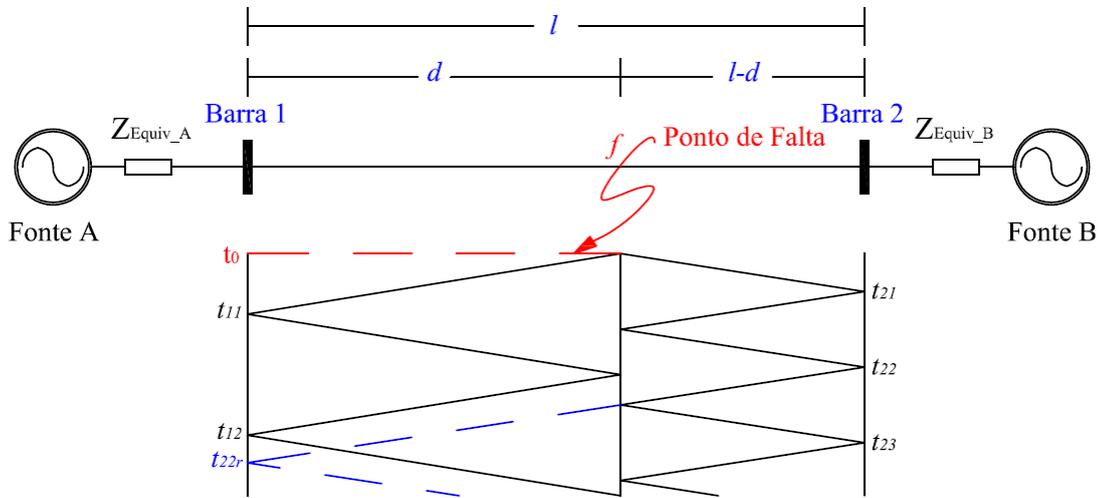
GALE *et al.* (1993) relacionam diversas formas de localizar faltas em linhas de transmissão. Considerando as características destes métodos, eles os classificam em quatro diferentes grupos denominados A, B, C e D. Dentre as características consideradas na classificação, se destacam o número de terminais monitorados, a utilização de pulsos elétricos e a utilização de ondas refletidas em um mesmo terminal. Conforme apresentado na Tabela 2.1, métodos dos tipos A e C monitoram um terminal, utilizam ondas refletidas e divergem apenas na utilização de pulsos. Já os métodos dos tipos B e D monitoram dois terminais e divergem na utilização de pulsos e de ondas refletidas.

Segundo GALE *et al.* (1993), métodos de um terminal, apesar de evitar a utilização de GPS para sincronizar as leituras de tensão e/ou corrente dos terminais monitorados, são métodos mais complexos e mais susceptíveis a erros, uma vez que utilizam ondas refletidas no cálculo da localização da falta. Existem situações, por exemplo, em que ondas refletidas no terminal oposto ao terminal monitorado são confundidas com as ondas refletidas no ponto de ocorrência da falta. Nestes casos, são comuns erros na identificação do instante de chegada das ondas viajantes no terminal monitorado, pois ondas refletidas em outros pontos do sistema podem ser erroneamente detectadas dificultando o cálculo da localização do defeito e promovendo maiores erros nos diagnósticos realizados.

**Tabela 2.1 – Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.**

| Tipo do Método | Características | Utiliza Pulsos Elétricos | Número de Terminais Utilizados |   | Utiliza ondas refletidas |
|----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------------|---|--------------------------|
|                |                 |                          | 1                              | 2 |                          |
| TIPO A         |                 |                          | √                              |   | √                        |
| TIPO B         |                 | √                        |                                | √ | √                        |
| TIPO C         |                 | √                        | √                              |   | √                        |
| TIPO D         |                 |                          |                                | √ |                          |

Na Figura 2.1 é apresentado o diagrama de reflexões no qual é ilustrada a propagação das ondas viajantes na ocorrência de uma falta em uma determinada LT.



**Figura 2.1 – Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.**

- Onde:
- $t_{11}$  = Instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 1;
  - $t_{21}$  = Instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 2;
  - $t_{12}$  = Instante de chegada da onda refletida no ponto da falta à Barra 1;
  - $t_{22}$  e  $t_{23}$  = Instantes de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à Barra 2;
  - $t_{22r}$  = Instante de chegada da onda refratada no ponto da falta à Barra 1.

Sendo  $v$  a velocidade de propagação das ondas viajantes, a distância entre a barra 1 e o ponto  $f$  de ocorrência da falta, para métodos de um terminal, é dada por:

$$d = \frac{(t_{12} - t_{11}) \cdot v}{2}. \quad (2.1)$$

Percebe-se que o instante  $t_{12}$  pode ser facilmente confundido com o instante  $t_{22r}$  referente à onda viajante refletida na barra 2 e refratada no local da falta. Já o princípio de operação dos métodos tipo D (dois terminais) é bastante simples e permite uma detecção mais confiável dos transitórios de interesse. Neste caso, não são utilizadas ondas refletidas e, portanto, os instantes iniciais dos transitórios são considerados iguais aos instantes de chegada das primeiras ondas incidentes nas barras 1 e 2, ou seja,  $t_{11}$  e  $t_{21}$ , respectivamente. Então, para este método, considerando uma velocidade de propagação  $v$  e o comprimento  $l$  da linha, a distância entre a barra 1 e o ponto  $f$  pode ser calculada a partir da equação 2.2.

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2}. \quad (2.2)$$

Percebe-se que métodos de dois terminais – tipo D – são mais robustos e menos susceptíveis a erros. De fato, mesmo fazendo necessária a utilização de GPS, é possível verificar que estes métodos são mais adequados para localização de faltas, pois permitem uma identificação mais confiável dos instantes iniciais dos transitórios nas extremidades da linha independente da reflexão e/ou refração de ondas viajantes em outros pontos do sistema.

## 2.2 LIN *et al.* (2008)

LIN *et al.* (2008) utilizam os conceitos de correlação verificados na teoria da probabilidade e estatística na localização de faltas. Basicamente, propõe-se no trabalho a utilização dos coeficientes de correlação entre os sinais de tensão nos dois terminais monitorados da linha a partir da equação 2.3 a seguir.

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau)dt . \quad (2.3)$$

Onde:  $R_{xy}(\tau)$  = Coeficientes de correlação;

$x(t)$  e  $y(t)$  = Ondas medidas nas barras 1 e 2, respectivamente;

$\tau$  = Tempo de trânsito entre a barra 1 e o ponto  $f$  da falta.

Na literatura, correlação é um indicador da força e direção da relação entre duas variáveis aleatórias. Desta forma, o algoritmo proposto em LIN *et al.* (2008) se baseia na identificação dos instantes iniciais dos transitórios nas extremidades da linha a partir das características do pico da curva dos coeficientes de correlação calculados. Portanto, considerando que as leituras dos sinais analisados estejam sincronizadas via GPS, LIN *et al.* (2008) propõem que o período  $(t_{11} - t_{21})$  necessário para calcular o local da falta segundo a equação 2.2 pode ser obtido através da diferença entre os tempos de ocorrência de um terço do valor de pico de  $R_{xy}$  (na borda de subida) e da metade do valor de pico de  $R_{xy}$  (na borda de descida), conforme apresentado na equação 2.4. Calculada esta constante de tempo, estima-se o local da falta através da equação 2.2.

$$\tau = (t_{11} - t_{21}) = \left[ t \Big|_{R_{xy}=(1/3)MAX(R_{xy}) \rightarrow Subida} \right] - \left[ t \Big|_{R_{xy}=(1/2)MAX(R_{xy}) \rightarrow Descida} \right]. \quad (2.4)$$

A elaboração do método da correlação foi motivada pelo fato de que a identificação dos instantes iniciais dos transitórios pode ser dificultada pela existência de ruídos no sistema. Desta forma, o método da correlação foi proposto como técnica alternativa, para localização de faltas, menos sensível a ruídos. Porém, este algoritmo se mostra menos preciso que os métodos convencionais, pois não apresenta boa precisão na determinação dos instantes iniciais dos transitórios nas barras monitoradas devido ao fato de determinar empiricamente a constante de tempo  $\tau$  utilizada na localização da falta.

### 2.3 GIRGIS *et al.* (1992)

GIRGIS *et al.* (1992) propõem um conjunto de equações que dão suporte para localização em faltas em linhas de transmissão por meio da análise de componentes de frequência fundamental. Basicamente, o trabalho apresenta um algoritmo que utiliza fasores fundamentais de tensão e corrente para determinar o ponto de ocorrência da falta em estudo. Dentre as considerações apresentadas no trabalho de GIRGIS *et al.* (1992), destacam-se as abordagens para casos de localização de faltas usando dados sincronizados e não sincronizados. Na falta de sincronismo entre os dados, é proposto um processo iterativo que tem como objetivo final a obtenção do ponto de ocorrência da falta bem como do ângulo de sincronização entre a barra de referência e as demais barras do sistema.

Considerando que neste trabalho de dissertação será abordada a localização de faltas por meio de métodos de dois terminais a partir de dados sincronizados, será apresentado nesta revisão bibliográfica apenas o equacionamento proposto por GIRGIS *et al.* (1992) referente à localização de faltas em linhas monitoradas em dois terminais para dados sincronizados. O sistema considerado em GIRGIS *et al.* (1992) para tal aplicação é apresentado na Figura 2.2, a seguir.

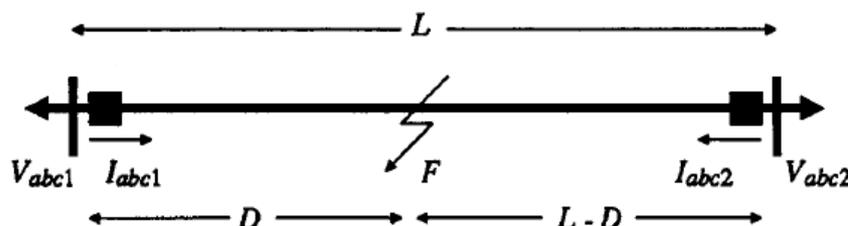


Figura 2.2 – Linha de transmissão monitorada em dois terminais.

Considerando os fasores de tensão e corrente nas barras 1 e 2 calculados a partir de dados sincronizados coletados em ambas as extremidades da linha, propõe-se que a

localização de faltas seja realizada a partir do procedimento apresentado nas equações de 2.5 a 2.10 evidenciadas a seguir.

$$VF_{abc} = V_{abc1} - D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \quad (2.5)$$

$$VF_{abc} = V_{abc2} - (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \quad (2.6)$$

Onde:  $VF_{abc}$  = Tensão no ponto de ocorrência da falta;  
 $V_{abc1}$  e  $V_{abc2}$  = Fasores de tensão trifásica nas barras 1 e 2, respectivamente;  
 $I_{abc1}$  e  $I_{abc2}$  = Fasores de corrente trifásica nas barras 1 e 2, respectivamente;  
 $Z_{abc}$  = Matriz impedância série, por unidade de comprimento;  
 $L$  = Comprimento da linha de transmissão;  
 $D$  = Distância entre a barra 1 e o ponto de falta.

Então, considerando a igualdade entre as equações 2.5 e 2.6, obtém-se que:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} = D \cdot Z_{abc} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2}). \quad (2.7)$$

Analisando, então, as três fases do sistema, é obtido o equacionamento final para localização de faltas composto pelas expressões 2.8, 2.9 e 2.10.

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \text{ ou } Y = M \cdot D, \quad (2.8)$$

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + L \cdot \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji} \cdot I_{i2}), \quad (2.9)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot (I_{i1} + I_{i2}); \quad j = a, b, c. \quad (2.10)$$

Desta forma, das equações apresentadas, percebe-se a existência de uma incógnita ( $D \rightarrow$  distância da barra 1 ao ponto de falta) e três equações complexas (ou seis equações reais). Segundo GIRGIS *et al.* (1992), o ponto de ocorrência da falta pode ser determinado por meio da solução da expressão 2.8 fazendo uso do método dos mínimos quadrados. A referida solução é apresentada na equação 2.11.

$$D = (M^+ \cdot M)^{-1} \cdot M^+ \cdot Y. \quad (2.11)$$

Onde  $M^+$  é a matriz transposta conjugada da matriz  $M$ .

Considerando, portanto, os procedimentos apresentados, percebe-se que o método proposto por GIRGIS *et al.* (1992) é aplicável em linhas monitoradas em dois e três terminais, sendo uma técnica independente do tipo de falta e, portanto, considerada generalista. O trabalho ainda apresenta resultados que atestam que os maiores erros verificados são relacionados a casos de faltas muito próximas às barras monitoradas bem como em casos de faltas de baixa impedância. Tal fato é considerado ponto negativo do algoritmo uma vez que, em boa parte das faltas em linhas de transmissão longas, as faltas se dão em condições de baixa impedância. Vale salientar também que o método em questão apresenta uma considerável complexidade de implementação, pois utiliza equações complexas além de possuir, como etapa do algoritmo, a necessidade de realizar a estimação fasorial tanto das tensões como das correntes nos terminais monitorados. Esta característica torna os procedimentos computacionais mais complexos e torna o algoritmo mais susceptível a erros devido ao grande número de variáveis envolvidas.

## 2.4 JIAN *et al.* (1998)

Segundo JIAN *et al.* (1998), o maior problema a ser solucionado pelos algoritmos baseados na teoria de ondas viajantes é a determinação do tempo de chegada das frentes de onda às barras monitoradas. Outro desafio é determinar da forma mais precisa possível a velocidade de propagação de tais ondas. Tanto os instantes iniciais dos transitórios como a velocidade de propagação das ondas são variáveis que influenciam diretamente na precisão dos métodos localizadores de faltas do tipo D propostos em GALE *et al.* (1993).

JIAN *et al.* (1998) afirmam que, na ocorrência de uma falta, as ondas viajantes que se propagam para ambos os terminais da linha apresentam componentes de frequência dominantes diferentes entre si. Tais componentes dependem tanto do ponto da falta como do tipo de falta. Diante de tal fato, ondas transitórias que se propagam em direções opostas numa linha de transmissão podem apresentar velocidades de propagação diferentes.

Na Figura 2.3 é ilustrada a propagação das ondas viajantes sob diferentes velocidades. Neste caso,  $v_1$  e  $v_2$  são velocidades de propagação diferentes que dependem da frequência dominante do sinal transitório capturado em cada um dos terminais

monitorados. A maioria dos métodos existentes utiliza velocidades de propagação iguais (ou aproximadamente) à velocidade da luz, porém, estudos mostram que esta aproximação proporciona maiores índices de erro na localização de faltas.

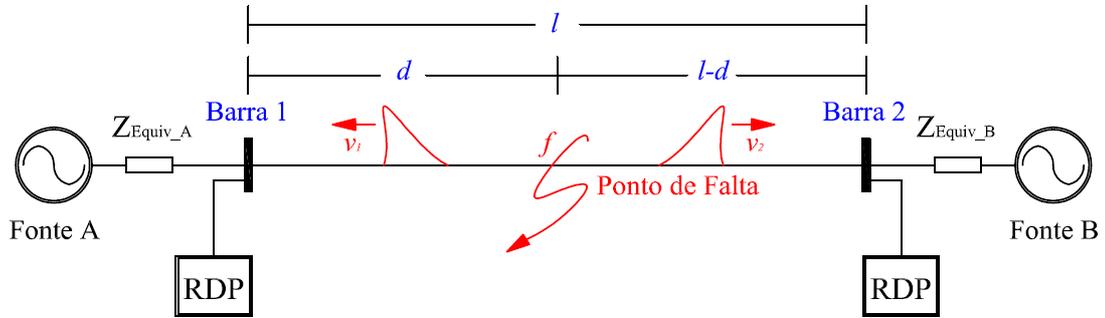


Figura 2.3 – Diferentes velocidades de propagação das ondas viajantes.

JIAN *et al.* (1998) propõem a determinação das velocidades de propagação das ondas viajantes antes do cálculo da localização da falta. Para tanto, realiza-se uma análise espectral dos sinais coletados nas extremidades da linha no intuito de identificar as suas respectivas frequências dominantes. Segundo os autores, a melhoria da precisão da localização de faltas através do método proposto é mais evidente para casos em que a falta ocorre em locais próximos às extremidades da linha. A ocorrência de faltas nestas regiões é detectada a partir da análise dos valores assumidos pelo coeficiente  $\eta$ . Então, sendo  $l$  o comprimento da linha,  $v$  a velocidade de propagação das ondas mais rápidas,  $t_1$  e  $t_2$  os instantes de chegada das ondas viajantes às barras 1 e 2 respectivamente,  $v_1$  e  $v_2$  as velocidades de propagação das ondas que se propagam em direção às barras 1 e 2, respectivamente, e  $d$  a distância da barra 1 ao ponto  $f$  da falta, são propostas as equações apresentadas a seguir.

$$\eta = \frac{|t_2 - t_1|}{l} \cdot v_c, \quad (2.12)$$

$$se: \eta = grande \Rightarrow d = \frac{v_1 v_2 \cdot (t_1 - t_2) + v_1 l}{v_1 + v_2}, \quad (2.13a)$$

$$se: \eta = pequeno \Rightarrow d = \frac{v \cdot (t_1 - t_2) + l}{2}. \quad (2.13b)$$

Pode-se afirmar que o trabalho apresenta considerações importantes a respeito da propagação de ondas viajantes em linhas de transmissão. De fato, o método proposto em JIAN *et al.* (1998) pode melhorar a precisão da localização de faltas já que realmente

existe a influência das frequências dominantes dos sinais transitórios sobre as velocidades de propagação das ondas. A análise espectral dos sinais é bastante utilizada em aplicações *off-line* nas quais são tomados os registros oscilográficos por completo até instantes próximos ao da extinção da falta, porém, para localização de faltas em tempo real, tal análise é dificultada pelo não conhecimento do registro oscilográfico completo. Assim, visando uma futura aplicação do método em tempo real, a referida análise espectral não será considerada.

## 2.5 COSTA *et al.* (2010)

COSTA *et al.* (2010) trabalharam com a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) como ferramenta de suporte ao diagnóstico de distúrbios em sistemas de potência e utilizaram, para esta aplicação, a Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR) como uma variante melhorada da TWD clássica. Por permitir a análise de um determinado sinal em diferentes níveis de resolução no tempo e frequência, a TWD supera algumas limitações verificadas em métodos convencionais como, por exemplo, a transformada de Fourier. Sendo assim, para análise de distúrbios em sistemas elétricos de potência, a TWD tem se mostrado ao longo dos anos bastante útil na detecção e localização de transitórios.

Basicamente, as transformadas TWD e TWDR são implementadas a partir do uso de bancos de filtros passa-altas e passa-baixas. A diferença básica entre as duas técnicas é que a TWD realiza um processo de subamostragem, o qual não é realizado pela TWDR. O cálculo dos coeficientes *wavelet* a partir da decomposição de sinais via TWD e TWDR é ilustrado nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente.

Devido ao procedimento de subamostragem de 2, o número de amostras do sinal formado pelos coeficientes *wavelet*, utilizados na análise de distúrbios, é igual à metade do número de amostras do sinal original. Tal fato implica num aumento do espaçamento entre as amostras dos coeficientes *wavelet* e torna a TWD dependente do número de amostras do sinal original o qual deve ser igual a uma potência de dois ( $2^n$ ). Segundo COSTA *et al.* (2010), o processo de subamostragem pode comprometer o uso da TWD na localização de faltas e, portanto, utilizam a TWDR como técnica mais adequada para esta aplicação.

A detecção de transitórios via TWD e TWDR é realizada através dos chamados coeficientes *wavelet* de detalhe, os quais têm amplitude aproximadamente nula para regime

permanente e valores diferentes de zero para casos de transitórios, conforme apresentado na Figura 2.6.

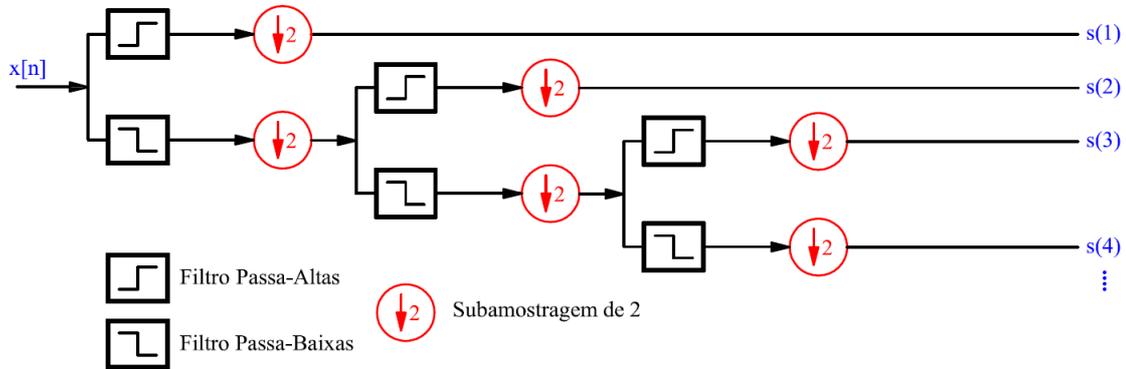


Figura 2.4 – Diagrama de blocos da decomposição em bandas usando um banco de filtros para implementação da TWD.

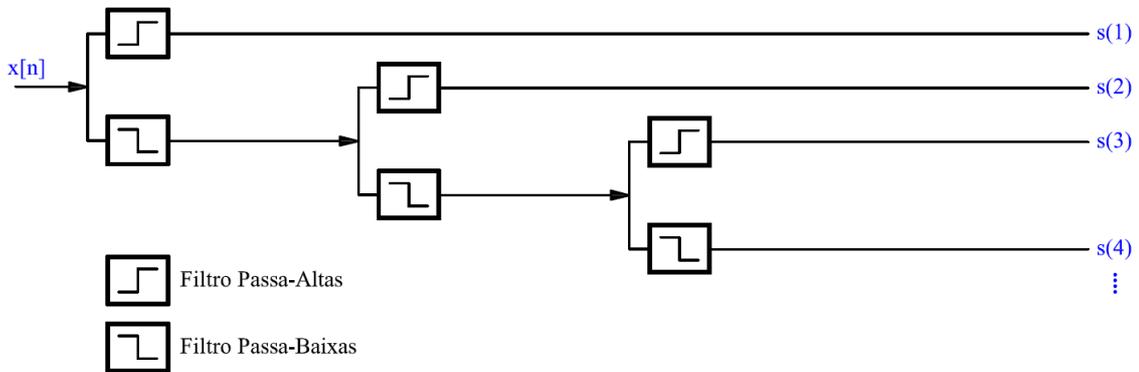


Figura 2.5 – Diagrama de blocos da decomposição em bandas usando um banco de filtros para implementação da TWDR.

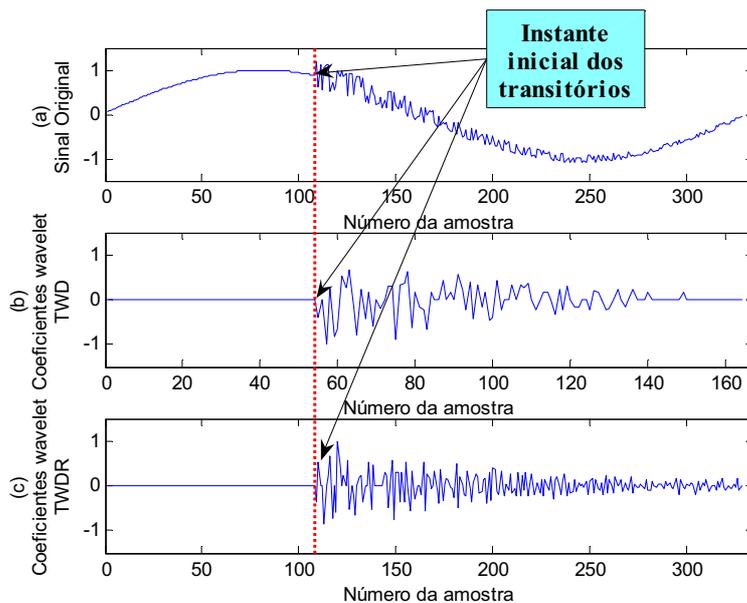
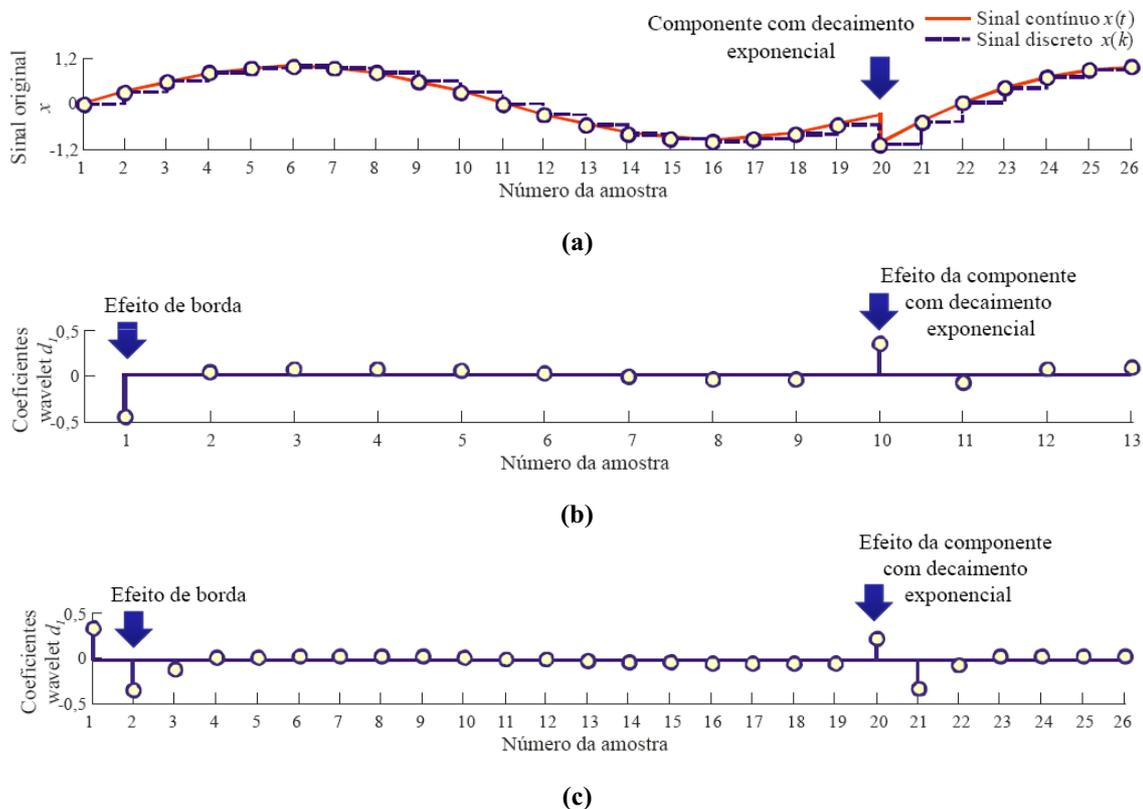


Figura 2.6 – Identificação do instante inicial dos transitórios via TWD e TWDR: (a) sinal original; (b) coeficientes *wavelet* (TWD); (c) coeficientes *wavelet* (TWDR).

Uma limitação da TWD e da TWDR se encontra no fato de que os valores dos primeiros coeficientes *wavelet* dependem das amostras iniciais e finais do sinal original. Tal fato promove um efeito de borda nos primeiros coeficientes *wavelet* gerados. Este efeito de borda é indesejável para procedimentos de localização de faltas, uma vez que podem ser interpretados como ocorrência de distúrbios quando na realidade não os são. COSTA *et al.* (2010) apresentam a Figura 2.7 na qual são ilustradas tais distorções a partir da análise de uma senóide que sofre um distúrbio com decaimento exponencial. Também a partir desta figura, percebe-se que, por não realizar a subamostragem, a TWDR se mostra mais precisa na detecção de transitórios, pois identifica diretamente o índice da amostra na qual iniciou o distúrbio.



**Figura 2.7 - Verificação do efeito de borda proveniente da aplicação da TWD e da TWDR na identificação de distúrbios apresentado em COSTA *et al.* (2010): (a) Sinal original; (b) coeficientes *wavelet* de detalhe obtidos via TWD; (c) coeficientes *wavelet* de detalhe obtidos via TWDR.**

Outra proposta apresentada em COSTA *et al.* (2010) é referente ao cálculo da energia normalizada dos coeficientes *wavelet* para detecção e classificação de distúrbios em sistemas de potência. De fato, no âmbito de classificação de distúrbios, o cálculo das energias é necessário, porém, para a localização de faltas a análise das componentes de alta frequência é suficiente. Vale salientar que, tanto para a TWD como para a TWDR, se faz

necessário o monitoramento individual das três fases do sistema em estudo para a detecção correta dos transitórios. Outra característica a ser destacada é que estas transformadas utilizam amostras de instantes passados do sistema para o cálculo dos coeficientes *wavelet* atuais de interesse. Tal dependência não apenas causa o efeito de borda apresentado, mas também torna a implementação de algoritmos localizadores de falta mais complexa.

## 2.6 FENG *et al.* (2008)

Propõe-se no trabalho de FENG *et al.* (2008) um método que suprime a utilização da velocidade das ondas viajantes no cálculo da localização de faltas. Diferentemente dos métodos convencionais de dois terminais, este faz uso de três tomadas de tempo referentes à chegada das ondas viajantes incidentes às barras monitoradas, sendo classificado como um método de três terminais. Segundo FENG *et al.* (2008), ao utilizar um instante de tempo adicional, o erro na localização da falta é diminuído. Por utilizar leituras de diferentes barras, faz-se necessária a utilização de GPS para sincronizar os instantes iniciais dos transitórios detectados (LEE; MOUSA, 1996). Na Figura 2.8 é ilustrado um sistema no qual pode ser aplicado o referido método.

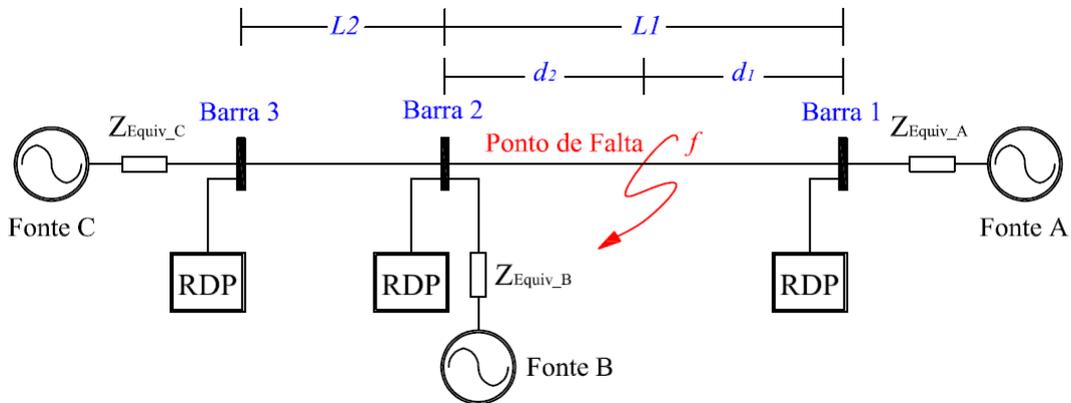


Figura 2.8 – Método de 3 terminais.

Para identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes às três barras, FENG *et al.* (2008) utilizam a transformada *wavelet*. Portanto, sendo  $t_0$  o instante inicial da falta ocorrida no ponto  $f$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  os tempos de chegada das ondas nas barras 1, 2 e 3, respectivamente,  $v$  a velocidade de propagação das ondas viajantes e  $d_2$  a distância entre a barra 2 e o ponto  $f$  de ocorrência da falta, são propostas, para o cálculo de  $d_2$  as equações apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Equações propostas para cálculo da localização da falta.

| Equações preliminares  | Equação para localização da falta   |
|--|---|
| $\begin{cases} (t_1 - t_0) \cdot v = d_1 \\ (t_2 - t_0) \cdot v = d_2 \\ (t_3 - t_0) \cdot v = L_2 + d_2 \\ d_1 + d_2 = L_1 \end{cases}$ | $d_2 = \frac{(t_2 - t_1) \cdot L_2}{2 \cdot (t_3 - t_2)} + \frac{L_1}{2}$ |

Percebe-se que, apesar da expressão proposta para o cálculo do local da falta não depender da velocidade de propagação das ondas, FENG *et al.* (2008) consideram velocidades de propagação iguais em todos os trechos da linha em análise para que esta grandeza seja suprimida do equacionamento proposto. Conforme visto em JIAN *et al.* (1998), tal aproximação é fonte de erros no processo de localização da falta baseada em ondas viajantes. Outro fator negativo deste método a ser destacado é a necessidade de três RDP. Desta forma, o método é mais oneroso e complexo do que outros métodos de dois terminais, fazendo necessário o conhecimento dos comprimentos de dois trechos das LTs consideradas e, portanto, não apresentando uma melhoria de precisão das estimativas da localização de faltas que compense tal investimento.

## 2.7 Síntese Bibliográfica

De acordo com os trabalhos apresentados, percebe-se que os métodos para localização de faltas baseados em ondas viajantes apresentam filosofias de funcionamento semelhantes e têm como objetivo principal a identificação, de forma precisa e confiável, do instante inicial de transitórios em pontos específicos do sistema elétrico em análise. As diferenças entre os métodos são relacionadas, basicamente, às técnicas usadas na detecção dos transitórios e às equações utilizadas para cálculo da localização das faltas.

Na revisão bibliográfica foi evidenciada a larga utilização da transformada *wavelet* na análise e detecção de distúrbios em sistemas de potência. Os demais métodos, como por exemplo, o da correlação, são considerados métodos alternativos, mas que não chegaram a se consolidar em aplicações de localização de faltas. Já os métodos baseados em componentes de frequência fundamental ainda são bastante utilizados, porém, apresentam fontes de erro mais impactantes sobre a precisão da localização das faltas quando comparadas às fontes de erro dos métodos baseados em componentes de alta frequência

(MOUTINHO *et al.*, 2010). Portanto, com o avanço dos RDP e com o aumento das frequências de amostragem, é provável que a localização de faltas baseada em ondas viajantes se torne mais popular e, conseqüentemente, seja adotada como rotina adicional aos relés digitais (PHADKE & THORP, 2009).

Neste trabalho, é proposto um método para detecção e localização de distúrbios em linhas de transmissão, monitorando apenas as tensões nas suas duas extremidades. A técnica utilizada se baseia na Transformada de Park (Tdq0) a qual, até então, não havia sido utilizada para aplicações de localização de faltas. Para o cálculo do local da falta, é considerada a equação proposta em GALE *et al.* (1993). Na Tabela 2.3 a seguir, é apresentado um resumo dos artigos referenciados, incluindo a técnica a ser implementada.

**Tabela 2.3 – Resumo da revisão bibliográfica referente à detecção de transitórios e localização de faltas em linhas de transmissão.**

| Características dos métodos    |     |   |       |    |      |               |        |          |     |
|--------------------------------|-----|---|-------|----|------|---------------|--------|----------|-----|
| Características<br>Referências | NTM |   | TDIIT |    |      |               | SA     |          | GPS |
|                                | 2   | 3 | MCFF  | TW | CORR | Outros (Tdq0) | Tensão | Corrente |     |
| GALE <i>et al.</i> (1993)      | √   | - | -     | -  | -    | -             | √      | √        | √   |
| LIN <i>et al.</i> (2008)       | √   | - | -     | -  | √    | -             | √      | -        | √   |
| GIRGIS <i>et al.</i> (1992)    | √   | √ | √     | -  | -    | -             | √      | √        | √/- |
| JIAN <i>et al.</i> (1998)      | √   | - | -     | √  | -    | -             | √      | -        | √   |
| COSTA <i>et al.</i> (2010)     | -   | - | -     | √  | -    | -             | √      | √        | -   |
| FENG <i>et al.</i> (2008)      | -   | √ | -     | √  | -    | -             | √      | -        | √   |
| MÉTODO PROPOSTO                | √   | - | -     | -  | -    | √             | √      | -        | √   |

**Legenda:**

NTM = Número de Terminais Monitorados;

TDIIT = Técnica para Detecção do Instante Inicial dos Transitórios;

SA = Sinais Avaliados;

GPS = Sincronização das Leituras via GPS;

MCFF = Método baseado nas Componentes de Frequência Fundamental de Tensão e Corrente;

TW = Transformada Wavelet Discreta ou Transformada Wavelet Discreta Redundante;

CORR = Método da Correlação.

## Capítulo 3

# Fundamentação Teórica

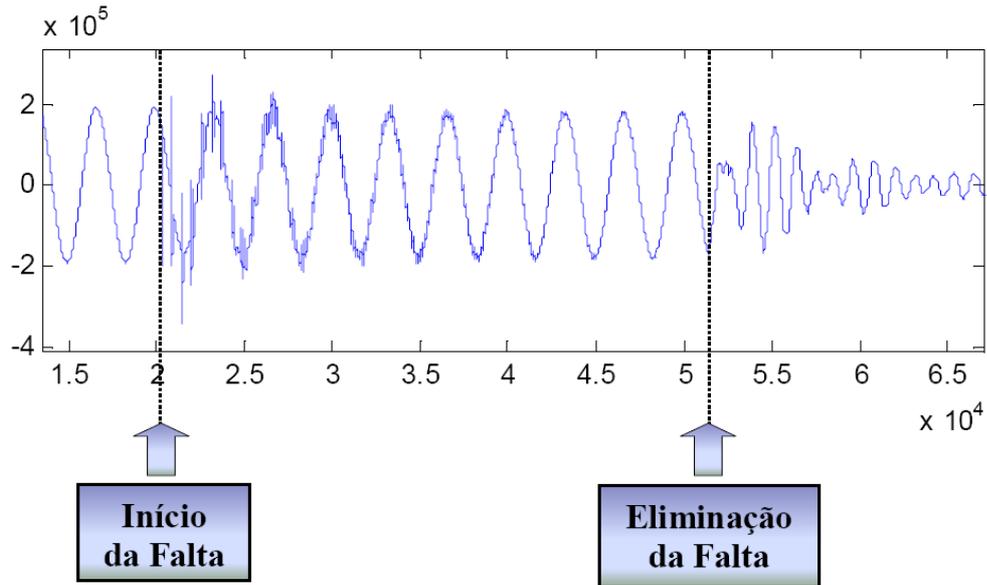
Este capítulo destina-se à apresentação de conceitos fundamentais sobre os fenômenos decorrentes de faltas em linhas de transmissão, contemplando a propagação de energia elétrica nas linhas em forma de ondas viajantes e, por fim, apresentando o princípio de funcionamento da técnica proposta para detecção de transitórios em sistemas elétricos de potência utilizada ao longo deste trabalho de dissertação.

### **3.1 Faltas em Linhas de Transmissão**

Em regime permanente, os parâmetros das linhas de transmissão ( $R$ ,  $L$  e  $C$ ) são bem definidos e praticamente constantes, apresentando apenas pequenas variações provenientes do tempo, vegetação, dos ventos, entre outros. Desta forma, quaisquer ocorrências que venham a modificar de forma considerável tais parâmetros podem gerar sobretensões no sistema no qual a linha se encontra instalada. Dentre os vários tipos de distúrbios que podem ocorrer num sistema elétrico de potência, as faltas são consideradas como um dos mais relevantes. Faltas em sistemas elétricos de potência são classificadas como desligamentos não programados de seus componentes e podem ser ocasionadas por motivos diversos como, por exemplo, por queda de condutores devido a intempéries, por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, entre outros. Usualmente as faltas são

classificadas como sendo monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra ou trifásicas. Os tipos de falta mais comuns são as do tipo monofásica seguida das faltas bifásicas, consistindo em torno de 70% e 30% das ocorrências, respectivamente (COSTA, 2006).

Tanto a ocorrência quanto o processo de eliminação de faltas geram transitórios no sistema, tendo cada um dos fenômenos a sua devida importância. Na Figura 3.1 são evidenciados os referidos transitórios.



**Figura 3.1 – Transitórios eletromagnéticos na tensão da fase A de um sistema trifásico simulado via ATP, devido à ocorrência da falta e da posterior eliminação do defeito.**

As amplitudes das sobretensões provenientes da ocorrência de faltas dependem fundamentalmente do tipo de aterramento utilizado no sistema elétrico, do tipo de falta e da resistência de falta. Tais sobretensões se propagam para ambos os terminais da linha de transmissão na forma de ondas viajantes. Portanto, conforme será apresentado nas subseções seguintes, uma vez detectados os instantes de chegada das ondas viajantes provenientes da falta nos terminais monitorados da linha de transmissão em análise, torna-se possível realizar a localização do ponto de ocorrência do defeito com boa precisão.

### 3.2 Ondas Viajantes em Sistemas de Transmissão

As linhas de transmissão têm seus parâmetros ( $R$ ,  $L$  e  $C$ ) distribuídos ao longo de sua extensão (ARAÚJO; NEVES, 2005). Portanto, a ocorrência de perturbações, sejam elas de natureza interna ou externa ao sistema elétrico em análise, provocará a propagação

de ondas viajantes ao longo da LT. Ao considerar toda a extensão de uma linha, pode-se afirmar que os efeitos provenientes de variações de tensão e/ou corrente em um de seus terminais não são instantaneamente percebidos pelo seu terminal oposto. As ondas eletromagnéticas geradas por tais variações levam um determinado tempo de trânsito para percorrer toda a extensão dos cabos até a outra extremidade da linha. Desta forma, os modelos mais utilizados atualmente na modelagem de LTs se baseiam na solução das equações de onda de tensão e corrente. Na Figura 3.2 é apresentado o circuito equivalente de um elemento incremental de uma linha de transmissão monofásica sem perdas.

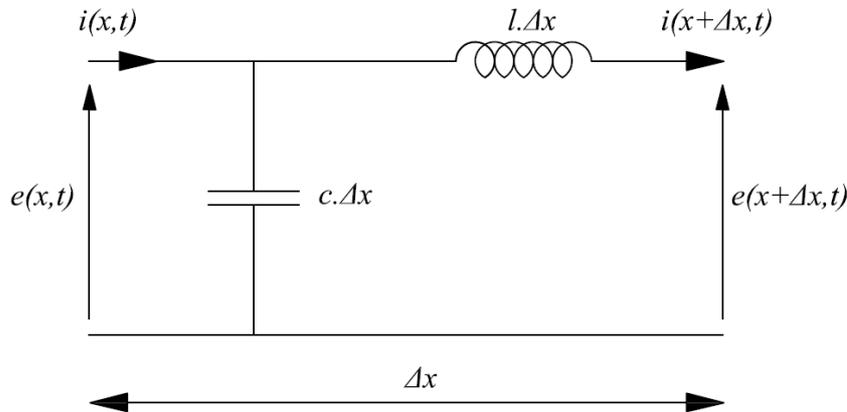


Figura 3.2 - Elemento Incremental de uma Linha Monofásica sem Perdas.

Onde:  $l$  é a indutância série da linha por unidade de comprimento ( $H/m$ );

$c$  é a capacitância shunt da linha por unidade de comprimento ( $F/m$ ).

A relação entre a tensão e corrente do sistema da Figura 3.2 é dada conforme evidenciado nas equações 3.1 e 3.2 a seguir.

$$e(x + \Delta x, t) = e(x, t) - l\Delta x \frac{\partial}{\partial t} i(x + \Delta x, t) \quad (3.1)$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - c\Delta x \frac{\partial}{\partial t} e(x, t). \quad (3.2)$$

A partir das equações 3.1 e 3.2, podem ser obtidas as equações de onda da tensão e corrente na linha de transmissão, apresentadas nas equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = cl \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.4)$$

A solução geral das equações 3.3 e 3.4 no domínio do tempo é apresentada a seguir.

$$e(x,t) = A(t-x/v)u(t-x/v) + B(t+x/v) \cdot u(t+x/v) \quad (3.5)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z} A(t-x/v) \cdot u(t-x/v) - \frac{1}{Z} B(t+x/v) \cdot u(t+x/v). \quad (3.6)$$

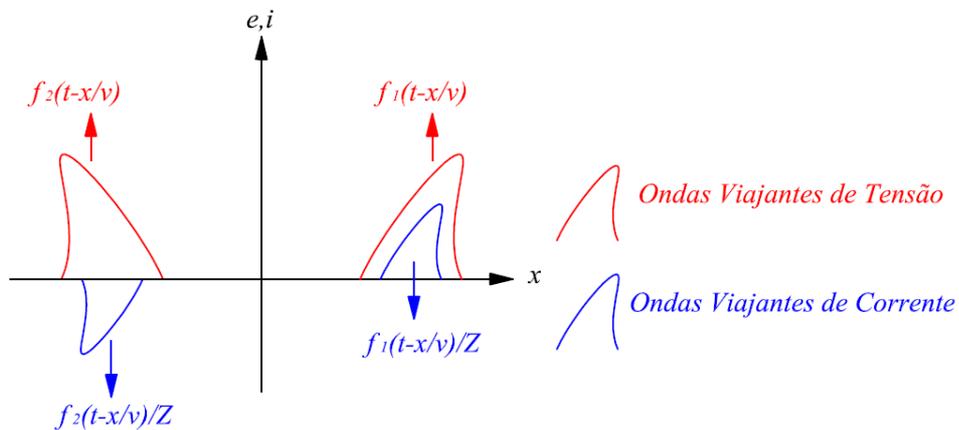
Onde:  $Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$ , é a impedância característica da linha de transmissão.

Pode-se ainda reescrever as equações 3.5 e 3.6 da seguinte forma:

$$e(x,t) = f_1(t-x/v) + f_2(t+x/v) \quad (3.7)$$

$$i(x,t) = \frac{f_1(t-x/v)}{Z} - \frac{f_2(t+x/v)}{Z}. \quad (3.8)$$

Percebe-se que as equações 3.7 e 3.8 podem ser compreendidas como a superposição de duas ondas. As funções  $f_1$  e  $f_2$  são interpretadas como ondas que viajam em sentidos opostos ao longo da linha de transmissão. Então, considerando que  $f_1$  se propaga no sentido positivo de  $x$  e  $f_2$  no sentido negativo, tais ondas são denominadas como ondas progressivas e ondas regressivas, respectivamente. Na Figura 3.3 é ilustrada a propagação das referidas ondas.



**Figura 3.3 – Ondas progressivas e regressivas.**

A partir da propagação das ondas eletromagnéticas provenientes do distúrbio em direção às extremidades da linha, estimam-se os tempos de trânsito das ondas viajantes do ponto da falta até as barras monitoradas, tornando possível o cálculo da estimativa do local de ocorrência do problema. Neste trabalho, para detecção dos instantes de chegada das ondas viajantes aos terminais da linha, será utilizada a Transformada de Park (Tdq0), conforme apresentado na seção seguinte.

### 3.3 Transformada de Park (Tdq0) Aplicada à Detecção de Distúrbios em Sistemas de Potência

O método proposto para localização de faltas se baseia na detecção de distúrbios em linhas de transmissão por meio da conhecida transformada de Park (Tdq0), denominada desta forma por ter sido proposta por R. H. Park e seus associados nos Estados Unidos em 1929. Largamente utilizada no estudo de máquinas elétricas de pólos salientes, a Tdq0 decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, sendo uma delas alinhada com o eixo do enrolamento de campo (componente de eixo direto  $d$ ) e a outra em quadratura com este mesmo eixo (componente de eixo em quadratura  $q$ ). Tal conceito se tornou bastante útil no estudo de máquinas de pólos salientes pelo fato de que, devido às saliências do rotor, cada fase do estator verifica uma indutância variável no tempo e as grandezas transformadas, que giram em sincronismo com ele, verificam caminhos magnéticos constantes (FITZGERALD *et al.*, 2006).

Nesta dissertação, propõe-se a utilização da Tdq0 na detecção de distúrbios e na localização de faltas. Então, considerando que o sistema referencial das grandezas transformadas gira na frequência da rede em sincronismo com os fasores das fases de um dado sistema trifásico, as grandezas transformadas, em regime permanente, não identificarão variações de frequência, pois a velocidade angular relativa entre os referidos vetores será nula. Na ocorrência de transitórios, a velocidade relativa entre tais grandezas se torna diferente de zero fazendo com que os sinais gerados possuam amplitudes não nulas e comportamento oscilatório. Na Figura 3.4 é ilustrada a analogia entre a aplicação da Tdq0 no estudo de máquinas elétricas e na localização de faltas.

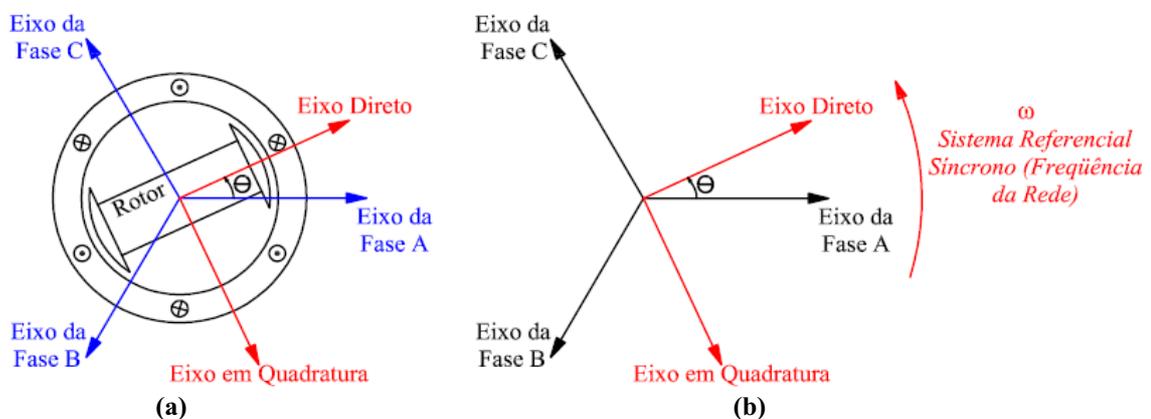
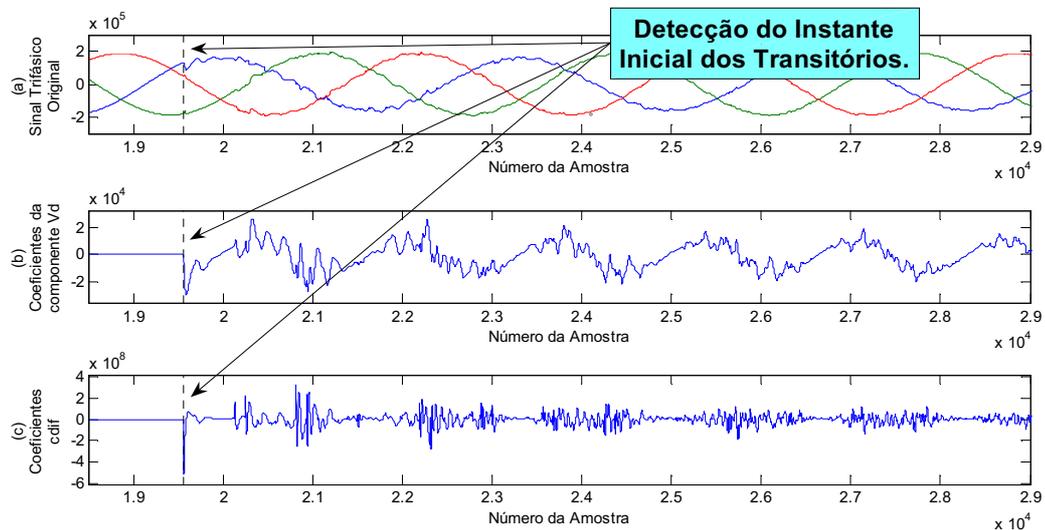


Figura 3.4 - Aplicação da Transformada de Park (Tdq0): (a) transformação realizada no estudo de máquinas elétricas; (b) transformação realizada como método de detecção de distúrbios e localização de faltas.

Para demonstrar o funcionamento da Tdq0 na detecção de transitórios, considere-se a análise das tensões trifásicas  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  e da respectiva componente de eixo direto  $V_d$  de um dado sistema trifásico. Alinhando o fasor de eixo direto  $V_d$  com o da fase A  $V_A$ , obtém-se um filtro que permite a visualização das componentes de frequência diferentes da frequência nominal da rede de forma que, em regime permanente, os coeficientes  $V_d$  têm amplitudes aproximadamente nulas.

Um fato relevante a ser considerado é que, dependendo do ângulo de incidência da falta, da resistência de falta bem como do fluxo de potência na linha em análise, o sistema pode apresentar transitórios suaves, com forte amortecimento e com frequências próximas à frequência nominal do sistema. Tal fato dificulta a detecção do instante inicial dos transitórios, uma vez que coeficientes  $V_d$  provenientes do distúrbio podem ser interpretados como característicos de uma situação de regime permanente. Então, para contornar tal problema, são calculados coeficientes proporcionais à diferença entre a amostra atual de  $V_d$  e a sua imediatamente anterior. Estes coeficientes são mais sensíveis à ocorrência de transitórios e são denominados de coeficientes  $c_{dif}$ . Na Figura 3.5 é apresentada a análise de um registro oscilográfico obtido via simulação realizada no ATP fazendo uso da Transformada de Park na detecção do instante inicial de transitórios provenientes de uma falta.



**Figura 3.5 - Identificação do instante inicial dos transitórios a partir da aplicação da Transformada de Park (Tdq0) às tensões de um sistema de 230 kV: (a) sistema trifásico com distúrbio; (b) coeficientes da componente de eixo direto  $V_d$ ; (c) coeficientes  $c_{dif}$  da componente de eixo direto.**

Os coeficientes  $c_{dif}$  têm um comportamento semelhante ao dos coeficientes *wavelet* de detalhe obtidos via TWD e TWDR e não apresentam os efeitos de borda demonstrados em COSTA *et al.* (2010). SANTOSO *et al.* (1996) propõem a utilização do quadrado dos

coeficientes *wavelet* de detalhe para análise de distúrbios em sistemas de potência. Então, visando a uma maior robustez do sistema localizador de faltas na identificação do instante inicial dos transitórios, são utilizados, nesta dissertação, os coeficientes  $c_{dif}$  elevados ao quadrado -  $[c_{dif}]^2$ . Portanto, a vantagem da utilização da Tdq0 na detecção de transitórios em linhas de transmissão é que, utilizando apenas amostras atuais do sistema e apenas uma amostra passada de  $V_d$ , é possível calcular os coeficientes  $[c_{dif}]^2$  os quais promovem um monitoramento de transitórios robusto nas três fases simultaneamente. O capítulo 4 apresenta de forma mais detalhada a Tdq0 e a obtenção dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$ .

Para validar a utilização do método proposto em aplicações de detecção de transitórios em linhas de transmissão, foi tomado um registro oscilográfico real proveniente de uma rejeição de carga ocorrida na subestação elevadora da UTE Camaçari Muricy I durante a tentativa de energização de um dos seus transformadores elevadores. Estes transformadores têm valores nominais de 13,8 kV/230 kV e 95 MVA. Os registros oscilográficos de tensão foram coletados a partir dos TPC (transformadores de potencial capacitivos) conectados aos terminais de alta tensão do referido transformador de potência. Apresenta-se na Figura 3.6 o layout da subestação elevadora da UTE Camaçari Muricy I.

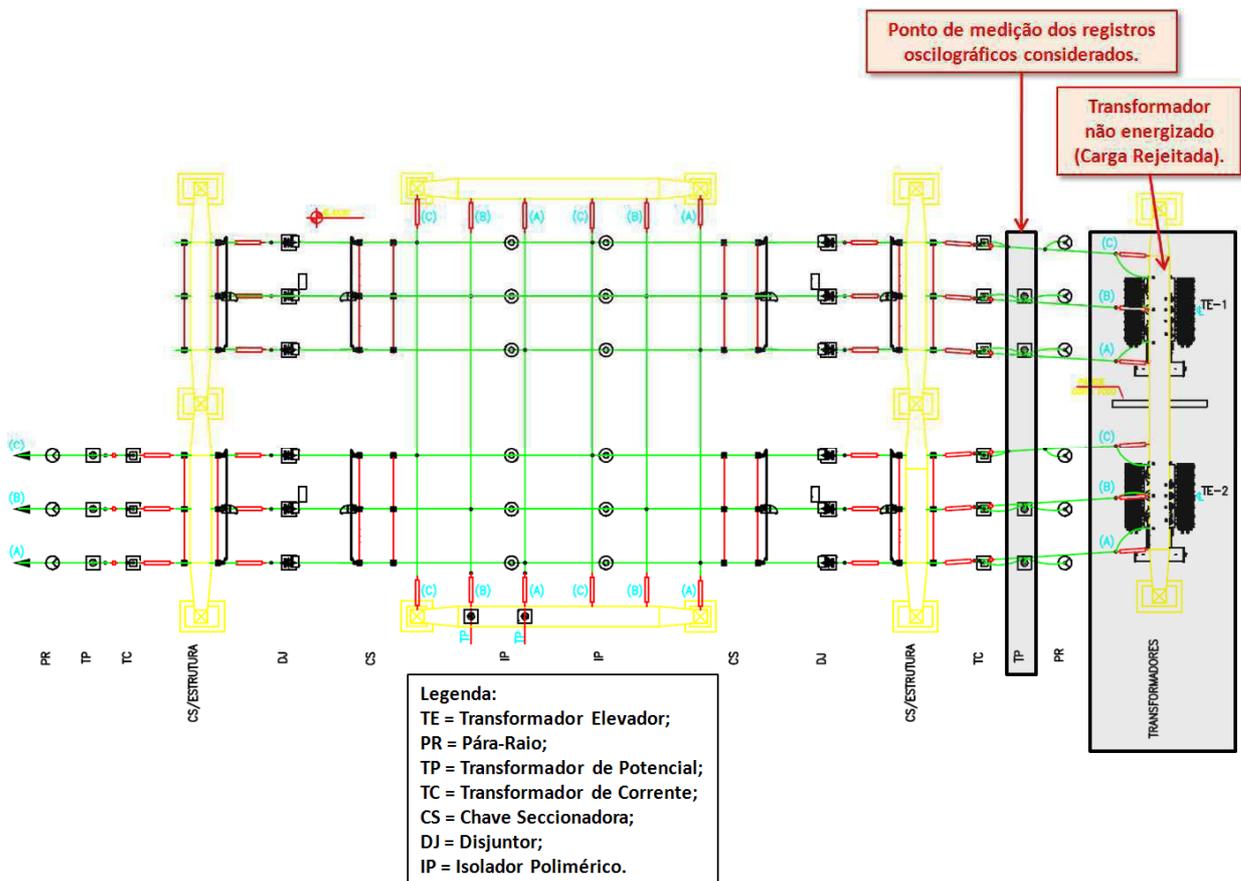
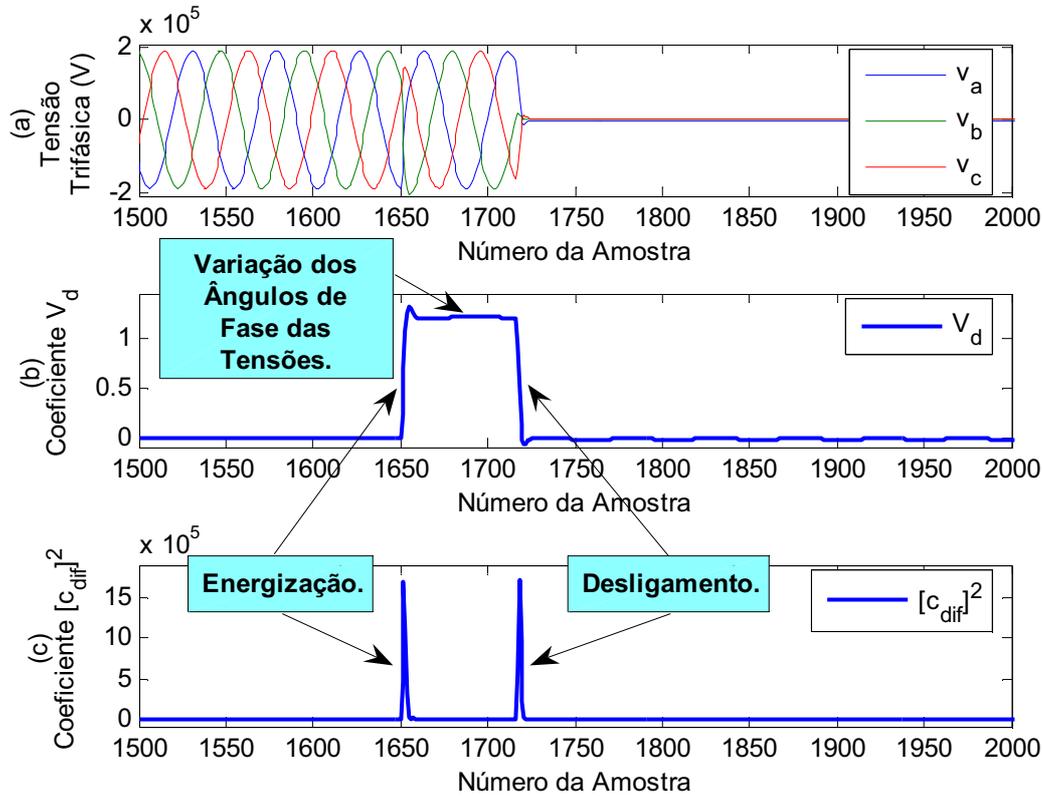


Figura 3.6 – Layout da subestação elevadora 230 kV da UTE Camaçari Muricy I.

Aplicando a Tdq0 aos registros oscilográficos de tensão coletados no ponto indicado na Figura 3.6 e calculando os respectivos coeficientes  $V_d$  e  $[c_{dif}]^2$ , foi possível identificar as ocorrências de transitórios durante a rejeição de carga em análise, conforme apresentado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Aplicação da Transformada de Park a registros oscilográficos reais: (a) Registro oscilográfico da tensão trifásica no lado de alta tensão do transformador elevador; (b) Coeficientes de eixo direto  $V_d$ ; (c) Coeficientes  $[c_{dif}]^2$  calculados a partir dos coeficientes  $V_d$ .**

Os resultados obtidos a partir da análise dos coeficientes  $V_d$  e  $[c_{dif}]^2$  os quais são calculados por meio da aplicação da Tdq0 aos registros oscilográficos reais considerados, vêm a comprovar que a detecção de distúrbios em sistemas de potência pode ser realizada através da Tdq0. Conforme verificado na Figura 3.7, a ocorrência da rejeição de carga é composta pela energização da referida carga seguida do desligamento que consiste na abertura dos contatos do disjuntor que a interligam à rede. Tais ocorrências foram corretamente detectadas pelos coeficientes  $V_d$  e  $[c_{dif}]^2$ , além de possibilitar a detecção de uma mudança do ângulo de fase das tensões após a energização. Portanto, fica validado o método proposto para detecção de distúrbios de forma que, no capítulo 4, é apresentado mais detalhadamente o método proposto para localização de faltas, evidenciando as principais características da Tdq0 e destacando a praticidade de tal método.

## Capítulo 4

### Método Proposto

Propõe-se um método para localização de faltas em linhas de transmissão utilizando medições de tensão, sincronizadas via GPS, nos dois terminais das linhas de transmissão em análise. Uma etapa essencial para o algoritmo é a obtenção dos instantes de chegada das ondas viajantes provenientes da falta às extremidades da linha. Portanto, para implementar a referida etapa de detecção de transitórios, é proposta uma técnica baseada na Transformada de Park ( $Tdq0$ ), a qual é bastante utilizada no estudo de máquinas elétricas de pólos salientes.

Conforme mencionado em capítulos anteriores, o método proposto gera um sistema referencial que gira na frequência da rede em sincronismo com os fasores das tensões trifásicas do sistema. Desta forma, para um observador sobre o sistema referencial síncrono, variações não são percebidas em regime permanente tornando possível a identificação de frequências diferentes da frequência nominal e desbalanceamentos entre fases. Sendo assim, de acordo com o conteúdo apresentado no Capítulo 3, em condições normais de operação da linha, sinais de amplitude aproximadamente nula são calculados para cada um dos terminais e, na ocorrência de transitórios, sinais não nulos com comportamento oscilatório são obtidos. Para melhor compreender o método proposto, é apresentado na Figura 4.1 o esquema de funcionamento do algoritmo para dois terminais, no qual são evidenciados os pontos de instalação dos RDP e do GPS utilizados. Na parte

central da figura, é ilustrado o diagrama de reflexões referente à falta exemplificada na Figura 2.1 do Capítulo 2.

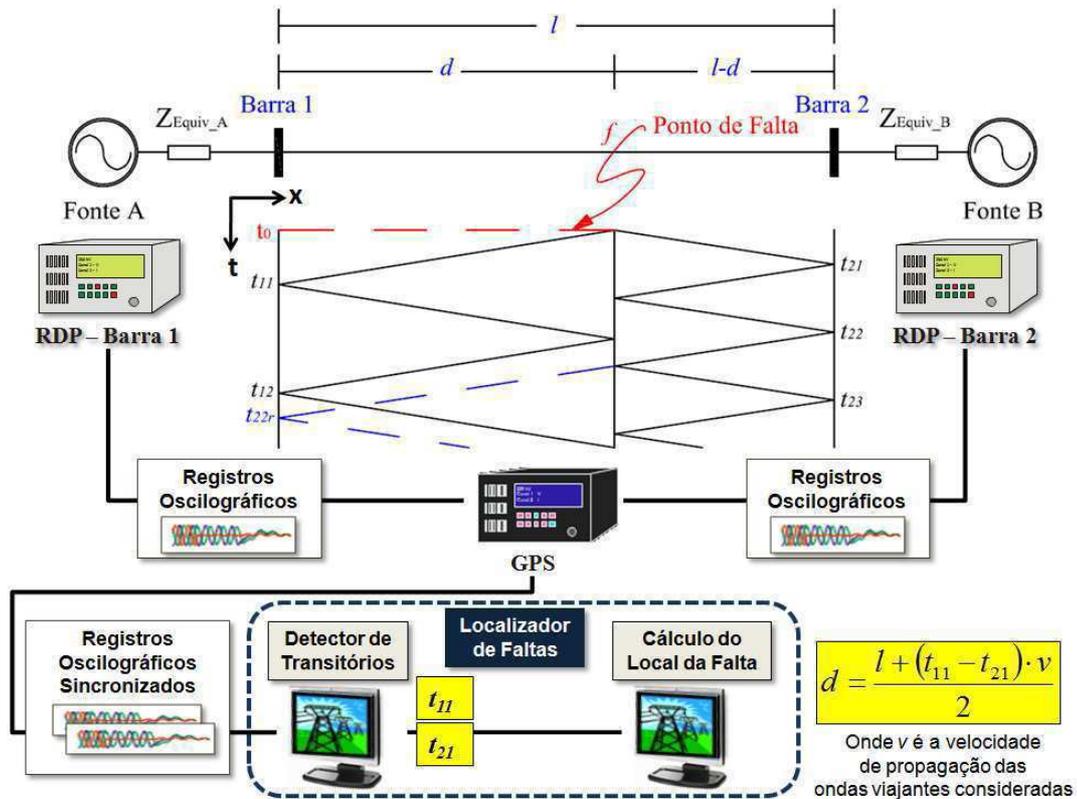


Figura 4.1 – Esquema de funcionamento para métodos localizadores de falta de dois terminais.

Neste contexto, o método é capaz de monitorar, em um determinado ponto, o conjunto de três fases através da análise de um só sinal, o qual é obtido a partir de amostras atuais das tensões trifásicas neste ponto. Sendo o método proposto de dois terminais, apenas dois sinais são necessários para a detecção do instante inicial dos primeiros transitórios nos terminais da linha ( $t_{11}$  e  $t_{21}$ ), possibilitando o cálculo da localização da falta, conforme apresentado na Figura 4.1.

Monitorar dois terminais a partir de apenas dois sinais diminui o número de variáveis envolvidas na localização do defeito e simplifica a implementação computacional do algoritmo. Um fato relevante é que, por utilizar apenas dados atuais do sistema em análise, é possível realizar a localização da falta no instante em que é concluída a detecção dos transitórios em ambos os terminais da linha, ou seja, quase imediatamente após a ocorrência do distúrbio. Tal fato evita a necessidade da avaliação pós-falta de registros oscilográficos tornando o procedimento de localização de faltas mais rápido e automático.

A implementação do algoritmo proposto é dividida em cinco etapas que consistem no cálculo dos parâmetros das linhas em análise, aquisição de dados nas extremidades da linha, aplicação da Tdq0 aos sinais analisados, identificação dos instantes iniciais dos transitórios nos dois terminais da linha e, por fim, o cálculo da localização da falta. Estas etapas são apresentadas nos tópicos a seguir.

#### 4.1 Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão em Análise

Na ocorrência de distúrbios em sistemas elétricos, as ondas viajantes se propagam com velocidade definida a partir dos parâmetros da linha de transmissão em questão. Desta forma, o cálculo correto destas grandezas é de suma importância para a obtenção precisa das velocidades de propagação das ondas e, conseqüentemente, para um bom desempenho do algoritmo localizador de faltas. Tais parâmetros dependem da estrutura das torres de suporte e sustentação da linha de transmissão, da resistividade do solo por onde esta passa e podem influenciar diretamente na precisão do algoritmo localizador de defeitos.

Neste trabalho, foram consideradas linhas a parâmetros distribuídos. Portanto, para os casos em que eram conhecidas as estruturas das torres de suporte e as respectivas resistividades do solo, utilizou-se o LINE CONSTANTS do ATP para calcular os parâmetros de interesse. Já para os casos em que apenas os parâmetros de sequência positiva e zero das linhas eram fornecidos, as velocidades de propagação foram calculadas por meio da expressão 4.1 (FUCHS, 1973).

$$v_m = \frac{\omega}{\text{Im}[\sqrt{(R_m + j\omega L_m) \cdot (j\omega C_m)}]} \quad (4.1)$$

Linhas de transmissão trifásicas podem apresentar um acoplamento eletromagnético significativo entre seus condutores. Usualmente, tais sistemas são desacoplados por meio da transformação modal, proposta por Edith Clarke em 1943 e que possibilita a diagonalização das matrizes impedância do sistema em análise. Também conhecida como transformação de Clarke, a transformação modal origina componentes ortogonais e estacionárias denominadas de modos aéreos e uma terceira denominada modo terra, as quais são relacionadas com as grandezas de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente, do sistema trifásico desacoplado. Portanto, na expressão 4.1,  $m$  indica o modo de propagação (modos aéreos ou modo terra),  $\omega$  é a frequência angular da rede e  $R$ ,

$L$  e  $C$  são os valores de resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento da linha, respectivamente. Vale salientar que, para faltas com conexão ao terra (monofásicas e bifásicas para a terra), sempre existirão o modo terra (calculados a partir dos parâmetros de sequência zero da linha) e os modos aéreos (calculados a partir dos parâmetros de sequência positiva e negativa da linha). Já para faltas de outros tipos (bifásica e trifásica), apenas os modos aéreos existirão. Desta forma, visando generalizar o método proposto, são consideradas neste trabalho as velocidades de propagação dos modos aéreos, pois estes existem em todos os casos de distúrbios.

A partir do procedimento apresentado, são obtidas as velocidades de propagação de interesse bem como outros parâmetros importantes, como por exemplo, as resistências série, indutâncias série e as capacitâncias *shunt*, todas estas dadas por unidade de comprimento e referentes aos circuitos de sequências zero e positiva. Tais dados são de extrema importância para uma correta modelagem dos sistemas considerados no ambiente ATP e, portanto, possibilitam a realização de análises mais confiáveis do método para localização de faltas que se propõe neste trabalho.

## 4.2 Aquisição de Dados nos dois Terminais da Linha de Transmissão

Conforme apresentado na Figura 4.1, a aquisição de dados do sistema localizador de faltas proposto é realizada por RDP instalados nos terminais da linha. Os sinais capturados por estes RDP devem ter suas bases de tempo sincronizadas por meio da utilização do GPS. É importante frisar que, na prática, a sincronização de dados por GPS não é perfeita e pode apresentar erros no sincronismo da ordem de  $\pm 1\mu\text{s}$  (RADOJEVIĆ *et al.*, 2009). De fato, a falta de sincronismo dos dados pode consistir em erros no resultado final da localização de faltas, porém, este problema pode ser contornado com a utilização de um relógio independente do sistema localizador de defeitos, ou seja, detectado o primeiro transitório em uma das extremidades da linha, seria iniciada a contagem do relógio independente aos RDP até a detecção do transitório na barra oposta e, portanto, o período ( $t_{11}-t_{21}$ ) necessário para localizar a falta, seria obtido sem maiores problemas.

Vale salientar que este trabalho de dissertação se limita a propor um método de dois terminais para localização de faltas em LTs e, portanto, desconsidera eventuais limitações dos equipamentos envolvidos como os RDP e o GPS. Contudo, embora tais limitações sejam temas motivadores para estudos futuros e para a melhoria da técnica proposta,

apenas sistemas com dados perfeitamente sincronizados serão considerados ao longo deste trabalho.

Em relação aos RDP, sabe-se que as frequências de amostragem utilizadas por estes dispositivos também influenciam na precisão dos métodos para localização de faltas baseados em ondas viajantes. Os tempos de trânsito das ondas provenientes da falta até as extremidades da linha são múltiplos do período de amostragem dos RDP. Portanto, para maiores frequências de amostragem, menores períodos de amostragem são verificados e, conseqüentemente, é percebida uma maior resolução do algoritmo na identificação dos instantes iniciais dos transitórios nos terminais monitorados. Usualmente, podem ser encontrados RDP comerciais com frequências de amostragem entre 15 kHz e 20 kHz.

Todas as rotinas do algoritmo proposto para localização de faltas foram implementadas na MODELS do ATP. Os sinais analisados são processados em tempo de execução das simulações sob um período de amostragem de 50  $\mu$ s que equivale considerar RDPs com frequências de amostragem de 20 kHz. É importante frisar que os erros admissíveis para os resultados da localização das faltas simuladas são diretamente proporcionais às frequências de amostragem consideradas. A expressão 4.2 apresenta a equação para cálculo deste erro.

$$|e| \approx \frac{\Delta t \cdot c}{2}. \quad (4.2)$$

Onde  $\Delta t$  é o período de amostragem do RDP utilizado e  $c$  é a velocidade de propagação da luz ( $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s).

Desta forma, para sinais amostrados a 20 kHz, o erro admissível, em módulo, é de aproximadamente 7,5 km, sendo este considerado como limiar para classificação de localização de faltas boas e ruins ao longo das análises dos resultados apresentadas no Capítulo 5. Por fim, vale salientar que independente das limitações relacionadas aos RDP e ao GPS, os métodos para localização de faltas em linhas de transmissão baseados em ondas viajantes são bastante promissores e, com o avanço que estes dispositivos vêm apresentando ao longo das últimas décadas, devem se tornar mais populares e comerciais num futuro próximo. O Apêndice A apresenta análises sobre a influência das taxas de amostragem sobre a precisão dos métodos localizadores de faltas.

### 4.3 Aplicação da Tdq0 e Cálculo dos Coeficientes $[c_{dij}]^2$

Conforme mencionado nas seções anteriores, a Transformada de Park (Tdq0) possibilita a obtenção de um sistema referencial que gira em sincronismo com a frequência da rede. Como variáveis de entrada, a Tdq0 utiliza dados das tensões de fase desacopladas, denominadas modos aéreos ( $V_\alpha$  e  $V_\beta$ ) e modo terra ( $V_0$ ). Tais componentes foram anteriormente mencionados no cálculo das velocidades de propagação das ondas e são obtidas via transformada de Clarke (WEDEPOHL, 1963). Portanto, aplicada a Tdq0, são calculadas as componentes de eixo direto e de eixo em quadratura ( $V_d$  e  $V_q$ ) as quais servirão como base para o alinhamento do eixo direto ao eixo da fase A, normalização dos sinais e para o cálculo dos coeficientes  $[c_{dij}]^2$ , etapas estas que darão suporte para a localização da falta de forma correta. As transformadas de Clarke e de Park são apresentadas na Tabela 4.1 a seguir.

**Tabela 4.1 – Transformadas de Clarke e de Park.**

| Transformada de Clarke  | Transformada de Park (Tdq0)   |
|---|---|
| $\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & \text{sen}(\omega t) \\ 0 & -\text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$ |

Portanto, a partir das transformadas mencionadas, é possível obter os coeficientes  $V_d$  de acordo com a expressão 4.3.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t + \theta) & \text{sen}(\omega t + \theta) \\ 0 & -\text{sen}(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} & \left(-\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}\right) & \left(-\frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}}\right) \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Onde:  $V_A, V_B$  e  $V_C$  = Tensões de fase do sistema trifásico em análise;

$V_d$  e  $V_q$  = Componentes de eixo direto e em quadratura, respectivamente;

$\omega$  = frequência angular das tensões e correntes da rede;

$t$  = instantes de tempo sincronizados via GPS;

$\theta$  = ângulo de fase da componente de eixo direto  $V_d$ .

Para que os coeficientes  $V_d$  apresentem valores aproximadamente nulos quando o sistema estiver operando em condições normais, é necessário que seja realizado antes da aplicação do cálculo dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$  o alinhamento entre o eixo direto e o eixo de uma das fases (neste trabalho, da fase A). Tal procedimento pode ser também realizado com auxílio da Transformada de Park. Desta forma, o procedimento de aplicação da Tdq0 e do cálculo dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$  pode ser dividido em três etapas conforme apresentado nos subitens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3.

#### 4.3.1 Alinhamento entre o Eixo Direto $d$ e o Eixo da Fase A e Normalização dos Sinais

Conforme mencionado anteriormente, a normalização dos sinais analisados e o alinhamento do eixo direto com o eixo da fase A podem ser realizados por meio da aplicação da Tdq0 utilizando apenas uma amostra de tensão de cada uma das fases do sistema em estudo. Para exemplificar tal procedimento, considere-se um sistema trifásico em regime permanente no qual o ângulo de fase da fase A é dado por  $\theta_v$ . As expressões 4.4, 4.5 e 4.6 são referentes aos sinais de tensão das fases do sistema considerado.

$$V_A = V \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_v). \quad (4.4)$$

$$V_B = V \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_v - 120^\circ). \quad (4.5)$$

$$V_C = V \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_v + 120^\circ). \quad (4.6)$$

Tomando estes sinais como variáveis de entrada da expressão 4.3, são obtidos os coeficientes  $V_d$  e  $V_q$ , conforme apresentado nas expressões 4.7 e 4.8.

$$V_d = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot [\text{sen}(\theta - \theta_v)]. \quad (4.7)$$

$$V_q = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot [\text{cos}(\theta - \theta_v)]. \quad (4.8)$$

Cientes de que as componentes  $V_d$  e  $V_q$  são ortogonais, é possível relacionar trigonometricamente as equações 4.7 e 4.8, segundo a expressão 4.9.

$$\frac{V_d}{V_q} = \frac{-\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot [\text{sen}(\theta - \theta_v)]}{-\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot [\text{cos}(\theta - \theta_v)]}. \quad (4.9)$$

Então, desenvolvendo a expressão 4.9, obtém-se a equação 4.10 que dá suporte para o cálculo dos ângulos de fase dos fasores da tensão trifásica do sistema em análise.

$$\theta_v = -\tan^{-1}\left(\frac{V_d}{V_q}\right) + \theta. \quad (4.10)$$

Percebe-se, portanto, que tomando apenas uma amostra de cada fase do sistema em análise, é possível calcular os ângulos de fase das tensões em regime permanente. A variável  $\theta$  da expressão 4.3 pode ser inicialmente escolhida aleatoriamente, desde que seja a mesma considerada na expressão 4.10. Em seguida, a Tdq0 continua a ser realizada sob a condição de  $\theta = \theta_v$ . Este procedimento pode ser utilizado em aplicações que necessitam a sincronização de fasores em regime permanente, como por exemplo, na inserção de geradores em sistemas de potência, situação esta em que se toma como referência a tensão da linha em aberto para sincronizar a tensão dos terminais do gerador em questão.

Tão importante quanto o alinhamento do eixo direto com o eixo da fase A, é a normalização dos sinais utilizados para localizar a falta. Normalizar os sinais implica em adequá-los a níveis de amplitude semelhantes, de forma a generalizar a técnica para sistemas em todos os níveis de tensão sem que haja necessidade de cálculos preliminares à aplicação do método proposto. O procedimento é simples e utiliza também o conceito de ortogonalidade apresentado nas expressões 4.7 e 4.8. A expressão 4.11 demonstrada a seguir apresenta a relação entre a amplitude de pico dos sinais em regime permanente com o valor do módulo das componentes de eixo direto e em quadratura.

$$V_M = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} = \sqrt{\left\{-\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot [\text{sen}(\theta - \theta_v)]\right\}^2 + \left\{-\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot [\text{cos}(\theta - \theta_v)]\right\}^2}$$

$$V_M = \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \cdot V. \quad (4.11)$$

Desta forma, considerando que  $V_M = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}$ , a amplitude dos sinais de tensão  $V$  em regime permanente pode ser calculada a partir da expressão 4.12.

$$V = \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) \cdot \sqrt{V_d^2 + V_q^2}. \quad (4.12)$$

Aplicando-se este procedimento a cada uma das barras monitoradas, os sinais a serem utilizados na detecção dos transitórios passam a ser  $V_A/V$ ,  $V_B/V$  e  $V_C/V$ . As amplitudes destes sinais terão amplitudes aproximadamente unitárias para o caso de regime permanente. Portanto, pode-se afirmar que uma vez normalizados os sinais, o método proposto se torna generalista e independente do nível de tensão da linha de transmissão em análise. Vale salientar que os procedimentos apresentados referentes à estimação do módulo e ângulo de fase por meio da Tdq0 só funcionam para o caso de regime permanente, embora existam formas de realizar tal estimação fasorial durante distúrbios.

### 4.3.2 Aplicação da Tdq0

Uma vez que as componentes  $V_d$  e  $V_A$  estejam alinhadas, ou seja,  $\theta$  igual ao ângulo de fase da tensão  $V_A$ , e sendo  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cong 377 \text{ rad/s}$  e  $V$  o valor de pico da tensão de fase do sistema, ao aplicar a Tdq0 obtém-se para o regime permanente:

$$V_d = 0. \quad (4.13)$$

$$V_q = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V. \quad (4.14)$$

Na presença de componentes harmônicas, são obtidos coeficientes  $V_d$  e  $V_q$  com comportamento oscilatório. Para ilustrar este fenômeno, seja considerado um sinal formado por harmônicas de 5ª ordem provenientes de uma falta conforme apresentado nas expressões 4.15, 4.16 e 4.17.

$$V_A = V \cdot \text{sen}(5\omega t + \theta_v). \quad (4.15)$$

$$V_B = V \cdot \text{sen}(5\omega t + \theta_v - 120^\circ). \quad (4.16)$$

$$V_C = V \cdot \text{sen}(5\omega t + \theta_v + 120^\circ). \quad (4.17)$$

Então, neste caso, as componentes de eixo direto e em quadratura obtidas apresentam comportamento oscilatório conforme evidenciado nas expressões 4.18 e 4.19.

$$V_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot \text{sen}(4\omega t). \quad (4.18)$$

$$V_q = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V \cdot \cos(4\omega t). \quad (4.19)$$

Na presença de harmônicas de outras ordens, sendo o sistema trifásico de sequência ABC ou CBA, serão obtidos sinais oscilatórios com frequências de ordens menores ou maiores, respectivamente. Em resumo, para um sistema ABC, a presença de harmônicas de ordem  $N$  implicará em sinais  $V_d$  e  $V_q$  com frequências de  $(N+1)$  vezes a frequência nominal do sistema. Já para um sistema CBA, a presença de harmônicas de ordem  $N$  implicará em sinais  $V_d$  e  $V_q$  com frequências de  $(N-1)$  vezes a frequência nominal do sistema. Tal característica possibilita não apenas a detecção de transitórios de alta frequência, mas também, afundamentos e elevação de tensão, desbalanceamento de fases, entre outros distúrbios que mantêm a frequência nominal do sistema durante sua ocorrência.

### 4.3.3 Cálculo dos Coeficientes $[c_{dif}]^2$

Na prática, dependendo das características da falta e do sistema em análise, os coeficientes  $V_d$  podem apresentar muita atenuação, dificultando a identificação correta do instante inicial dos transitórios. Então, conforme mencionado anteriormente, são calculados os coeficientes  $[c_{dif}]^2$  a partir da aproximação de Taylor apresentada na equação 4.20, na qual  $\Delta t$  é o período de amostragem dos sinais em análise e  $V_d$  é a componente de eixo direto calculada via Tdq0. Conforme apresentado no Capítulo 3, SANTOSO *et al.* (1996) propõem a utilização do quadrado dos coeficientes *wavelet* de detalhe para análise de distúrbios em sistemas de potência e, portanto, visando a uma maior robustez do sistema localizador de faltas na identificação do instante inicial dos transitórios, são utilizados, neste trabalho, os coeficientes  $c_{dif}$  elevados ao quadrado -  $[c_{dif}]^2$ .

$$[c_{dif}(t)]^2 = \left[ \frac{V_d(t) - V_d(t - \Delta t)}{\Delta t} \right]^2. \quad (4.20)$$

Tais coeficientes são mais sensíveis às variações referentes aos transitórios nas barras monitoradas e proporcionam o cálculo de sinais nulos para o regime permanente mesmo que haja mudança das fases do sistema de tensões considerado, ou seja, em casos nos quais  $\theta \neq \theta_v$ , (perda do sincronismo do sistema localizador de faltas). Vale salientar que o sincronismo do sistema localizador deve ser realizado sempre que o regime permanente seja verificado por vários ciclos após a ocorrência de distúrbios.

### 4.4 Identificação do Instante Inicial dos Transitórios

Segundo COSTA *et al.* (2010), os métodos que utilizam a TWD ou a TWDR na detecção de distúrbios consideram que os coeficientes *wavelet* com amplitudes mais relevantes são relacionados com os instantes inicial e final dos transitórios no ponto em análise. Já para o método proposto, percebe-se que os coeficientes  $[c_{dif}]^2$  calculados a partir das componentes  $V_d$  sincronizadas assumem valores diferentes de zero uma amostra após o início do transitório. Portanto, sendo  $F_s$  a frequência de amostragem dos RDP utilizados na aquisição de dados, basta detectar o índice  $i$  da primeira amostra  $[c_{dif}]^2$  não nula e então terá sido detectado o instante inicial dos transitórios  $t_{transitório}$ . O procedimento a ser realizado apresenta implementação simples e é necessário para a obtenção dos instantes iniciais dos transitórios em segundos. As expressões 4.21a e 4.21b descrevem o procedimento, sendo este ilustrado na Figura 4.2.

- Se  $[c_{dif}(i)]^2 = 0 \Rightarrow t_{transitório} = \{ \}$ ; (4.21a)

- Se  $[c_{dif}(i)]^2 > 0 \Rightarrow t_{transitório} = (i-1)/F_s$ ; (4.21b)

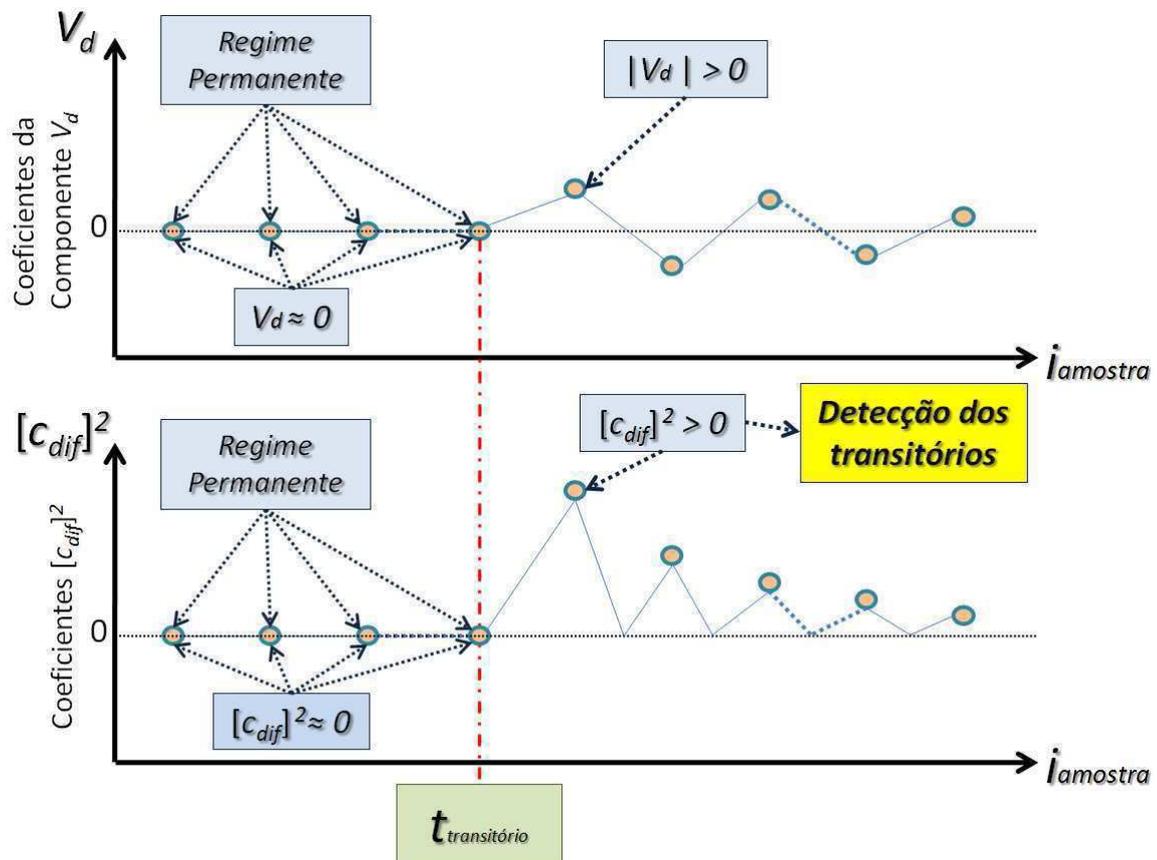
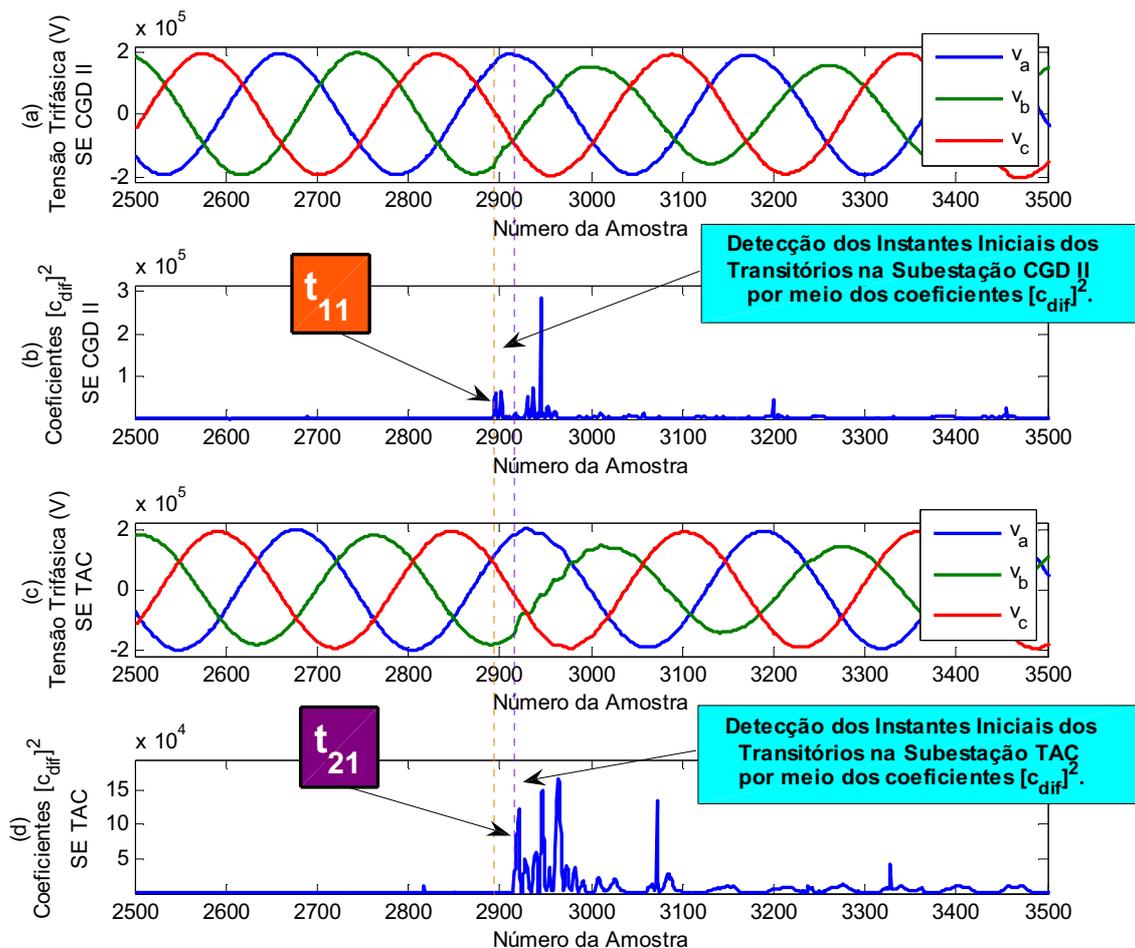


Figura 4.2 - Detecção do instante inicial dos transitórios a partir dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$  obtidos via Tdq0.

Veja que, mesmo com a sincronização dos fasores  $V_d$  e  $V_A$ , podem ser verificados coeficientes  $[c_{dif}]^2$  de pequena amplitude durante o regime permanente devido a ruídos ou oscilações de baixa frequência. Desta forma, o descarte destes coeficientes é realizado através de técnicas de filtragem que consistem na eliminação dos coeficientes cujas amplitudes, em valor absoluto, sejam inferiores a um determinado limiar calculado a partir da análise dos sinais obtidos em regime permanente (SANTOSO *et al.*, 1996). Desta forma, apenas os coeficientes  $[c_{dif}]^2$  referentes ao distúrbio serão considerados.

Para ilustrar a aplicação do método proposto, são apresentados nas Figuras 4.3a e 4.3c registros oscilográficos reais de uma falta ocorrida na linha de transmissão de 230 kV que interliga as subestações Campina Grande II e Tacaimbó do sistema CHESF de transmissão. Já nas Figuras 4.3b e 4.3d, é apresentada a detecção dos transitórios em ambas as subestações por meio da análise dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$  calculados a partir dos procedimentos demonstrados anteriormente.



**Figura 4.3 - Detecção dos instantes iniciais dos transitórios nas subestações Campina Grande II e Tacaimbó através dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$ : (a) Tensões de fase medidas na SE CGD II; (b) coeficientes  $[c_{dif}]^2$  na SE CGD II; (c) Tensões de fase medidas na SE TAC; (d) coeficientes  $[c_{dif}]^2$  na SE TAC.**

Percebe-se que, mesmo apresentando transitórios suaves no terminal conectado à subestação Campina Grande II, o método consegue detectar o início dos transitórios neste terminal de forma satisfatória, promovendo o cálculo de coeficientes  $[c_{dif}]^2$  de amplitudes bem mais relevantes nos instantes de regime transitório quando comparados aos coeficientes calculados para os momentos em que o sistema opera normalmente.

Conhecendo-se, portanto, o comprimento aproximado dos condutores da linha de transmissão em análise e uma vez calculados os instantes iniciais dos transitórios  $t_{11}$  e  $t_{21}$  nos dois terminais da linha e a velocidade de propagação das ondas viajantes na linha, torna-se possível calcular, com boa precisão, a distância entre uma das extremidades da linha de transmissão e o ponto de ocorrência da falta conforme será apresentado no tópico 4.5 a seguir.

## 4.5 Cálculo da Localização de Faltas

Detectados os instantes iniciais dos transitórios  $t_{11}$  e  $t_{21}$  nas extremidades da linha defeituosa, o cálculo da localização da falta se torna uma tarefa simples. Para tanto, deve-se ter conhecimento da velocidade  $v$  de propagação das ondas viajantes obtida na seção 4.1 e o comprimento  $l$  da linha de transmissão em análise. Desta forma, considerando  $d$  a distância da barra 1 ao ponto  $f$  de ocorrência da falta (ver Figura 4.1), o cálculo da estimativa da localização do defeito é realizado através da expressão 4.22 proposta em GALE *et al.* (1993).

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (4.22)$$

Vale salientar que, ao contrário dos métodos baseados no cálculo da impedância das linhas que fazem uso comprimento médio geométrico entre os terminais monitorados (ZIMATH *et al.*, 2010), as aplicações de localização de faltas baseadas em ondas viajantes consideram o comprimento total dos condutores incluindo o comprimento dos cabos que interligam os TPC utilizados na medição aos dispositivos registradores (RDP). Tal consideração se deve ao fato de que é através dos condutores que as ondas se propagam e, portanto, toda a extensão dos cabos deve ser considerada. Na Figura 4.4 são ilustrados os diferentes comprimentos considerados para os métodos baseados no cálculo da impedância da linha e para os baseados nas ondas viajantes.

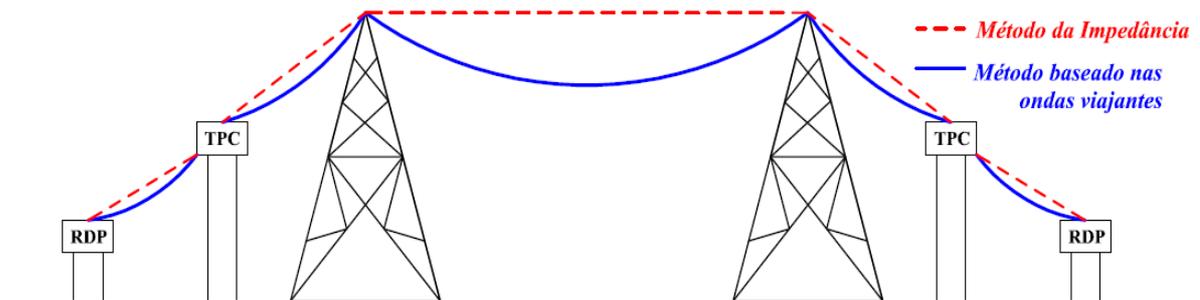


Figura 4.4 – Comprimento da LT considerado na localização de faltas.

Para casos em que o comprimento da linha não é conhecido, é necessária a determinação desta extensão em quilômetros. De fato, o cálculo do comprimento dos condutores pode ser enxergado, num primeiro momento, como uma tarefa de difícil realização, porém, existem formas simples para calcular, com boa precisão, este comprimento bastando realizar o procedimento de detecção de transitórios no sistema elétrico em análise durante sua energização. Desta forma, as ondas viajantes provenientes da energização em uma das pontas da linha, se propagam ao longo dos condutores e, chegando ao terminal oposto em aberto, são refletidas. Portanto, o segundo transitório detectado no terminal no qual foi realizada a energização, ocorrerá  $t_E$  segundos após o fechamento dos disjuntores e, então, uma boa aproximação do comprimento dos condutores da linha poderá ser calculado a partir da expressão 4.23.

$$l \approx \frac{t_E \cdot v}{2} \quad (4.23)$$

Onde:  $t_E$  = Período entre o instante de energização e de chegada das ondas refletidas;

$v$  = Velocidade de propagação das ondas na linha em análise;

$l$  = Comprimento total dos condutores da linha de transmissão.

Percebe-se então que quanto mais precisos forem os dados da velocidade de propagação das ondas, do comprimento da linha e dos instantes iniciais dos transitórios nas barras monitoradas, melhor será a estimativa da localização da falta, evidenciando a importância e necessidade do cumprimento fiel de cada uma das etapas do método proposto.

## 4.6 Implementação do Método na Linguagem MODELS do ATP

No presente trabalho, o programa ATP é utilizado para implementar e avaliar o método proposto para localização de faltas em linhas de transmissão. As etapas descritas ao longo deste Capítulo 4 são incorporadas às simulações digitais fazendo uso da linguagem MODELS do ATP, a qual proporciona uma iteração dinâmica em tempo de execução com o próprio ATP, dando suporte à simulação de dispositivos de controle e proteção tal como requerido para o desenvolvimento deste trabalho.

A MODELS é uma linguagem de uso geral, baseada na descrição de estruturas, ou modelos, com características semelhantes à programação orientada a objetos. Uma das potencialidades desta linguagem é que os modelos podem ser desenvolvidos separadamente, agrupados em bibliotecas e usados em outros modelos como blocos independentes. Desta forma, considerando que as etapas de processamento de dados necessárias para localizar faltas são, na maioria, semelhantes para cada terminal monitorado, funções independentes referentes a cada uma das etapas do algoritmo são implementadas. Então, ao analisar os sinais de tensão nos dois terminais da LT, tais blocos de funções podem ser aplicadas a ambas extremidades, diferindo apenas nos sinais de entrada e saídas para cada uma destas funções. Portanto, pode-se afirmar que a linguagem MODELS proporciona uma maior flexibilidade nas simulações digitais, de modo que permite a aplicação de rotinas de controle e proteção a qualquer nó do sistema em análise.

Em geral, as etapas de elaboração de algoritmos para fins de proteção e controle se tornam mais simples quando ferramentas matemáticas de fácil manipulação estão disponíveis. O algoritmo proposto foi inicialmente idealizado a partir de rotinas confeccionadas no ambiente MATLAB<sup>®</sup>, ferramenta esta reconhecida mundialmente como uma das mais eficientes para tratamento matemático de dados. Porém, a avaliação das rotinas fez necessária também a simulação de registros oscilográficos dos sistemas em estudo. Outro fato a ser considerado é que, no âmbito da análise de algoritmos para localização de faltas, existe a necessidade da geração de relatórios com resultados da localização de faltas para posterior análise. Então, diante das necessidades de simulação de registros oscilográficos de impressão de resultados, pode-se dizer que a linguagem MODELS dá suporte para a realização de forma adequada das análises do algoritmo proposto, uma vez que permite, por meio de rotinas bastante simples, a geração de

arquivos com extensão *.txt* que, neste trabalho, hora simularam registros oscilográficos e, num segundo momento, os relatórios finais das localizações de faltas.

Dentre as etapas descritas nos tópicos de 4.1 a 4.5, apenas a 4.1 que diz respeito ao cálculo dos parâmetros da linha é realizado de forma *off-line*, ou seja, antes da realização das simulações. Todas as outras etapas, incluindo a aquisição de dados, é implementada por meio da linguagem MODELS e processada em tempo de execução das simulações de faltas realizadas no ATP. Na Figura 4.5 é apresentado o diagrama de blocos do esquema utilizado para implementação, avaliação e validação do método proposto para localização de faltas em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais, conforme descrito detalhadamente ao longo deste Capítulo 4.

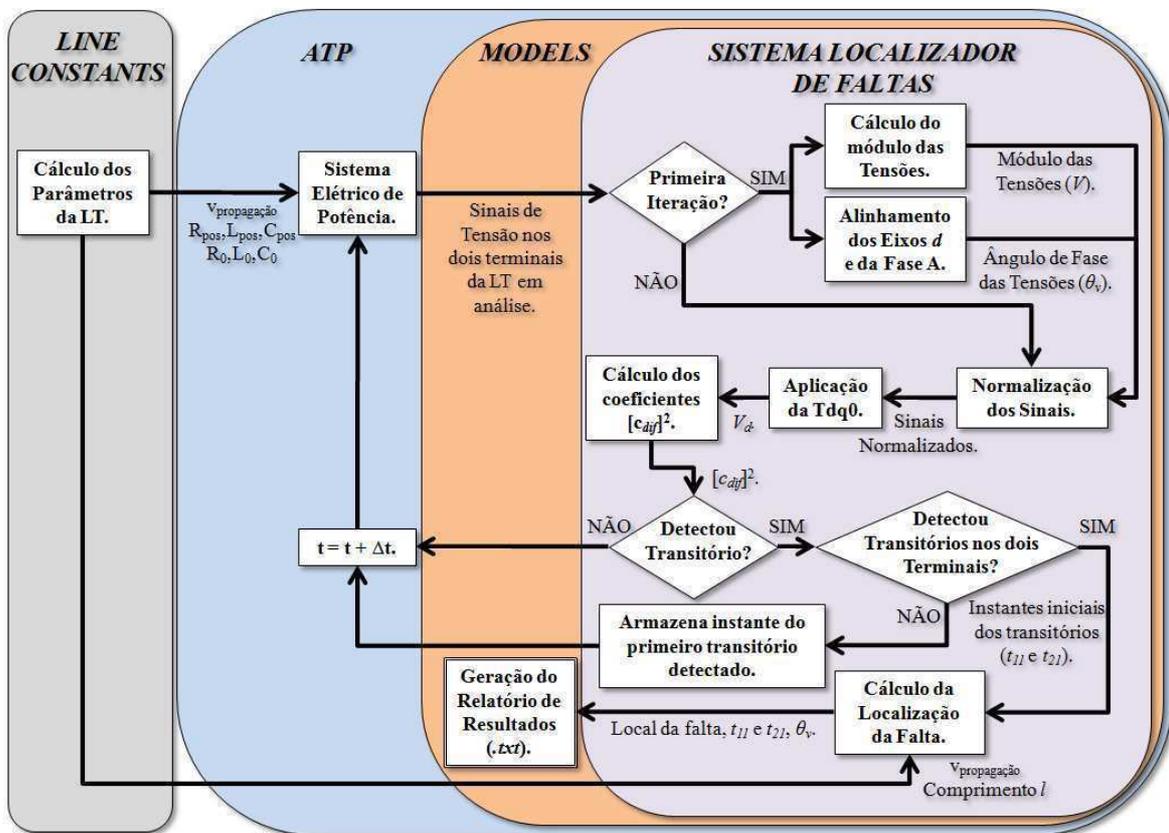


Figura 4.5 – Diagrama de blocos para localização de faltas em LTs via método proposto.

De acordo com o diagrama, percebe-se que os procedimentos de alinhamento dos eixos *d* e da fase A bem como de normalização dos sinais é realizado apenas na primeira iteração da simulação. Vale salientar que o valor do módulo das tensões obtido é utilizado ao longo de toda a simulação na normalização dos sinais. Já o cálculo da localização de faltas só é realizado quando os transitórios em ambas as extremidades da linha são detectados. Desta forma, os relatórios de resultados só são gerados na ocorrência de

distúrbios na linha de transmissão em análise, de forma que, para o sistema operando normalmente, os relatórios de resultados permanecem em branco.

O Capítulo 5 a seguir descreve os sistemas elétricos considerados na avaliação e validação do método localizador de faltas bem como apresenta resultados da aplicação do método proposto para localização de faltas. Conforme mencionado anteriormente, tais resultados são obtidos através de simulações de faltas em linhas de transmissão reais do SIN (Sistema Interligado Nacional) e em linhas fictícias, contemplando diversas condições de falta e possibilitando uma avaliação minuciosa do método proposto.

## Capítulo 5

# Avaliação e Validação do Método

O método proposto para localização de faltas é avaliado através de simulações digitais fazendo uso do *software* ATP. Conforme mencionado no Capítulo 4, é utilizada a linguagem MODELS do ATP para incorporar o método localizador de faltas às simulações computacionais. Portanto, o algoritmo é aplicado em tempo de execução das simulações, fazendo com que o procedimento de processamento dos sinais de tensão das extremidades das linhas seja realizado de forma semelhante ao realizado pelos relés digitais. Sendo assim, é possível avaliar o algoritmo como se este estivesse incorporado ao conjunto de rotinas de IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) instalados nos sistemas elétricos analisados.

No total, quatro linhas de transmissão foram utilizadas na avaliação e validação do método proposto para localização de faltas. Dentre estas, duas LTs são utilizadas na avaliação e outras duas na validação do método. Usualmente, a avaliação e validação de algoritmos localizadores de faltas são realizadas por meio de simulações em massa nas quais é considerado o maior número possível de diferentes casos de faltas. Dentre os parâmetros que devem variar nesta análise se destacam as condições de falta (local da falta, resistência de falta e ângulo de incidência da falta) e o tipo de transposição utilizada nas linhas em estudo. Desta forma, as localizações obtidas têm seus valores comparados ao erro admissível referente à frequência de amostragem utilizada nas simulações. Neste

trabalho, a frequência utilizada é de 20 kHz, implicando em um erro admissível de aproximadamente 7,5 km. Então, localizações de faltas com erros em módulo abaixo deste limiar são classificadas como um caso de localização satisfatória. Em caso contrário, a localização é considerada como sendo não satisfatória.

Para que a avaliação e validação do método proposto sejam confiáveis, é de suma importância considerar diferentes tipos de transposição das linhas. Tal constatação é explicada pelo fato de que os diferentes esquemas de transposição podem influenciar bastante no comportamento dos sistemas elétricos e, portanto, podem provocar maiores ou menores erros do sistema localizador de defeitos dependendo da configuração de transposição adotada. Sendo assim, é perceptível a necessidade de considerar na validação do método proposto situações não apenas de linhas perfeitamente transpostas, mas também de linhas não transpostas e com algum tipo de transposição real. Respeitando estas considerações, a avaliação e validação se tornam abrangentes, permitindo uma maior aproximação das simulações à realidade dos sistemas elétricos e dando suporte para que a metodologia proposta seja aprovada e considerada aplicável em sistemas elétricos reais por meio da atuação de relés digitais.

Dentre os esquemas de transposição mais conhecidos, destaca-se o que utiliza três torres de transposição. Normalmente conhecido como transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6, este esquema é largamente utilizado pelos sistemas de transmissão do SIN (Sistema Interligado Nacional) e tem características peculiares conforme apresentado no tópico 5.1.

## **5.1 Linhas de Transmissão com Três Torres de Transposição**

Considerar linhas perfeitamente transpostas nas simulações contribui para o sucesso do método localizador de faltas. Sabe-se que em casos nos quais a linha é não transposta, o acoplamento magnético entre as fases da LT é intensificado e os parâmetros de sequência negativa diferem dos parâmetros de sequência positiva. Neste caso, os sinais de tensão nas extremidades da linha apresentam três componentes com características distintas sendo estas referentes aos parâmetros de sequência positiva, negativa e zero. Portanto, o cálculo das velocidades de propagação se torna impreciso, uma vez que cada uma das componentes apresenta velocidades diferentes e, conseqüentemente, torna-se necessária a obtenção de três instantes iniciais de transitórios referentes às diferentes componentes de sequência. Assim, a localização de faltas pode apresentar maiores erros.

No SIN, por exemplo, para diminuir o acoplamento magnético entre as fases, é normalmente utilizado um esquema de transposição conhecido como 1/6-1/3-1/3-1/6, o qual utiliza três torres de transposição para troca do posicionamento físico dos condutores das fases. Aplicando este esquema de transposição, é diminuído o acoplamento magnético entre as fases e, portanto, é verificado um sistema mais estável e balanceado. O referido esquema de transposição é ilustrado na Figura 5.1 a seguir.

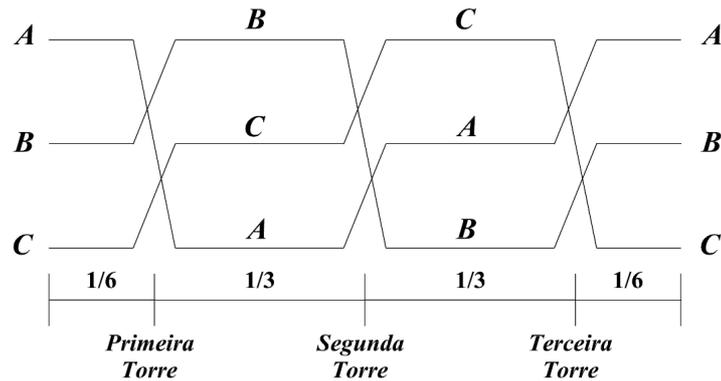


Figura 5.1 – Esquema de Transposição 1/6-1/3-1/3-1/6.

Visando, portanto, abranger as etapas de avaliação e validação do método proposto, casos que contemplem situações de LTs perfeitamente transpostas, não transpostas e com três torres de transposição são considerados. Os tópicos a seguir apresentam os sistemas elétricos analisados ao longo das etapas de avaliação e validação do método proposto.

## 5.2 Sistema Elétricos Considerados

Dentre os sistemas considerados para avaliação e validação do método proposto, foram analisadas linhas reais integrantes do SIN (Sistema Interligado Nacional) e uma linha fictícia construída a partir de dados de uma LT também real. Na Tabela 5.1 a seguir, são identificados o tipo de linha e o tipo de transposição utilizada nas etapas de avaliação e validação do método proposto para localização de faltas.

Tabela 5.1 – Etapas de avaliação e validação do método proposto.

| Etapa     | Número de LTs Consideradas | Tipo da LT          | Tipo de Transposição                                 |
|-----------|----------------------------|---------------------|--|
| Avaliação | 2                          | 2 Reais             | Perf. Transpostas                                    |
| Validação | 2                          | 1 Fictícia e 1 Real | Perf. Transpostas, Não Transpostas e 1/6-1/3-1/3-1/6 |

Percebe-se, portanto, que a etapa de avaliação do algoritmo proposto se dá mediante simulações em massa de duas LTs reais perfeitamente transpostas, contemplando um caso ideal de operação, ao contrário da validação na qual o método proposto é analisado por meio de casos mais adversos de acoplamento magnético. Os referidos sistemas elétricos utilizados nas etapas de avaliação e validação do método proposto são descritos mais detalhadamente nos tópicos 5.2.1 e 5.2.2 a seguir.

### 5.2.1 Sistema Elétrico Fictício

O sistema elétrico fictício considerado é formado por dois circuitos equivalentes A e B interligados por uma linha de transmissão com tensão nominal de 230 kV e comprimento de 500 km, conforme apresentado na Figura 5.2.

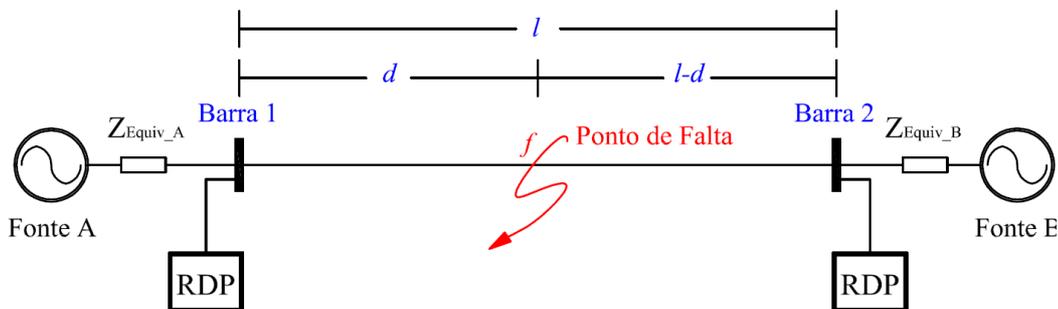


Figura 5.2 – Sistema elétrico fictício utilizado na avaliação do método proposto.

O efeito capacitivo verificado em linhas de grande extensão é considerável e promove maiores erros em procedimentos de localização de faltas. Então, a escolha por uma linha de 500 km se deve à tentativa de contemplar tal fonte de erros. Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros de sequência da referida LT. Já nas Tabelas 5.3 e 5.4 são evidenciados os dados dos equivalentes A e B conectados às extremidades da LT fictícia.

Tabela 5.2 – Dados de sequência da linha de transmissão.

| Sequência | R (Ω/km) | X (Ω/km) | $\omega C$ (μho/km) |
|-----------|----------|----------|---------------------|
| Zero      | 0,236    | 1,035    | 2,490               |
| Positiva  | 0,054    | 0,527    | 3,144               |

Tabela 5.3 – Tensão das fontes ( $V_{base} = 230$  kV).

| Fonte   | Módulo (p.u.) | Fase (°) |
|---------|---------------|----------|
| Fonte A | 1,014         | 10       |
| Fonte B | 1,000         | 0        |

Tabela 5.4 – Impedâncias das fontes.

| Fonte   | Sequência Zero     |                    | Sequência Positiva |                    |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|         | $R_0$ ( $\Omega$ ) | $X_0$ ( $\Omega$ ) | $R_1$ ( $\Omega$ ) | $X_1$ ( $\Omega$ ) |
| Fonte A | 1,445              | 5,276              | 1,963              | 5,648              |
| Fonte B | 1,445              | 5,276              | 1,963              | 5,648              |

### 5.2.2 Sistema Interligado Nacional

No intuito de tornar o processo de avaliação e validação mais confiável, foram consideradas linhas de transmissão reais pertencentes ao SIN (Sistema Interligado Nacional) instaladas nos sistemas elétricos localizados na região Nordeste do Brasil. Ao todo, três LTs reais são analisadas nas etapas de avaliação e validação do método proposto. Na Tabela 5.5 são listadas as linhas reais consideradas e as áreas onde estas se encontram instaladas são destacadas no mapa eletro-geográfico da Figura 5.3 a seguir.

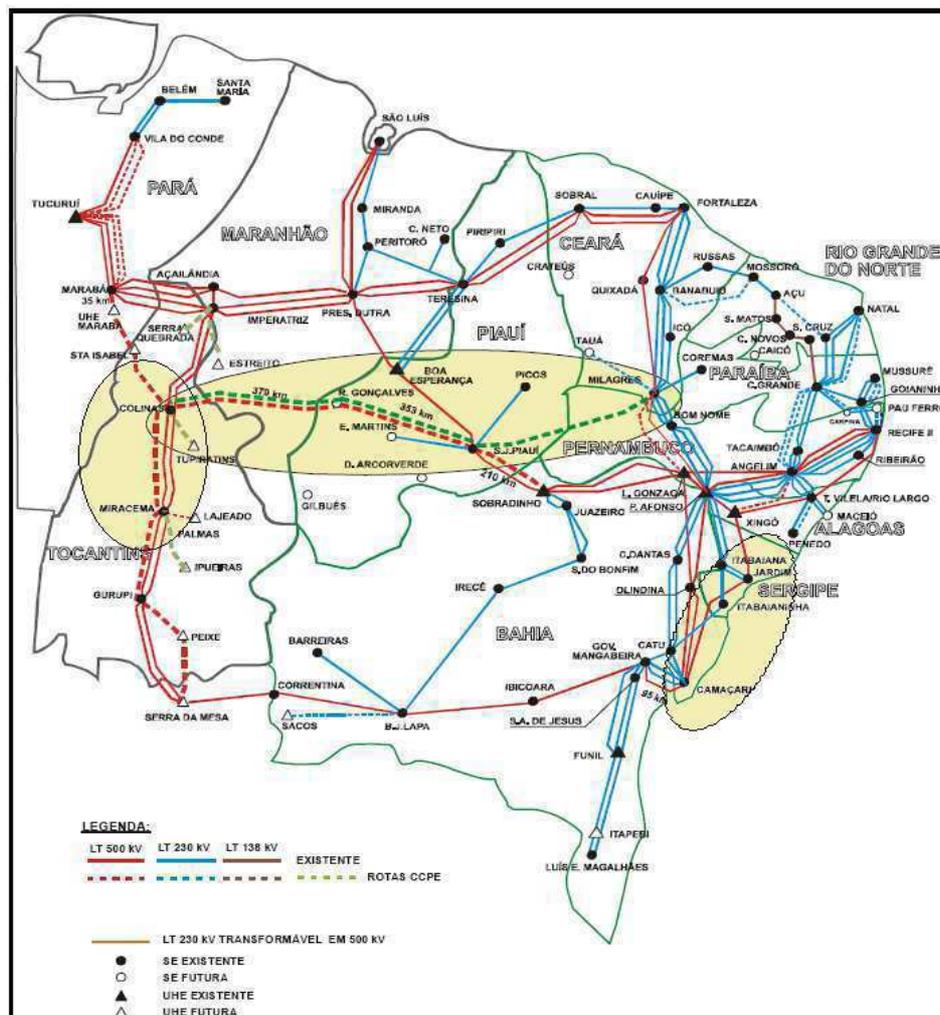


Figura 5.3 – Mapa eletro-geográfico do sistema elétrico considerado para validação do método proposto (Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2010).

**Tabela 5.5 – LTs reais consideradas na avaliação e validação do método proposto.**

| Linha de Transmissão                | Tensão Nominal | Número do Circuito Considerado | Sistema de Transmissão | Etapa da análise |
|-------------------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|------------------|
| LT Miracema – Colinas (MIR-COL)     | 500 kV         | Circuito 1                     | ELETRONORTE            | Avaliação        |
| LT Colinas – R. Gonçalves (COL-RGO) | 500 kV         | Circuito 1                     |                        |                  |
| LT Jardim – Camaçari (JDM-CMD)      | 500 kV         | Circuito Único                 | CHESF                  | Validação        |

Os dados de sequência e comprimentos das referidas linhas de transmissão são apresentados na Tabela 5.6. Já os dados referentes ao resto do sistema elétrico real considerado (porção Nordeste do SIN) são apresentados no Apêndice B.

**Tabela 5.6 – Dados de sequência das LTs reais consideradas na avaliação e validação do método proposto.**

| LT / Comprimento   | Sequência | R ( $\Omega$ /km) | X ( $\Omega$ /km) | $\omega$ C (mho/km) |
|--------------------|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|
| JDM-CMD / 248,4 km | Zero      | 0,3996            | 0,9921            | 3,0839              |
|                    | Positiva  | 0,0333            | 0,3170            | 5,2033              |
| MIR-COL / 161,0 km | Zero      | 0,4230            | 1,3570            | 2,7080              |
|                    | Positiva  | 0,0170            | 0,2660            | 6,0860              |
| COL-RGO / 379,0 km | Zero      | 0,4930            | 1,3390            | 2,8900              |
|                    | Positiva  | 0,0186            | 0,2670            | 6,1240              |

### 5.3 Avaliação do Método Proposto

Conforme mencionado anteriormente, a avaliação do método proposto é realizada a partir de simulações em massa de faltas em linhas de transmissão reais nas quais é aplicado, em tempo de execução, o algoritmo localizador de faltas. Nesta etapa, linhas perfeitamente transpostas são consideradas. Para tanto, foram realizadas 19200 simulações de faltas nas linhas MIR-COL e COL-RGO apresentadas no tópico 5.2. Cada simulação apresenta diferentes condições de falta na tentativa de abranger ao máximo a avaliação do método. Na Tabela 5.7 são evidenciados os limites inferiores e superiores dos parâmetros variados nos referidos casos.

Tabela 5.7 – Parâmetros variados na simulação de faltas nas LTs MIR-COL (161,0 km), e COL-RGO (379,0 km).

| Linha   | Resistência de Falta ( $\Omega$ ) |              |                    | Ângulo de Incidência da Falta ( $^{\circ}$ ) |                  |                         | Local de Aplicação da Falta (km) |            |                   |
|---------|-----------------------------------|--------------|--------------------|--|------------------|-------------------------|----------------------------------|------------|-------------------|
|         | $R_{f\text{ MIN}}$                | $\Delta R_f$ | $R_{f\text{ MAX}}$ | $\theta_{f\text{ MIN}}$                      | $\Delta\theta_f$ | $\theta_{f\text{ MAX}}$ | $d_{\text{ MIN}}$                | $\Delta d$ | $d_{\text{ MAX}}$ |
| MIR-COL | 0                                 | 30           | 100                | 0  | 20               | 180                     | 20                               | 20         | 141               |
| COL-RGO | 0                                 | 30           | 100                | 0  | 20               | 180                     | 20                               | 20         | 359               |

Nas Tabelas 5.8 e 5.9 são apresentados os resultados obtidos a partir das localizações de faltas mediante as simulações das linhas MIR-COL e COL-RGO, respectivamente.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos para a LT MIR-COL.

| Tipo da Falta | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias (%) |
|---------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| AT            | 560                       | 559                                  | 99,82%                                   |
| BT            | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| CT            | 560                       | 551                                  | 98,39%                                   |
| AB            | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| BC            | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| CA            | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| ABT           | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| BCT           | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| CAT           | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| ABC           | 560                       | 560                                  | 100,00%                                  |
| <b>Total:</b> | <b>5600</b>               | <b>5590</b>                          | <b>99,82%</b>                            |

Tabela 5.9 – Resultados obtidos para a LT COL-RGO.

| Tipo da Falta | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias (%) |
|---------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| AT            | 1360                      | 1324                                 | 97,35%                                   |
| BT            | 1360                      | 1343                                 | 98,75%                                   |
| CT            | 1360                      | 1350                                 | 99,26%                                   |
| AB            | 1360                      | 1350                                 | 99,26%                                   |
| BC            | 1360                      | 1358                                 | 99,85%                                   |
| CA            | 1360                      | 1354                                 | 99,56%                                   |
| ABT           | 1360                      | 1360                                 | 100,00%                                  |
| BCT           | 1360                      | 1360                                 | 100,00%                                  |
| CAT           | 1360                      | 1356                                 | 99,71%                                   |
| ABC           | 1360                      | 1360                                 | 100,00%                                  |
| <b>Total:</b> | <b>13600</b>              | <b>13515</b>                         | <b>99,38%</b>                            |

Pode-se notar que as mesmas variações de resistência de falta e de ângulo de incidência de falta são aplicadas às linhas de transmissão MIR-COL e COL-RGO, porém, por apresentarem diferentes comprimentos, o número de simulações para cada linha é diferente. De fato, para que as mesmas variações dos parâmetros da falta sejam contempladas, diferentes quantidades de simulações são necessárias para cada uma das LTs. Os dados gerais da etapa de avaliação do método proposto são apresentados na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10 – Resultados gerais da localização de faltas nas LTs MIR-COL e COL-RGO.**

| Linha de Transmissão | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Não Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias |
|----------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| MIR-COL              | 5600                      | 10                                       | 5590                                 | <b>99,82%</b>                        |
| COL-RGO              | 13600                     | 85                                       | 13515                                | <b>99,38%</b>                        |
| <b>Total:</b>        | <b>19200</b>              | <b>95</b>                                | <b>19105</b>                         | <b>99,51%</b>                        |

Os resultados obtidos evidenciam, nesta etapa de avaliação, que o método proposto é bastante eficaz na localização de faltas em linhas de transmissão. Das 19200 simulações, aproximadamente 99,51% das localizações apresentaram erros abaixo dos 7,5 km admissíveis para uma frequência de amostragem de 20 kHz. Vale salientar que as linhas consideradas apresentam indutores *shunt* instalados em ambas as extremidades bem como possuem compensação capacitiva série em uma das extremidades (ver Apêndice B). Tais características, em muitos casos, podem provocar maiores índices de erro nas localizações das faltas e, portanto, por serem consideradas nesta etapa de avaliação, evidenciam ainda mais a potencialidade do método proposto em situações ideais de acoplamento magnético.

## 5.4 Validação do Método Proposto

Para a validação do método proposto, são consideradas linhas reais e fictícias com diferentes tipos de transposição, conforme apresentado anteriormente na Tabela 5.1. Inicialmente, faltas na LT fictícia foram simuladas possibilitando a validação do método para os melhores e piores casos de acoplamento magnético entre fases, ou seja, para casos da linha perfeitamente tranposta e sem transposição. Na segunda etapa, a linha que interliga as subestações de Jardim e de Camaçari é considerada. Neste segundo momento, são considerados casos da linha perfeitamente tranposta, sem transposição e, no intuito de tornar as simulações mais realísticas, com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6. Desta

forma, os casos simulados são aproximados às configurações verificadas na prática sem que sejam desconsiderados os casos extremos de acoplamento eletromagnético entre as fases do sistema em análise. Na Tabela 5.11 são apresentados os limites inferiores e superiores dos parâmetros variados ao longo das simulações das duas etapas da validação.

**Tabela 5.11 – Parâmetros variados nas simulações de faltas na LT Fictícia (500 km) e na LT JDM-CMD (248,4 km).**

| Linha       | Resistência de Falta ( $\Omega$ ) |              |           | Ângulo de Incidência da Falta ( $^{\circ}$ ) |                  |                | Local de Aplicação da Falta (km) |            |         |
|-------------|-----------------------------------|--------------|-----------|--|------------------|----------------|----------------------------------|------------|---------|
|             | $R_f$ MIN                         | $\Delta R_f$ | $R_f$ MAX | $\theta_f$ MIN                               | $\Delta\theta_f$ | $\theta_f$ MAX | $d$ MIN                          | $\Delta d$ | $d$ MAX |
| LT Fictícia | 0                                 | 30           | 100       | 0  | 20               | 180            | 20                               | 20         | 480     |
| JDM-CMD     | 0                                 | 30           | 100       | 0  | 20               | 180            | 20                               | 20         | 230     |

Ao longo desta etapa do trabalho, primou-se por uma validação robusta. Para tanto, foram simulados mais de 30000 casos que contemplam todas as variações mencionadas. Os resultados das simulações de faltas na LT fictícia são apresentados nas Tabelas 5.12 e 5.13 referenciando os casos da linha perfeitamente transposta e sem transposição, respectivamente. Já os resultados das simulações da LT JDM-CMD são evidenciados nas Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16 para os casos da linha perfeitamente transposta, sem transposição e com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6, respectivamente.

**Tabela 5.12 – Resultados obtidos para a LT fictícia perfeitamente transposta.**

| Tipo da Falta | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias (%) |
|---------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| AT            | 960                       | 949                                  | <b>98,85%</b>                            |
| BT            | 960                       | 949                                  | <b>98,85%</b>                            |
| CT            | 960                       | 949                                  | <b>98,85%</b>                            |
| AB            | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| BC            | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| CA            | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| ABT           | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| BCT           | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| CAT           | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| ABC           | 960                       | 960                                  | <b>100,00%</b>                           |
| <b>Total:</b> | <b>9600</b>               | <b>9567</b>                          | <b>99,66%</b>                            |

**Tabela 5.13 – Resultados obtidos para a LT fictícia sem transposição.**

| <b>Tipo da Falta</b> | <b>Número de Casos Simulados</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias (%)</b> |
|----------------------|----------------------------------|---|---|
| AT                   | 960                              | 944   | <b>98,33%</b>                                   |
| BT                   | 960                              | 947   | <b>98,65%</b>                                   |
| CT                   | 960                              | 950   | <b>98,96%</b>                                   |
| AB                   | 960                              | 954   | <b>98,38%</b>                                   |
| BC                   | 960                              | 960   | <b>100,00%</b>                                  |
| CA                   | 960                              | 954   | <b>99,38%</b>                                   |
| ABT                  | 960                              | 955   | <b>99,48%</b>                                   |
| BCT                  | 960                              | 960   | <b>100,00%</b>                                  |
| CAT                  | 960                              | 959   | <b>99,90%</b>                                   |
| ABC                  | 960                              | 960   | <b>100,00%</b>                                  |
| <b>Total:</b>        | <b>9600</b>                      | <b>9543</b>                                 | <b>99,41%</b>                                   |

**Tabela 5.14 – Resultados obtidos para a LT JDM-CMD perfeitamente transposta.**

| <b>Tipo da Falta</b> | <b>Número de Casos Simulados</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias (%)</b> |
|----------------------|----------------------------------|---|---|
| AT                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| BT                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| CT                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| AB                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| BC                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| CA                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| ABT                  | 440                              | 439   | <b>99,77%</b>                                   |
| BCT                  | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| CAT                  | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| ABC                  | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| <b>Total:</b>        | <b>4400</b>                      | <b>4399</b>                                 | <b>99,98%</b>                                   |

**Tabela 5.15 – Resultados obtidos para a LT JDM-CMD sem transposição.**

| <b>Tipo da Falta</b> | <b>Número de Casos Simulados</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias (%)</b> |
|----------------------|----------------------------------|---|---|
| AT                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| BT                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| CT                   | 440                              | 439   | <b>99,77%</b>                                   |
| AB                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| BC                   | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| CA                   | 440                              | 400   | <b>90,91%</b>                                   |
| ABT                  | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| BCT                  | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| CAT                  | 440                              | 427   | <b>97,05%</b>                                   |
| ABC                  | 440                              | 440   | <b>100,00%</b>                                  |
| <b>Total:</b>        | <b>4400</b>                      | <b>4346</b>                                 | <b>98,77%</b>                                   |

**Tabela 5.16 – Resultados obtidos para a LT JDM-CMD com transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6.**

| <b>Tipo da Falta</b> | <b>Número de Casos Simulados</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias</b> | <b>Número de Localizações Satisfatórias (%)</b> |
|----------------------|----------------------------------|---|---|
| AT                   | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| BT                   | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| CT                   | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| AB                   | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| BC                   | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| CA                   | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| ABT                  | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| BCT                  | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| CAT                  | 304                              | 304   | <b>100,00%</b>                                  |
| ABC                  | 304                              | 300   | <b>98,68%</b>                                   |
| <b>Total:</b>        | <b>3040</b>                      | <b>3036</b>                                 | <b>99,87%</b>                                   |

Considerando os resultados obtidos por meio das simulações de faltas na LT fictícia, percebe-se que, conforme esperado, o número de localizações satisfatórias para o caso da linha perfeitamente transposta é maior que o número verificado na situação da linha sem transposição. De fato, o acoplamento eletromagnético entre as fases do sistema para uma linha sem transposição é intensificado, proporcionando, em alguns casos, tensões trifásicas desequilibradas e, conseqüentemente, tornando mais impreciso o procedimento de detecção do instante inicial dos transitórios nas barras monitoradas. Desta forma, existe um aumento no índice de erros das localizações de faltas. Na Tabela 5.17 são mostrados os resultados gerais das simulações da LT fictícia e na Tabela 5.18 são apresentadas as análises dos casos nos quais as localizações foram classificadas como não satisfatórias.

**Tabela 5.17 – Resultados gerais da localização de faltas na LT fictícia.**

| Tipo de Transposição | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Não Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias (%) |
|----------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|--|
| Perf. Transp.        | 9600                      | 33                                       | 9567                                 | <b>99,66%</b>                            |
| Não Transposta       | 9600                      | 57                                       | 9543                                 | <b>99,41%</b>                            |
| <b>Total:</b>        | <b>19200</b>              | <b>90</b>                                | <b>19110</b>                         | <b>99,53%</b>                            |

**Tabela 5.18 – Análise dos resultados não satisfatórios para LT fictícia.**

| Tipo de Transposição | Número de Localizações Não Satisfatórias | Número de casos relacionados a faltas de alta impedância (>60 Ω). | Número de casos relacionados a ângulos de incidência próximos a zero (<10°). | Número de casos relacionados a motivos não conhecidos. |
|----------------------|--|---|--|--|
| Perf. Transp.        | 33 (100%)                                | 22 (66,67%)   | 0 (0,00%)  | 11 (33,33%)  |
| Não Transposta       | 57 (100%)                                | 41 (71,93%)   | 6 (10,53%)   | 10 (17,54%)  |
| <b>Total:</b>        | <b>90 (100%)</b>                         | <b>63 (70,00%)</b>  | <b>6 (6,67%)</b>   | <b>21 (23,33%)</b>                                     |

De acordo com os resultados obtidos, menos de 0,5% dos 19200 casos simulados apresentaram uma localização da falta não satisfatória. Aproximadamente 70% das 90 localizações não satisfatórias são relacionadas a situações de faltas de alta impedância e em torno de apenas 6% são relacionadas a casos de faltas com ângulos de incidência próximos a zero ou próximos ao cruzamento dos sinais de tensão pelo zero.

Nesta primeira etapa de validação do método proposto, é evidenciada uma baixa sensibilidade do algoritmo em relação às situações mais adversas no que se refere à faltas de alta impedância e faltas com ângulo de incidência próximo a zero. Dentre os casos que divergiram, detecta-se uma maior influência da resistência de falta sobre os resultados obtidos. De fato, para altas impedâncias de falta, existe uma maior atenuação dos transitórios e, conseqüentemente, maior atenuação dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$ . Desta forma, é possível que amostras dos coeficientes  $[c_{dif}]^2$  referentes à ocorrência de transitórios sejam interpretadas como sendo relacionadas ao regime permanente do sistema em estudo, consistindo em imprecisões na detecção do instante inicial dos transitórios e, portanto, em maiores níveis de erro na localização da falta.

Em relação à condição de linha não transposta, um fato possível é que o algoritmo proposto gere coeficientes  $[c_{dif}]^2$  de amplitudes consideráveis provenientes do desbalanceamento das fases. Desta forma, é bem provável que ocorra a detecção errônea de uma ocorrência de transitórios quando na realidade apenas um desbalanceamento é verificado no regime permanente. Vale salientar que, apesar da diminuição da taxa de acerto do caso da linha perfeitamente transposta para o caso da linha sem transposição, pode-se dizer que o algoritmo proposto funcionou muito bem para ambas as situações, uma vez que a diferença, em porcentagem, do número de localizações satisfatórias entre ambos os casos foi da ordem de apenas 0,2%.

Considerando agora os resultados obtidos por meio da simulação de faltas na LT JDM-CMD, percebe-se que, assim como verificado para a LT fictícia, uma maior quantidade de localizações não satisfatórias é verificada para o caso da linha não transposta. Fica concluído, portanto, que a localização de faltas pode ser comprometida em casos de sistemas desbalanceados e/ou desequilibrados. Mesmo assim, o número de localizações com erro dentro dos limites admissíveis para uma frequência de 20 kHz foi de aproximadamente 98,77% dos 4400 casos simulados para o caso da linha sem transposição, evidenciando que, mesmo em situações adversas de acoplamento eletromagnético entre fases, o método proposto funciona muito bem.

Um fato a ser destacado é que a transposição do tipo 1/6-1/3-1/3-1/6 colabora substancialmente para o equilíbrio entre as fases. A partir dos resultados obtidos evidenciados na Tabela 5.16, verificou-se que a localização de faltas apresentou melhores taxas de acerto do que para o caso da linha sem transposição. De fato, conforme

mencionado anteriormente, quanto mais balanceado o sistema no qual se aplica o método proposto para localização de faltas, menor a propabilidade de ocorrência de detecções errôneas de transitórios e, conseqüentemente, o método se torna ainda mais confiável. A análise geral dos casos simulados para LT JDM-CMD é apresentada na Tabela 5.19.

**Tabela 5.19 – Resultados gerais da localização de faltas na LT JDM-CMD.**

| Tipo de Transposição | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Não Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias (%) |
|----------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|--|
| Perf. Transp.        | 4400                      | 1  | 4399                                 | <b>99,98%</b>                            |
| Não Transposta       | 4400                      | 54                                       | 4346                                 | <b>98,77%</b>                            |
| 1/6-1/3-1/3-1/6      | 3040                      | 4  | 3036                                 | <b>99,87%</b>                            |
| <b>Total:</b>        | <b>11840</b>              | <b>59</b>                                | <b>11781</b>                         | <b>99,50%</b>                            |

Percebe-se, portanto, que independentemente do tipo de transposição considerada para a LT JDM-CMD, o método proposto apresentou comportamento bastante satisfatório, promovendo localizações das faltas com erro admissível em mais de 99% dos 11840 casos simulados. Vale salientar que dentre os resultados não satisfatórios, boa parte destes está relacionado à faltas de alta impedância entre 70  $\Omega$  e 100  $\Omega$ . Tais valores de resistência de falta são considerados nas simulações com o intuito de abranger a validação do método, porém, para sistemas de transmissão, são valores pouco verificados nas ocorrências de faltas sendo mais comuns em distúrbios nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

A fim de facilitar a análise comparativa entre os casos simulados na etapa de validação do método proposto, são apresentados na Tabela 5.20 os dados gerais das simulações realizadas para todas as linhas de transmissão consideradas.

**Tabela 5.20 – Resultados gerais da etapa de validação do método proposto.**

| Linha de Transmissão | Tipo de Transposição | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Não Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias |
|----------------------|----------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| LT Fictícia          | Perf. Transp.        | 9600                      | 33                                       | 9567                                 | <b>99,66%</b>                        |
|                      | Não Transposta       | 9600                      | 57                                       | 9543                                 | <b>99,41%</b>                        |
| LT JDM-CMD           | Perf. Transp.        | 4400                      | 1  | 4399                                 | <b>99,98%</b>                        |
|                      | Não Transposta       | 4400                      | 54                                       | 4346                                 | <b>98,77%</b>                        |
|                      | 1/6-1/3-1/3-1/6      | 3040                      | 4  | 3036                                 | <b>99,87%</b>                        |
| <b>Total Geral:</b>  |                      | <b>31040</b>              | <b>149</b>                               | <b>30891</b>                         | <b>99,52%</b>                        |

Com base nos dados expostos, pode-se observar que o desempenho do método proposto para localização de faltas é bastante satisfatório no sentido de proporcionar uma taxa de localizações com erro admissível na ordem de 99,52% dos 31040 casos simulados. Assim, o algoritmo proposto para localização de faltas, apresenta-se como uma possível rotina a ser incorporada a relés digitais no intuito de proporcionar uma localização precisa e automática da localização de faltas quase imediatamente após a ocorrência do distúrbio.

## 5.5 Síntese da Avaliação e Validação do Método Proposto

Conforme mencionado anteriormente, métodos para localização de faltas são, em geral, validados por meio da análise de grandes quantidades de casos de faltas. Neste trabalho, utiliza-se o ATP e o Matlab<sup>®</sup> para possibilitar a simulação em massa de faltas com diferentes configurações. Para se ter uma percepção global das análises realizadas, é importante que os resultados sejam apresentados em conjunto, sem que haja distinção entre as fases de avaliação e validação do algoritmo proposto para localização de faltas em linhas de transmissão. Portanto, na Tabela 5.21, são evidenciados os resultados gerais obtidos nas etapas de avaliação e validação do método localizador de faltas. Mais de 50000 casos foram simulados sendo 99,51% deles considerados satisfatórios. Tal fato evidencia a potencialidade do algoritmo e sua aplicabilidade como rotina adicional a IEDs.

**Tabela 5.21 – Resultados gerais das etapas de avaliação e validação do método proposto.**

| Linha de Transmissão | Tipo de Transposição | Número de Casos Simulados | Número de Localizações Não Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias | Número de Localizações Satisfatórias (%) |
|----------------------|----------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|--|
| LT MIR-COL           | Perf. Transp.        | 5600                      | 10                                       | 5590                                 | <b>99,82%</b>                            |
| LT COL-RGO           | Perf. Transp.        | 13600                     | 85                                       | 13515                                | <b>99,38%</b>                            |
| LT Fictícia          | Perf. Transp.        | 9600                      | 33                                       | 9567                                 | <b>99,66%</b>                            |
|                      | Não Transp.          | 9600                      | 57                                       | 9543                                 | <b>99,41%</b>                            |
| LT JDM-CMD           | Perf. Transp.        | 4400                      | 1  | 4399                                 | <b>99,98%</b>                            |
|                      | Não Transp.          | 4400                      | 54                                       | 4346                                 | <b>98,77%</b>                            |
|                      | 1/6-1/3-1/3-1/6      | 3040                      | 4  | 3036                                 | <b>99,87%</b>                            |
| <b>Total Geral:</b>  |                      | <b>50240</b>              | <b>244</b>                               | <b>49996</b>                         | <b>99,51%</b>                            |



Etapa de Avaliação do Método



Etapa de Validação do Método

## Capítulo 6

### Conclusões

Um método para localização de faltas em linhas de transmissão baseado na teoria das ondas viajantes foi desenvolvido e avaliado por meio de simulações digitais do tipo EMTP, nas quais foram considerados sistemas elétricos de potência de alta tensão com diferentes tipos de transposição. Dentre os sistemas analisados, linhas reais e fictícias foram modeladas para avaliação e validação do método proposto. Diversas condições de faltas foram contempladas, a exemplo do local de ocorrência do defeito, da resistência de falta e do ângulo de incidência da falta. Já o efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases das linhas de transmissão foi considerado a partir do estudo de casos de faltas em linhas perfeitamente transpostas, não transpostas e com esquema de transposição 1/6-1/3-1/3-1/6, sendo este último bastante utilizado nos sistemas de transmissão do SIN.

Os resultados obtidos evidenciaram a eficiência do método na localização de faltas em linhas de transmissão monitoradas em dois terminais. A partir de simples rotinas programadas na linguagem MODELS, o algoritmo proposto foi incorporado às simulações no ATP de forma que dos 50240 casos simulados, 99,51% apresentaram localizações de faltas com erros em módulo dentro dos limites admissíveis para a frequência de amostragem adotada. Neste trabalho, uma frequência de amostragem de 20 kHz foi utilizada implicando num limiar de erro admissível de aproximadamente 7,5 km. Vale

frisar que a precisão dos métodos para localização de faltas baseados em ondas viajantes é dependente das frequências de amostragem utilizadas pelos RDP. Porém, conforme apresentado no Apêndice A, com o avanço de tais equipamentos é vislumbrado um futuro promissor para estas técnicas uma vez que quanto maiores forem as taxas de amostragem utilizadas pelos RDP, maior a precisão do cálculo do ponto de falta. Contudo, mesmo utilizando os equipamentos disponíveis atualmente no mercado, o algoritmo proposto neste trabalho oferece uma restrição do campo de busca do defeito muito boa e se mostra bastante eficiente quando considerados casos de faltas em linhas longas, ou seja, com comprimento acima de 240 km.

O método proposto para localização de faltas é baseado na detecção de transitórios em dois terminais da LT por meio da aplicação da Transformada de Park (Tdq0) a qual, até então, não havia sido utilizada para fins de localização de defeitos. Esta transformada permite o monitoramento simultâneo das três fases em cada um dos terminais da linha. Sendo assim, para métodos de localização de faltas de dois terminais, apenas dois sinais, compostos pelos coeficientes  $[c_{dif}]^2$ , calculados a partir de amostras atuais de tensão sincronizadas por GPS, são considerados. Portanto, uma vantagem do método é a diminuição do número de variáveis envolvidas no procedimento de localização de faltas, fato este que diminui a probabilidade de erros e torna o método mais confiável. Outro fator positivo do algoritmo proposto e considerado relevante é a utilização de apenas amostras atuais do sistema. Desta forma, o método apresenta grande simplicidade de implementação e proporciona uma localização de faltas de forma automática quase que imediatamente após a ocorrência do distúrbio.

Como consequência, a localização de faltas por meio do método proposto pode propiciar melhores taxas de continuidade de serviço por meio da identificação rápida do ponto de ocorrência do defeito. Considerando que, usualmente, a busca pelo local do problema é realizada por vias terrestres ou utilizando helicópteros, ter uma boa estimativa do local da falta limita o campo de busca do problema, acelera a localização do defeito, permite uma rápida restauração do sistema, promove melhorias nas taxas de continuidade de serviço e, conseqüentemente, evita desligamentos prolongados os quais são bastante comuns em casos de faltas em linhas de transmissão longas.

Algumas limitações da técnica proposta são impostas pelas características das faltas e pelos esquemas de transposição utilizados. Conforme verificado ao longo dos resultados,

maiores índices de erros são verificados nos casos de faltas de alta impedância, com ângulos de incidência próximos a zero ou próximos ao cruzamento das tensões pelo zero e, por fim, no caso de sistemas com alto acoplamento eletromagnético entre fases. Em relação às faltas de alta impedância e de ângulos de incidência aproximadamente nulos, os transitórios podem apresentar atenuação considerável, promovendo coeficientes  $[c_{dif}]^2$  também bastante atenuados, dificultando o cálculo correto dos instantes iniciais dos transitórios nos pontos de interesse e, conseqüentemente, introduzindo maiores erros à localização de faltas. Já em relação ao acoplamento eletromagnético entre fases, pode-se afirmar que coeficientes  $[c_{dif}]^2$  de amplitudes consideráveis podem ser gerados devido ao desbalanceamento das fases. Desta forma, é possível que o algoritmo confunda situações de regime permanente com situações de regime transitório, implicando, portanto, em maiores erros na identificação do ponto de falta. Mesmo diante de tais limitações, o algoritmo se mostrou bastante eficiente para todos os casos analisados nos quais foram contempladas variações das condições de falta e do tipo de transposição utilizado.

Como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes atividades podem ser desenvolvidas:

1. Realizar uma análise comparativa entre o desempenho do método proposto e de métodos convencionais baseados em componentes de frequência fundamental de tensão e corrente, como por exemplo, o método da impedância, evidenciando as potencialidades e limitações de cada uma destes;
2. Avaliação do desempenho do método considerando a influência de uma possível falta de sincronismo entre os RDP utilizados devido à utilização dos GPS, uma vez que operacionalmente tal equipamento não proporciona um sincronismo perfeito entre os registros oscilográficos e, portanto, pode fazer com que o algoritmo apresente maiores desvios na localização de faltas;
3. Análise da aplicação do método para localização de faltas usando um relógio independente, conforme proposto neste trabalho, em situações de RDP não sincronizados, visando a obtenção de alternativas que suprimam a utilização de GPS quando aplicados métodos de dois terminais para localizar defeitos;
4. Utilização da linguagem C para incorporar as rotinas desenvolvidas (até então na linguagem MODELS) às simulações digitais em tempo real utilizando o RTDS<sup>TM</sup>,

tornando a avaliação do método mais realística e tornando possível a análise do algoritmo proposto quando aplicado em sistemas dinâmicos;

5. Implementação do algoritmo desenvolvido em um *hardware* (por exemplo, em um processador digital de sinais) para monitoramento de transitórios no sistema e localização automática de faltas cuja avaliação pode ser realizada por meio de simulações em tempo real via RTDS<sup>TM</sup> fazendo uso das saídas analógicas disponíveis neste equipamento;
6. Implementação de um sistema físico para localização de faltas, consistindo num módulo que receba todos os dispositivos e equipamentos necessários para aquisição de dados de tensão do secundário dos TPC, para filtragem dos sinais, tratamento de dados, para apresentação da localização da falta e, por fim, para proteger os dispositivos contra condições climáticas adversas e contra interferências eletromagnéticas, possibilitando a aplicação do dispositivo em diferentes ambientes sem que o seu funcionamento seja comprometido.

# Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, A. E. A., NEVES W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG – Brasil: Editora UFMG, 2005.
- COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, agosto 2006.
- COSTA, F. B., SOUZA, B. A., BRITO, N. S. D., SILVA, K. M. “Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios”. *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2010*, Belém-PA, Brasil, 18-21 de maio, 2010.
- DOMMEL, H. W. *Eletromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*. Portland, BPA: [s.n.], 1996.
- DOMMEL, H. W., MICHELS, J. “High-speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis”. *IEEE Conference*, Paper No. A78, pp. 214-219, January/February 1978.
- DUBE, L. “*Models in ATP: Language Manual*”, [S.l.], 1996.
- FENG, Z., JUN, L., LI, Z., ZHIHAO, Y. “A New Fault Location Method Avoiding Wave Speed and Based on Traveling Waves for EHV Transmission Line”. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies - DRPT 2008*, Nanjing, China, April 6-9, 2008.
- FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., C., UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas - 6ª edição*. Porto Alegre, RS – Brasil: Editora Bookman, 2006.
- FUCHS, R. D. *Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), Itajubá, 1973.

- GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., XU BINGYIN GE YAOZHONG CORY, B. J., BARKER, J. R. G. "Fault Location Based on Travelling Waves". *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 54-59, New York, 1993.
- GIRGIS, A. M., HART, D. G., PETERSON, W. L. "A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, N<sup>o</sup>. 1, pp. 98-107, January 1992.
- GOPALAKRISHNAN, A., KEZUNOVIC, M., MCKENNA, S. M., HAMAI, D. M. "Fault Location Using the Distributed Parameter Transmission Line Model". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, N<sup>o</sup>. 4, October 2000.
- HANSELMAN, D., LITTLEFIELD, B. *MatLab<sup>®</sup> 6 - Curso Completo*. Editora Prentice Hall, 2003.
- JAMALI, S., GHEZELJEH, A. "Fault Location on Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves". *International Conference on Developments in Power System Protection*, Vol. 1, pp. 220-223, 5-8 April, 2004.
- JIAN, Q., XIANGXUN, C., JIANCHAO, Z. "Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform". *International Conference on Power System Technology - POWERCON'98*, Vol. 1, pp. 533-537, Beijing, China, 18-21 August, 1998.
- LEE, H., MOUSA, A. M. "GPS Travelling Wave Fault Locator Systems: Investigation into the Anomalous Measurements Related to Lightning Strikes". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- LEUVEN EMTP CENTER, *ATP - Alternative Transients Program: Rule Book*. Heverlee, Belgium, July 1987.
- LIN, D., JUN P., WENXIA, S., JUN, T., JUN, Z. "Fault Location for Transmission Line Based on Traveling Waves Using Correlation Analysis Method". *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 9-13, 2008.
- LOPES, F. V., FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A. "Uma Nova Abordagem para Localização de Faltas em Linhas de Transmissão". *IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America*, São Paulo-SP, Brasil, 8-10 de novembro, 2010.

- MOUTINHO, J. A. P., FILHO, J. C., MATOS, R. R., DUTRA, C. A., TUMA, E. T., COSTA, S. O. S. “Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Através de Ondas Viajantes: Aplicação no Sistema Elétrico Tramo Oeste do Pará”. *X STPC - Seminário Técnico de Proteção e Controle*, Recife-PE, 17-20 de outubro, 2010.
- PHADKE, A. G., THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2<sup>nd</sup> Edition, New York, USA: John Willey & Sons Inc, 2009.
- RADOJEVIĆ, Z. M., KIM, C. H., POPOV, M., PRESTON, G., TERZIJA, V. “New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters”. *International Conference on Power Systems Transients, IPST 2009*, Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- SANTOSO, S., POWERS, E. J., HOFMANN, P. “Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2): 924-930, 1996.
- WEDEPOHL, L. M. “Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase Systems”. *Proceedings of the IEE*, Vol. 110, no. 12, pp. 2200-2212, December, 1963.
- WISZNIEWSKI, A. “Accurate Fault Impedance Locating Algorithm”. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, Vol. 130, issue: 6, pp. 311 – 314, November, 1983.
- ZAMORA, I., MIAAMBRES, J. F., MAZON, A. J., R. ALVAREZ-LSASI, LAZARO, J. “Fault Location on Two-Terminal Transmission Lines Based on Voltages”. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol. 143, issue: 1, pp. 1-6, January, 1996.
- ZIMATH, S. L., RAMOS, M. A. F., FILHO, J. E. S. “Comparison of Impedance and Travelling Wave Fault Location Using Real Faults”. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, New Orleans, USA, April 19-22, 2010.
- ZHENG, X., LI, X., DING, J., DUAN, Z. “Study on Impedance-traveling Wave Assembled Algorithm in One-terminal Fault Location System for Transmission Lines”. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies – DRPT 2008*, Nanjing, China, April 6-9, 2008.

## Apêndice A

# Análise da Influência das Frequências de Amostragem Sobre a Precisão dos Métodos Localizadores de Faltas

Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a precisão dos métodos localizadores de faltas baseados na teoria de ondas viajantes é diretamente influenciada pela frequência de amostragem dos RDP utilizados na aquisição dos sinais a serem analisados. De fato, os tempos de trânsito das ondas viajantes provenientes de faltas são aproximados para valores múltiplos do período de amostragem mais próximos. Assim, quanto menores as frequências de amostragem, maiores os períodos de amostragem e, portanto, maiores erros provenientes das aproximações dos tempos de trânsito, implicando no aumento dos erros verificados na localização de faltas. Então, é a partir deste conceito que é calculado o erro admissível dos algoritmos baseados em ondas viajantes conforme apresentado no Capítulo 4. Tais erros são denominados admissíveis porque não se enquadram como imprecisões dos algoritmos, mas sim, como limitações dos equipamentos utilizados na aquisição de dados.

Com o avanço dos RDP, maiores frequências de amostragem serão disponibilizadas e, portanto, o erro admissível diminuirá proporcionalmente. Isto implica dizer que a precisão da localização de faltas será melhorada a partir do aumento das taxas de aquisição

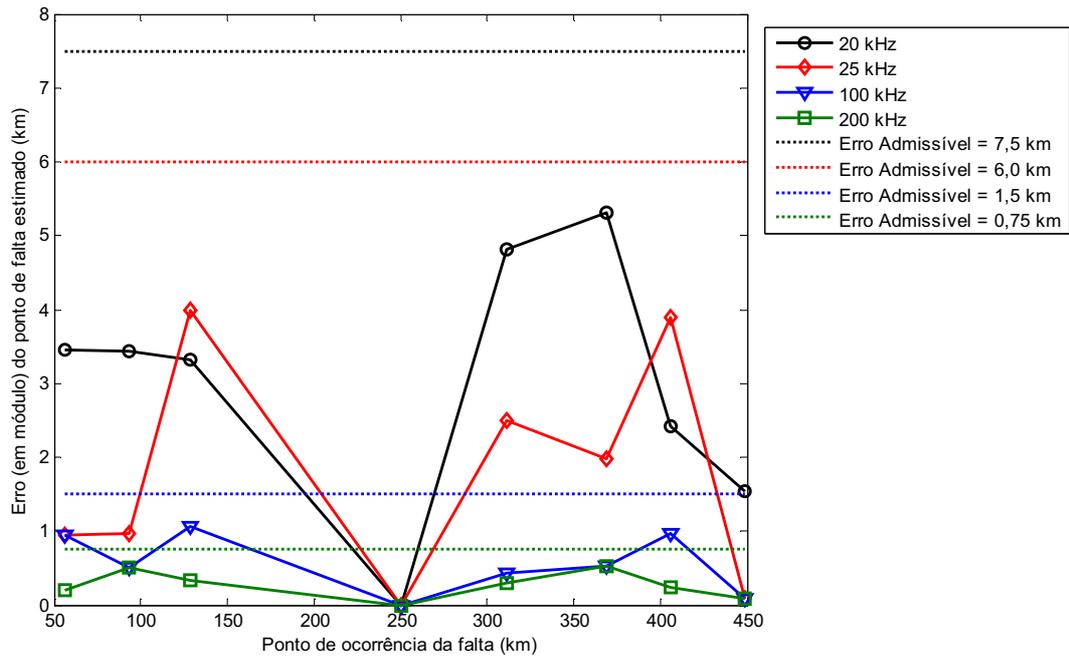
de dados. De fato, sendo possível optar por altas frequências de amostragem, o erro máximo admissível passa a ser parâmetro ajustável do sistema localizador de falhas. Por exemplo, se é desejado um erro máximo admissível de 7,5 km nas localizações de falhas deve ser utilizada uma frequência de amostragem de 20 kHz ( $\Delta t = 50 \mu s$ ). Já se o erro máximo admissível desejado for de 750 m, a frequência de amostragem a ser utilizada será de 200 kHz ( $\Delta t = 5 \mu s$ ), frequência esta não disponível no mercado.

Desta forma, para ilustrar a influência das frequências de amostragem sobre os algoritmos baseados na teoria de ondas viajantes, foram simuladas falhas monofásicas na linha de transmissão fictícia, perfeitamente transposta, apresentada na Figura 5.2 do Capítulo 5. Para tanto, RDP virtuais com frequências de amostragem de 20 kHz, 25 kHz, 100 kHz e 200 kHz foram considerados, cujos erros admissíveis são de 7,5 km, 6,0 km, 1,5 km e 0,75 km, respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela A.1.

**Tabela A.1 – Localização de Falhas monofásicas 1A-T via Tdq0 para análise da influência das frequências de amostragem sobre os métodos localizadores de falhas.**

|                                |                     | RDP <sub>1</sub><br>F <sub>s</sub> =20 kHz |           | RDP <sub>2</sub><br>F <sub>s</sub> =25 kHz |           | RDP <sub>3</sub><br>F <sub>s</sub> =100 kHz |           | RDP <sub>4</sub><br>F <sub>s</sub> =200 kHz |           |
|--------------------------------|---------------------|--|-----------|--|-----------|---|-----------|---|-----------|
| Linha Perfeitamente Transposta | Local da Falta (km) | Local estimado (km)                        | Erro (km) | Local estimado (km)                        | Erro (km) | Local estimado (km)                         | Erro (km) | Local estimado (km)                         | Erro (km) |
|                                | 56                  | 52,55                                      | 3,45      | 56,94                                      | 0,94      | 56,94                                       | 0,94      | 56,21                                       | 0,21      |
|                                | 93                  | 96,43                                      | 3,43      | 92,04                                      | 0,96      | 93,50                                       | 0,50      | 93,50                                       | 0,50      |
|                                | 129                 | 125,68                                     | 3,32      | 132,99                                     | 3,99      | 130,07                                      | 1,07      | 129,34                                      | 0,34      |
|                                | 250                 | 250,00                                     | 0,00      | 250,00                                     | 0,00      | 250,00                                      | 0,00      | 250,00                                      | 0,00      |
|                                | 311                 | 315,82                                     | 4,82      | 308,50                                     | 2,50      | 311,43                                      | 0,43      | 310,70                                      | 0,30      |
|                                | 369                 | 374,32                                     | 5,32      | 367,01                                     | 1,99      | 368,47                                      | 0,53      | 368,47                                      | 0,53      |
|                                | 406                 | 403,57                                     | 2,43      | 402,11                                     | 3,89      | 405,04                                      | 0,96      | 405,77                                      | 0,23      |
|                                | 449                 | 447,45                                     | 1,55      | 448,91                                     | 0,09      | 448,91                                      | 0,09      | 448,91                                      | 0,09      |

Analisando os resultados evidenciados na Tabela A.1 é verificado que, utilizando o método proposto para localizar as falhas simuladas, as falhas foram localizadas de forma bastante satisfatória. De fato, conforme apresentado na Figura A.1, todos os resultados das localizações apresentaram erros (em módulo) dentro dos respectivos níveis de erros admissíveis e, desta forma, percebe-se que uma vez disponibilizados RDP com altas frequências de amostragem, a precisão dos métodos baseados na teoria das ondas viajantes será tão melhor quanto maior for a taxa de aquisição de dados utilizada.



**Figura A.1 – Gráfico comparativo entre os erros (em módulo) calculados para as faltas monofásicas simuladas e os erros admissíveis para cada frequência de amostragem utilizada.**

Neste contexto, pode-se afirmar que a precisão dos métodos localizadores de falta está relacionada apenas à garantia de que o erro verificado nas localizações estará dentro dos limites admissíveis, uma vez que a precisão em si é dependente das características dos RDP utilizados. Então, neste caso, pode-se afirmar que o método proposto apresenta comportamento bastante satisfatório quando utilizado para localizar faltas em linhas de transmissão, pois permitiu uma identificação do ponto de falta com erro dentro dos níveis aceitáveis em mais de 99% dos casos de faltas simulados, conforme apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

## Apêndice B

### Dados do Sistema Elétrico Referente à Interligação Norte-Nordeste

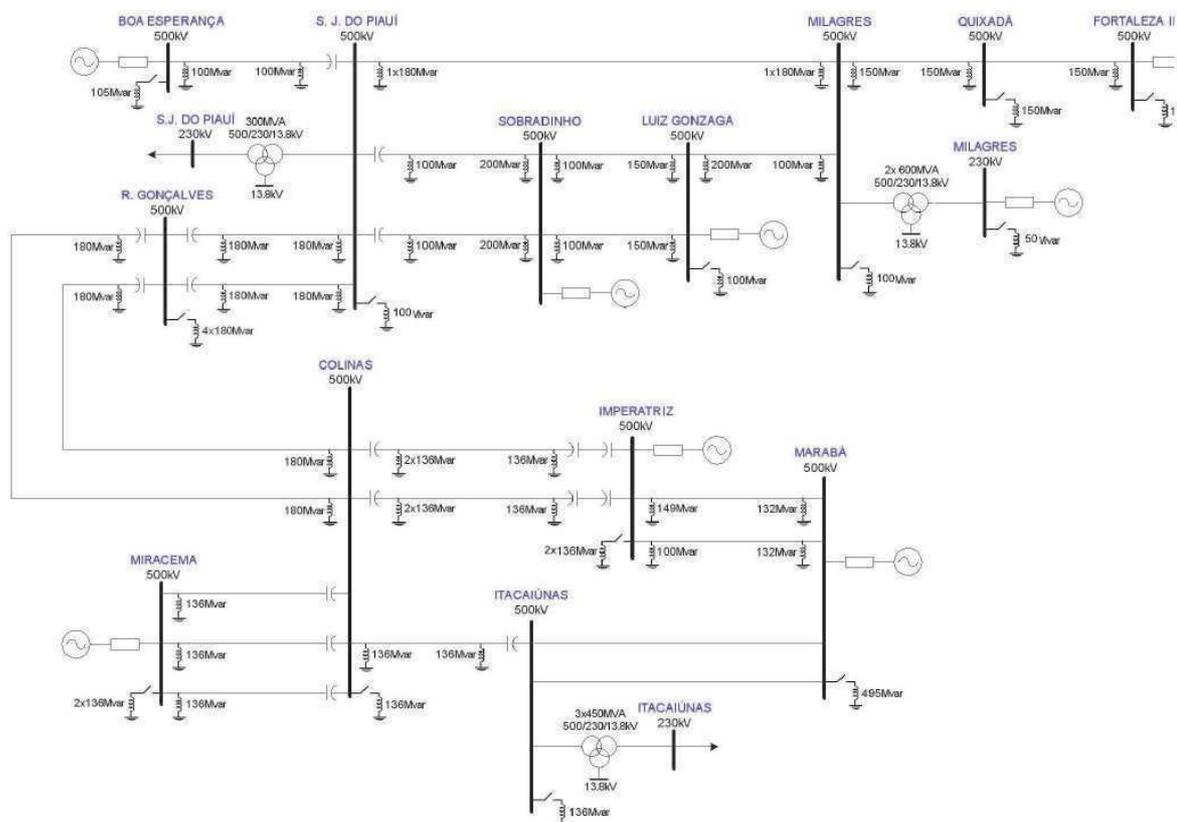


Figura B.1 - Diagrama unifilar de parte do SIN referente à interligação Norte-Nordeste utilizado na etapa de avaliação do método proposto (Configuração analisada para 2009).

**Tabela B.1 – Linhas de Transmissão de 500 kV – Parâmetros Elétricos.**

| Linha de Transmissão              | Sequência Positiva    |                       |                          | Sequência Zero        |                       |                          | Comp. (km) |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|------------|
|                                   | R <sub>1</sub> (Ω/km) | X <sub>1</sub> (Ω/km) | Y <sub>1</sub> (μmho/km) | R <sub>0</sub> (Ω/km) | X <sub>0</sub> (Ω/km) | Y <sub>0</sub> (μmho/km) |            |
| LT Fortaleza II - Quixadá         | 0,026                 | 0,282                 | 5,877                    | 0,223                 | 0,9                   | 3,41                     | 137,8      |
| LT Quixadá - Milagres             | 0,026                 | 0,282                 | 5,881                    | 0,242                 | 0,872                 | 3,448                    | 268,7      |
| LT Milagres – L. Gonzaga          | 0,024                 | 0,283                 | 5,895                    | 0,242                 | 0,858                 | 3,421                    | 231,2      |
| LT Sobradinho – L. Gonzaga, C1    | 0,0244                | 0,3219                | 5,088                    | 0,3221                | 1,353                 | 2,782                    | 289,5      |
| LT Sobradinho – L. Gonzaga, C2    | 0,0244                | 0,3219                | 5,087                    | 0,324                 | 1,358                 | 2,781                    | 319,0      |
| LT Milagres – S. J. Piauí         | 0,0186                | 0,267                 | 6,124                    | 0,493                 | 1,339                 | 2,89                     | 400,0      |
| LT S. J. Piauí – Sobradinho, C1   | 0,0246                | 0,3219                | 5,124                    | 0,3764                | 1,411                 | 3,092                    | 211,0      |
| LT S. J. Piauí – Sobradinho, C2   | 0,0186                | 0,267                 | 6,124                    | 0,493                 | 1,339                 | 2,89                     | 210,0      |
| LT Boa Esperança – S. J. Piauí    | 0,0246                | 0,3219                | 5,12                     | 0,3763                | 1,411                 | 3,064                    | 233,8      |
| LT S. J. Piauí – R. Gonçalves, C1 | 0,0186                | 0,267                 | 6,124                    | 0,493                 | 1,339                 | 2,89                     | 353,0      |
| LT S. J. Piauí – R. Gonçalves, C2 | 0,0186                | 0,267                 | 6,124                    | 0,493                 | 1,339                 | 2,89                     | 353,0      |
| LT Colinas – R. Gonçalves, C1     | 0,0186                | 0,267                 | 6,124                    | 0,493                 | 1,339                 | 2,89                     | 379,0      |
| LT Colinas – R. Gonçalves, C2     | 0,0186                | 0,267                 | 6,124                    | 0,493                 | 1,339                 | 2,89                     | 379,0      |
| LT Colinas – Imperatriz, C1       | 0,017                 | 0,266                 | 6,086                    | 0,423                 | 1,357                 | 2,708                    | 343,0      |
| LT Colinas – Imperatriz, C2       | 0,017                 | 0,266                 | 6,086                    | 0,423                 | 1,357                 | 2,708                    | 343,0      |
| LT Miracema – Colinas, C1         | 0,017                 | 0,266                 | 6,086                    | 0,423                 | 1,357                 | 2,708                    | 161,0      |
| LT Miracema – Colinas, C2         | 0,017                 | 0,266                 | 6,086                    | 0,423                 | 1,357                 | 2,708                    | 161,0      |
| LT Miracema – Colinas, C3         | 0,017                 | 0,266                 | 6,086                    | 0,423                 | 1,357                 | 2,708                    | 161,0      |
| LT Marabá – Imperatriz, C1        | 0,0259                | 0,326                 | 5,07                     | 0,431                 | 1,268                 | 3,37                     | 182,0      |
| LT Marabá – Imperatriz, C2        | 0,017                 | 0,266                 | 6,086                    | 0,424                 | 1,357                 | 2,708                    | 182,0      |
| LT Marabá – Itacaiúnas, C1        | 0,018                 | 0,311                 | 5,386                    | 0,349                 | 1,394                 | 3,263                    | 39,2       |
| LT Marabá – Itacaiúnas, C2        | 0,018                 | 0,311                 | 5,386                    | 0,349                 | 1,394                 | 3,263                    | 39,2       |
| LT Colinas – Itacaiúnas           | 0,017                 | 0,268                 | 6,202                    | 0,218                 | 0,921                 | 3,592                    | 304,6      |

**Tabela B.2 – Potência Nominal e Relação X<sub>0</sub>/X<sub>1</sub> dos reatores de linha.**

| Linha de Transmissão           | Subestação   | V <sub>base</sub> (kV) | Potência (MVA) | X <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> |
|--------------------------------|--------------|------------------------|----------------|--------------------------------|
| Quixadá – Fortaleza II         | Fortaleza II | 500                    | 150            | -                              |
| Quixadá – Fortaleza II         | Quixadá      | 500                    | 150            | -                              |
| Quixadá - Milagres             | Milagres     | 500                    | 150            | -                              |
| B. Esperança – S. J. Piauí     | B. Esperança | 500                    | 100            | 1,73                           |
| B. Esperança – S. J. Piauí     | S. J. Piauí  | 500                    | 100            | 1,70                           |
| L. Gonzaga - Milagres          | L. Gonzaga   | 500                    | 200            | -                              |
| L. Gonzaga - Milagres          | Milagres     | 500                    | 100            | -                              |
| Milagres – S. J. Piauí         | Milagres     | 500                    | 180            | -                              |
| Milagres – S. J. Piauí         | S. J. Piauí  | 500                    | 180            | -                              |
| S. J. Piauí – R. Gonçalves, C1 | S. J. Piauí  | 500                    | 180            | -                              |
| S. J. Piauí – R. Gonçalves, C1 | R. Gonçalves | 500                    | 180            | -                              |
| S. J. Piauí – R. Gonçalves, C2 | S. J. Piauí  | 500                    | 180            | -                              |
| S. J. Piauí – R. Gonçalves, C2 | R. Gonçalves | 500                    | 180            | -                              |
| Colinas – R. Gonçalves, C1     | Colinas      | 500                    | 180            | -                              |
| Colinas – R. Gonçalves, C1     | R. Gonçalves | 500                    | 180            | -                              |
| Colinas – R. Gonçalves, C2     | Colinas      | 500                    | 180            | -                              |
| Colinas – R. Gonçalves, C2     | R. Gonçalves | 500                    | 180            | -                              |
| S. J. Piauí – Sobradinho, C1   | S. J. Piauí  | 500                    | 100            | 1,67                           |

|                              |             |     |     |      |
|------------------------------|-------------|-----|-----|------|
| S. J. Piauú – Sobradinho, C1 | Sobradinho  | 500 | 200 | 1,66 |
| S. J. Piauú – Sobradinho, C2 | S. J. Piauú | 500 | 100 | 1,67 |
| S. J. Piauú – Sobradinho, C2 | Sobradinho  | 500 | 200 | 1,66 |
| Sobradinho – L. Gonzaga, C1  | Sobradinho  | 500 | 100 | 1,66 |
| Sobradinho – L. Gonzaga, C1  | L. Gonzaga  | 500 | 150 | 1,63 |
| Sobradinho – L. Gonzaga, C2  | Sobradinho  | 500 | 100 | 1,66 |
| Sobradinho – L. Gonzaga, C2  | L. Gonzaga  | 500 | 150 | 1,68 |
| Marabá – Imperatriz, C1      | Imperatriz  | 500 | 149 | -    |
| Marabá – Imperatriz, C1      | Marabá      | 500 | 132 | -    |
| Marabá – Imperatriz, C2      | Imperatriz  | 500 | 100 | -    |
| Marabá – Imperatriz, C2      | Marabá      | 500 | 132 | -    |
| Colinas - Itacaiúnas         | Colinas     | 500 | 136 | -    |
| Colinas - Itacaiúnas         | Itacaiúnas  | 500 | 136 | -    |
| Colinas – Imperatriz, C1     | Colinas     | 500 | 272 | -    |
| Colinas – Imperatriz, C1     | Imperatriz  | 500 | 136 | -    |
| Colinas – Imperatriz, C2     | Colinas     | 500 | 272 | -    |
| Colinas – Imperatriz, C2     | Imperatriz  | 500 | 136 | -    |
| Colinas – Miracema, C1       | Miracema    | 500 | 136 | -    |
| Colinas – Miracema, C2       | Miracema    | 500 | 136 | -    |
| Colinas – Miracema, C3       | Miracema    | 500 | 136 | -    |

**Tabela B.3 – Reatância dos bancos de capacitores série.**

| Linha de Transmissão           | Subestação   | Reatância (%) |
|--------------------------------|--------------|---------------|
| B. Esperança – S. J. Piauú     | S. J. Piauú  | 2,11          |
| S. J. Piauú – R. Gonçalves, C1 | R. Gonçalves | 1,75          |
| S. J. Piauú – R. Gonçalves, C2 | R. Gonçalves | 1,75          |
| Colinas – R. Gonçalves, C1     | R. Gonçalves | 1,92          |
| Colinas – R. Gonçalves, C2     | R. Gonçalves | 1,92          |
| S. J. Piauú – Sobradinho, C1   | S. J. Piauú  | 1,9           |
| S. J. Piauú – Sobradinho, C2   | S. J. Piauú  | 1,44          |
| Colinas - Itacaiúnas           | Itacaiúnas   | 1,63          |
| Colinas – Imperatriz, C1       | Colinas      | 0,952         |
| Colinas – Imperatriz, C2       | Colinas      | 0,952         |
| Colinas – Imperatriz, C1       | Imperatriz   | 0,952         |
| Colinas – Imperatriz, C2       | Imperatriz   | 0,952         |
| Colinas – Miracema, C1         | Colinas      | 0,952         |
| Colinas – Miracema, C2         | Colinas      | 0,952         |
| Colinas – Miracema, C3         | Colinas      | 0,952         |

**Tabela B.4 – Cargas representadas como impedâncias constantes.**

| Linha de Transmissão  | Carga (MVA)       |
|-----------------------|-------------------|
| SE Itacaiúnas, 230 kV | (340,50 + j36,90) |

**Tabela B.5 – Transformadores - Impedâncias.**

| Subestação | Tensão (kV) |       |               | Impedância (% $z$ , $S_{base} = 100$ MVA) |          |          | Potência (MVA) | Quantidade |
|------------|-------------|-------|---------------|---|----------|----------|----------------|------------|
|            | P           | S     | T             | $X_{ps}$                                  | $X_{pt}$ | $X_{st}$ |                |            |
| Milagres   | 550 Y       | 230 Y | 13,8 $\Delta$ | 1,15                                      | 4,37     | 5,58     | 600            | 2          |
| S.J. Piauí | 550 Y       | 230 Y | 13,8 $\Delta$ | 3,55                                      | 15,20    | 11,29    | 300            | 1          |
| Itacaiúnas | 550 Y       | 230 Y | 13,8 $\Delta$ | 10,00                                     | 6,67     | 15,00    | 450            | 3          |

**Tabela B.6 – Curva de saturação dos transformadores da SE Milagres.**

| Corrente (A) | Fluxo (V.s) |
|--------------|-------------|
| 0,49222      | 833,835     |
| 0,56885      | 952,955     |
| 0,61021      | 1072,074    |
| 0,63869      | 1191,193    |
| 3,33087      | 1310,313    |
| 14,6738      | 1429,432    |

**Tabela B.7 – Curva de saturação dos transformadores da SE S. J. do Piauí.**

| Corrente (A) | Fluxo (V.s) |
|--------------|-------------|
| 2,2268       | 1191,193    |
| 10,495       | 1310,313    |
| 20,1043      | 1429,432    |
| 32,6099      | 1548,552    |
| 62,5632      | 1667,671    |
| 111,4591     | 1727,231    |
| 148,0925     | 1786,79     |
| 187,6286     | 1846,35     |

**Tabela B.8 – Curva de saturação dos transformadores da SE Itacaiúnas.**

| Corrente (A) | Fluxo (V.s) |
|--------------|-------------|
| 1,3361       | 1191,212    |
| 3,0632       | 1310,333    |
| 9,2397       | 1369,894    |
| 44,4864      | 1489,015    |
| 202,4365     | 1565,253    |
| 1011,0611    | 1869,012    |
| 1365,4489    | 2047,694    |

**Tabela B.9 – Potência Nominal e Relação  $X_0/X_1$  dos reatores de barra.**

| Subestação   | V <sub>base</sub><br>(kV) | Potência<br>(Mvar) | $X_0/X_1$ |
|--------------|---------------------------|--------------------|-----------|
| Milagres     | 500                       | 50                 | 1,00      |
| Milagres     | 500                       | 100                | 1,00      |
| L. Gonzaga   | 500                       | 100                | 1,00      |
| B. Esperança | 500                       | 105                | 1,00      |
| S. J. Piauí  | 500                       | 100                | 1,00      |
| Colinas      | 500                       | 136                | 1,00      |
| R. Gonçalves | 500                       | 720                | 1,00      |
| Imperatriz   | 500                       | 272                | 1,00      |
| Itacaiúnas   | 500                       | 136                | 1,00      |
| Miracema     | 500                       | 272                | 1,00      |
| Marabá       | 500                       | 495                | 1,00      |

**Tabela B.10 – Impedâncias equivalentes – Configuração 2009.**

| Subestação            | Sequência Positiva |               | Sequência Zero  |               |
|-----------------------|--------------------|---------------|-----------------|---------------|
|                       | Resistência (Ω)    | Reatância (Ω) | Resistência (Ω) | Reatância (Ω) |
| Milagres, 230 kV      | 7,62               | 44,01         | 1,39            | 14,26         |
| Fortaleza II, 500 kV  | 3,90               | 106,61        | 1,98            | 24,49         |
| Luiz Gonzaga, 500 kV  | 0,51               | 14,49         | 0,59            | 10,79         |
| Sobradinho, 500 kV    | 0,87               | 84,58         | 0,49            | 21,24         |
| Boa Esperança, 500 kV | 0,41               | 273,33        | 7,79            | 100,94        |
| Marabá, 500 kV        | 0,93               | 18,92         | 9,89            | 57,82         |
| Imperatriz, 500 kV    | 2,69               | 131,3         | 1,80            | 41,90         |
| Miracema, 500 kV      | 2,40               | 27,08         | 7,20            | 52,54         |

**Tabela B.11 – Impedâncias de transferências – Configuração 2009.**

| Subestação            |                      | Sequência Positiva |               | Sequência Zero  |               |
|-----------------------|----------------------|--------------------|---------------|-----------------|---------------|
| De                    | Para                 | Resistência (Ω)    | Reatância (Ω) | Resistência (Ω) | Reatância (Ω) |
| Milagres, 230 kV      | S. J. Piauí, 230 kV  | 53,06              | 281,33        | 2888,20         | 11740,57      |
| Fortaleza II, 500 kV  | Marabá, 500 kV       | 146,77             | 1628,50       | 202000          | 210520,80     |
| Fortaleza II, 500 kV  | Imperatriz, 500 kV   | 17,90              | 187,61        | 11926           | 131540        |
| Boa Esperança, 500 kV | Fortaleza II, 500 kV | 27,34              | 445,98        | 9887,30         | 14920,25      |
| Boa Esperança, 500 kV | Marabá, 500 kV       | 99,76              | 903,78        | 15524           | 27083,75      |
| Boa Esperança, 500 kV | Imperatriz, 500 kV   | 12,04              | 104,11        | 895,63          | 1673,65       |