

Marcelo Azevedo Benetti

Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em  
Metodologias de Localização de Faltas em Linhas de  
Transmissão

Florianópolis – SC

2009



Universidade Federal de Santa Catarina  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em  
Metodologias de Localização de Faltas em Linhas de  
Transmissão

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Marcelo Azevedo Benetti

Florianópolis, Outubro de 2009



# Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em Metodologias de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão

Marcelo Azevedo Benetti

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.  
Orientador - UFSC

---

Prof. Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng.  
Co-Orientador - UFSC

---

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc. - UFSC

---

Prof. Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng. - UFSC

---

Prof. Lenois Mariotto, D.Eng. - UFSC

---

Prof.<sup>a</sup> Jacqueline Gisele Rolim, D.Eng. - UFSC

---

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D. - UFSC



*Aos meus pais, Waldemar e Julieta, pelo suporte e apoio incondicional,  
em todos os momentos de minha vida.  
E pelo seu incentivo para que eu sempre enfrente os meus medos e,  
assim, viva os meus sonhos.*





# Agradecimentos

A Alexandre Campos inicialmente, meu tutor, durante a graduação, no PET/UFSC. Com ele, aprendi a questionar o mundo, percebendo que só há crescimento pessoal com interrogações. Não com respostas prontas e dogmáticas. Além disto, agradeço-o por conduzir-me ao LabPlan/UFSC.

A Ildemar Decker, meu orientador em toda minha jornada no LabPlan, desde meu estágio, até a conclusão deste trabalho. Sua visão sistêmica do sistema elétrico mundial, apontando as tendências do setor, e seu brilhantismo didático, foram fundamentais para os meus trabalhos.

A Marcelo Agostini. Sua disponibilidade e sua prontidão para a discussão de questões técnicas pontuais, as mais diversas, foram imprescindíveis para a concretização dos meus desenvolvimentos.

Aos meus colegas de LabPlan, André Queiroz, Felipe Trevisan, George Gavioli, Ritchie Guder, Gelson Brigatto, Vanessa Araújo, Flávia Sá e Alisson Fernandes, que compartilharam comigo as experiências vivenciadas nas disciplinas da pós-graduação.

Aos colegas da Equipe MedFasee, Thiago Jeremias, Ricardo Lira, Alexandre Fürstenberger, Moises Santos, Daniel Dotta, Tiago Chinvski e Gabriel Paim, que contribuíram para a minha formação, com o intercâmbio de informações e discussões sobre diferentes temas.

Agradeço também a todos os professores da pós-graduação e aos colegas de LabPlan, pelo privilégio da convivência, em um ambiente ético, dinâmico e de excelência acadêmica.

Por fim, gostaria de agradecer à Eletrosul Centrais Elétricas S.A., em especial a Breno Meyer, pela disponibilização de dados, relativos ao registro de uma ocorrência em seu sistema de transmissão, utilizados nas simulações empreendidas no decorrer deste trabalho.



Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em Metodologias de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão

Marcelo Azevedo Benetti

Outubro / 2009

Orientador: Ildemar Cassana Decker, D.Sc.

Co-Orientador: Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Medição Fasorial Sincronizada; Localização de Faltas, Linhas de Transmissão.

Número de Páginas: 130

Neste trabalho, investiga-se a utilização de dados de sistemas de medição fasorial sincronizada em metodologias de localização de faltas em Linhas de Transmissão (LTs).

Inicialmente, é explicitada a estrutura básica de um sistema de medição fasorial sincronizada, detalhando-se o funcionamento de cada elemento. São referenciados os desenvolvimentos a nível mundial, salientando-se os projetos verificados no Brasil. Após, é abordado o tema de localização de faltas, situando-se o problema e apresentando-se as técnicas registradas na bibliografia e as classificações a elas determinadas. Neste contexto, são detalhados os equacionamentos originais de três metodologias de localização de faltas em LTs, baseadas em fasores da frequência fundamental. A necessidade da estimação *on-line* dos parâmetros da linha, para o processamento das metodologias, motivou a investigação de três técnicas.

Foram implementados, em ambiente Matlab, algoritmos para a localização de faltas, utilizando-se o *software Alternative Transients Program (ATP)* na obtenção das grandezas elétricas. Nas simulações, foram investigadas diferentes configurações de faltas, avaliando-se a sensibilidade dos algoritmos à variação do ponto, da resistência e do tipo de falta, à geração de fasores, à estimação de parâmetros da linha e à perda de sincronismo angular entre os terminais da LT. Por fim, são avaliados os resultados de um caso real.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## Use of Synchronized Phasor Measurement in Fault Location Methodologies on Transmission Lines

Marcelo Azevedo Benetti

October / 2009

Advisor: Ildemar Cassana Decker, D.Sc.

Co-Advisor: Marcelo Neujahr Agostini, D.Eng.

Area of Concentration: Power Systems.

Keywords: Synchronized Phasor Measurement; Fault Location; Transmission Lines.

Number of Pages: 130

In this work, the use of data from synchronized phasor measurement systems is investigated in fault location methodologies on transmission lines.

Initially, the basic structure of a synchronized phasor measurement system is explained, detailing the operation of each element. The developments at the global level are described, highlighting the projects occurring in Brazil. Afterwards, the issue of fault location is approached, situating the problem and introducing the techniques reported in the literature and the classifications them. In this context, the equations of three fault location methodologies on transmission lines are detailed, based on phasors of the fundamental frequency. The need for on-line estimation of line parameters, for the processing of these methodologies, motivated the investigation of three techniques.

Algorithms for fault location were implemented, in Matlab environment, using the Alternative Transients Program software to obtain the electrical data. In the simulations, different configurations of faults were investigated, evaluating the sensitivity of algorithms changing the point, the resistance and the type of fault, the generation of phasors, the estimation of the line parameters and the loss of angle synchronism between the terminals of the line. Finally, the results of a real case are evaluated.

# Sumário

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xx</b>
<b>Lista de Siglas .....</b>	<b>xxii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos .....	4
1.1.1 Objetivo Geral .....	4
1.1.2 Objetivos Específicos .....	4
1.2 Organização da Dissertação .....	5
<b>2. Tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada .....</b>	<b>7</b>
2.1 Fontes de Sincronização e o Sistema GPS .....	8
2.2 Unidade de Medição Fasorial .....	9
2.3 Concentrador de Dados .....	10
2.4 Canais de Comunicação .....	11
2.5 Desenvolvimentos em SPMS .....	12
2.5.1 Estados Unidos .....	13
2.5.2 China .....	18
2.5.3 Outros Países .....	19
2.5.4 Brasil .....	20
2.6 Comentários Finais .....	24

<b>3. Problema das Faltas em Sistemas de Potência .....</b>	<b>26</b>
3.1 Conseqüências das Faltas em Sistemas de Potência .....	27
3.2 Importância da Rápida Localização da Falta em Sistemas de Transmissão .....	28
3.3 Tipos de Falta em Sistemas de Potência.....	29
3.4 Classificação dos Métodos de Localização de Faltas .....	31
3.4.1 Métodos Baseados no Conhecimento.....	32
3.4.2 Métodos Baseados em Transitórios de Alta Frequência .....	33
3.4.3 Métodos Baseados em Fasores da Frequência Fundamental .....	34
3.5 Etapas e Erros Associados a um Algoritmo de Localização de Faltas .....	41
3.6 Comentários Finais .....	43
<b>4. Metodologias Abordadas para Localização de Faltas em LTs .....</b>	<b>44</b>
4.1 Métodos Baseados em Fasores de Dois Terminais Dependentes de Sincronização	45
4.1.1 Método Proposto por Brahma .....	45
4.1.2 Método Proposto por Wang .....	50
4.2 Método Baseado em Fasores de Dois Terminais Independentes de Sincronização .	57
4.2.1 Método Proposto por Silveira.....	57
4.3 Comentários Finais .....	60
<b>5. Técnicas Utilizadas para Estimação de Parâmetros de LTs .....</b>	<b>62</b>
5.1 Parâmetros Obtidos por Representação em Quadripólos .....	63
5.2 Parâmetros Obtidos de Circuitos Equivalentes $\pi$ de Seqüência .....	67
5.3 Parâmetros Obtidos de Circuito Trifásico Equivalente $\pi$ .....	69
5.4 Comentários Finais .....	73

<b>6. Experimentos Computacionais e Resultados Obtidos .....</b>	<b>74</b>
6.1 Análise Individual das Metodologias de Localização de Falhas.....	76
6.1.1 Método Proposto por Brahma .....	77
6.1.2 Método de Brahma Alterado .....	79
6.1.3 Método Proposto por Wang .....	80
6.1.4 Método Proposto por Silveira.....	82
6.2 Combinação das Metodologias – Proposta de Benetti .....	83
6.3 Análise de Sensibilidade.....	86
6.3.1 Geração de Fasores .....	86
6.3.2 Estimação de Parâmetros .....	88
6.3.3 Diferenças Angulares .....	90
6.3.3.1 Diferença de 10° entre os Fasores dos Terminais da LT .....	90
6.3.3.2 Diferença de 45° entre os Fasores dos Terminais da LT .....	91
6.3.3.3 Diferença de 110° entre os Fasores dos Terminais da LT .....	92
6.3.3.4 Análise do Impacto dos Desvios Angulares nas Metodologias .....	92
6.4 Aplicação em um Caso Real.....	95
6.4.1 Curto-Circuito entre Fase C e Terra .....	98
6.4.2 Curto-Circuito entre as Fases A e C .....	106
6.5 Comentários Finais .....	111
<b>7. Conclusões .....</b>	<b>114</b>
7.1 Sugestões para Desenvolvimentos Futuros .....	117

<b>Apêndice A – Configurações das Faltas Simuladas no <i>Software</i> ATP para Obtenção dos Fasores .....</b>	<b>119</b>
A.1 Configuração Pré-Falta .....	119
A.2 Falta do Tipo AB .....	119
A.3 Falta do Tipo ABC .....	120
A.4 Falta do Tipo ACT .....	120
A.5 Falta do Tipo BT .....	120
<b>Apêndice B – Configurações das Faltas Simuladas no <i>Software</i> ATP para Obtenção dos Dados de Oscilografia .....</b>	<b>121</b>
B.1 Falta do Tipo AB .....	121
B.2 Falta do Tipo ABC .....	121
B.3 Falta do Tipo ACT .....	122
B.4 Falta do Tipo BT .....	122
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>123</b>



# Lista de Figuras

2.1 Estrutura básica de um SPMS .....	8
2.2 Elementos constituintes de uma PMU .....	9
2.3 Principais funções de um PDC .....	11
2.4 Situação atual do SPMS do Subsistema WECC – Fonte: <a href="http://www.naspi.org">http://www.naspi.org</a> .....	14
2.5 EIPP ao final de 2005 – Fonte: <a href="http://www.naspi.org">http://www.naspi.org</a> .....	16
2.6 Situação do sistema elétrico norte-americano e canadense em março de 2009 – Fonte: <a href="http://www.naspi.org">http://www.naspi.org</a> .....	17
2.7 Tela de monitoração em tempo real do Projeto MedFasee .....	21
2.8 Localização geográfica do Projeto MedFasee Eletrosul .....	22
2.9 Tela de monitoração em tempo real do Projeto MedFasee Frequência.....	23
3.1 Tipos de falta .....	29
3.2 Classificação dos métodos de localização de faltas em LTs .....	32
3.3 Diagrama unifilar de uma LT em falta.....	34
3.4 LT com subsistemas equivalentes .....	37
3.5 Equivalente a partir das barras $S$ e $R$ .....	37
3.6 Circuito pré-falta .....	38
3.7 Circuito em falta para uma falta do tipo fase-terra.....	38
3.8 Circuito superposto para uma falta do tipo fase-terra.....	39
3.9 LT monofásica em regime permanente .....	40
3.10 LT monofásica com falta no Ponto $F$ .....	40
4.1 Especificação das metodologias para localização de faltas em LTs baseadas em fases da frequência fundamental .....	45
4.2 LT considerada para análise .....	46

4.3 LT com uma falta .....	46
4.4 Falta na Linha <i>SR</i> .....	51
4.5 Rede de seqüência positiva em torno da LT com falta .....	55
4.6 Rede de seqüência positiva para uma situação real .....	56
4.7 Linha monofásica .....	58
5.1 Linha representada por um quadripólo .....	63
5.2 Modelo de linha monofásica com parâmetros distribuídos .....	64
5.3 Modelo $\pi$ -equivalente de linha .....	66
5.4 Modelo $\pi$ para uma LT .....	68
5.5 Modelo $\pi$ para uma LT trifásica .....	70
6.1 Fluxograma das rotinas de simulação implementadas .....	75
6.2 Fluxograma do Método Proposto por Brahma implementado .....	77
6.3 Fluxograma do Método de Brahma Alterado implementado .....	79
6.4 Fluxograma do Método Proposto por Wang implementado .....	81
6.5 Fluxograma do Método Proposto por Silveira implementado .....	82
6.6 Proposta de Benetti .....	84
6.7 Particularização da Proposta de Benetti implementada .....	85
6.8 Fluxograma para análise da sensibilidade – geração de fasores .....	87
6.9 Impacto dos desvios angulares no Método Proposto por Brahma .....	93
6.10 Impacto dos desvios angulares no Método de Brahma Alterado .....	93
6.11 Impacto dos desvios angulares no Método Proposto por Wang .....	94
6.12 Impacto dos desvios angulares no Método Proposto por Silveira .....	94
6.13 Impacto dos desvios angulares na Proposta de Benetti .....	94
6.14 Torres caídas da LT Ivaiporã - Areia em 08/09/2009 – Fonte: Eletrosul .....	96

6.15	Representação das dimensões da LT Ivaiporã - Areia – Fonte: Eletrosul .....	96
6.16	Gráficos da corrente trifásica medida nos terminais da LT Ivaiporã - Areia .....	97
6.17	Corrente trifásica – Terminal de Ivaiporã – Curto-circuito: Fase C e Terra .....	99
6.18	Corrente trifásica – Terminal de Areia – Curto-circuito: Fase C e Terra .....	99
6.19	Corrente trifásica – Terminal de Ivaiporã – Curto-circuito: Fases A e C .....	106
6.20	Corrente trifásica – Terminal de Areia – Curto-circuito: Fases A e C .....	106

# Lista de Tabelas

3.1 Índices de ocorrência dos tipos de falta – LTs da BPA e SSPB .....	30
3.2 Índices de ocorrência dos tipos de falta – LTs da Eletronorte.....	30
3.3 Índices de ocorrência dos tipos de falta – Caso teste contido em [59] .....	30
6.1 Estimativas de falta – Método Proposto por Brahma – Ponto 1 .....	78
6.2 Estimativas de falta – Método Proposto por Brahma – Ponto 2 .....	78
6.3 Estimativas de falta – Método Proposto por Brahma – Ponto 3 .....	78
6.4 Estimativas de falta – Método de Brahma Alterado – Ponto 1 .....	80
6.5 Estimativas de falta – Método de Brahma Alterado – Ponto 2 .....	80
6.6 Estimativas de falta – Método de Brahma Alterado – Ponto 3 .....	80
6.7 Estimativas de falta – Método Proposto por Wang .....	81
6.8 Estimativas de falta – Método Proposto por Silveira .....	83
6.9 Estimativas de falta – Proposta de Benetti .....	85
6.10 Estimativas de falta – Sensibilidade à geração de fasores .....	87
6.11 Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Wang .....	88
6.12 Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Wang – Médias Totais .....	89
6.13 Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Silveira .....	89
6.14 Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Silveira – Médias Totais .....	90
6.15 Sensibilidade ao desvio angular de $10^\circ$ – Configurações: Apêndice A .....	91
6.16 Sensibilidade ao desvio angular de $45^\circ$ – Configurações: Apêndice A .....	91
6.17 Sensibilidade ao desvio angular de $110^\circ$ – Configurações: Apêndice A .....	92

6.18 Parâmetros da LT Ivaiporã - Areia – Fonte: ONS .....	97
6.19 Estimativas – Método de Brahma Alterado – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	100
6.20 Estimativas – Método Proposto por Wang – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	101
6.21 Estimativas – Método Proposto por Silveira – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	101
6.22 Estimativas da Proposta de Benetti – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	102
6.23 Estimativas das metodologias – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia – Média entre 3º e 4º ciclos .....	103
6.24 Estimativas do ponto de falta – Método Proposto por Johns e Jamali – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	104
6.25 Estimativas do ponto de falta – Método Proposto por Dalcastagnê – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	104
6.26 Estimativas comparativas do ponto de falta de diferentes metodologias – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia .....	105
6.27 Estimativas – Método de Brahma Alterado – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia .....	107
6.28 Estimativas – Método Proposto por Wang – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia .....	108
6.29 Estimativas – Método Proposto por Silveira – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia .....	108
6.30 Estimativas da Proposta de Benetti – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia .....	109
6.31 Estimativas comparativas do ponto de falta de diferentes metodologias – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia .....	110

# Lista de Siglas

A/D – Analógico/Digital

AM – *Amplitude-Modulated*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ATP – *Alternative Transients Program*

BPA – *Bonneville Power Administration*

CAISO – *California Independent System Operator*

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CNOS – Centro Nacional de Operação do Sistema

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

DFT – *Discrete Fourier Transform*

DOE – *U.S. Department of Energy*

EHV – *Extra High Voltage*

EIPP – *Eastern Interconnect Phasor Project*

EMS – *Energy Management System*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

GOES – *Geostationary Operational Environmental Satellite*

GPS – *Global Positioning System*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IPDO – Informativo Preliminar Diário da Operação

KEPCO – *Korea Electric Power Co.*

LabPlan – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

LT – Linha de Transmissão

MME – Ministério de Minas e Energia

NASPI – *North American SynchroPhasor Initiative*

NERC – *North American Electric Reliability Council*

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PDC – *Phasor Data Concentrator*

PLC – *Power Line Communication*

PMU – *Phasor Measurement Unit*

PPS – Pulso Por Segundo

PRTT – *Performance Requirements Task Team*

SAGE – Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

SCE – *Southern California Edison*

SEE – Sistemas de Energia Elétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

SPMS – *Synchronized Phasor Measurement System*

SSPB – *Swedish State Power Board*

TPC – *Taiwan Power Company*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VPN – *Virtual Private Network*

WAMS – *Wide Area Measurement System*

WECC – *Western Electric Coordinating Council*

# Capítulo 1

## Introdução

Pode-se afirmar que os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) constituem-se em um dos maiores e mais complexos sistemas já construídos pela humanidade. Eles se firmaram como parte fundamental da sociedade contemporânea, pois têm a finalidade de fornecer energia elétrica aos consumidores, com uma qualidade adequada, no instante em que estes a solicitam. Estes sistemas são divididos em sistemas de geração, transmissão e distribuição.

Ao longo dos anos, tais sistemas vêm se expandido, a fim de atenderem a demanda por energia, cada vez maior. Tal demanda está relacionada à situação econômica mundial, cuja tendência é de crescimento. Pode-se afirmar que no final do século XX, mais especificamente nas duas últimas décadas, verificou-se uma tendência mundial de reestruturação da indústria de energia elétrica [1]. Antes baseada em um modelo monopolista, cujo enfoque se baseava na obrigação de servir ao consumidor, a indústria passou a estruturar-se sob uma plataforma de mercado, onde se considera a energia elétrica uma mercadoria, buscando-se adquirir aquela que apresente o menor preço. Neste modelo de mercado, o preço é o elemento balizador para todos aqueles que nele operam.

Estas mudanças na indústria de energia elétrica ocorreram em anos, modos e graus de intensidade diferentes nos diversos países em que se verificaram. Isto devido às características políticas, econômicas e sociais peculiares de cada país. Neste processo de reestruturação, houve a separação das etapas de geração, transmissão e distribuição. Criou-se também um novo serviço, denominado comercialização de energia elétrica. Todo este processo recebeu o nome de desverticalização [2]. Objetivou-se, com isto, aumentar a eficiência de todo o processo, possibilitando melhores decisões de investimento; inserir competitividade ao setor; criar melhores oportunidades aos consumidores; e atrair capital



privado.

Neste novo cenário, aos SEE foi introduzida a característica de livre concorrência na compra e venda da mercadoria energia elétrica [3]. Para a garantia desta característica, é necessária a desverticalização do setor, assegurando, na medida do possível, condições de concorrência perfeita. Consideram-se as atividades de transmissão e distribuição monopólios naturais. Nestes segmentos, uma única empresa apresenta uma configuração topológica, na qual o atendimento às necessidades do consumidor é realizado de maneira ótima, ou quase ótima. Desta forma, as empresas devem ser reguladas, por agentes governamentais, a fim de atenderem os usuários com determinados níveis de confiabilidade, associados a padrões pré-definidos de qualidade. Em tais segmentos, o estabelecimento de concorrência, ou não se mostraria prático e factível, ou não seria economicamente vantajoso. Em contrapartida, nos segmentos de geração e comercialização de energia elétrica, a concorrência é empreendida. Para que isto se torne possível, é necessário o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição. Além disto, como qualquer outro segmento, faz-se fundamental para o adequado funcionamento do mercado de energia elétrica as seguintes premissas:

- Eficiência econômica, como um todo, dos agentes;
- Auto-sustentabilidade do mercado, a fim de garantir sua expansão;
- Operação adequada dos serviços, com confiabilidade e padrões de qualidade pré-definidos;
- Não discriminação na prestação dos serviços;
- Busca de universalização para os serviços.

Para a efetivação dos itens listados acima, e também para especificar, disciplinar, fiscalizar e legislar sobre as inter-relações acerca dos agentes de geração, comercialização, transmissão e distribuição, fazem-se necessários os seguintes órgãos:

- Operador independente do sistema;
- Planejador do sistema;
- Operador de mercado;
- Regulador de mercado.

No Brasil, têm-se respectivamente as seguintes instituições, todas elas vinculadas ao Ministério de Minas e Energia (MME):

- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS);
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE);
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE);
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Concernente à operação dos SEE, sua complexidade sempre se mostrou ser um grande desafio. O aumento da geração de energia distribuída e a crescente demanda pelo aumento da confiabilidade e da qualidade da energia elétrica fornecida impõem novas dificuldades à operação. Os sistemas de transmissão, por sua vez, não têm acompanhado o crescimento da indústria de energia elétrica, dada a dificuldade em planejarem-se e implementarem-se expansões adequadas. Adicionalmente se observa, com cada vez maior frequência, a inclusão de novas tecnologias de equipamentos aos sistemas [4]. Neste contexto, as redes elétricas têm sido levadas à proximidade de seus limites operativos, aumentando a possibilidade de ocorrência de grandes colapsos, envolvendo extensas áreas geográficas, e de congestionamentos em Linhas de Transmissão (LTs) [5]. Isto enfatiza a necessidade de reforço dos sistemas de potência com novos sistemas de monitoramento, proteção e controle. Faz-se necessário também que as soluções apresentem favorável relação custo-benefício, aperfeiçoando os processos de planejamento, operação e manutenção dos mercados de energia elétrica [6], [7].

Ferramentas como o Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement System* – SPMS) fazem uso de avanços nas comunicações; aumento da capacidade de processamento e armazenagem de computadores; e de novas tecnologias como o Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* – GPS). O SPMS se mostra uma ferramenta promissora para enfrentar as novas necessidades de monitoração e gerenciamento da segurança de sistemas elétricos de potência [8], [9].

Um SPMS tem como seu elemento base a Unidade de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit* – PMU). Há, no entanto, outros equipamentos, tais como as estações de recepção do sinal de GPS, o Concentrador de Dados (*Phasor Data Concentrator* – PDC) e os canais de comunicação entre as PMUs e o PDC. Para obter-se o perfil de tensões e correntes complexas de um dado sistema elétrico, em um determinado instante, faz-se necessária uma mesma base de tempo. O sistema GPS, através de seu sinal de PPS (Pulso Por Segundo), possibilita sua utilização como fonte de sincronização para as medidas

fasoriais [10].

O principal foco dos estudos relacionados ao SPMS tem sido a exploração das potenciais aplicações, objetivando a segurança operacional dos sistemas elétricos de potência, bem como a otimização do uso de recursos energéticos e estruturais dos SEE.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste no estudo da utilização de dados de sistemas de medição fasorial sincronizada em metodologias de localização de faltas em Linhas de Transmissão.

Nessas metodologias, os parâmetros da LT são estimados e atualizados, à medida que se efetua o processamento do ponto de falta. Desta forma, não é necessário o conhecimento prévio acerca dos valores de tais parâmetros.

Outro ponto a salientar-se diz respeito à utilização de informações provenientes de PMUs para a implementação destas metodologias. Empregam-se valores fasoriais de tensão e corrente como variáveis de entrada a serem manipuladas. Assim, tais metodologias diferem-se daquelas onde são utilizados dados de oscilografia.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Têm-se como objetivos específicos deste trabalho, desenvolvimentos e implementações relacionadas aos seguintes tópicos:

- Análise do estado da arte acerca dos estudos e aplicações referentes à tecnologia de medição fasorial sincronizada em diferentes países;
- Estudo de diferentes metodologias de localização de faltas em LTs que possibilitem a utilização da tecnologia de medição fasorial sincronizada para o seu processamento;
- Emprego de abordagens diversificadas na estimação dos parâmetros de LTs,

fazendo uso das mesmas informações requeridas pelas metodologias de localização de faltas;

- Implementação de metodologias robustas de localização de faltas em LTs, que utilizem a tecnologia de medição fasorial sincronizada e a estimação de parâmetros, a partir de informações provenientes somente dos terminais da LT.
- Análise dos resultados obtidos referentes às metodologias implementadas, investigação de sua sensibilidade à variação de configurações e cenários e proposição de um algoritmo de localização de faltas, construído a partir de um arranjo das técnicas estudadas e implementadas.

## 1.2 Organização da Dissertação

Este documento está estruturado em 7 capítulos, como mostrado na seqüência.

**Capítulo 2.** Neste, é descrita a tecnologia de medição fasorial sincronizada. Primeiramente, abordam-se os principais elementos que constituem esta tecnologia, discutindo-nos de forma pormenorizada. Depois, é discutida a implementação desses sistemas em diferentes países, destacando-se, por fim, o *status* atual verificado no Brasil.

**Capítulo 3.** O capítulo situa o problema da localização de faltas em sistemas de potência. São referenciadas as conseqüências que as faltas trazem aos sistemas e salientada a importância de sua rápida localização. Apresentam-se os tipos de falta, suas características e as classificações dadas aos métodos de localização, discutindo-se seus principais fundamentos, as etapas e os erros associados a eles.

**Capítulo 4.** São apresentadas as metodologias de localização de faltas em LTs exploradas no trabalho. Situam-se tais metodologias, a partir do contexto em que são implementadas. De forma detalhada, é apresentado o equacionamento utilizado.

**Capítulo 5.** São abordadas, neste capítulo, as técnicas para estimação dos parâmetros de LTs, utilizadas no processamento da localização do ponto de falta, sendo seus equacionamentos descritos.

**Capítulo 6.** Descrevem-se, nesta etapa, os experimentos computacionais realizados e os resultados aferidos deles. Primeiramente, é avaliado cada algoritmo de localização de faltas em LTs implementado, perante diferentes tipos e configurações de falta.

Posteriormente, é apresentada uma proposta de algoritmo, utilizando-se um arranjo das diferentes técnicas exploradas. Após, é analisada a sensibilidade dos desenvolvimentos à variação no processo de geração de fasores, à estimação dos parâmetros da LT e à falta de sincronismo angular entre os terminais da LT. Por fim, é apresentado e discutido um caso real de falta ocorrido no Sistema Interligado Nacional (SIN).

**Capítulo 7.** Apresentam-se, neste capítulo, as conclusões. São retomadas as principais questões abordadas ao longo do trabalho, salientando-se os contextos em que foram inseridos. São discutidos os objetivos propostos e os resultados obtidos, a partir das implementações empreendidas. Por fim, realizam-se comentários acerca das contribuições do trabalho, e apontam-se sugestões para desenvolvimentos futuros.

## Capítulo 2

# Tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada

Um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement System – SPMS*), cujo dispositivo elementar é a Unidade de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit – PMU*), é formado ainda por estações para recepção de sinal do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System – GPS*), pelo Concentrador de Dados (*Phasor Data Concentrator – PDC*) e pelos canais de comunicação entre as PMUs e o PDC [11].

O GPS emite o sinal de PPS (Pulso Por Segundo), fornecendo às PMUs o instante exato em que deve ser realizada a aquisição dos dados. Isto faz com que todas as PMUs de um determinado sistema estejam sincronizadas. As grandezas amostradas, de uma forma geral, constituem-se de tensões e correntes trifásicas em linhas, transformadores e alimentadores de subestações. Depois de processados pelas PMUs, os fasores são enviados ao PDC, por meio de canais adequados de comunicação. O PDC, reunindo as medidas referentes à magnitude e ao ângulo de tensões e correntes, organiza tais informações, verificando a existência de eventuais períodos de ausência de dados, e as disponibiliza para aplicações.

A seguir, a Figura 2.1 ilustra um SPMS em sua estrutura elementar.

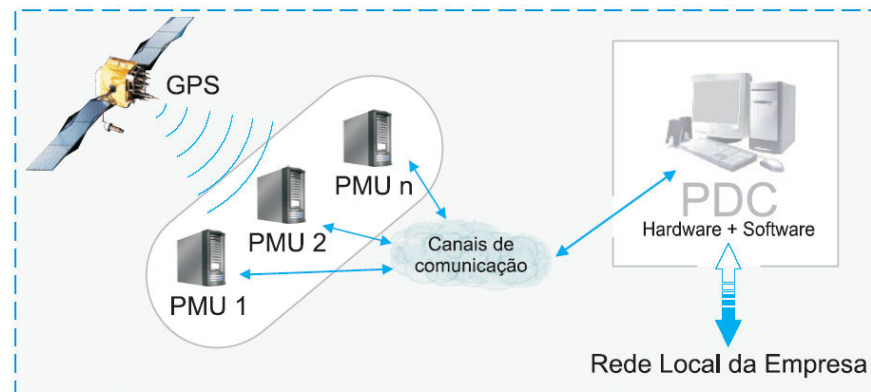


Figura 2.1: Estrutura básica de um SPMS.

Na seqüência, são abordados, em maiores detalhes, os principais elementos constituintes do SPMS.

## 2.1 Fontes de Sincronização e o Sistema GPS

Em função das inúmeras perspectivas que o SPMS possibilitou às atividades de monitoramento e operação de sistemas elétricos, várias tentativas foram realizadas no intuito de sincronizar os instantes de amostragem dos equipamentos em subestações remotas. Diferentes meios de comunicação foram cogitados para a distribuição dos pulsos de amostragem, tais como redes de fibra óptica, sinais AM (*Amplitude-Modulated*), microondas e sinais via satélite do sistema GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*). Nenhum destes, no entanto, mostrou-se suficientemente eficaz para a sincronização dos instantes de aquisição com a precisão requerida [12].

A partir do início da década de 90, devido à operação americana Tempestade no Deserto, realizada no Oriente Médio, passou-se a conhecer o *Navstar Global Positioning System*, hoje amplamente conhecido como GPS. Tal sistema, inicialmente utilizado para fins militares, é composto por 24 satélites dispostos em seis órbitas. Ele foi projetado com o objetivo de fornecer dados, referentes a coordenadas de posição, a instrumentos de navegação. Os satélites, no entanto, também transmitem um sinal de PPS, com uma precisão normalmente maior que  $1 \mu\text{s}$ , que pode ser recebido por estações receptoras na Terra. Em função disto, tornou-se possível utilizar-se este sinal de pulso como fonte de

sincronização para medidas fasoriais. Considerando-se uma frequência de  $60\text{ Hz}$ , um erro no pulso de sincronização da ordem de  $1\ \mu\text{s}$ , implica na existência de um erro em torno de  $0,021^\circ$  [13]. Isto satisfaz aos requisitos de precisão exigidos pelas aplicações atualmente vislumbradas e implementadas com o SPMS.

## 2.2 Unidade de Medição Fasorial

A Unidade de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit* – PMU) representa o principal elemento de um SPMS. Tal equipamento primeiramente realiza a aquisição dos valores medidos de tensão e corrente nos diferentes elementos do sistema elétrico. Posteriormente, as medidas são processadas e convertidas em fasores, sendo então enviadas ao Concentrador de Dados.

A PMU é composta por um sistema de aquisição; filtros *anti-aliasing*, circuito oscilador e módulo conversor Analógico/Digital (A/D); e por um microprocessador que efetua o tratamento matemático das amostras. A PMU é constituída ainda por um módulo que recebe e processa o sinal do GPS, fornecendo, desta forma, uma referência de tempo ao conjunto oscilador – conversor A/D. Algumas PMUs possuem um *buffer* de memória local que permite exercer a função de um gravador digital de perturbações, embora sua capacidade de armazenamento seja limitada. A Figura 2.2 ilustra a estrutura descrita.

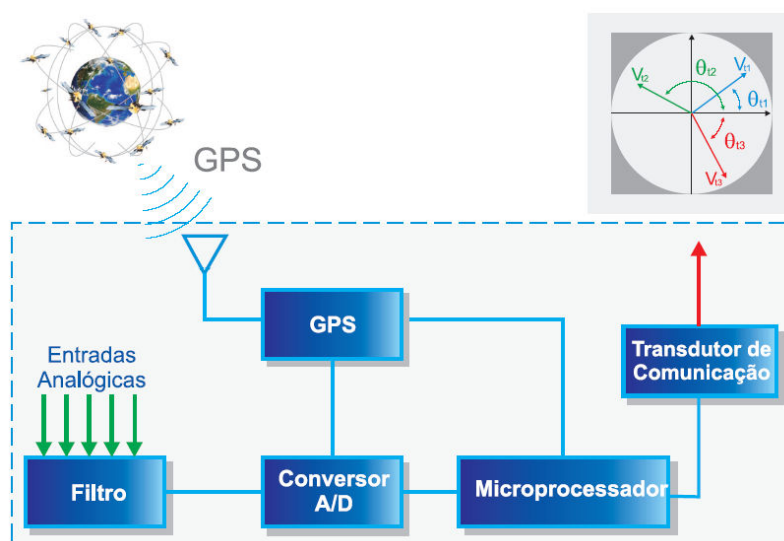


Figura 2.2: Elementos constituintes de uma PMU.



De forma contínua, o GPS envia um sinal de PPS. Tendo o sinal uma precisão maior que  $1 \mu s$  e sendo ele recebido por estações distantes entre si com idêntica precisão, torna-se possível que o processo de aquisição seja executado de modo sincronizado em diferentes localizações ao longo do sistema, independentemente da distância entre as subestações onde se encontram instaladas as PMUs.

A partir dos secundários dos Transformadores de Potencial e de Corrente são realizadas aquisições simultâneas de amostras instantâneas de tensão e corrente respectivamente. Realizada a conversão A/D, diferentes métodos podem ser empregados no tratamento dos dados, a fim de se efetuar o cálculo das grandezas fasoriais. Atualmente, pode-se afirmar que a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform – DFT*) é a ferramenta matemática mais empregada no tratamento das amostras de tensão e corrente do sistema. Depois de processados, os fasores são enviados, juntamente com outras grandezas que podem também ser adquiridas e/ou calculadas pelas PMUs (frequência, variação de frequência, sinais digitais), ao Concentrador de Dados [14].

## 2.3 Concentrador de Dados

O Concentrador de Dados (*Phasor Data Concentrator – PDC*) tem, como principal função, reunir, de maneira coerente, as medidas fasoriais enviadas pelas PMUs, disponibilizando-as para diferentes aplicações.

Faz-se necessário, para a garantia de um adequado desempenho do SPMS, que o PDC apresente algumas características. São elas:

- Manutenção do equilíbrio entre o tempo de acesso e a capacidade de armazenamento;
- Robustez para suportar falhas de *hardware*, de *software* e nos canais de comunicação, armazenando os dados fasoriais de forma segura, sem perda de informação;
- Prever a expansão do processamento de dados, devido ao incremento de PMUs;
- Simultaneidade na aquisição, processamento e disponibilização dos dados fasoriais.

As medidas fasoriais de tensões e correntes das PMUs podem ser enviadas ao PDC a taxas que variam, em geral, desde 1 até 60 fasores por segundo. Adotou-se originalmente a norma *IEEE (Institute of Electrical and Eletronics Engineers) Standard 1344-1995* como padrão para o formato dos *frames* de dados enviados pelas PMUs ao PDC. No entanto, após a publicação da norma *IEEE Standard for Synchrophasors for Power System – C37.118-2005*, alterando-se as padronizações anteriores, esta se tornou a norma de referência.

Além das medidas fornecidas pelas PMUs, é possível também a troca de informações entre PDCs. Tal processo é realizado continuamente, gerando um fluxo de dados capaz de representar o estado do sistema de forma bastante próxima à situação em tempo real. Considerando-se o caráter centralizador do PDC, algumas implementações atribuem a ele também a função de monitoramento, referente à disponibilidade e ao funcionamento das unidades de medição [15]. A Figura 2.3 traz ilustradas as principais funções de um PDC e sua inserção em um SPMS.

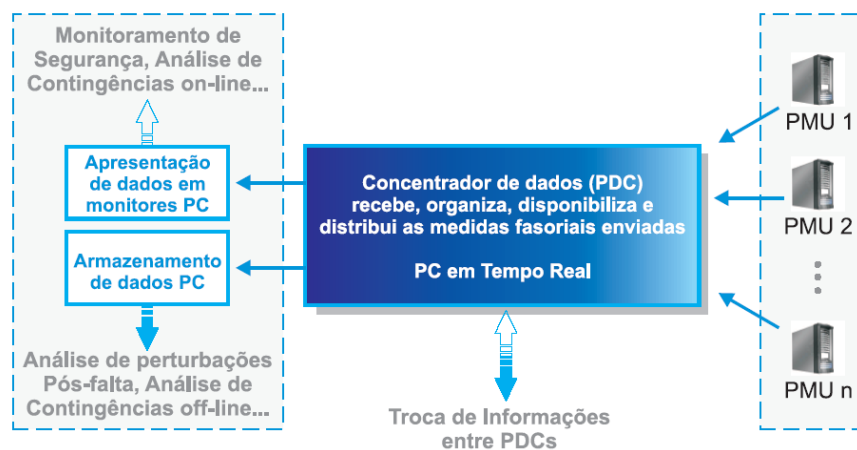


Figura 2.3: Principais funções de um PDC.

## 2.4 Canais de Comunicação

Considerando-se a estrutura e a operação do SPMS, atribui-se aos canais de comunicação a função de viabilizar a transferência de dados entre as PMUs e o PDC, bem como permitir a troca de informações entre PDCs de diferentes áreas.

Os canais de comunicação considerados para uso atualmente incluem opções de estruturas que operam tanto através de meios físicos específicos, quanto através do uso de tecnologia sem fio denominada *wireless*. O emprego da tecnologia *wireless* implica no uso de canais de microondas ou de sistemas de satélites. No que se refere ao emprego de tecnologias que utilizam meios físicos específicos, diversas são as escolhas possíveis. Dentre elas, pode-se citar o uso de linhas telefônicas, de cabos de fibra óptica [16], da rede de baixa e média tensão, o que pressupõe o emprego de tecnologia PLC (*Power Line Communication*), de um sistema de modems [17], ou da própria Internet, com o sistema de *Virtual Private Network* (VPN).

No que se refere aos atrasos de comunicação envolvidos na transmissão de dados, sabe-se que o desempenho e a rapidez no envio de informações estão associados com o tipo de canal de comunicação escolhido. Tendo em vista que muitas aplicações requerem altas taxas de atualizações de dados, é possível estabelecer-se uma relação entre o tipo de aplicação desejada e o requisito de eficiência do canal de comunicação. Aplicações de monitoração não exigem taxas de transferência e segurança tão altas quanto às necessárias para aplicações de controle, podendo-se utilizar a Internet como meio de comunicação entre as PMUs e o PDC [18]. Já para aplicações de controle, é recomendável o uso de canais de fibra óptica, a fim de minimizar-se a latência da rede.

## 2.5 Desenvolvimentos em SPMS

Como anteriormente discutido, as redes elétricas têm sido operadas em condições cada vez mais próximas aos limites de sua capacidade. Isto potencializa a ocorrência de colapsos envolvendo grandes áreas geográficas quando do surgimento de perturbações inesperadas [19].

Em função de tal cenário, diversos trabalhos de pesquisa ao redor do mundo têm sido desenvolvidos no intuito de aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos. A medição fasorial sincronizada é uma tecnologia desenvolvida para tal fim. Os exemplos de SPMS instalados com maiores dimensões se encontram localizados nos Estados Unidos e na China. Há diversos outros países, no entanto, que possuem esta tecnologia instalada em seus sistemas, e atualmente trabalham no desenvolvimento de novas aplicações. No Brasil,

protótipos foram já implementados e atualmente estão sendo realizados estudos para a implementação de um sistema de medição fasorial sincronizada que monitore todo o sistema interligado. Na seqüência, são explicitados os cenários de SPMS em diversos países.

### 2.5.1 Estados Unidos

A fim de analisar e entender os impactos de falhas no sistema elétrico dos Estados Unidos, um determinado grupo de trabalho examinou detalhadamente, dentre os anos de 1979 e 1995, 162 eventos relatados pelo *North American Electric Reliability Council* (NERC). Resultados apontaram a presença de problemas na monitoração em tempo real, na operação, no controle e nos sistemas de comunicação, bem como nos tempos de restauração do sistema, ao ocorrerem falhas de grande porte [20]. Estudos desta espécie reafirmaram a necessidade do aprimoramento dos instrumentos de monitoração e controle em tempo real para uma operação econômica e confiável do sistema elétrico.

Dentre os novos instrumentos propostos para enfrentar os desafios relatados, destacam-se aqueles relacionados à tecnologia de SPMS. Estes sistemas genericamente são citados na literatura como *Wide Area Measurement System* (WAMS) [21]. O desenvolvimento desta tecnologia teve início em 1989, com o Projeto WAMS nos Subsistemas do *Western Electric Coordinating Council* (WECC), especialmente no Subsistema da *Bonneville Power Administration* (BPA) e da *Southern California Edison* (SCE), e no *California Independent System Operator* (CAISO) [22], [23]. Os estudos iniciais, com relação a essa tecnologia, objetivavam a monitoração *on-line* do sistema. A partir das informações disponibilizadas pelo SPMS, poderia realizar-se a estimação do estado do sistema, para análise de sua estabilidade; a preservação de informações relacionadas a eventos, para posterior estudo e investigação; e a análise do comportamento do sistema frente a variações de carregamento. Em uma etapa posterior de desenvolvimento, previa-se já a utilização das informações disponibilizadas no controle dos sistemas.

Pode-se salientar ainda que países como a França e aqueles pertencentes ao Nordel (mercado de energia composto pelos países nórdicos) também foram precursores no

desenvolvimento desses Sistemas WAMS.

Durante os anos de 2005 e 2006, o SPMS do Subsistema WECC foi submetido a diversos testes a fim de investigar-se o desempenho dinâmico do sistema, aperfeiçoando as ferramentas de modelagem e refinando métodos de processamento de sinais para a identificação de modos de oscilação [24]. Na Figura 2.4, tem-se ilustrado o atual estágio deste SPMS.



Figura 2.4: Situação atual do SPMS do Subsistema WECC – Fonte: <http://www.naspi.org>.

No verão boreal de 2003, obtida experiência através do Projeto WAMS, o Departamento de Energia Norte-Americano (*U.S. Department of Energy – DOE*) deu início ao *Eastern Interconnect Phasor Project (EIPP)*, executado por um grupo de trabalho composto por agentes de transmissão, fabricantes de equipamentos, operadores independentes, pesquisadores de universidades e empresas públicas [25]. O EIPP objetivou o aumento da confiabilidade do sistema elétrico, fazendo uso de medições fasoriais sincronizadas para a monitoração e o controle do sistema. Para isto, seis Equipes de Trabalho (*Task Teams*) foram criadas:

- *Real-Time Applications Task Team*;
- *Equipment Placement Task Team*;

- *Off-Line Applications Task Team*;
- *Business Management Task Team*;
- *Performance Requirements Task Team*;
- *Data Management Task Team*.

Os principais desenvolvimentos se concentraram na identificação, descrição e especificação dos requisitos funcionais dos componentes de *hardware* e *software* de SPMS. Estes componentes se referem aos equipamentos (PMUs, PDC, redes de comunicação etc), e também às aplicações de monitoração, proteção e controle. De forma específica, o *Performance Requirements Task Team* (PRTT) trabalhou na elaboração de um documento com sugestões e requisitos para um guia de testes de PMUs. O objetivo fundamental do guia consistiu na definição de procedimentos de testes para a avaliação do desempenho das PMUs instaladas no EIPP.

Após 14 de agosto de 2003, quando grande parte da rede leste do sistema elétrico norte-americano se deparou com um *blackout* de grandes proporções, Estados Unidos e Canadá criaram a *Power System Task Force*. Esta força tarefa, em conjunto com o NERC e a indústria, elaborou um relatório apurando as causas do *blackout* e sugerindo medidas para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico. Dentre tais medidas, tem-se como destaque a necessidade de avaliação e adoção de melhores ferramentas de operação em tempo real e de utilizarem-se registradores de dados sincronizados no tempo [26].

Em função do *blackout* e das recomendações contidas no relatório de apuração das causas, o Projeto EIPP ganhou importância dentro do DOE e na indústria elétrica norte-americana. A primeira etapa do EIPP se encerrou em final de 2004, com a instalação de uma rede de 31 PMUs e sete PDCs. A segunda fase, iniciada em 2005, teve como principal objetivo formar uma rede com centenas de PMUs [27].

A Figura 2.5 ilustra os pontos de instalação de PMUs no EIPP, existentes ao final de 2005.

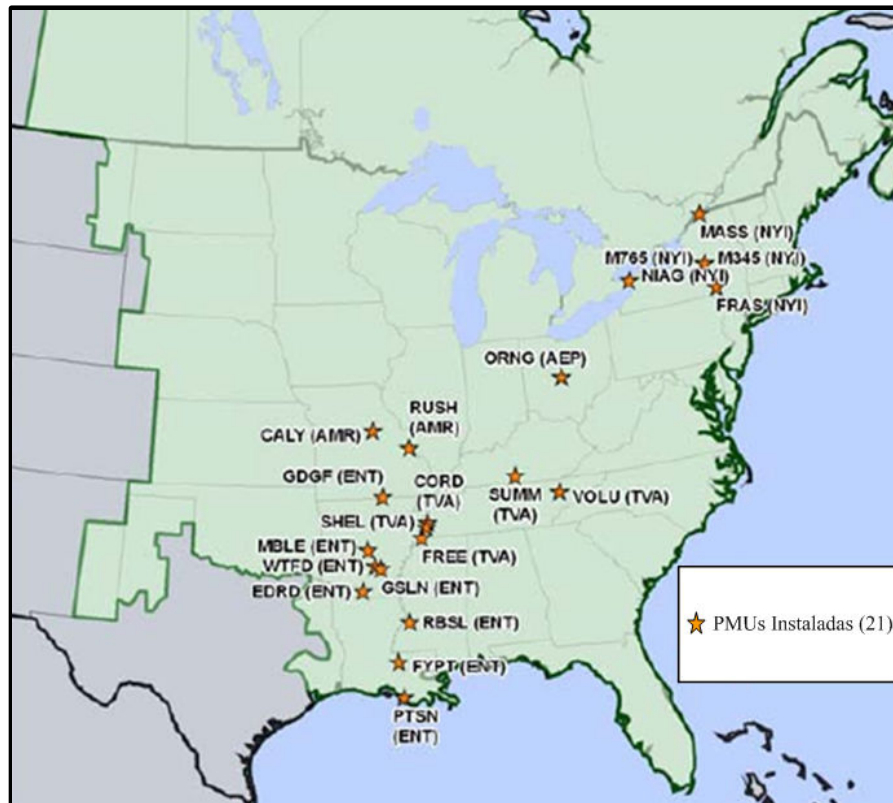


Figura 2.5: EIPP ao final de 2005 – Fonte: <http://www.naspi.org>.

Em 2007, o DOE e o NERC, em conjunto com empresas do setor elétrico e outras organizações, formaram o *North American SynchroPhasor Initiative* (NASPI). Neste esforço, as experiências referentes à investigação, ao desenvolvimento e à implantação da tecnologia de sincrofases, adquiridas através dos Projetos EIPP e WAMS, foram combinadas. Durante o ano de 2008, o NERC focou-se no seu papel principal de facilitar a participação de agentes da indústria no NASPI. Como coordenador das atividades do NASPI, o NERC contratou uma consultoria, a fim de que fosse realizado um levantamento financeiro acerca das necessidades do NASPI, para, com isto, justificar os gastos orçamentários referentes a 2009. O DOE, por sua vez, tem-se concentrado no apoio à pesquisa e ao desenvolvimento de tecnologias avançadas. Com relação à forma de organização do NASPI, este é estruturado em um grupo de trabalho composto por membros voluntários de organizações que operam o sistema elétrico, coordenam os esquemas de proteção, fornecem *hardware* e *software* associados a tecnologias de telecomunicação e também por pesquisadores de universidades, da indústria e de laboratórios norte-americanos de pesquisa e desenvolvimento. O grupo de trabalho é

subdividido em sete *Task Teams* (Equipes de Trabalho), focadas em diferentes aspectos de desenvolvimento e aplicação da tecnologia de medição de sincrofasores [28], [29]:

- *Business Management Task Team*;
- *Operations Implementation Task Team*;
- *Planning Implementation Task Team*;
- *Performance & Standards Task Team*;
- *Data & Network Management Task Team*;
- *Equipment Placement Task Team*;
- *Research Initiatives Task Team*.

A seguir, na Figura 2.6, é mostrado o sistema elétrico norte-americano e canadense, com a discriminação dos locais onde estão instalados os atuais PDCs e PMUs, bem como as localidades onde se tem planejada a instalação de futuras PMUs. Em março de 2009, tinham-se instaladas já mais de 200 PMUs em tal sistema.

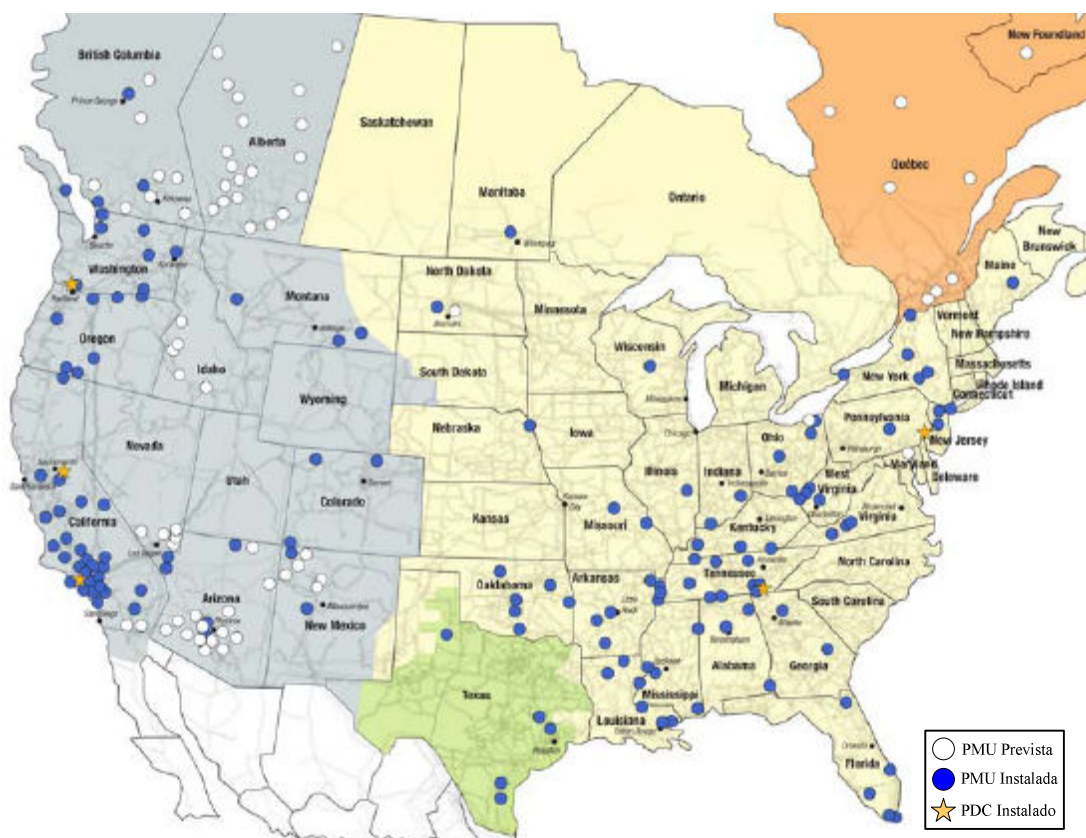


Figura 2.6: Situação do sistema elétrico norte-americano e canadense em março de 2009 –

Fonte: <http://www.naspi.org>.



## 2.5.2 China

Pesquisas acerca da medição fasorial sincronizada tiveram início em 1994 na China. No entanto, apenas a partir de 2002, iniciou-se a implementação de um SPMS no sistema elétrico chinês [30]. O governo chinês tem investido principalmente em pesquisas nas áreas de monitoração e controle de sistemas elétricos, haja vista as fracas conexões entre geradores e cargas e a necessidade de transferência de grandes quantidades de potência entre áreas longínquas [31], [32]. No final de 2004, o sistema chinês contava com 150 PMUs instaladas. Ao final de 2007, este número já passava de 400. Na sua maioria, realizando a monitoração da dinâmica do sistema elétrico, para a validação de modelos de simulação. Um protótipo de WAMS foi implementado na parte leste do sistema da província de *Heilongjiang*. Tal sistema elétrico é formado por sete unidades de geração (três térmicas) interligadas por linhas de 220 kV. Em cada uma destas unidades, há conectada uma PMU. Com os dados provenientes destas PMUs, realizam-se estudos relacionados à validação de parâmetros e modelos, à predição da estabilidade, e à estimação e correção de erros e atrasos dos dados recebidos das PMUs.

Nos últimos anos, dez novos SPMSs foram instalados ou se encontram em fase final de instalação em cinco sistemas denominados regionais (*Northern, Northeastern, Central, Southern e Eastern*) e em outros cinco sistemas provinciais (*Jiangsu, Henan, Guangdong, Yunnan e Guizhou*) [33]. Podem-se dividir as aplicabilidades de SPMS em dois grandes grupos. Um grupo denominado de funções básicas e outro caracterizado por funções avançadas. As funções básicas são as seguintes:

- Análise e monitoração em tempo real;
- Monitoração de distúrbios;
- Plataforma integrada de dados.

Já as funções avançadas, especificam-se em:

- Monitoração da operação de geradores;
- Monitoração de ângulos críticos;
- Inserção de medidas fasoriais na estimação de estados;
- Monitoração da estabilidade de tensão;
- Validação de modelos para simulações;

- Identificação e localização de faltas.

Em julho de 2006, para garantir a compatibilidade entre os esquemas de monitoramento da dinâmica dos sistemas elétricos e as medições fasoriais, criou-se um grupo de trabalho para a padronização das especificações técnicas referentes aos sistemas WAMS [34]. Este grupo de trabalho é composto por pesquisadores, agentes da indústria e operadores do sistema de potência chinês, sendo que os padrões a serem estabelecidos se referem aos tipos de funções implementadas, especificações e guias de teste para PMUs, protocolos de comunicação e sistemas para sincronização temporal. Cabe salientar que o desenvolvimento destas padronizações se acelerou em função dos modos de oscilação em baixa frequência registrados no sistema elétrico chinês em 29 de outubro de 2005. De maneira geral, as especificações estão sendo estabelecidas tomando-se por base a monitoração das oscilações de baixa frequência, que consiste no principal objetivo do Projeto WAMS da China.

### 2.5.3 Outros Países

Nos últimos anos, alguns países da Ásia também deram início à implantação de WAMS em seus respectivos sistemas elétricos.

Na Coreia do Sul, a *Korea Electric Power Co.* (KEPCO) desenvolveu e implantou um sistema WAMS, contendo 24 PMUs instaladas nas maiores subestações e pontos de geração do sistema elétrico coreano [16]. Cada PMU monitora as tensões e correntes trifásicas das 14 principais LTs da KEPCO. Os dados são enviados pelas PMUs, a uma taxa de 10 sincrofasores por segundo, para um servidor localizado no centro de operação do sistema. Ele realiza o pré-processamento (ordena os pacotes de acordo com a respectiva etiqueta de tempo) e encaminha-os para armazenamento em um servidor de dados. No que se refere a aplicações, há implementada uma ferramenta de monitoração *on-line* e desenvolvimentos relacionados à análise da segurança dinâmica e da estabilidade de tensão.

Em Taiwan, um acidente em uma torre de uma linha de transmissão de 345 kV, em julho de 1999, levou a *Taiwan Power Company* (TPC) a implantar um WAMS, cuja entrada em operação se deu em 2002 [17]. O sistema possui cinco PMUs instaladas na

cinco principais subestações da companhia. Os dados, das PMUs, são enviados continuamente para dois PDCs, via rede Ethernet, a uma taxa de 20 sincrofasores por segundo. Há desenvolvidas aplicações para o auxílio da operação do sistema, na área de monitoração *on-line* dos fasores, e de localização de faltas. Encontram-se, em desenvolvimento, estudos relacionados à definição de um plano de defesa contra contingências extremas, com o intuito de reduzir-se o risco de instabilidades no sistema causadas pelo incremento de carga nas LTs e por faltas severas.

No Japão, desde a última década do século passado, tem-se dado atenção para o desenvolvimento de aplicações baseadas na tecnologia de medição fasorial sincronizada [35]. A característica longitudinal das interconexões do sistema elétrico japonês faz com que oscilações de baixa frequência em torno de  $0,3$  a  $0,5$  Hz estejam presentes. Em função disto, instalou-se um protótipo de SPMS que abrange as seis maiores empresas japonesas de eletricidade. As PMUs se localizam em 11 universidades e encontram-se conectadas ao sistema de distribuição, monitorando a frequência do sistema nestas seis diferentes áreas do sistema elétrico japonês.

Há registros de desenvolvimentos em SPMS também no México [36], Suécia [37], [38], Noruega [39], [40], Dinamarca [41], Croácia [42], Suíça, Itália, Áustria, Tailândia, Austrália, Hungria [43], entre outros.

## 2.5.4 Brasil

Com relação às experiências brasileiras acerca da tecnologia de medição fasorial sincronizada, pode-se citar como pioneiro o Projeto MedFasee, com início em 2003 e término em 2005, constituído por uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a empresa Reason Tecnologia S.A. e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) [4].

Como resultado deste Projeto MedFasee, desenvolveu-se um protótipo de SPMS, constituído por três PMUs instaladas nas capitais dos três estados do sul do Brasil, para monitoramento das grandezas do sistema elétrico brasileiro. Tais PMUs, conectadas à rede de baixa tensão, enviavam, através da Internet, sincrofasores de tensão ao PDC, instalado no Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LabPlan) em

Florianópolis, Santa Catarina [44]. A Figura 2.7 ilustra a tela de monitoração em tempo real da frequência e dos fasores de tensão medidos pelo protótipo de SPMS implementado.

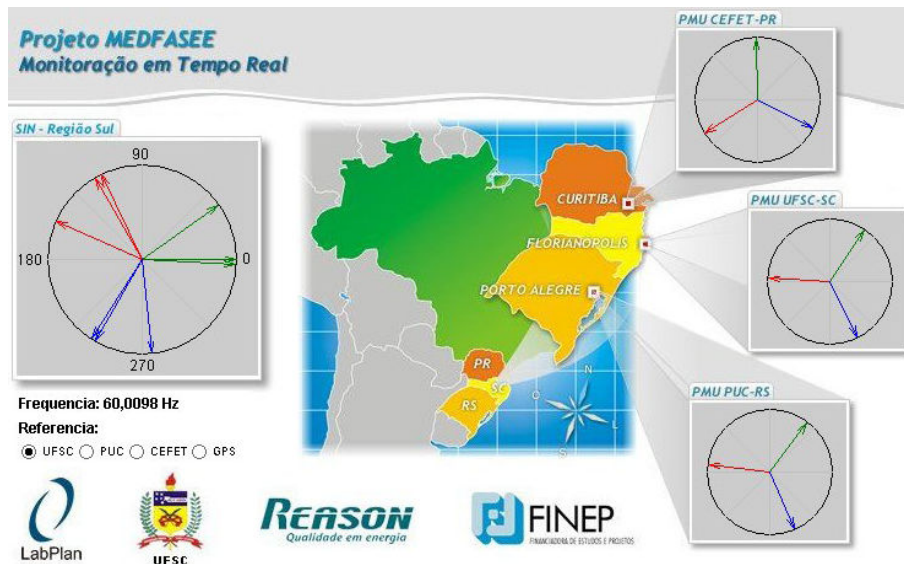


Figura 2.7: Tela de monitoração em tempo real do Projeto MedFasee.

O Projeto MedFasee também forneceu experiência e conhecimento acerca da tecnologia de medição fasorial sincronizada, o que fomentou o desenvolvimento de outros três projetos: Projeto MedFasee Eletrosul, Projeto MedFasee Frequência e Projeto MedFasee CTEEP.

O Projeto MedFasee Eletrosul, uma parceria entre a UFSC, a empresa Reason Tecnologia S.A. e a Eletrosul Centrais Elétricas S. A., teve início em 2007, e objetiva a implementação de um protótipo de sistema de medição fasorial sincronizada no sistema de transmissão da Eletrosul Centrais Elétricas S. A. [45], [46]. Dentre as aplicações deste protótipo, tem-se o desenvolvimento de aplicações de monitoramento e de localização de faltas em LTs. Os dados de entrada para este sistema são providos por PMUs instaladas em quatro diferentes subestações da empresa, monitorando as grandezas elétricas de oito terminais de LTs de 525 kV. Na Figura 2.8, tem-se ilustrada a localização geográfica dos equipamentos referentes ao protótipo de SPMS.



Figura 2.8: Localização geográfica do Projeto MedFasee Eletrosul.

O Projeto MedFasee Frequência teve finalizada a instalação de todos os seus equipamentos ao final de 2009. Constituiu-se a partir de uma parceria entre UFSC, Reason Tecnologia S.A. e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Nele, prevê-se a investigação do desempenho dinâmico do SIN, a partir de sua monitoração em tempo real, uma vez que se tem implementado um protótipo de SPMS, formado por 9 PMUs e um PDC, instalados em universidades brasileiras, cobrindo as 5 regiões geográficas do país. Este projeto tem por objetivo ainda servir como instrumento de desenvolvimento, difusão e uso acadêmico da tecnologia de medição fasorial sincronizada. Na Figura 2.9, ilustra-se a tela de monitoração em tempo real das grandezas elétricas.

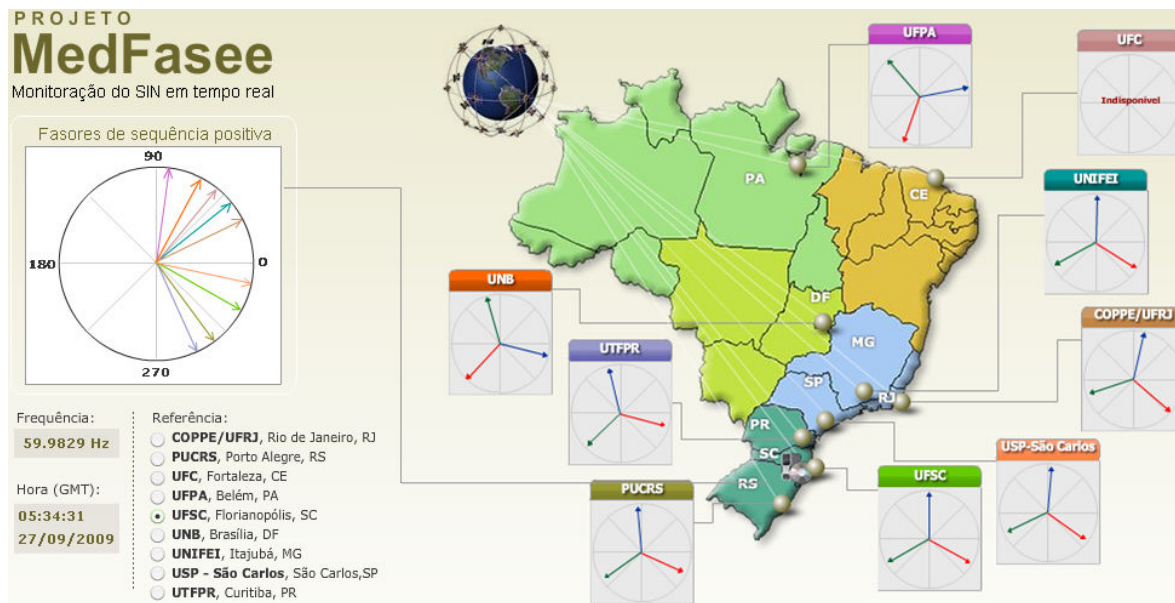


Figura 2.9: Tela de monitoração em tempo real do Projeto MedFasee Frequência.

Por fim, ainda em fase de desenvolvimento e implementação, uma parceria entre a UFSC, a Reason Tecnologia S.A. e a Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP), tem-se o Projeto MedFasee CTEEP. Neste projeto, prevê-se a instalação de um protótipo de SPMS no sistema de transmissão em *Extra High Voltage* (EHV) da CTEEP. Dentre os desenvolvimentos, consta a monitoração das condições operacionais e de proteção do sistema elétrico, a monitoração de aberturas angulares, a identificação de oscilações e a localização de faltas em LTs.

Acerca dos resultados produzidos pelo Projeto MedFasee, podem ser citados ainda desenvolvimentos acadêmicos recentes que fizeram uso da experiência adquirida. Tais desenvolvimentos se referem à análise da dinâmica de sistemas elétricos de potência, fazendo uso de medição fasorial sincronizada [47], e à melhoria da estabilidade angular a pequenos sinais dos sistemas elétricos, a partir de um esquema de controle hierárquico, constituído de uma camada descentralizada e outra centralizada que utiliza dados fasoriais sincronizados [18], [48].

Em relação à utilização da tecnologia de SPMS no SIN, isto tem se mostrado uma tendência natural e vem sendo sinalizada pela ANEEL e pelo ONS, no âmbito das ações previstas para a melhoria das condições de segurança operacional do sistema.

De forma específica, observa-se a proposição do uso desta tecnologia no Projeto do

Sistema de Oscilografia de Longa Duração, cujas responsabilidades e ações estão discriminadas na Resolução Normativa – ANEEL Nº 170, de 27 de Abril de 2005. O Projeto prevê a implementação de um sistema de registro de fasores com o objetivo de monitorar o desempenho dinâmico do SIN, quando da ocorrência de perturbações sistêmicas. Tem-se como objetivo também a utilização da tecnologia de medição fasorial sincronizada no suporte à operação em tempo real, aperfeiçoando o processo de estimação de estados e desenvolvendo ferramentas para a visualização de grandezas em tempo real. Atribuem-se, como responsabilidades dos agentes de transmissão, a aquisição, a instalação e a operação das PMUs, bem como a implantação da infra-estrutura de disponibilização e envio dos sincrofases ao ONS. Este é responsável pelas etapas de definição da arquitetura do SPMS, da quantidade e da localização das PMUs, dos requisitos necessários aos sistemas de comunicação e do sistema de registro de fasores.

O ONS, através de contratação da Consultoria Kema, definiu aplicações em tempo real a serem utilizadas em seus Centros de Controle [49]. São quatro as funções selecionadas: monitoração do nível de estresse do sistema, assistente para conexão de ilhas elétricas, assistente para fechamento de *loop* e monitoração de oscilações do sistema. Em conjunto com a Kema, o ONS decidiu, para fins de estudo, pela implementação destas aplicações na plataforma EMS (*Energy Management System*)/SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), desenvolvida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), denominado Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE), que é utilizado para supervisão e controle no Centro Nacional de Operação do Sistema (CNOS). Atualmente, tem sido realizados estudos de caso para avaliar-se o desempenho da inserção das aplicações [50].

## 2.6 Comentários Finais

Pode-se constatar que a inserção da tecnologia de medição fasorial sincronizada nas ferramentas de análise de sistemas elétricos de potência tem se mostrado uma tendência.

Construída a partir dos avanços tecnológicos verificados no final do século passado, esta tecnologia vem consolidando-se a nível mundial, com o desenvolvimento de novas aplicações, antes não vislumbradas.

Os Estados Unidos, por ter sido vanguarda na implementação de sistemas de medição fasorial sincronizada, reúne bastante experiência na área e tem já implementados, em seus centros de controle, instrumentos e ferramentas de apoio à operação, baseadas na tecnologia. Outros países, no entanto, têm destinado vultosos investimentos em pesquisas nesta área.

O Brasil tem se organizado na implementação de um sistema de medição fasorial em nível nacional. Há, no entanto, desde 2003, experimentos acadêmicos e protótipos desenvolvidos destes sistemas, o que permitiu o acúmulo de experiência e conhecimento acerca da tecnologia.

No que concerne ao futuro, pode-se ressaltar que esta é uma tecnologia que não vem a substituir, de forma abrupta, as ferramentas atualmente utilizadas para a análise de sistemas de potência. Ela vem a complementar tais ferramentas, agregando novas possibilidades e contribuindo para o aumento das alternativas de análise e da precisão. O que se coloca como grande desafio aos agentes envolvidos é o desenvolvimento de aplicações que façam uso dos recursos tecnológicos disponibilizados e das informações providas pelos sistemas, gerando resultados operacionais e financeiros eficazes.



# Capítulo 3

## Problema das Faltas em Sistemas de Potência

Em condições normais de operação, pode-se considerar um sistema de potência trifásico equilibrado e simétrico, em relação às suas três fases. Incidentes, no entanto, podem fazer com que o sistema deixe de operar em tais condições temporariamente. Dentre estas situações indesejáveis, têm-se as faltas, que podem ser do tipo curto-circuito e circuito aberto. Uma falta tipo circuito aberto surge em decorrência de condutores em aberto (corrente nula). A falta tipo curto-circuito, por sua vez, acontece quando a corrente elétrica flui através de um caminho indevido (corrente elevada). A partir desta elucidação, o termo falta, quando citado no texto, referir-se-á à falta do tipo curto-circuito, objetivo de interesse do estudo.

Diversos são os equipamentos constituintes de um sistema de potência que podem apresentar defeitos. Dentre eles, têm-se as LTs, os transformadores, os geradores e os equipamentos de controle, manobra, medição e proteção. Nos sistemas de transmissão, entretanto, a LT é o componente mais vulnerável a falhas. Isto se dá devido às elevadas dimensões de uma LT e também às intempéries diversas a que pode estar submetida. As faltas podem ser causadas por diversos fatores. Dentre exemplos de agentes causadores de faltas em uma LT, têm-se:

- Fenômenos naturais, tais como descargas atmosféricas, tempestades, chuvas de granizo, ventos fortes e excesso de gelo sobre linhas;
- Curto-circuitos causados por galhos de árvores, pássaros ou outros animais;
- Acidentes, como veículos que colidem em torres de sustentação ou objetos voadores (aeronaves e balões) que se chocam contra linhas aéreas;

- Falhas de componentes do próprio sistema, como isoladores que perdem sua capacidade de isolação;
- Queimadas;
- Vandalismo.

A localização de uma eventual falta é importante para o início da etapa de manutenção. Mesmo que a interligação dos sistemas de transmissão permita que a energia seja redirecionada para outras LTs em perfeito funcionamento, a confiabilidade do sistema diminui. Em sistemas cada vez mais próximos de seus limites máximos de transmissão, este aspecto ganha relevância [51].

## 3.1 Conseqüências das Falhas em Sistemas de Potência

Os dispositivos de proteção dos sistemas de potência (relés de proteção, disjuntores, fusíveis etc) servem para isolar as faltas. Caso esta etapa de proteção falhe, graves conseqüências podem ocorrer no sistema, tais como perda de estabilidade, danos a equipamentos (vizinhos ao local da falha), incêndios, explosões e o aparecimento de desligamentos em cascata. A conseqüência mais conhecida, no entanto, é a interrupção do fornecimento de energia elétrica, fenômeno relacionado à confiabilidade do sistema. Uma falta pode ainda causar uma variação de tensão de curta duração (salto de tensão ou afundamento da tensão), que representa uma perturbação relacionada à qualidade de energia [52].

Os efeitos das faltas diferem em relação aos níveis de transmissão e distribuição. Uma falta no nível de transmissão causa, em geral, um afundamento de tensão, abrangendo um grande número de usuários, mas sem interrupção do fornecimento de energia elétrica, na maior parte das vezes. Isto ocorre devido à interligação das redes dos sistemas de potência, que faz com que uma perturbação se propague para vários outros pontos. Em nível de distribuição, a interligação do sistema é menor, com o predomínio das redes radiais. Assim, uma falta, neste nível, causa um afundamento de tensão para um menor número de usuários (menor interligação), podendo interromper, em contrapartida, o

fornecimento de energia elétrica para determinados grupos de consumidores (menor confiabilidade) [53], [54].

## 3.2 Importância da Rápida Localização da Falta em Sistemas de Transmissão

Caso uma falta cause a interrupção no fornecimento de energia elétrica, evidentemente se faz necessária a rápida localização do ponto defeituoso na LT para o restabelecimento da operação normal do sistema. Outro aspecto importante com relação ao tempo de localização da falta se relaciona à confiabilidade dos sistemas de potência. Como já mencionado, a diminuição do número de LTs operacionais, pode levar um sistema à instabilidade.

A questão da localização de faltas em LTs também ganha relevância a partir da tendência mundial de desregulamentação dos setores de energia elétrica [55]. Neste cenário, as etapas de geração, transmissão e distribuição são claramente separadas, processo denominado desverticalização. Há concorrência na geração e na comercialização de energia elétrica, sendo a transmissão e a distribuição de energia elétrica consideradas monopólios naturais. A ausência de concorrência torna obrigatório o controle das empresas transmissoras por parte de um agente regulador. Este adota critérios técnicos e econômicos para forçar as empresas de transmissão a manterem a continuidade de seus serviços. Dentre os aspectos considerados, as legislações estabelecem penalidades em função do tempo que uma LT permanece inoperante. Desta forma, é importante que uma empresa transmissora possa localizar, de forma rápida e assertiva, eventuais faltas em suas LTs para diminuir os valores de tais penalidades.

No Brasil, a ANEEL tem a incumbência de exercer a função de agente regulador. No estabelecimento da atividade de transmissão no país, cada empresa transmissora estabelece um contrato de prestação de serviços de transmissão com o ONS [3]. Neste contrato, são estipuladas penalidades à empresa transmissora quando do estabelecimento de eventuais faltas de continuidade do serviço. Assim, a empresa possui uma renda assegurada (cujo valor é fixado no contrato) que é diminuída de uma parcela variável (em decorrência de

penalidades). Esta parcela variável é dependente do número de desligamentos verificados (programados ou intempestivos) e do tempo de cada um destes desligamentos. A partir do exposto, pode-se afirmar que uma empresa transmissora de energia elétrica deve reduzir a duração dos desligamentos intempestivos (ou não-programados). Para isto, a eficiência da estimação do ponto de falta em uma LT é de fundamental importância.

### 3.3 Tipos de Falta em Sistemas de Potência

As faltas em sistemas de potência podem vir a acontecer de quatro formas distintas. Elas podem ser classificadas, em ordem decrescente de frequência de ocorrência, nos tipos fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica [56]. A Figura 3.1 expõe as configurações destes respectivos tipos de falta.

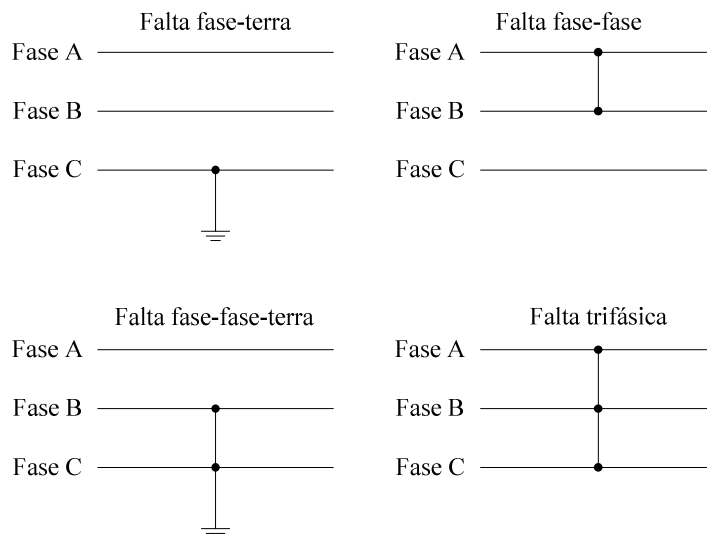


Figura 3.1: Tipos de falta.

Pelo fato de sua incidência ser de maior frequência, as faltas do tipo fase-terra apresentam maior interesse prático. Para ilustrar, em termos quantitativos, esta afirmação, apresenta-se a Tabela 3.1 relacionada ao caso particular de três LTs [57]:

- *500 kV* – da BPA, que constitui a Agência Federal controlada pelo Departamento de Energia dos EUA;
- *400 kV* – da *Swedish State Power Board* (SSPB), que representa a Organização

Estatual Sueca de Energia Elétrica;

- 200 kV – da SSPB.

Tipo de Falta:	BPA	SSPB	
	500 kV	400 kV	200 kV
fase-terra	93 %	70 %	56 %
fase-fase	4 %	23 %	27 %
fase-fase-terra	2 %	7 %	17 %
trifásica	1 %		

Tabela 3.1: Índices de ocorrência dos tipos de falta – LTs da BPA e SSPB.

Com relação à incidência das faltas para diferentes níveis de tensão, em [58], tem-se a análise de um sistema de transmissão da Eletronorte, localizado no estado do Pará e parte integrante do SIN. Os valores acerca de tal análise estão explicitados na Tabela 3.2.

Tipo de Falta:	500 kV	230 kV	69 kV
fase-terra	92 %	92 %	58 %
fase-fase	3 %	3 %	11 %
fase-fase-terra	0 %	0 %	25 %
trifásica	5 %	5 %	6 %

Tabela 3.2: Índices de ocorrência dos tipos de falta – LTs da Eletronorte.

Na Tabela 3.3, por sua vez, estão ilustrados os valores referentes a um caso teste, trazido por [59], e que apresenta a configuração topológica típica de uma concessionária do sistema elétrico brasileiro.

Tipo de Falta:	345 kV	230 kV	138 kV
fase-terra	91 %	80 %	73 %
fase-fase	1 %	1,5 %	6 %
fase-fase-terra	7 %	17 %	17 %
trifásica	1 %	1,5 %	4 %

Tabela 3.3: Índices de ocorrência dos tipos de falta – Caso teste contido em [59].

Pode-se observar, a partir dos valores expostos nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, que a incidência da falta fase-terra é proporcional ao nível de tensão da LT. Para níveis mais elevados, a incidência é maior.

Uma falta pode ainda ser transitória ou permanente. As faltas permanentes são irreversíveis, sendo que o restabelecimento da LT acontece somente depois de efetuados os reparos na rede. Estas faltas podem ocorrer devido, por exemplo, ao rompimento de condutores. As transitórias, por sua vez, ocorrem sem danos físicos aos sistemas de potência. Após a atuação da etapa de proteção, a operação normal pode ser restabelecida. A localização deste tipo de falta se mostra, em geral, mais difícil. Uma falta transitória pode ser causada por galhos de árvores que se aproximam demasiadamente das linhas, quando da ocorrência de ventos fortes, ou devido a isoladores parcialmente danificados, que perdem sua capacidade de isolamento sob certas condições climáticas.

## 3.4 Classificação dos Métodos de Localização de Faltas

Pode-se considerar que os sinais de tensão e corrente aferidos nos dois terminais de uma LT sob condição de falta são formados por um componente de frequência fundamental e por sinais transitórios de alta frequência. Desta forma, as técnicas de localização de faltas em LTs, apresentadas na literatura, podem ser classificadas, de maneira preliminar, em dois grupos:

- Métodos de localização de faltas baseados em fasores de frequência fundamental;
- Métodos de localização de faltas baseados em transitórios de alta frequência.

No entanto, pode-se considerar ainda a existência de outro grupo de métodos de localização de faltas. Estes são denominados métodos de localização de faltas baseados no conhecimento [60].

A Figura 3.2 expõe a classificação dos métodos de localização de faltas em função do tipo de sinal utilizado na estimação do ponto de falta.

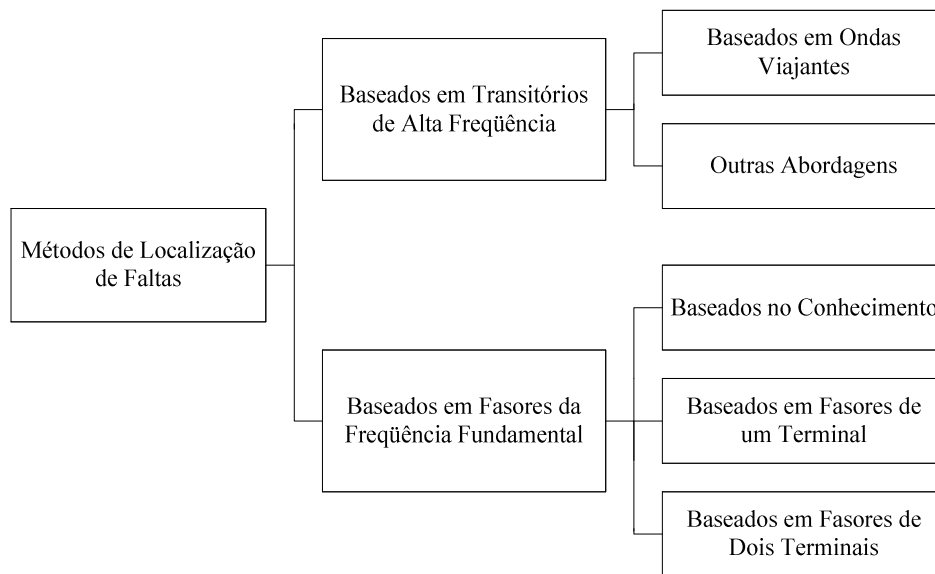


Figura 3.2: Classificação dos métodos de localização de faltas em LTs.

### 3.4.1 Métodos Baseados no Conhecimento

Este grupo de métodos requer a utilização de informações externas, como as provenientes de alarmes de sistemas SCADA e de sensores de tensão na carga, bem como de relés de proteção e de disjuntores atuantes na isolação de uma falta. Há basicamente duas grandes abordagens [61]. A primeira se constitui na análise da relação entre as informações provenientes do monitoramento da rede, com condições de falta armazenadas em uma estrutura do tipo árvore ou tabela. Na segunda abordagem, comparam-se os resultados obtidos via simulação do sistema de proteção e as informações provenientes do monitoramento da rede de energia elétrica. São apresentados alguns exemplos de técnicas de localização de faltas baseadas no conhecimento em [62], [63] e [64].

### 3.4.2 Métodos Baseados em Transitórios de Alta Frequência

Descargas atmosféricas, chaveamentos e faltas em LTs originam ondas viajantes que se propagam pela linha e são modificadas e refletidas nas suas discontinuidades (barramentos, fontes, transformadores e pontos de falta). Ou seja, estas perturbações criam ondas viajantes, nos sentidos direto e reverso da LT. Estas ondas são atenuadas e distorcidas pelas perdas da linha, em função dos efeitos Joule e Corona, até finalmente se extinguirem [65]. O sistema elétrico passa então a apresentar sinais transitórios de alta frequência superpostos aos de frequência fundamental, quando da ocorrência de uma perturbação qualquer. Desta forma, um sinal de tensão ou corrente medido no terminal de uma LT com falta apresenta o componente de frequência fundamental e harmônicos. Registram-se também sinais exponenciais decrescentes e transitórios de alta frequência. Este grupo de métodos baseados nos transitórios de alta frequência utiliza toda esta gama de informação para estimar o local da falta na LT. Estes métodos, devido à natureza dos sinais que são utilizados, requerem alta taxa de amostragem para uma operação adequada. Para sua implementação, faz-se necessário um investimento financeiro superior aos métodos de outros grupos.

Os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes são conhecidos há muito tempo. Na década de 1950, diferentes sistemas foram testados, alguns deles gerando produtos comerciais [66]. Embora tenham sido alcançados resultados bastante satisfatórios, os elevados custos de instalação, operação e manutenção limitaram o emprego e a disseminação desta classe de métodos. A partir da década de 1990, no entanto, estes métodos passaram a ser empregados com maior frequência em função da necessidade de estimar os pontos de falta com maior precisão e rapidez em LTs longas e de EHV. Outros aspectos também contribuíram para a maior utilização destes métodos nos últimos anos, como, por exemplo, os avanços tecnológicos na área de aquisição de dados em alta velocidade, na sincronização de medidas via GPS e nos sistemas de comunicação em geral.



### 3.4.3 Métodos Baseados em Fasores da Frequência Fundamental

A maioria dos métodos de localização de faltas pode ser classificada na categoria daqueles baseados em fasores de frequência fundamental [67]. Algumas destas técnicas foram desenvolvidas como produtos comerciais, em caráter de localizadores de falta autônomos ou como funções incorporadas a relés de proteção e a registradores de perturbação. Este grupo de métodos subdivide-se ainda em duas grandes classes:

- Métodos baseados em fasores de um terminal;
- Métodos baseados em fasores dos dois terminais.

Os métodos baseados nos sinais de frequência fundamental têm como variáveis de entrada os fasores de tensão e corrente, obtidos a partir das medidas de um ou dos dois terminais da LT sob falta. Considera-se o diagrama unifilar de uma LT homogênea operando sob condição de falta, como ilustrado na Figura 3.3. Nesta linha, o Terminal Emissor (*Sending End*) é denominado  $S$ . O Terminal Receptor (*Receiving End*), por sua vez, é identificado por  $R$ . O ponto da linha sob falta (*Fault Point*) aparece identificado por  $F$ .

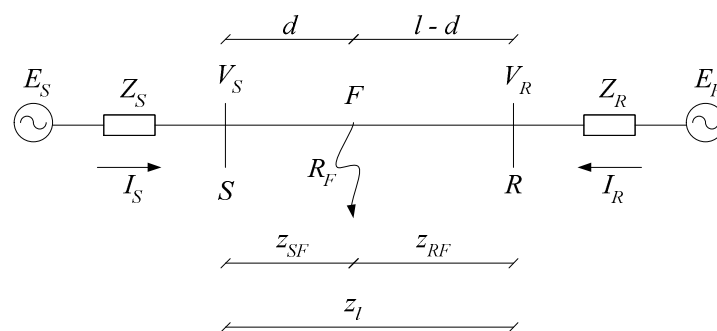


Figura 3.3: Diagrama unifilar de uma LT em falta.

Nos métodos que consideram fasores de somente um terminal, o princípio básico consiste em tentar determinar a impedância  $z_{SF}$ , a partir dos fasores de tensão e corrente medidos no Terminal  $S$  da linha [68]. De posse desta informação, estima-se o ponto de falta.

Considera-se a LT com característica homogênea. Isto significa que ela possui parâmetros elétricos, por unidade de comprimento, constantes: resistência série  $r_u$ , indutância série  $L_u$  e capacitância em derivação  $C_u$ . Assim, a condutância em derivação da linha é desconsiderada, já que seu efeito é desprezível perante o efeito da capacitância em derivação da LT e também por não haver uma modelagem confiável desse parâmetro. Desta forma, a impedância série da LT é definida como

$$z_u = r_u + j\omega L_u \quad (3.1)$$

sendo sua admitância em derivação dada por

$$y_u = j\omega C_u \quad (3.2)$$

ambas por unidade de comprimento.

Assim, a impedância série total da LT é dada por

$$z_l = lz_u. \quad (3.3)$$

A impedância série do trecho da linha localizado entre o Terminal  $S$  e o Ponto de Falta  $F$  consiste em uma parcela da impedância total e é dada por

$$z_{SF} = dz_l. \quad (3.4)$$

Como  $z_l$  é um parâmetro conhecido e  $z_{SF}$  pode ser determinado através de medidas de tensão e corrente no Terminal  $S$ , a localização da falta pode ser obtida isolando-se  $d$  na Equação (3.4). Assim, tem-se

$$d = \frac{z_{SF}}{z_l}. \quad (3.5)$$

No que se refere às ferramentas matemáticas utilizadas por metodologias de localização de faltas, há a necessidade de transformações matemáticas empregadas para a decomposição das grandezas de um sistema trifásico desequilibrado em grandezas monofásicas independentes.

A decomposição em componentes simétricos é uma transformação matemática baseada no teorema de Fortescue, que demonstra ser possível a decomposição, de um sistema composto por  $N$  fasores desequilibrados, em  $N$  sistemas formados por  $N$  fasores equilibrados, denominados componentes simétricos dos fasores originais [69]. São três estes componentes: de seqüência positiva, de seqüência negativa e de seqüência zero. A limitação desta transformação é que ela só gera modos desacoplados para o caso de LTs

transpostas. A transposição consiste em rotacionar as posições das fases da linha, em intervalos, de tal forma que cada fase percorra todas as posições em uma determinada configuração da linha [70]. Esta prática é utilizada para igualar os valores das impedâncias próprias e mútuas.

A transformação modal, por sua vez, é utilizada para decompor as grandezas de um sistema de potência trifásico em três modos magneticamente desacoplados [71]. Existem diversas matrizes de transformação modal. A mais utilizada, no entanto, é a transformação de Clarke. Esta transformação separa uma grandeza trifásica desequilibrada em componentes decompostos sobre dois eixos em quadratura, modos 1 (ou  $\alpha$ ) e 2 (ou  $\beta$ ), mais um componente de modo 0 (equivalente ao componente simétrico de sequência zero). A transformação de Clarke pode ser aplicada em LTs não transpostas.

O avanço dos meios de comunicação possibilitou a aplicação de métodos que utilizam informações fasoriais dos dois terminais da LT [72]. Aproximações antes necessárias nos métodos de um terminal passaram a não mais existir, uma vez que o número de equações disponíveis tornou-se consistente com a ordem do problema. Desta forma, a resistência de falta, a influência da reatância, a posição da falta e as impedâncias de fonte praticamente não mais exerceram influência sobre o desempenho da maioria dos métodos baseados em fasores provenientes dos dois terminais da linha.

Em alguns métodos que utilizam fasores da frequência fundamental é necessário o conhecimento das impedâncias das fontes  $Z_S$  e  $Z_R$ , pois tais valores interferem na estimativa do ponto de falta. Para a obtenção dos valores destas impedâncias, que representam os equivalentes Thevenin, pode-se recorrer a bancos de dados de concessionárias de energia elétrica ou a programas de curto-circuito. Devido à característica dinâmica dos sistemas elétricos de potência, no entanto, há mudanças em sua topologia, o que leva à alteração nos valores dessas impedâncias. Por isso, em [73], tem-se desenvolvido um método para a representação dos equivalentes Thevenin a partir das tensões e correntes registradas nas extremidades da LT.

Considera-se a Figura 3.4, onde as barras terminais pertencem a sistemas elétricos diferentes, sendo que a única interligação entre os subsistemas é a LT SR.

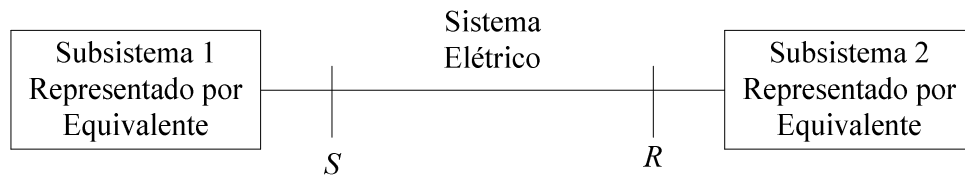


Figura 3.4: LT com subsistemas equivalentes.

O sistema elétrico pode ser representado a partir do diagrama unifilar da Figura 3.5, sendo  $Z_S$  e  $Z_R$  as impedâncias de entrada em relação às barras  $S$  e  $R$ .



Figura 3.5: Equivalente a partir das barras  $S$  e  $R$ .

Na determinação das impedâncias equivalentes, é utilizada a técnica das componentes simétricas e o teorema da superposição. Os circuitos em componentes de seqüência são decompostos conforme cada tipo de falta, já que a ocorrência da impedância de seqüência está atrelada ao tipo de falta. Na Figura 3.6, tem-se representado o circuito pré-falta. A Figura 3.7 ilustra o circuito em falta para o caso de uma falta fase-terra. A Figura 3.8, portanto, exhibe a configuração do circuito superposto, obtido a partir das redes pré-falta e em falta.

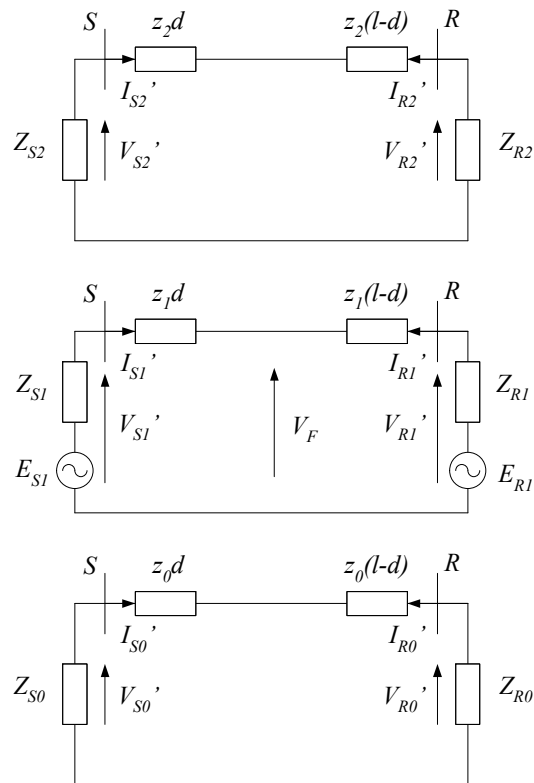


Figura 3.6: Circuito pré-falta.

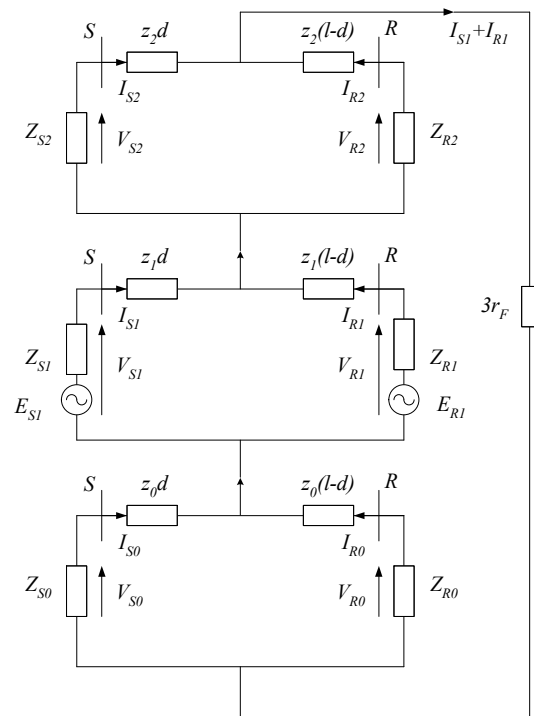


Figura 3.7: Circuito em falta para uma falta do tipo fase-terra.

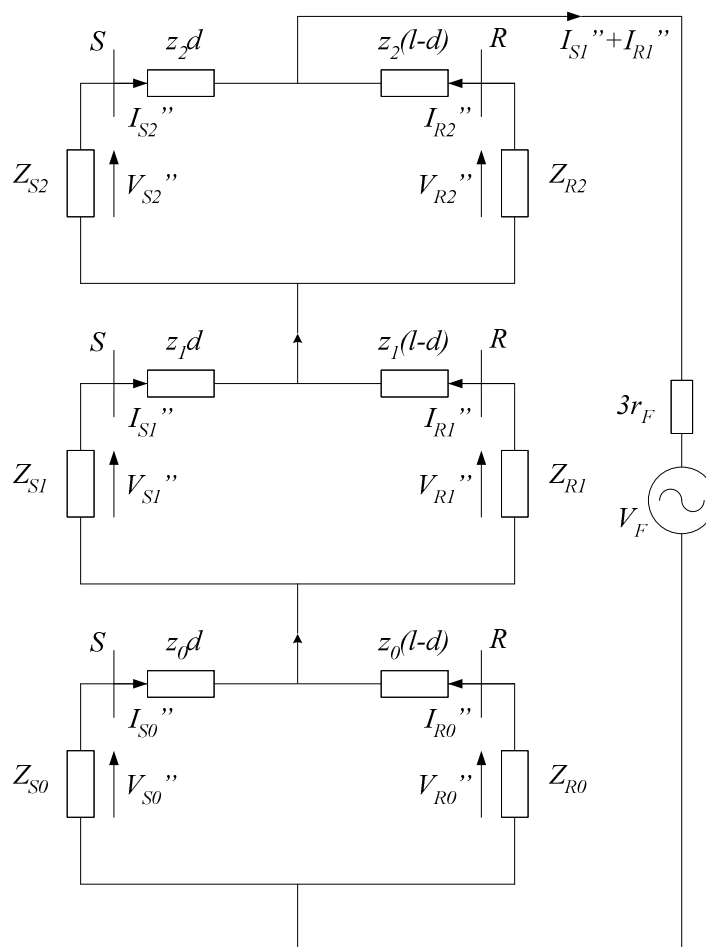


Figura 3.8: Circuito superposto para uma falta do tipo fase-terra.

As impedâncias das fontes são então calculadas a partir do circuito superposto, exposto na Figura 3.8, obtendo-se

$$Z_{S1} = -\frac{V_{S1} - V'_{S1}}{I_{S1} - I'_{S1}} = -\frac{V''_{S1}}{I''_{S1}} \quad (3.6)$$

$$Z_{S0} = -\frac{V_{S0} - V'_{S0}}{I_{S0} - I'_{S0}} = -\frac{V''_{S0}}{I''_{S0}} \quad (3.7)$$

$$Z_{R1} = -\frac{V_{R1} - V'_{R1}}{I_{R1} - I'_{R1}} = -\frac{V''_{R1}}{I''_{R1}} \quad (3.8)$$

$$Z_{R0} = -\frac{V_{R0} - V'_{R0}}{I_{R0} - I'_{R0}} = -\frac{V''_{R0}}{I''_{R0}} \quad (3.9)$$

Para a compreensão do princípio básico de operação dos algoritmos que fazem uso de

fasores dos dois terminais da LT, considera-se uma linha monofásica e homogênea com parâmetros, por unidade de comprimento, conhecidos, como ilustrado na Figura 3.9.

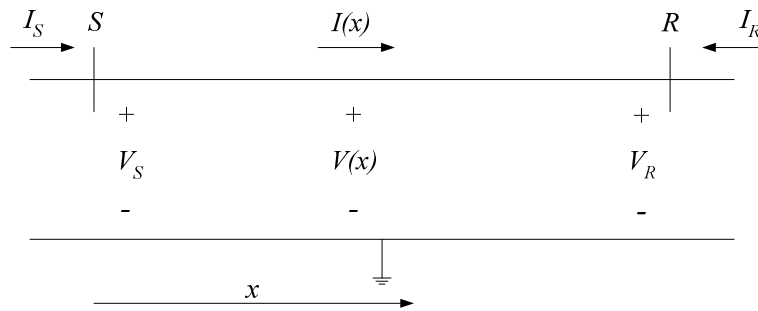


Figura 3.9: LT monofásica em regime permanente.

Assume-se que as medidas de tensão e corrente tomadas nos Terminais  $S$  e  $R$  da linha são sincronizadas, fazendo com que os fasores  $V_S$  e  $I_S$  estejam em sincronismo com  $V_R$  e  $I_R$ . Pode-se calcular, a partir de  $V_S$  e  $I_S$ , a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha localizado a uma distância  $x$  do Terminal  $S$ . Estas grandezas, no entanto, também podem ser obtidas a partir de  $V_R$  e  $I_R$ , considerando-se que o mesmo ponto está localizado a uma distância  $l - x$  do Terminal  $R$ .

Considera-se agora a ocorrência de uma falta no Ponto  $F$  da linha, ilustrada na Figura 3.9. Tal configuração é exposta na Figura 3.10, onde as variáveis  $x$  e  $y$  representam as distâncias de um ponto qualquer em relação aos Terminais  $S$  e  $R$  da linha respectivamente.

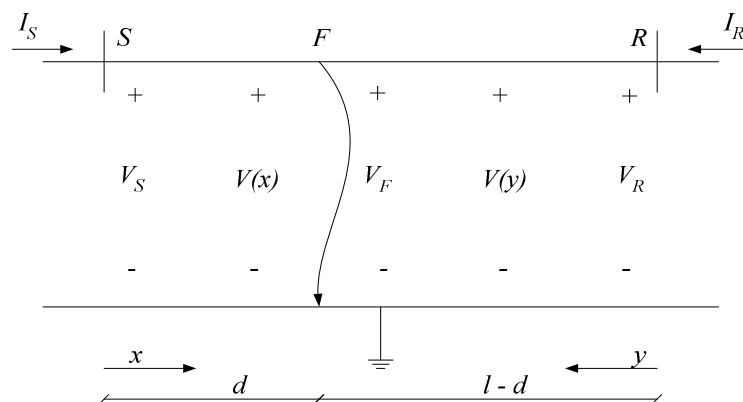


Figura 3.10: LT monofásica com falta no Ponto  $F$ .

Pode-se então considerar que a linha é dividida em duas LTs homogêneas, cujos parâmetros, por unidade de comprimento, são iguais aos da linha original  $SR$ :

- LT  $SF$ , de comprimento  $d$ ;
- LT  $RF$ , de comprimento  $l - d$ .

Mesmo com a ocorrência da falta, a tensão e a corrente, em qualquer ponto da linha localizado a uma distância  $0 \leq x \leq d$  do Terminal  $S$ , ainda podem ser obtidas a partir de  $V_S$  e  $I_S$ . De maneira análoga, a tensão e a corrente em qualquer ponto da linha localizado a uma distância  $0 \leq y \leq l - d$  do Terminal  $R$  também podem ser determinadas a partir de  $V_R$  e  $I_R$ . Somente a tensão do Ponto  $F$  ( $V_F$ ), no qual se tem  $x = d$  e  $y = l - d$ , pode ser obtida a partir dos fasores de ambos os terminais da LT. Desta forma, pode-se afirmar que

$$V(x)|_{x=d} = V(y)|_{y=l-d}. \quad (3.10)$$

A Equação (3.10) é considerada a expressão básica utilizada pela maioria dos métodos baseados em fasores da frequência fundamental dos dois terminais da linha [74]. Pode-se verificar que não há necessidade de adoção de nenhuma hipótese simplificadora para sua obtenção.

### 3.5 Etapas e Erros Associados a um Algoritmo de Localização de Faltas

Ao contrário da proteção de distância, onde o mais importante é a confiabilidade da proteção e a rapidez de atuação, fazendo do tempo um aspecto de fundamental importância, nos algoritmos de localização de faltas, o enfoque se dá na estimação do ponto o mais preciso possível, mesmo que isto exija um maior tempo e esforço computacional.

Com relação às etapas necessárias a um algoritmo de localização de faltas, essas podem variar, dependendo das informações requeridas por cada algoritmo [75]. Pode haver a necessidade de identificação do tipo de falta, de sincronização e filtragem dos dados de entrada, de adoção de diferentes taxas de amostragem para a interpolação dos dados, de estimação dos fasores fundamentais e de uma correta detecção do instante da falta. Todos



estes aspectos estão relacionados a cada particular metodologia empregada e influenciam, em graus diferentes de importância, a estimação do ponto de falta.

A precisão de um algoritmo de localização de faltas pode ser influenciada por diversos fatores. Algumas fontes de erros, como os transformadores de proteção, dependentes do grau de exatidão, e o processo de aquisição de dados, são de difícil intervenção. Questões, no entanto, como a transposição de uma linha e a sincronização entre os dados de seus terminais podem ser trabalhadas nos algoritmos, a fim de que sua influência seja reduzida [57].

Nos algoritmos de localização de faltas baseados em fasores, os valores dos parâmetros da linha são determinados, tomando-se como referência a frequência fundamental de  $60\text{ Hz}$ , no caso do sistema elétrico brasileiro. Variações deste valor podem comprometer a estimação do ponto de falta.

Outro aspecto a ser considerado é a transposição das LTs. Quando uma LT é perfeitamente transposta, suas matrizes de parâmetros são equilibradas. Isto significa que, para qualquer ponto da linha ao longo de sua extensão, os elementos da diagonal são iguais entre si, o mesmo ocorrendo com os elementos fora da diagonal. Como a maioria dos algoritmos desenvolvidos considera as linhas transpostas, a não verificação desta característica pode introduzir erros.

Com relação aos transformadores de instrumentação, presentes nos sistemas, idealmente eles fornecem uma grandeza secundária em fase com a primária, estando as amplitudes primária e secundária relacionadas exatamente. Devido, no entanto, a características construtivas, há erros de fase e de amplitude entre as grandezas primárias e secundárias, o que pode interferir nos resultados dos algoritmos de localização de faltas.

O sincronismo de dados locais e remotos no tempo é um pressuposto importante para grande parte das metodologias de localização de faltas que utilizam informação dos dois terminais de uma linha. Erros nos equipamentos de oscilografia, perda no sinal de GPS, ou atrasos no envio dos registros podem inserir erros [73].

Por fim, pode-se citar a detecção do instante de ocorrência da falta como um fator importante nos algoritmos de localização de faltas. A partir da determinação deste instante, são definidos os períodos pré-falta e pós-falta, fundamentais para implementação das metodologias.

## 3.6 Comentários Finais

Diversos são os fatores que podem originar a ocorrência de uma falta em uma LT. Como consequência normal deste evento, tem-se a interrupção no fornecimento de energia elétrica. Neste cenário, há diminuição da confiabilidade do sistema elétrico e penalização aos agentes de transmissão pela inoperância da linha. Isto faz com que a rápida e precisa localização da falta seja de grande importância.

Com relação às metodologias desenvolvidas para a localização de faltas, há diferentes abordagens, no que se refere ao tipo de informação utilizada e ao seu emprego. Associados às características particulares de cada metodologia, têm-se os erros de estimação do ponto de falta.

O grande desafio que se coloca, por sua vez, é a adaptação, o aperfeiçoamento e a implementação das abordagens, utilizando-se os recursos tecnológicos desenvolvidos nas áreas de processamento de sinais e de transmissão de dados, que têm possibilitado maior robustez aos sistemas e aberto novos paradigmas.

# Capítulo 4

## Metodologias Abordadas para Localização de Faltas em LTs

Como já explicitado, as técnicas para localização de faltas em LTs se subdividem em métodos baseados em fasores da frequência fundamental, métodos baseados em transitórios de alta frequência e métodos baseados no conhecimento.

Neste trabalho, são realizadas implementações, desenvolvidas análises e discutidos resultados referentes a métodos que se fundamentam em fasores da frequência fundamental, sendo estes obtidos a partir dos valores medidos de tensão e corrente, provenientes dos dois terminais da linha.

Este grupo de metodologias pode ser organizado em duas classes:

- Metodologias dependentes de sincronização entre as medidas dos dois terminais da LT;
- Metodologias independentes de sincronização entre as medidas.

A Figura 4.1 ilustra estas classes de metodologias, as quais serão exploradas no decorrer do trabalho.

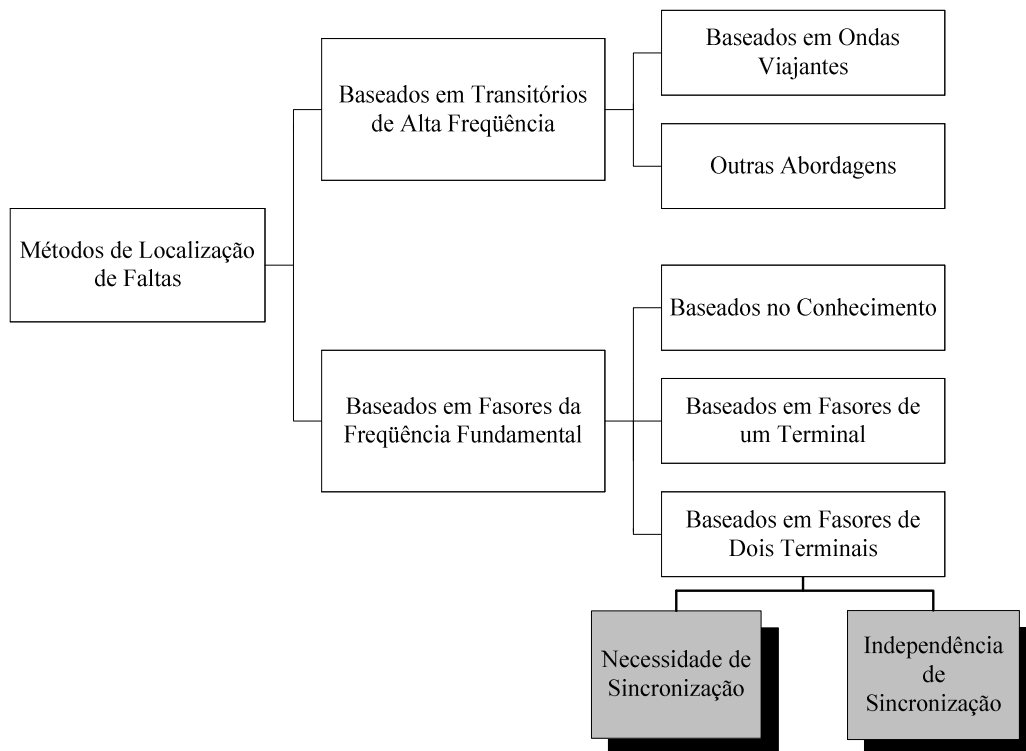


Figura 4.1: Especificação das metodologias para localização de faltas em LTs baseadas em fasores da freqüência fundamental.

Cabe salientar que os métodos explorados no trabalho fazem uso de medidas fasoriais para a estimação do ponto de falta. Estes fasores são obtidos a partir do processamento das medidas terminais de tensão e corrente da LT. Na seqüência, são explorados métodos fundamentados em fasores da freqüência fundamental obtidos dos dois terminais da LT e subdivididos nas duas classes já citadas: dependentes e independentes de sincronização.

## 4.1 Métodos Baseados em Fasores de Dois Terminais Dependentes de Sincronização

### 4.1.1 Método Proposto por Brahma

O método para localização de faltas em LTs, descrito na seqüência, utiliza somente

medições sincronizadas de tensão de ambos os terminais da linha, eliminando-se o erro devido ao transformador de corrente [76].

Para o desenvolvimento da técnica proposta, considera-se inicialmente a LT mostrada na Figura 4.2.

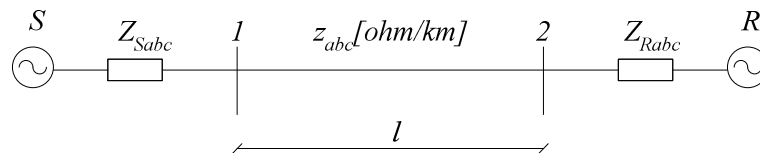


Figura 4.2: LT considerada para análise.

As matrizes impedância de fonte trifásica são  $Z_{Sabc}$  e  $Z_{Rabc}$  ohms. Assume-se que tais valores são conhecidos e iguais aos equivalentes Thevenin do modelo para as Barras 1 e 2.

O comprimento da LT é dado por  $l$ . A matriz impedância trifásica da linha, formada pelas impedâncias próprias e mútuas entre fases, é dada por

$$z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \Omega/km . \quad (4.1)$$

Para uma análise trifásica, esta linha produz uma matriz impedância/admitância de barra de dimensão  $6 \times 6$ . A matriz admitância de barra tem então o seguinte formato

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} . \quad (4.2)$$

Na Equação (4.2), cada elemento é uma matriz de dimensão  $3 \times 3$ .

A Figura 4.3 exibe o Ponto F (local da falta), considerado como uma terceira barra.

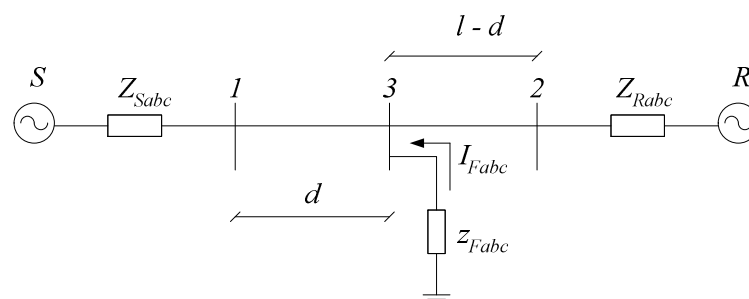


Figura 4.3: LT com uma falha.

Desta forma, a matriz impedância de barra passa a ter dimensão  $9 \times 9$ .

As mudanças nas tensões das três barras, devido à falta, podem ser obtidas através de

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = Z_{barra\_falha} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ I_{Fabc} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde

$[0]$ : matriz nula de dimensão  $3 \times 1$ ;

$I_{Fabc}$ : corrente de falta trifásica de dimensão  $3 \times 1$ , com a direção mostrada na Figura 4.3;

$\Delta V_i$ : mudança nas tensões trifásicas da barra  $i$  devido à falta (dimensão  $3 \times 1$ );

$Z_{barra\_falha}$ : matriz impedância de barra trifásica, com a falta considerada na Barra 3 (dimensão  $9 \times 9$ ).

Da Equação (4.3), pode-se escrever

$$\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ I_{Fabc} \end{bmatrix} = Y_{barra\_falha} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Na Equação (4.4),  $Y_{barra\_falha}$  é a matriz admitância de barra trifásica, que possui dimensão  $9 \times 9$ , sendo igual ao inverso de  $Z_{barra\_falha}$ . Simbolicamente,  $Y_{barra\_falha}$  é representada pela Equação (4.5).

Cada elemento de  $Y_{barra\_falha}$  é uma matriz de dimensão  $3 \times 3$ . As matrizes admitância de barra estão relacionadas à configuração física do sistema de potência. Elementos da matriz admitância de barra  $Y_{barra}$  (antes da falta) são conhecidos. Utilizando-se então as conexões do sistema mostrado na Figura 4.3, pode-se relacionar os elementos de  $Y_{barra\_falha}$  aos elementos de  $Y_{barra}$ , como mostrado nas equações abaixo

$$Y_{barra\_falha} = \begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} & Y'_{13} \\ Y'_{21} & Y'_{22} & Y'_{23} \\ Y'_{31} & Y'_{32} & Y'_{33} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$Y'_{11} = Y_{11} - \frac{y_{abc}}{l} + \frac{y_{abc}}{d} \quad (4.6)$$

$$Y'_{12} = Y'_{21} = [0]_{3 \times 3} \quad (4.7)$$

$$Y'_{13} = Y'_{31} = -\frac{y_{abc}}{d} \quad (4.8)$$

$$Y'_{22} = Y_{22} - \frac{y_{abc}}{l} + \frac{y_{abc}}{l-d} \quad (4.9)$$

$$Y'_{23} = Y'_{32} = -\frac{y_{abc}}{l-d} \quad (4.10)$$

$$Y'_{33} = \frac{y_{abc}}{d} + \frac{y_{abc}}{l-d} + (z_{Fabc})^{-1} \quad (4.11)$$

onde

$d, l-d$  : distância do Ponto  $F$  às Barras  $1$  e  $2$ ;

$l$  : comprimento total da LT;

$z_{Fabc}$  : matriz impedância de falta trifásica;

$y_{abc}$  : inverso da matriz impedância de linha trifásica, por unidade de comprimento,

ou seja,

$$y_{abc} = (z_{abc})^{-1}. \quad (4.12)$$

Utilizando-se desde a Equação (4.8) até a (4.11), pode-se obter

$$[0]_{3 \times 3} = \left( Y_{11} - \frac{y_{abc}}{l} \right) \Delta V_1 + \frac{y_{abc}}{d} \Delta V_1 - \frac{y_{abc}}{d} \Delta V_3 \quad (4.13)$$

$$[0]_{3 \times 3} = \left( Y_{22} - \frac{y_{abc}}{l} \right) \Delta V_2 + \frac{y_{abc}}{l-d} \Delta V_2 - \frac{y_{abc}}{l-d} \Delta V_3 \quad (4.14)$$

onde

$$d + (l-d) = l. \quad (4.15)$$

As Equações (4.13) e (4.14) representam seis equações complexas. As tensões nas Barras  $1$  e  $2$  são continuamente medidas. Assim,  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$  são conhecidos. As incógnitas nas Equações (4.13), (4.14) e (4.15) são  $\Delta V_3$ ,  $d$  e  $l-d$ .

As Equações (4.13) e (4.14) podem então ser reescritas como

$$\frac{1}{d} \Delta V_1 - \frac{1}{d} \Delta V_3 = -y_{abc}^{-1} \left( Y_{11} - \frac{y_{abc}}{l} \right) \Delta V_1 = z_{abc} \left( \frac{y_{abc}}{l} - Y_{11} \right) \Delta V_1 = P \quad (4.16)$$

$$\frac{l}{l-d} \Delta V_2 - \frac{l}{l-d} \Delta V_3 = -y^{-l} \left( Y_{22} - \frac{y_{abc}}{l} \right) \Delta V_2 = z_{abc} \left( \frac{y_{abc}}{l} - Y_{22} \right) \Delta V_2 = Q. \quad (4.17)$$

Pode-se observar que  $P$  e  $Q$  são vetores de dimensão  $3 \times 1$ . Assim,  $P(l)$  e  $Q(l)$  referem-se aos primeiros valores dos vetores coluna.

De forma análoga, para as demais grandezas,  $(\cdot)(l)$ , tem-se a consideração também do primeiro valor dos respectivos vetores coluna.

Para obter-se a solução de  $d$ , tem-se o seguinte

$$x \Delta V_1(l) - x \Delta V_3(l) = P(l) \quad (4.18)$$

$$y \Delta V_2(l) - y \Delta V_3(l) = Q(l) \quad (4.19)$$

$$\frac{l}{x} + \frac{l}{y} = l \text{ ou } y = \frac{x}{xl - l} \quad (4.20)$$

onde

$$x = \frac{l}{d} \text{ e } y = \frac{l}{l-d}. \quad (4.21)$$

A partir das Equações (4.18) e (4.19), tem-se

$$\frac{x \Delta V_1(l) - P(l)}{x} = \frac{y \Delta V_2(l) - Q(l)}{y}. \quad (4.22)$$

Substituindo-se o valor de  $y$ , ilustrado na Equação (4.20), na Equação (4.22), e utilizando-se a Equação (4.21), em  $x$ , obtém-se a distância  $d$  do Ponto  $F$  à Barra  $l$ , que representa a estimativa do ponto de falta

$$\begin{aligned} \Delta V_1(l) - \frac{P(l)}{x} &= \Delta V_2(l) - Q(l)l + \frac{Q(l)}{x} \\ \Delta V_1(l) - P(l)d_l &= \Delta V_2(l) - Q(l)l + Q(l)d_l \\ d_l &= \frac{|\Delta V_1(l) - \Delta V_2(l) + lQ(l)|}{|P(l) + Q(l)|} \end{aligned} \quad (4.23)$$

onde

$P$  e  $Q$  são vetores dados por

$$P_{3 \times 1} = z_{abc} \left( \frac{y_{abc}}{l} - Y_{11} \right) \Delta V_1 \quad (4.24)$$

$$Q_{3 \times 1} = z_{abc} \left( \frac{y_{abc}}{l} - Y_{22} \right) \Delta V_2. \quad (4.25)$$



O desenvolvimento acima exposto é realizado para o primeiro ponto de estimativa do local da falta,  $d_1$ . Por tratar-se de uma estruturação trifásica, no entanto, são obtidos a partir da metodologia, outras duas estimativas,  $d_2$  e  $d_3$ , referentes respectivamente aos segundos e terceiros valores dos vetores coluna.

### 4.1.2 Método Proposto por Wang

Trata-se de uma técnica de localização de falhas em LTs desenvolvida para a utilização de medidas sincronizadas de tensão e corrente provenientes de PMUs [77].

Em estado normal de operação, um sistema de potência com  $n$  nós pode ser representado pela equação de admitância nodal, descrita pela Equação (4.26)

$$[Y]_{n \times n} \cdot [V^{(0)}]_n = [I^{(0)}]_n. \quad (4.26)$$

Ou pela equação de impedância nodal

$$[Z]_{n \times n} \cdot [I^{(0)}]_n = [V^{(0)}]_n \quad (4.27)$$

onde

$[V^{(0)}]_n$  : tensões nodais pré-falta;

$[I^{(0)}]_n$  : injeções de corrente nodais pré-falta;

$[Y]_{n \times n} = [G]_{n \times n} + j[B]_{n \times n}$  : matriz de admitância nodal  $n \times n$ ;

$[Z]_{n \times n} = [R]_{n \times n} + j[X]_{n \times n}$  : matriz de impedância nodal  $n \times n$ .

Assume-se que uma falta ocorre na Linha  $SR$ , entre  $S$  e  $R$ , como explicitado pela Figura 4.4.

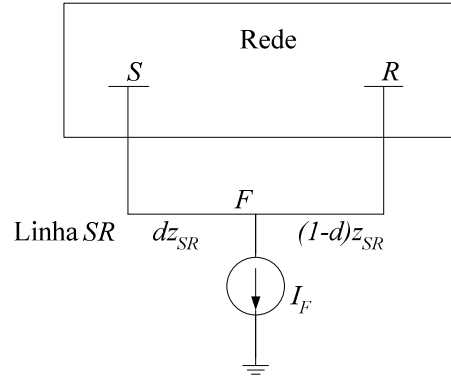


Figura 4.4: Falta na Linha SR.

A distância entre o Terminal  $S$  e o Ponto  $F$  (local da falta) é  $dL_{SR}$ ;  $L_{SR}$  é o comprimento da Linha  $SR$  e  $z_{SR}$  é a impedância da Linha  $SR$ .

Um novo Terminal  $F$  aparece com a falta, e a Equação (4.26) se torna

$$[Y]_{(n+1) \times (n+1)} \cdot ([V^{(0)}]_{n+1} + [\Delta V]_{n+1}) = [I^{(0)}]_{n+1} + [\Delta I]_{n+1} \quad (4.28)$$

onde

$$[V^{(0)}]_{n+1} = \begin{bmatrix} V_I^{(0)} \\ \vdots \\ V_n^{(0)} \\ V_F^{(0)} \end{bmatrix}; \quad [\Delta V]_{n+1} = \begin{bmatrix} \Delta V_I \\ \vdots \\ \Delta V_n \\ \Delta V_F \end{bmatrix}; \quad [I^{(0)}]_{n+1} = \begin{bmatrix} I_I^{(0)} \\ \vdots \\ I_n^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [\Delta I]_{n+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_F \end{bmatrix};$$

$$[Y]_{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} Y_{II} & \cdots & Y_{IS} & \cdots & Y_{IR} & \cdots & Y_{In} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ Y_{SI} & \cdots & Y'_{SS} & \cdots & Y'_{SR} & \cdots & Y_{Sn} & Y'_{SF} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ Y_{RI} & \cdots & Y'_{RS} & \cdots & Y'_{RR} & \cdots & Y_{Rn} & Y'_{RF} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ Y_{nI} & \cdots & Y_{nS} & \cdots & Y_{nR} & \cdots & Y_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & Y'_{FS} & 0 & Y'_{FR} & 0 & 0 & Y'_{FF} \end{bmatrix}.$$

Devido ao novo Terminal  $F$ , as admitâncias próprias  $Y_{SR}$ ,  $Y_{RS}$  passam a ter os seguintes formatos

$$\begin{aligned}
Y'_{SS} &= Y_{SS} - \frac{I}{z_{SR}} + \frac{I}{dz_{SR}} \\
Y'_{SR} &= Y'_{RS} = Y_{SR} + \frac{I}{z_{SR}} \\
Y'_{RR} &= Y_{RR} - \frac{I}{z_{SR}} + \frac{I}{(1-d)z_{SR}}.
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Para o Terminal  $F$ , a admitância própria  $Y'_{FF}$  e as admitâncias mútuas  $Y'_{FS}$  e  $Y'_{FR}$ , entre os Terminais  $S$  e  $R$  são

$$\begin{aligned}
Y'_{FF} &= \frac{I}{dz_{SR}} + \frac{I}{(1-d)z_{SR}} \\
Y'_{SF} &= Y'_{FS} = -\frac{I}{dz_{SR}} \\
Y'_{RF} &= Y'_{FR} = -\frac{I}{(1-d)z_{SR}}.
\end{aligned} \tag{4.30}$$

A Equação (4.28) pode ser dividida em componentes de pré-falta e falta

$$[Y]_{(n+1) \times (n+1)} \cdot [V^{(0)}]_{n+1} = [I^{(0)}]_{n+1} \tag{4.31}$$

$$[Y]_{(n+1) \times (n+1)} \cdot [\Delta V]_{n+1} = [\Delta I]_{n+1}. \tag{4.32}$$

A Equação (4.32) tem a seguinte representação na forma expandida

$$\begin{bmatrix}
Y_{l1} & \cdots & Y_{lS} & \cdots & Y_{lR} & \cdots & Y_{ln} & 0 \\
\vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\
Y_{s1} & \cdots & Y'_{SS} & \cdots & Y'_{SR} & \cdots & Y_{Sn} & Y'_{SF} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\
Y_{r1} & \cdots & Y'_{RS} & \cdots & Y'_{RR} & \cdots & Y_{Rn} & Y'_{RF} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\
Y_{n1} & \cdots & Y_{nS} & \cdots & Y_{nR} & \cdots & Y_{nn} & 0 \\
0 & 0 & Y'_{FS} & 0 & Y'_{FR} & 0 & 0 & Y'_{FF}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\Delta V_l \\
\vdots \\
\Delta V_S \\
\vdots \\
\Delta V_R \\
\vdots \\
\Delta V_n \\
\Delta V_F
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 \\
\vdots \\
0 \\
\vdots \\
0 \\
\vdots \\
0 \\
\Delta I_F
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 \\
\vdots \\
0 \\
\vdots \\
0 \\
\vdots \\
0 \\
I_F
\end{bmatrix}.$$

As fórmulas para a localização da falta se derivam da Equação (4.32). A tensão de falta (Terminal  $F$ ) não pode ser medida. Assim, a linha  $F$  da Equação (4.32) é substituída.

A partir da linha  $F$  da matriz, tem-se

$$Y'_{FS}\Delta V_S + Y'_{FR}\Delta V_R + Y'_{FF}\Delta V_F = \Delta I_F = I_F$$

$$\Delta V_F = \frac{I_F - Y'_{FS}\Delta V_S - Y'_{FR}\Delta V_R}{Y'_{FF}}. \quad (4.33)$$

Inserindo-se a Equação (4.33) na linha  $S$  da Equação (4.32), tem-se

$$Y_{S1}\Delta V_1 + \dots + Y'_{SS}\Delta V_S + \dots + Y'_{SR}\Delta V_R + \dots + Y_{Sn}\Delta V_n + Y'_{SF}\Delta V_F = 0$$

$$Y_{S1}\Delta V_1 + \dots + \left( Y'_{SS} - \frac{Y'_{SF}Y'_{FS}}{Y'_{FF}} \right) \Delta V_S + \dots + \left( Y'_{SR} - \frac{Y'_{SF}Y'_{FR}}{Y'_{FF}} \right) \Delta V_R + \dots + Y_{Sn}\Delta V_n + \frac{Y'_{SF}}{Y'_{FF}} I_F = 0$$

onde

$$Y'_{SS} - \frac{Y'_{SF}Y'_{FS}}{Y'_{FF}} = \left( Y_{SS} - \frac{1}{z_{SR}} + \frac{1}{dz_{SR}} \right) - \frac{\left( \frac{1}{dz_{SR}} \right) \left( \frac{1}{dz_{SR}} \right)}{\left( \frac{1}{dz_{SR}} + \frac{1}{(1-d)z_{SR}} \right)} =$$

$$\left( Y_{SS} - \frac{1}{z_{SR}} + \frac{1}{dz_{SR}} \right) - \frac{(1-d)}{dz_{SR}} = Y_{SS} \quad (4.34)$$

$$Y'_{SR} - \frac{Y'_{SF}Y'_{FR}}{Y'_{FF}} = \left( Y_{SR} + \frac{1}{z_{SR}} \right) - \frac{\left( \frac{1}{dz_{SR}} \right) \left( \frac{1}{(1-d)z_{SR}} \right)}{\left( \frac{1}{dz_{SR}} + \frac{1}{(1-d)z_{SR}} \right)} = \left( Y_{SR} + \frac{1}{z_{SR}} - \frac{1}{z_{SR}} \right) = Y_{SR} \quad (4.35)$$

$$Y_{S1}\Delta V_1 + \dots + Y_{SS}\Delta V_S + \dots + Y_{SR}\Delta V_R + \dots + Y_{Sn}\Delta V_n - \frac{\frac{1}{dz_{SR}}}{\frac{1}{dz_{SR}} + \frac{1}{(1-d)z_{SR}}} I_F = 0$$

$$Y_{S1}\Delta V_1 + \dots + Y_{SS}\Delta V_S + \dots + Y_{SR}\Delta V_R + \dots + Y_{Sn}\Delta V_n = (1-d)I_F. \quad (4.36)$$

Similarmente à linha  $S$ , para a linha  $R$  da Equação (4.32), obtém-se

$$Y_{R1}\Delta V_1 + \dots + Y_{RS}\Delta V_S + \dots + Y_{RR}\Delta V_R + \dots + Y_{Rn}\Delta V_n = dI_F. \quad (4.37)$$

Então

$$[Y]_{n \times n} \cdot [\Delta V]_n = [\Delta I]_n = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta I_S \\ \vdots \\ \Delta I_R \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ (1-d)I_F \\ \vdots \\ dI_F \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} I \\ \vdots \\ S \\ \vdots \\ R \\ \vdots \\ n \end{matrix}. \quad (4.38)$$

A Equação (4.38) é utilizada para a localização de faltas a partir de medições sincronizadas de tensão. Sob falta, mede-se  $[\Delta V]_n$ . Calcula-se  $[\Delta I]_n$ . A falta pode então ser localizada a partir da seguinte expressão

$$d = \frac{\Delta I_R}{\Delta I_S + \Delta I_R} = \frac{dI_F}{I_F((1-d) + d)}. \quad (4.39)$$

A corrente de falta pode ser obtida a partir de

$$I_F = \Delta I_S + \Delta I_R = (1-d)I_F + dI_F. \quad (4.40)$$

Utilizando-se as componentes de seqüência positiva, para a decomposição de sistemas trifásicos desequilibrados, tem-se

$$[Y]_{n \times n(1)} \cdot [\Delta V]_{n(1)} = [\Delta I]_{n(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta I_{S(1)} \\ \vdots \\ \Delta I_{R(1)} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ (1-d)I_{F(1)} \\ \vdots \\ dI_{F(1)} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} I \\ \vdots \\ S \\ \vdots \\ R \\ \vdots \\ n \end{matrix}. \quad (4.41)$$

onde

$(\cdot)_{(1)}$ : componente de seqüência positiva;

$n$ : número de nós da rede elétrica;

$[Y]_{n \times n(1)}$ : matriz admitância de seqüência positiva;

$[\Delta V]_{n(1)}$ : tensões nodais de seqüência positiva (componente de falta somente);

$[\Delta I]_{n(1)}$ : injeções de corrente nodais de seqüência positiva (componente de falta somente).

A Equação (4.41) necessita das medições de tensão de todos os nós da rede, como mostrado em [78]. Por isto, tal equação se torna inviável, caso algum nó da rede não

possua uma PMU instalada. Baseadas então nessa equação, novas fórmulas, que necessitam somente dos valores de tensão e corrente dos dois terminais da LT com falta, são desenvolvidas.

Assume-se que uma rede em torno da LT com falta é mostrada na Figura 4.5. Considera-se, para exemplificação, uma falta do tipo fase-terra.

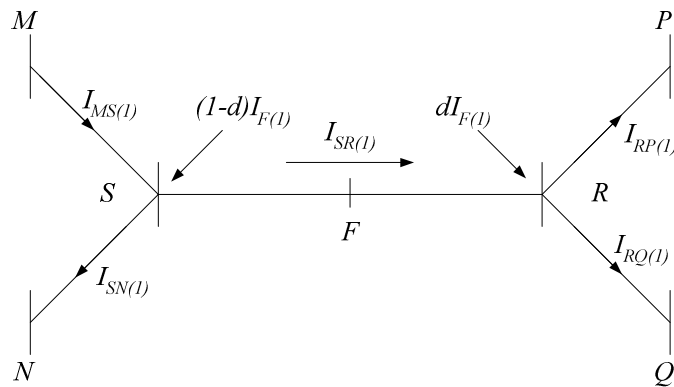


Figura 4.5: Rede de seqüência positiva em torno da LT com falta.

A partir da Figura 4.5 e da Equação (4.41), as seguintes expressões são obtidas

$$I_{MS(1)} - I_{SN(1)} - I_{SR(1)} = (1-d)I_{F(1)} \quad (4.42)$$

$$I_{SR(1)} - I_{RP(1)} - I_{RQ(1)} = dI_{F(1)} \quad (4.43)$$

onde

$I_{MS(1)}$  : corrente de seqüência positiva de  $M$  para  $S$ ;

$I_{SR(1)}$  : corrente de seqüência positiva de  $S$  para  $R$ ;

Similarmente para  $I_{SN(1)}$ ,  $I_{RP(1)}$  e  $I_{RQ(1)}$ .

$I_{SR(1)} = \frac{V_{S(1)} - V_{R(1)}}{Z_{SR(1)}}$ , na realidade, não existe, sendo utilizado somente para fins de

cálculo. Em uma situação real,  $I_{SR(1)}$  é substituída por  $I_{SF(1)}$  e  $I_{RF(1)}$ , como ilustrado pela Figura 4.6.

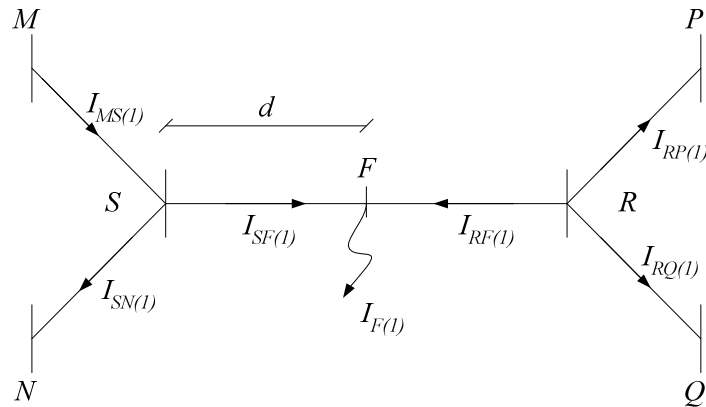


Figura 4.6: Rede de seqüência positiva para uma situação real.

Aplicam-se as seguintes equações

$$I_{MS(l)} - I_{SN(l)} - I_{SF(l)} = 0 \quad (4.44)$$

$$-I_{RF(l)} - I_{RP(l)} - I_{RQ(l)} = 0 \quad (4.45)$$

A Equação (4.46) é obtida das Equações (4.42) e (4.44)

$$I_{MS(l)} - I_{SN(l)} - I_{SR(l)} = I_{SF(l)} - I_{SR(l)} = (1 - d)I_{F(l)} \quad (4.46)$$

De forma similar, chega-se à Equação (4.47), a partir das Equações (4.43) e (4.45)

$$I_{RF(l)} + I_{SR(l)} = dI_{F(l)} \quad (4.47)$$

Considerando-se as Equações (4.46) e (4.47), a fórmula para a localização de faltas, utilizando-se componentes de seqüência positiva, é

$$d = \frac{I_{RF(l)} + I_{SR(l)}}{I_{SF(l)} + I_{RF(l)}} = \frac{\Delta I_{RF(l)} + \frac{\Delta V_{S(l)} - \Delta V_{R(l)}}{z_{SR(l)}}}{\Delta I_{SF(l)} + \Delta I_{RF(l)}} \quad (4.48)$$

Podem ser considerados ainda componentes de seqüência zero e negativa para a obtenção da estimativa do ponto de falta, como mostrado respectivamente pelas Equações (4.49) e (4.50)

$$d = \frac{I_{RF(0)} + \frac{V_{S(0)} - V_{R(0)}}{z_{SR(0)}}}{I_{SF(0)} + I_{RF(0)}} \quad (4.49)$$

$$d = \frac{I_{RF(2)} + \frac{V_{S(2)} - V_{R(2)}}{Z_{SR(2)}}}{I_{SF(2)} + I_{RF(2)}}. \quad (4.50)$$

Ressalta-se que na Equação (4.48), onde se tem componentes de seqüência positiva, é considerada a diferença entre o regime em falta e a configuração pré-falta, nos valores de tensão e corrente utilizados. Já nas Equações (4.49) e (4.50), utilizam-se somente os valores referentes ao regime em falta, já que teoricamente não há componentes de seqüência zero e negativa na configuração pré-falta, considerando-se um sistema trifásico equilibrado.

## 4.2 Método Baseado em Fasores de Dois Terminais Independentes de Sincronização

Na constituição do escopo apresentado, separam-se as metodologias de localização de faltas em LTs em duas diferentes classes. Concernente à classe que se caracteriza pela sua independência com relação à sincronização entre as medidas tomadas nos dois terminais da LT, apresenta-se um método, cujo equacionamento é descrito, em detalhes, na seção seguinte.

### 4.2.1 Método Proposto por Silveira

Esta metodologia de localização de faltas em LTs faz uso dos dados de tensão e corrente de ambos os terminais da linha, sem a necessidade de que tais terminais estejam sincronizados [73]. A motivação para o seu desenvolvimento vem do fato de que a sincronização dos fasores pode ser considerada como um dos itens a serem enfrentados e superados pelas técnicas que utilizam dados de dois terminais.

Tem-se como princípio da metodologia, a igualdade dos módulos das tensões no ponto de falta, calculados a partir dos dados de cada um dos terminais. Tal princípio se deriva do Método Proposto por Johns e Jamali [74]. Nele, obtém-se a equação que estima a



distância da falta a partir da afirmação de que, caso as medidas de tensão e corrente tomadas nos dois terminais da LT sob falta estejam sincronizadas, o fasor de tensão no ponto da falta pode ser obtido através dos fasores de tensão e corrente de ambos os terminais da linha.

Desenvolve-se toda a metodologia para o modelo de linhas curtas, sendo a aplicação das equações finais plenamente viável no modelo de linhas longas.

Considera-se a linha curta monofásica ilustrada pela Figura 4.7.

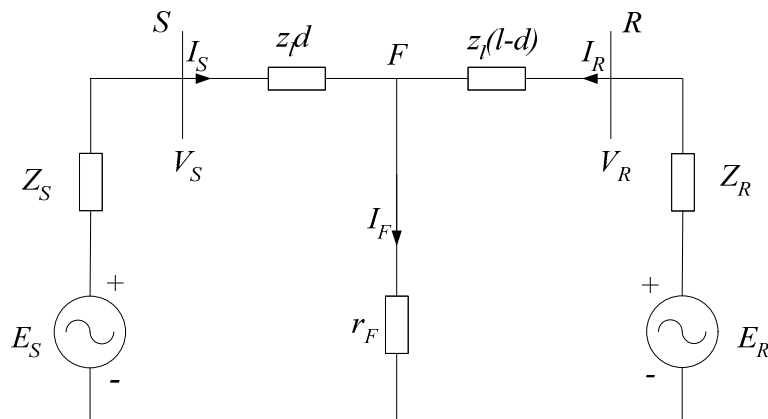


Figura 4.7: Linha monofásica.

Assim, pode-se escrever que

$$V_F = V_S - I_S dz_l \quad (4.51)$$

$$V_F = V_R - I_R (l-d) z_l. \quad (4.52)$$

Tomando-se o módulo de  $V_F$  das Equações (4.51) e (4.52), e igualando-os, tem-se

$$|V_S - I_S dz_l| = |V_R - I_R (l-d) z_l|. \quad (4.53)$$

Considerando-se  $P = z_l I_S$  e  $Q = z_l I_R$ , obtém-se

$$|V_S - Pd| = |V_R - Q(l-d)|. \quad (4.54)$$

Desenvolvendo-se a Equação (4.54), chega-se ao seguinte resultado

$$\begin{aligned} & (|V_S| \cos \theta_S - |P| d \cos \theta_P)^2 + (|V_S| \sin \theta_S - |P| d \sin \theta_P)^2 = \\ & (|V_R| \cos \theta_R - |Q|(l-d) \cos \theta_Q)^2 + (|V_R| \sin \theta_R - |Q|(l-d) \sin \theta_Q)^2 \end{aligned} \quad (4.55)$$

onde

$\theta_P$ : ângulo de  $P$  ( $P = |P| \underline{\theta}_P$ );

$\theta_Q$ : ângulo de  $Q$  ( $Q = |Q| \underline{\theta}_Q$ );

$\theta_S$ : fase de  $V_S$  ( $V_S = |V_S| \underline{\theta}_S$ );

$\theta_R$ : fase de  $V_R$  ( $V_R = |V_R| \underline{\theta}_R$ ).

Desenvolvendo-se cada uma das partes da Equação (4.55), obtêm-se

$$\begin{aligned} (|V_S| \cos \theta_S - |P| d \cos \theta_P)^2 = \\ |V_S|^2 \cos^2 \theta_S - 2|V_S| \cos \theta_S |P| d \cos \theta_P + |P|^2 d^2 \cos^2 \theta_P \end{aligned} \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} (|V_S| \sen \theta_S - |P| d \sen \theta_P)^2 = \\ |V_S|^2 \sen^2 \theta_S - 2|V_S| \sen \theta_S |P| d \sen \theta_P + |P|^2 d^2 \sen^2 \theta_P \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} (|V_R| \cos \theta_R - |Q|(1-d) \cos \theta_Q)^2 = \\ |V_R|^2 \cos^2 \theta_R - 2|V_R| \cos \theta_R |Q|(1-d) \cos \theta_Q + |Q|^2 (1-d)^2 \cos^2 \theta_Q \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$\begin{aligned} (|V_R| \sen \theta_R - |Q|(1-d) \sen \theta_Q)^2 = \\ |V_R|^2 \sen^2 \theta_R - 2|V_R| \sen \theta_R |Q|(1-d) \sen \theta_Q + |Q|^2 (1-d)^2 \sen^2 \theta_Q. \end{aligned} \quad (4.59)$$

Somando-se as Equações (4.56) e (4.57), obtêm-se

$$\begin{aligned} |V_S|^2 (\cos^2 \theta_S + \sen^2 \theta_S) - 2|V_S| |P| d (\cos \theta_S \cos \theta_P + \sen \theta_S \sen \theta_P) + \\ + |P|^2 d^2 (\sen^2 \theta_P + \cos^2 \theta_P) \end{aligned} \quad (4.60)$$

$$|V_S|^2 - 2|V_S| |P| d \cos(\theta_S - \theta_P) + |P|^2 d^2. \quad (4.61)$$

Somando-se as Equações (4.58) e (4.59), alcança-se o seguinte resultado

$$\begin{aligned} |V_R|^2 (\cos^2 \theta_R + \sen^2 \theta_R) - 2|V_R| |Q|(1-d) (\cos \theta_R \cos \theta_Q + \sen \theta_R \sen \theta_Q) + \\ + |Q|^2 (1-d)^2 (\sen^2 \theta_Q + \cos^2 \theta_Q) \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$|V_R|^2 - 2|V_R| |Q|(1-d) \cos(\theta_R - \theta_Q) + |Q|^2 (1-d)^2. \quad (4.63)$$

Igualando-se as Equações (4.61) e (4.63), e considerando-se as identidades trigonométricas, chega-se a

$$\begin{aligned} |V_S|^2 - 2|V_S||P|d\cos(\theta_S - \theta_P) + |P|^2 d = \\ |V_R|^2 - 2|V_R||Q|(l-d)\cos(\theta_R - \theta_Q) + |Q|^2 (l-d)^2. \end{aligned} \quad (4.64)$$

Desenvolvendo-se a Equação (4.64), tem-se

$$\begin{aligned} |P|^2 d^2 - |Q|^2 d^2 - 2|V_S||P|\cos(\theta_S - \theta_P)d - 2|V_R||Q|\cos(\theta_R - \theta_Q)d + \\ + 2l|Q|^2 d + |V_S|^2 - |V_R|^2 + 2|V_R||Q|l\cos(\theta_R - \theta_Q) + |Q|^2 l^2 = 0. \end{aligned} \quad (4.65)$$

Chegando-se a

$$\begin{aligned} d^2 (|P|^2 - |Q|^2) - 2d \left[ |V_S||P|\cos(\theta_S - \theta_P) + |V_R||Q|\cos(\theta_R - \theta_Q) - l|Q|^2 \right] + \\ + |V_S|^2 - |V_R|^2 + 2|V_R||Q|l\cos(\theta_R - \theta_Q) - |Q|^2 l^2 = 0. \end{aligned} \quad (4.66)$$

A Equação (4.66) se constitui em uma equação de segundo grau

$$Ad^2 + Bd + C = 0$$

onde

$$\begin{aligned} A &= |P|^2 - |Q|^2 \\ B &= -2 \left[ |V_S||P|\cos(\theta_S - \theta_P) + |V_R||Q|\cos(\theta_R - \theta_Q) - l|Q|^2 \right] \\ C &= |V_S|^2 - |V_R|^2 + 2|V_R||Q|l\cos(\theta_R - \theta_Q) - |Q|^2 l^2. \end{aligned}$$

Uma das raízes da Equação (4.66) é positiva e se encontra dentro dos limites físicos da linha, fornecendo, portanto, o local da falta.

Pode-se constatar que a metodologia faz uso de um modelo de linha curta para o desenvolvimento da expressão que fornece o ponto de falta. Por tratar-se de uma equação de segundo grau, tal expressão tem aplicabilidade em outros modelos de representação de LTs.

### 4.3 Comentários Finais

Neste capítulo, foram explicitados, em detalhes, os equacionamentos de três diferentes metodologias de localização de faltas, baseadas em fasores da frequência fundamental dos dois terminais de uma LT. Nas duas primeiras, há a necessidade de que os fasores, em relação aos terminais da linha, estejam sincronizados. Na última metodologia,

tal sincronização não se faz necessária.

Cabe salientar que, nos métodos apresentados, as informações necessárias para a obtenção da estimativa do ponto de falta se referem ao comprimento total da linha, aos fasores trifásicos de tensão e corrente associados aos dois terminais, aos parâmetros característicos da LT e às impedâncias equivalentes das fontes terminais, associadas à topologia do sistema elétrico de potência.

O comprimento total de uma linha é um dado de fácil obtenção e conhecido dos operadores de um sistema. Os fasores trifásicos de tensão e corrente são fornecidos pelas PMUs, a partir do processamento das grandezas elétricas. As impedâncias equivalentes podem ser obtidas a partir de uma abordagem que utiliza os valores de tensão e corrente registrados na extremidade de uma LT, como mostrado no Capítulo 3. No que concerne aos parâmetros característicos da linha, são apresentadas, no próximo capítulo, abordagens para sua estimação, a fim de que seus valores sejam obtidos de maneira *on-line*.

# Capítulo 5

## Técnicas Utilizadas para Estimação de Parâmetros de LTs

Uma LT de energia elétrica possui quatro parâmetros: resistência, indutância, capacitância e condutância, que influenciam seu comportamento, modificadas as condições físicas, mecânicas e elétricas de um sistema elétrico de potência [69].

A condutância entre condutores, ou entre condutor e terra, considera a corrente de fuga nos isoladores das linhas aéreas de transmissão, ou na isolação dos cabos subterrâneos. Tal condutância, entre condutores de uma linha aérea, no entanto, pode ser considerada nula, pois a fuga nos seus isoladores é desprezível.

Algumas das propriedades dos circuitos podem ser explicadas a partir dos campos elétrico e magnético presentes em um circuito percorrido por uma corrente. Uma variação de corrente nos condutores provoca, por consequência, uma modificação no número de linhas de fluxo magnético concatenadas com o circuito. Qualquer variação do fluxo concatenado com o circuito, por sua vez, induz-lhe uma tensão, cujo valor é proporcional à taxa de variação do fluxo. Pode-se afirmar que indutância é o parâmetro do circuito que relaciona a tensão induzida por variação de fluxo, com a taxa de variação da corrente.

Com relação ao parâmetro capacitância, que se estabelece entre os condutores, ele é definido pela carga nos condutores, por unidade de diferença de potencial entre eles.

A resistência, intrínseca à característica do condutor em oferecer oposição ao fluxo elétrico, e a indutância, uniformemente distribuídas ao longo da linha, formam a impedância em série. A condutância e a capacitância existentes entre condutores de uma linha monofásica, ou entre o condutor e o neutro de uma linha trifásica, formam a admitância em derivação. Apesar de resistência, indutância e capacitância serem

distribuídas ao longo da linha, elas podem ser representadas como parâmetros concentrados, em um circuito equivalente da LT.

Para a implementação das metodologias apresentadas no Capítulo 4, que objetivam a localização de faltas em LTs, faz-se necessário o conhecimento dos valores referentes aos parâmetros de tais linhas. São utilizadas então três técnicas para a estimação destes parâmetros. Nestas técnicas, utilizam-se apenas os valores de tensão e corrente das duas extremidades de uma LT. Na seqüência, são apresentadas, em detalhes, as três técnicas utilizadas.

## 5.1 Parâmetros Obtidos por Representação em Quadripolos

Um quadripolo, também denominado rede de duas portas, ou ainda, dispositivo de duas portas, constitui-se em um circuito elétrico ou dispositivo com dois pares de terminais [79]. Dois terminais formam uma porta caso satisfaçam a exigência de que a corrente que entra em uma porta, verifica-se a mesma que dela sai [80]. Em um dispositivo de duas portas, torna-se possível a isolação de um circuito inteiro, ou de parte dele, substituindo-se por seus parâmetros característicos. Desta forma, a parte isolada do circuito se torna uma “caixa preta” com um conjunto de propriedades distintas, permitindo-se abstrair de sua imagem física específica, e assim, simplificando-se a análise. Qualquer circuito linear de quatro terminais pode ser transformado em um dispositivo de duas portas, desde que não contenha uma fonte independente.

Uma LT pode ser representada por um quadripolo, com as tensões e correntes indicadas nos seus terminais, conforme exibido pela Figura 5.1.

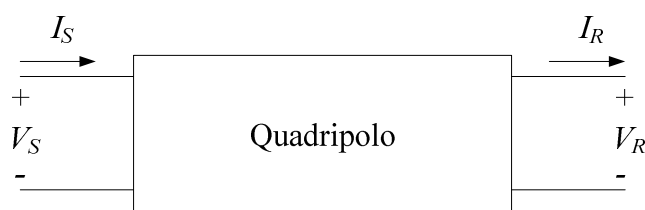


Figura 5.1: Linha representada por um quadripolo.

As relações entre as variáveis de tensão e corrente nos terminais do quadripolo são estabelecidas por

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (5.1)$$

$$I_S = CV_R + DI_R. \quad (5.2)$$

Em forma matricial tem-se

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são parâmetros que dependem das constantes das LTs.

O modelo de linha longa faz uso de equações hiperbólicas e está estabelecido sobre três hipóteses básicas. São elas:

- Considera-se o efeito dos parâmetros distribuídos ao longo da LT;
- Para maior precisão do modelo, a LT deve apresentar extensão elevada;
- São obtidas expressões para determinação dos valores de tensão em qualquer ponto da linha.

Abaixo, na Figura 5.2, tem-se representada uma linha monofásica com parâmetros distribuídos de comprimento  $l$ .

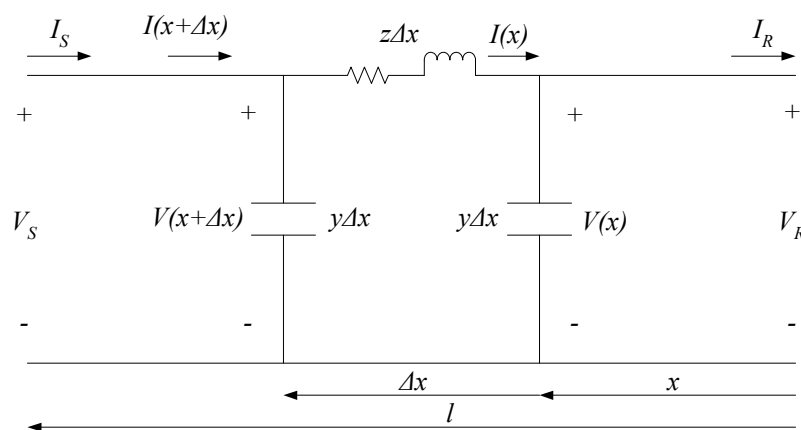


Figura 5.2: Modelo de linha monofásica com parâmetros distribuídos.

Os fasores de tensão e corrente no Terminal  $S$  da LT podem ser obtidos a partir dos fasores referentes ao Terminal  $R$ , utilizando-se as seguintes equações

$$V_S = V_R \cosh(\gamma l) + Z_C \sinh(\gamma l) I_R \quad (5.4)$$

$$I_S = \frac{I}{Z_C} \sinh(\gamma l) V_R + \cosh(\gamma l) I_R. \quad (5.5)$$

Relacionando-se a forma matricial apresentada na Equação (5.3) com as Equações (5.4) e (5.5), obtêm-se

$$A = D = \cosh(\gamma l) \quad (5.6)$$

$$B = Z_C \sinh(\gamma l) \quad (5.7)$$

$$C = \frac{I}{Z_C} \sinh(\gamma l). \quad (5.8)$$

Para a obtenção dos parâmetros do quadripolo, identificados na Equação (5.3), faz-se uso de uma identidade trigonométrica, representada por

$$\cosh^2(\gamma l) - \sinh^2(\gamma l) = 1. \quad (5.9)$$

Em relação aos parâmetros do quadripolo, a identidade trigonométrica equivale a

$$A^2 - BC = 1. \quad (5.10)$$

Desta forma, empregando-se as Equações (5.3) e (5.10), obtêm-se um sistema composto por três equações linearmente independentes

$$AV_R + BI_R = V_S \quad (5.11)$$

$$CV_R + AI_R = I_S \quad (5.12)$$

$$A^2 - BC = 1. \quad (5.13)$$

A partir da Equação (5.13), chega-se a

$$B = \frac{A^2 - 1}{C}. \quad (5.14)$$

Substituindo-se a Equação (5.14) na Equação (5.11), tem-se

$$C = \frac{I_R (A^2 - 1)}{V_S - AV_R}. \quad (5.15)$$

Por fim, fazendo-se uso das Equações (5.12) e (5.15), consegue-se obter o parâmetro  $A$ , apenas em função dos fasores de tensão e corrente. Assim

$$A = \frac{I_S V_S + I_R V_R}{I_S V_R + I_R V_S}. \quad (5.16)$$

Determinados os parâmetros do quadripolo, parte-se para a obtenção dos valores da constante de propagação da LT ( $\gamma$ ) e da impedância característica da LT ( $Z_C$ ). De posse de



tais valores, chega-se finalmente à determinação da impedância e da admitância da linha, em função de resistência, indutância e capacitância.

Utilizando-se a Equação (5.6), tem-se

$$\gamma = \frac{\text{acosh}(A)}{l}. \tag{5.17}$$

Para obter-se a impedância característica, faz-se uso das Equações (5.7) e (5.8). A partir da equivalência de tais equações, tem-se

$$Z_c = \frac{B}{\text{senh}(\gamma l)} \Leftrightarrow Z_c = \frac{\text{senh}(\gamma l)}{C}. \tag{5.18}$$

A partir de (5.18), pode-se chegar a

$$Z_c^2 = \frac{B}{\text{senh}(\gamma l)} \frac{\text{senh}(\gamma l)}{C} \tag{5.19}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}}. \tag{5.20}$$

O modelo de linha  $\pi$ -nominal pode ser representado considerando-se as equações hiperbólicas associadas ao modelo de linha longa. Assim, obtém-se o modelo  $\pi$ -equivalente, ilustrado pela Figura 5.3.

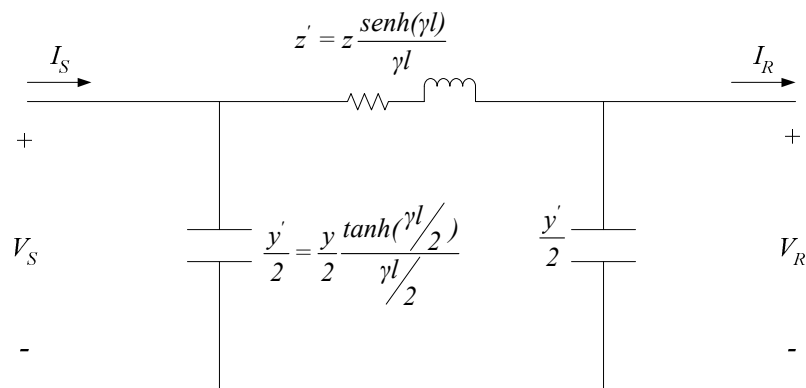


Figura 5.3: Modelo  $\pi$ -equivalente de linha.

Substituindo-se os parâmetros  $z$  e  $y$  das equações acerca do modelo  $\pi$ -nominal por  $z'$  e  $y'$ , têm-se

$$V_S = \left( I + \frac{z' y'}{2} \right) V_R + z' I_R \quad (5.21)$$

$$I_S = y' \left( I + \frac{z' y'}{4} \right) V_R + \left( I + \frac{z' y'}{2} \right) I_R. \quad (5.22)$$

Comparando-se as Equações (5.4) e (5.5) com as Equações (5.21) e (5.22), pode-se determinar  $z'$  e  $y'$ . Para isto, faz-se uso da seguinte identidade trigonométrica

$$\tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh(\gamma l)}. \quad (5.23)$$

De posse de tais equações, chega-se então aos seguintes valores dos parâmetros corrigidos

$$z' = Z_C \sinh(\gamma l) = z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (5.24)$$

$$\frac{y'}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{y}{2} \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2}. \quad (5.25)$$

É possível escrever  $z'$  e  $y'$  em função dos parâmetros do quadripolo. Expandindo-se a Equação (5.3) e comparando-a a Equação (5.21), chega-se a

$$z' = B \quad (5.26)$$

$$A = I + \frac{z' y'}{2}. \quad (5.27)$$

Finalmente, substituindo-se então a Equação (5.26) na Equação (5.27), e isolando-se  $y'$ , tem-se

$$y' = \frac{2A - 2}{B}. \quad (5.28)$$

## 5.2 Parâmetros Obtidos de Circuitos Equivalentes $\pi$ de Seqüência

Nesta técnica, a impedância série da LT é estimada a partir de um modelo que representa a linha por um circuito equivalente  $\pi$  de seqüência [81]. Este modelo está

representado na Figura 5.4.

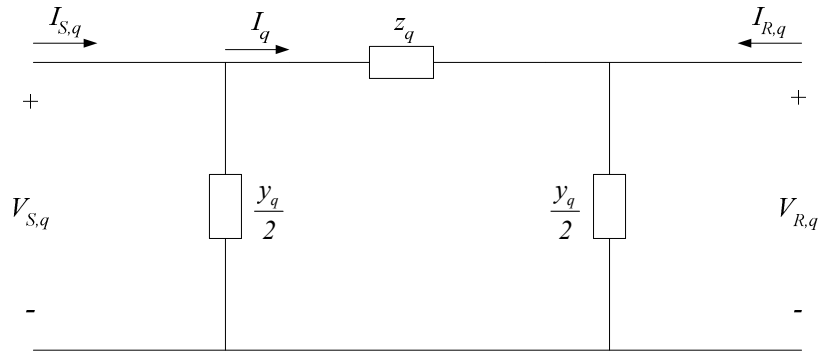


Figura 5.4: Modelo  $\pi$  para uma LT.

Tem-se denotado  $z_q$  como a impedância série de seqüência  $q$  da linha. A admitância em derivação de seqüência  $q$  da linha está representada por  $y_q$ . A corrente de linha de seqüência  $q$  corresponde a  $I_q$ .  $V_{i,q}$  denota a tensão complexa de seqüência  $q$  do terminal  $i$ .  $I_{i,q}$  representa, no entanto, a corrente complexa de seqüência  $q$  que sai do terminal  $i$  em direção à linha,  $\forall q \in \{0, 1, 2\}$ ,  $\forall i \in \{S, R\}$ .

Para a estimção dos parâmetros deste circuito, faz-se necessária a obtenção inicialmente das grandezas elétricas de seqüência  $V_{i,q}$  e  $I_{i,q}$ ,  $\forall i, q$ . Tais grandezas podem ser calculadas a partir de medições das grandezas de fase nos terminais. Assim, tem-se

$$\begin{bmatrix} V_{i,0} \\ V_{i,1} \\ V_{i,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{i,a} \\ V_{i,b} \\ V_{i,c} \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

$$\begin{bmatrix} I_{i,0} \\ I_{i,1} \\ I_{i,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{i,a} \\ I_{i,b} \\ I_{i,c} \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

onde  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

De posse dos valores destas grandezas, pode-se verificar que o somatório das correntes medidas nos Terminais  $S$  e  $R$  é obtido a partir da corrente requerida pelas admitâncias em derivação da linha. Desta forma, tem-se

$$I_{S,q} + I_{R,q} = \frac{I}{2} y_q (V_{S,q} + V_{R,q}). \quad (5.31)$$

Isolando-se  $y_q$  na Equação (5.31), obtém-se

$$y_q = 2 \left( \frac{I_{S,q} + I_{R,q}}{V_{S,q} + V_{R,q}} \right). \quad (5.32)$$

Por consequência, a corrente de linha  $I_q$  pode então ser diretamente calculada a partir de

$$I_q = -I_{R,q} + \frac{I}{2} y_q V_{R,q}. \quad (5.33)$$

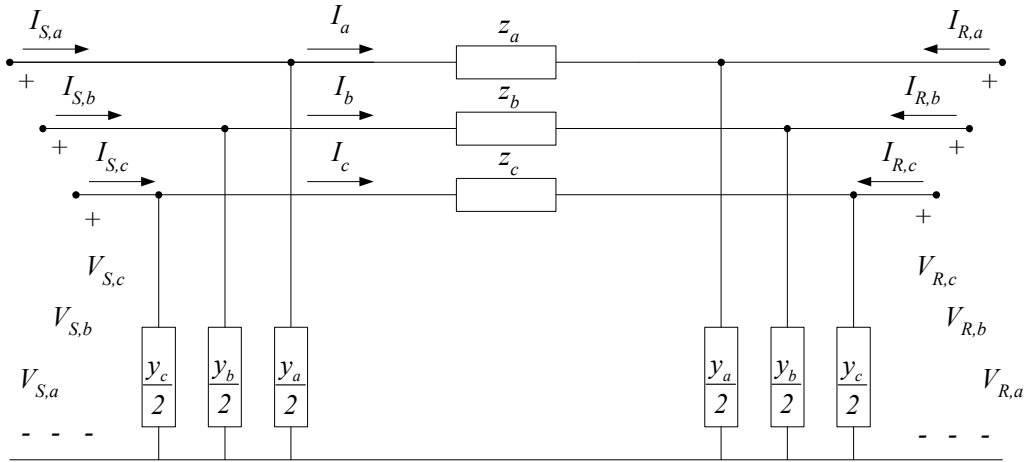
Por fim, obtém-se o valor da impedância série de linha.

Tem-se então

$$z_q = \frac{V_{S,q} - V_{R,q}}{I_q}. \quad (5.34)$$

## 5.3 Parâmetros Obtidos de Circuito Trifásico Equivalente $\pi$

Nesta abordagem, assumem-se desprezíveis os efeitos de retorno e do cabo de cobertura [82]. Desta forma, a linha pode ser representada por um circuito trifásico equivalente  $\pi$ , conforme ilustrado pela Figura 5.5. Em tal configuração,  $z_q$  representa a impedância série da fase  $p$ ,  $I_p$  se refere à corrente de linha da fase  $p$  e  $y_p$  denota a admitância em derivação da fase  $p$ ,  $\forall p \in \{a, b, c\}$ .


 Figura 5.5: Modelo  $\pi$  para uma LT trifásica.

Supondo-se conhecer os valores dos fasores de corrente e tensão nos terminais da linha, pode-se observar que o somatório das correntes medidas nos Terminais  $S$  e  $R$  é obtido a partir do valor de corrente requerida pelas admitâncias em derivação.

Assumindo-se uma linha transposta, tem-se que

$$\begin{bmatrix} I_{S,a} \\ I_{S,b} \\ I_{S,c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{R,a} \\ I_{R,b} \\ I_{R,c} \end{bmatrix} = \frac{I}{2} \begin{bmatrix} y_p & y_m & y_m \\ y_m & y_p & y_m \\ y_m & y_m & y_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S,a} \\ V_{S,b} \\ V_{S,c} \end{bmatrix} + \frac{I}{2} \begin{bmatrix} y_p & y_m & y_m \\ y_m & y_p & y_m \\ y_m & y_m & y_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R,a} \\ V_{R,b} \\ V_{R,c} \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

onde  $y_p$  e  $y_m$  representam respectivamente as admitâncias próprias e mútuas em derivação.

A Equação (5.35) define um sistema sobredeterminado, com três equações algébricas complexas e duas incógnitas. Utilizando-se as duas primeiras equações do sistema, tem-se

$$I_{S,a} + I_{R,a} = \frac{I}{2} y_p \Delta_a + \frac{I}{2} y_m \sigma_a \quad (5.36)$$

$$I_{S,b} + I_{R,b} = \frac{I}{2} y_p \Delta_b + \frac{I}{2} y_m \sigma_b \quad (5.37)$$

onde

$$\Delta_a = V_{S,a} + V_{R,a} \quad (5.38)$$

$$\Delta_b = V_{S,b} + V_{R,b} \quad (5.39)$$

$$\sigma_a = V_{S,b} + V_{S,c} + V_{R,b} + V_{R,c} \quad (5.40)$$

$$\sigma_b = V_{S,a} + V_{S,c} + V_{R,a} + V_{R,c}. \quad (5.41)$$

Multiplicando-se a Equação (5.37) por  $\frac{\Delta_a}{\Delta_b}$ , obtém-se o seguinte sistema equivalente

$$I_{S,a} + I_{R,a} = \frac{I}{2} y_p \Delta_a + \frac{I}{2} y_m \sigma_a \quad (5.42)$$

$$(I_{S,b} + I_{R,b}) \frac{\Delta_a}{\Delta_b} = \frac{I}{2} y_p \Delta_a + \frac{I}{2} y_m \sigma_b \frac{\Delta_a}{\Delta_b}. \quad (5.43)$$

Subtraindo-se a Equação (5.43) da Equação (5.42) e isolando-se  $y_m$  da expressão resultante, tem-se que

$$y_m = \frac{2(I_{S,a} + I_{R,a}) - 2(I_{S,b} + I_{R,b}) \frac{\Delta_a}{\Delta_b}}{\sigma_a - \sigma_b \frac{\Delta_a}{\Delta_b}}. \quad (5.44)$$

De forma análoga, multiplicando-se a Equação (5.37) por  $\frac{\sigma_a}{\sigma_b}$ , chega-se ao seguinte sistema equivalente

$$I_{S,a} + I_{R,a} = \frac{I}{2} y_p \Delta_a + \frac{I}{2} y_m \sigma_a \quad (5.45)$$

$$(I_{S,b} + I_{R,b}) \frac{\sigma_a}{\sigma_b} = \frac{I}{2} y_p \Delta_b \frac{\sigma_a}{\sigma_b} + \frac{I}{2} y_m \sigma_a. \quad (5.46)$$

Subtraindo-se a Equação (5.46) da Equação (5.45) e isolando-se  $y_p$  da expressão resultante, chega-se a

$$y_p = \frac{2(I_{S,a} + I_{R,a}) - 2(I_{S,b} + I_{R,b}) \frac{\sigma_a}{\sigma_b}}{\Delta_a - \Delta_b \frac{\sigma_a}{\sigma_b}}. \quad (5.47)$$

Por conseqüência, utilizando-se as Equações (5.44) e (5.47), faz-se possível o cálculo dos valores das admitâncias em derivação  $y_m$  e  $y_p$  respectivamente, a partir dos fasores de tensão e corrente.

Assim, pode-se também calcular os fasores de corrente de linha  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ . Portanto

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} I_{R,a} \\ I_{R,b} \\ I_{R,c} \end{bmatrix} + \frac{I}{2} \begin{bmatrix} y_p & y_m & y_m \\ y_m & y_p & y_m \\ y_m & y_m & y_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R,a} \\ V_{R,b} \\ V_{R,c} \end{bmatrix}. \quad (5.48)$$

Para o cálculo dos parâmetros série da linha, no entanto, pode-se observar que

$$\begin{bmatrix} V_{S,a} \\ V_{S,b} \\ V_{S,c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{R,a} \\ V_{R,b} \\ V_{R,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_p & z_m & z_m \\ z_m & z_p & z_m \\ z_m & z_m & z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

onde  $z_p$  e  $z_m$  representam as impedâncias série próprias e mútuas da linha.

A Equação (5.49) define novamente um sistema sobredeterminado com três equações algébricas complexas e duas incógnitas. Fazendo-se uso das duas primeiras equações do sistema, tem-se que

$$(V_{S,a} - V_{R,a}) = z_p I_a + z_m (I_b + I_c) \quad (5.50)$$

$$(V_{S,b} - V_{R,b}) = z_p I_b + z_m (I_a + I_c). \quad (5.51)$$

Multiplicando-se a Equação (5.51) por  $\frac{I_a}{I_b}$ , obtém-se o sistema

$$V_{S,a} - V_{R,a} = z_p I_a + z_m (I_b + I_c) \quad (5.52)$$

$$(V_{S,b} - V_{R,b}) \frac{I_a}{I_b} = z_p I_a + z_m (I_a + I_c) \frac{I_a}{I_b}. \quad (5.53)$$

Subtraindo-se a Equação (5.53) da Equação (5.52) e isolando-se  $z_m$  da expressão resultante, chega-se a

$$z_m = \frac{V_{S,a} - V_{R,a} - (V_{S,b} - V_{R,b}) \frac{I_a}{I_b}}{I_b + I_c - (I_a + I_c) \frac{I_a}{I_b}}. \quad (5.54)$$

Analogamente, multiplicando-se a Equação (5.51) por  $\frac{(I_b + I_c)}{(I_a + I_c)}$ , obtém-se o seguinte sistema

$$(V_{S,a} - V_{R,a}) = z_p I_a + z_m (I_b + I_c) \quad (5.55)$$

$$(V_{S,b} - V_{R,b}) \frac{I_b + I_c}{I_a + I_c} = z_p I_b \frac{I_b + I_c}{I_a + I_c} + z_m (I_a + I_c). \quad (5.56)$$

Subtraindo-se a Equação (5.56) da Equação (5.55) e isolando-se  $z_p$  da expressão resultante, tem-se que

$$z_p = \frac{V_{s,a} - V_{R,a} - (V_{S,b} - V_{R,b}) \frac{I_b + I_c}{I_a + I_c}}{I_a - I_b \frac{I_b + I_c}{I_a + I_c}}. \quad (5.57)$$

Desta forma, fazendo-se uso das Equações (5.54) e (5.57), são obtidos os parâmetros série da linha, partindo-se dos valores referentes aos fasores de tensão e corrente.

Caso se deseje obter os parâmetros de seqüência da linha, estes podem ser obtidos a partir do cálculo direto das seguintes expressões

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_p & y_m & y_m \\ y_m & y_p & y_m \\ y_m & y_m & y_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.58)$$

$$\begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_p & z_m & z_m \\ z_m & z_p & z_m \\ z_m & z_m & z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5.59)$$

## 5.4 Comentários Finais

Ao longo deste capítulo, foram apresentadas três técnicas para a estimção dos parâmetros característicos de uma LT. O conhecimento destes valores, referentes às impedâncias em série e às indutâncias em derivação, faz-se necessário para a implementação das metodologias de localização de faltas, apresentadas no Capítulo 4.

Cabe salientar que nas técnicas abordadas neste capítulo, utilizaram-se como informações requeridas somente valores de tensão e corrente trifásicos, referentes aos terminais da linha. Desta forma, a estimção dos parâmetros da linha é realizada de maneira *on-line*, não sendo necessária a adoção de dados de projeto ou de medições anteriores, resultando em valores associados ao regime normal de operação imediatamente anterior à ocorrência de uma falta.



# Capítulo 6

## Experimentos Computacionais e Resultados Obtidos

Neste capítulo, são descritas as implementações das metodologias de localização de faltas em LTs, expostas no Capítulo 4.

Para a obtenção das grandezas elétricas necessárias às rotinas de simulação, fez-se uso do *software Alternative Transients Program (ATP)*. Para o desenvolvimento dos algoritmos, utilizou-se o *software Matlab*.

Inicialmente, implementaram-se diferentes algoritmos referentes às metodologias de localização de faltas. Para cada metodologia, avaliaram-se os desempenhos das diferentes técnicas de estimação dos parâmetros das linhas, expostas no Capítulo 5.

Definidos os arranjos, cujas estimativas dos pontos de falta foram as mais precisas, passou-se a investigar a sensibilidade dos algoritmos, frente: a variações no processo de obtenção dos fasores; à estimativa dos parâmetros da linha; e à perda de sincronismo angular entre os terminais da LT.

Por fim, avaliou-se o desempenho das implementações em relação a um caso real de falta ocorrido no SIN.

A Figura 6.1 ilustra o fluxograma acerca das rotinas utilizadas para as simulações.

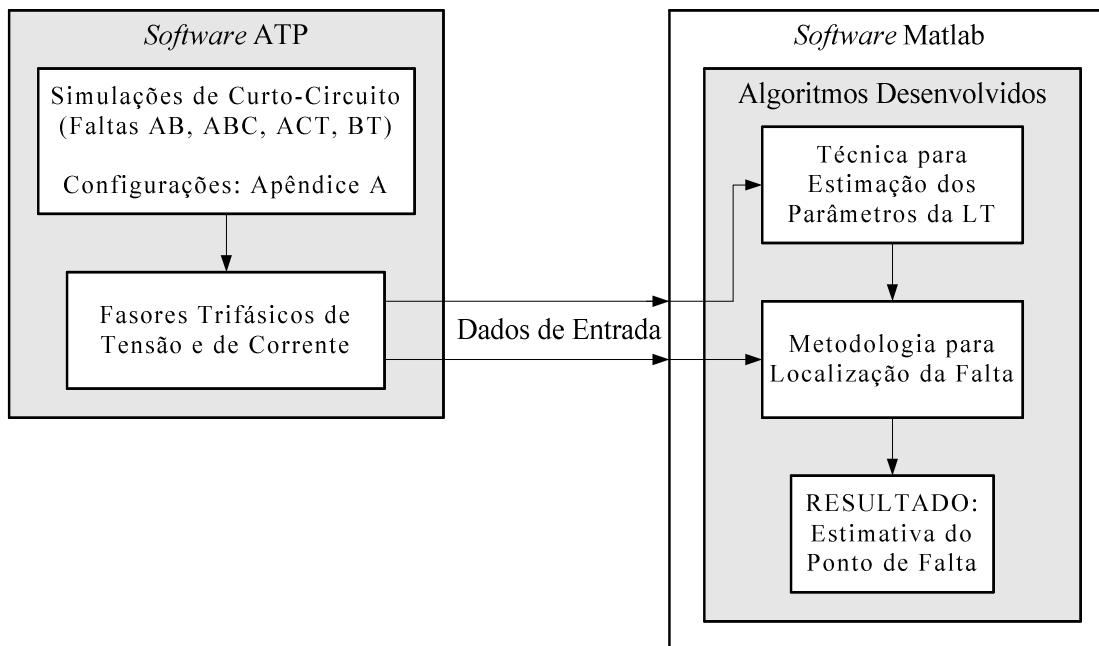


Figura 6.1: Fluxograma das rotinas de simulação implementadas.

Como dados de entrada para a execução dos algoritmos desenvolvidos, têm-se somente os valores dos fasores trifásicos de tensão e de corrente, de ambos os terminais da linha, considerados sincronizados.

Nas simulações, cujos resultados são expostos na seqüência, utilizaram-se os valores obtidos das simulações no *software* ATP referentes às configurações expostas no Apêndice A.

Acerca das características da LT utilizada, fez-se uso de um modelo a parâmetros distribuídos, considerando-se uma transposição perfeita. Os valores dos parâmetros utilizados são:

- Extensão:
  - 200 km.
- Nível de tensão:
  - 525 kV.
- Resistência, por unidade de comprimento:
  - 0,219  $\Omega$ /km.
- Indutância, por unidade de comprimento:
  - 1,37 mH/km.

- Capacitância, por unidade de comprimento:

➤  $0,00856 \mu F/km$ .

Com relação aos valores referentes aos equivalentes Thevenin, para os dois terminais da LT, têm-se:

- Resistência:

➤  $0,3 \Omega$ .

- Indutância:

➤  $2 mH$ .

- Capacitância:

➤  $0 \mu F/km$ .

O desempenho dos algoritmos desenvolvidos, exposto na seção seguinte, é medido a partir do erro percentual absoluto aferido para cada simulação. A Equação (6.1) explicita a obtenção do referido valor

$$Erro\ Relativo = \frac{|Ponto\ Estimado - Ponto\ Real|}{Comprimento\ da\ Linha} \cdot 100 \quad (6.1)$$

onde a distância do ponto de falta considerada se refere ao Terminal S.

Cabe salientar que os valores referentes à estimação do ponto de falta podem ser inferiores ou superiores ao valor real do ponto. Isto ocasiona erros percentuais que podem ser positivos ou negativos. No entanto, nas análises realizadas neste trabalho, considera-se o valor absoluto para melhor compararem-se os resultados obtidos a partir de diferentes cenários e metodologias.

## 6.1 Análise Individual das Metodologias de Localização de Falhas

Nesta seção, tem-se estruturada a descrição das rotinas utilizadas para as simulações dos métodos de localização de faltas implementados, exibindo-se os resultados obtidos. A seguir, cada uma das implementações é apresentada e discutida.

### 6.1.1 Método Proposto por Brahma

Neste método, cuja descrição detalhada está contemplada na Seção 4.1.1, utilizam-se somente os valores dos fasores trifásicos de tensão de ambos os terminais da LT, que devem estar sincronizados. Eliminam-se, com isto, os erros associados ao transformador de corrente. No equacionamento deste método, adota-se uma abordagem trifásica no que se refere às grandezas utilizadas. Desta forma, não são utilizadas transformações matemáticas para a decomposição das grandezas de um sistema trifásico desequilibrado em grandezas monofásicas independentes.

Como o método originalmente proposto considera conhecidos os parâmetros trifásicos da linha e dos equivalentes Thevenin associados ao sistema elétrico, não é adotada nenhuma das técnicas abordadas no Capítulo 5. Em relação aos resultados do ponto de falta, são estimados três pontos, visto que o equacionamento da metodologia se dá a partir de uma abordagem trifásica. Na Figura 6.2, tem-se exibido o fluxograma implementado deste método.

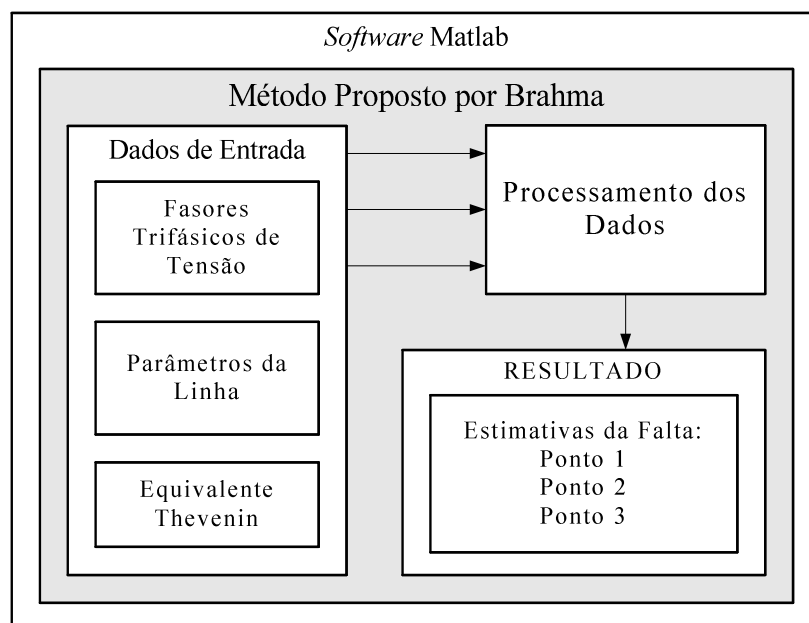


Figura 6.2: Fluxograma do Método Proposto por Brahma implementado.

Na seqüência, encontram-se ilustrados os resultados das simulações para quatro

diferentes tipos de falta: fase-fase (AB), trifásica (ABC), fase-fase-terra (ACT) e fase-terra (BT).

Para cada tipo de falta, foram simulados quatro diferentes cenários, adotando-se resistências de falta de  $1,5 \Omega$  e de  $70 \Omega$  e consideraram-se, em relação ao Terminal S, dois diferentes locais para o ponto real da falta:  $30 \text{ km}$  e  $110 \text{ km}$ .

Nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 estão ilustrados os resultados da estimação do ponto de falta obtidos.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
1,5	30	0,5993	0,5998	0,5995	0,5829
1,5	110	0,1108	0,1100	0,1107	0,1649
70	30	0,5969	0,5969	0,5951	0,6066
70	110	0,1124	0,1133	0,1181	0,0695

Tabela 6.1: Estimativas de falta – Método Proposto por Brahma – Ponto 1.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
1,5	30	0,6004	0,5999	0,5714	0,5992
1,5	110	0,1091	0,1100	0,2125	0,1114
70	30	0,5930	0,5967	0,4325	0,5886
70	110	0,1223	0,1146	0,6237	0,1268

Tabela 6.2: Estimativas de falta – Método Proposto por Brahma – Ponto 2.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
1,5	30	0,6180	0,5996	0,5994	0,5969
1,5	110	0,0852	0,1103	0,1106	0,1444
70	30	0,5398	0,5918	0,5968	0,4767
70	110	0,2624	0,1273	0,1128	0,3811

Tabela 6.3: Estimativas de falta – Método Proposto por Brahma – Ponto 3.

## 6.1.2 Método de Brahma Alterado

Esta implementação se deriva do método anteriormente apresentado. Passam a ser utilizados os fasores trifásicos de corrente e de tensão, obtidos respectivamente a partir dos transformadores de corrente e de potencial, sendo necessário que os terminais da linha estejam sincronizados.

Em contrapartida, não mais é necessário o conhecimento prévio dos parâmetros da LT, uma vez que estes passam a ser estimados. Tal estimação é obtida a partir da representação por Circuito Trifásico Equivalente  $\pi$  (Seção 5.3). Continua sendo adotada uma abordagem trifásica em relação às grandezas utilizadas. Os equivalentes Thevenin associados ao sistema elétrico necessitam também de estimação. Para tal, utiliza-se uma abordagem que considera os componentes simétricos e o teorema da superposição, como mostrado na Seção 3.4.3. A Figura 6.3 traz ilustrado o fluxograma da implementação.

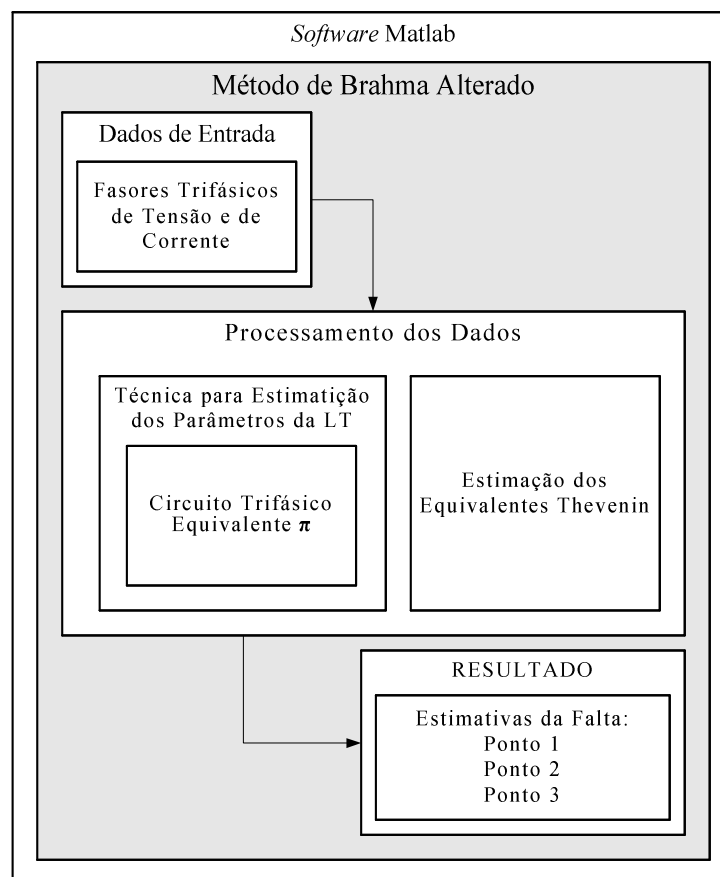


Figura 6.3: Fluxograma do Método de Brahma Alterado implementado.

Foram realizadas simulações considerando-se os mesmos cenários da seção anterior. As Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 exibem os resultados obtidos.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
1,5	30	0,1634	0,7368	0,9631	0,6007
1,5	110	0,0391	0,1297	0,1804	0,1149
70	30	0,1453	0,5850	0,8510	0,5839
70	110	0,0777	0,1242	0,1386	0,1420

Tabela 6.4: Estimativas de falta – Método de Brahma Alterado – Ponto 1.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
1,5	30	0,5068	0,5551	0,6032	0,4487
1,5	110	0,0973	0,1037	0,1070	0,0871
70	30	0,5029	0,5027	0,5953	0,4521
70	110	0,1023	0,1007	0,1231	0,0734

Tabela 6.5: Estimativas de falta – Método de Brahma Alterado – Ponto 2.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
1,5	30	0,6003	0,5158	0,4670	0,5977
1,5	110	0,1178	0,0980	0,0980	0,1275
70	30	0,5888	0,5475	0,4214	0,5635
70	110	0,1370	0,1109	0,1108	0,1849

Tabela 6.6: Estimativas de falta – Método de Brahma Alterado – Ponto 3.

### 6.1.3 Método Proposto por Wang

Neste algoritmo, tem-se implementada a metodologia de localização de faltas apresentada na Seção 4.1.2. Faz-se necessária a sincronização das medidas referentes aos

dois terminais da linha e utilizam-se os componentes simétricos de seqüência positiva. Para a estimação dos parâmetros da linha, considera-se a Representação em Quadripolos, cuja descrição está contemplada na Seção 5.1.

Na Figura 6.4, está representado o fluxograma da implementação referente a esta metodologia e, na Tabela 6.7, têm-se exibidos os resultados acerca das estimativas do ponto de falta.

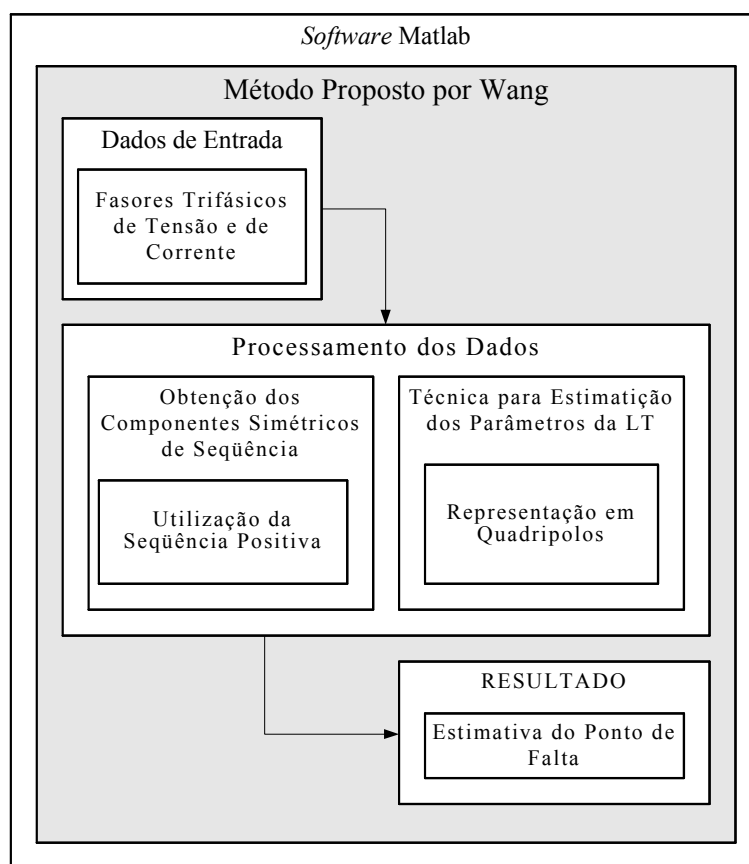


Figura 6.4: Fluxograma do Método Proposto por Wang implementado.

<b><i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i></b>					
<b>Características da Falta</b>		<b>Tipo de Falta</b>			
<b>Resistência (<math>\Omega</math>):</b>	<b>Local (km):</b>	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<i>1,5</i>	<i>30</i>	<i>0,5991</i>	<i>0,6018</i>	<i>0,6003</i>	<i>0,5960</i>
<i>1,5</i>	<i>110</i>	<i>0,1209</i>	<i>0,1104</i>	<i>0,1159</i>	<i>0,1319</i>
<i>70</i>	<i>30</i>	<i>0,5896</i>	<i>0,5965</i>	<i>0,5924</i>	<i>0,5676</i>
<i>70</i>	<i>110</i>	<i>0,1348</i>	<i>0,1191</i>	<i>0,1296</i>	<i>0,1736</i>

Tabela 6.7: Estimativas de falta – Método Proposto por Wang.



### 6.1.4 Método Proposto por Silveira

Este método de localização de faltas em LTs, cuja descrição detalhada está contemplada na Seção 4.2.1, não necessita de sincronização entre os fasores de tensão e corrente referentes aos terminais da linha. Seu princípio está baseado na igualdade dos módulos de tensão no ponto de falta, sendo estes calculados a partir dos dados de cada um dos terminais. Utiliza-se a decomposição em componentes simétricos para a obtenção das grandezas monofásicas independentes, adotando-se a seqüência positiva. Para o processo de estimação dos parâmetros da linha, faz-se uso da representação por Circuitos Equivalentes  $\pi$  de Seqüência (Seção 5.2).

A Figura 6.5 traz o fluxograma da implementação e a Tabela 6.8 exhibe os resultados obtidos das simulações referentes às estimativas do ponto de falta.

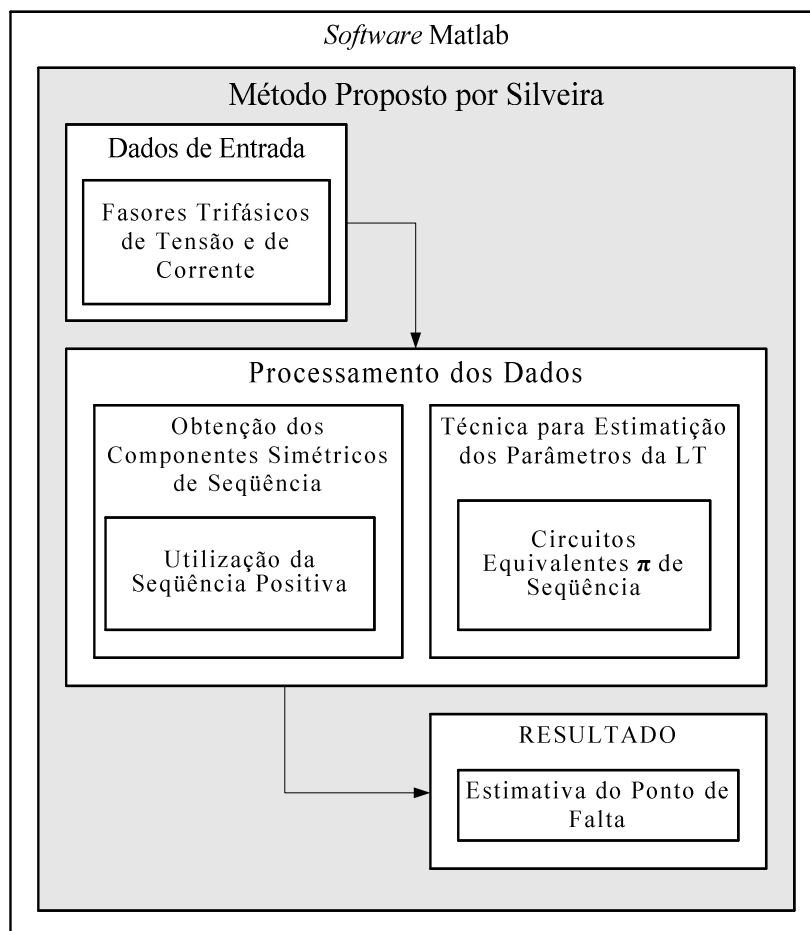


Figura 6.5: Fluxograma do Método Proposto por Silveira implementado.

<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>					
Características da Falta		Tipo de Falta			
Resistência ( $\Omega$ ):	Local (km):	AB	ABC	ACT	BT
<i>1,5</i>	<i>30</i>	<i>0,0958</i>	<i>0,0986</i>	<i>0,0971</i>	<i>0,0927</i>
<i>1,5</i>	<i>110</i>	<i>0,0495</i>	<i>0,0388</i>	<i>0,0444</i>	<i>0,0607</i>
<i>70</i>	<i>30</i>	<i>0,0862</i>	<i>0,0932</i>	<i>0,0890</i>	<i>0,0639</i>
<i>70</i>	<i>110</i>	<i>0,0636</i>	<i>0,0477</i>	<i>0,0584</i>	<i>0,1030</i>

Tabela 6.8: Estimativas de falta – Método Proposto por Silveira.

## 6.2 Combinação das Metodologias – Proposta de Benetti

Implementados os arranjos descritos na seção anterior, partiu-se para a construção de uma proposta que contemplasse os resultados das estimativas do ponto de falta de tais arranjos. A esta metodologia, denominou-se Proposta de Benetti, uma consequência natural da disponibilidade de um determinado número de estimativas.

Nesta proposta, a partir de um conjunto de métodos aplicados simultaneamente, é realizado um tratamento estatístico dos resultados, objetivando a exclusão de estimativas do ponto de falta contaminadas por erros grosseiros. A Figura 6.6 ilustra tal proposta.

Proposta de Benetti

<p style="text-align: center;">Métodos Adotados</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <input checked="" type="radio"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="Brahma Alterado"/> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <input checked="" type="radio"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="Wang"/> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <input checked="" type="radio"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="Silveira"/> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <input type="radio"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="Método 4"/> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <input type="radio"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="Método 5"/> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <span style="margin-right: 10px;">.</span><span style="margin-right: 10px;">.</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <span style="margin-right: 10px;">.</span><span style="margin-right: 10px;">.</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <span style="margin-right: 10px;">.</span><span style="margin-right: 10px;">.</span> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <input type="radio"/> <input style="width: 100px;" type="text" value="Método n"/> </div>	<p style="text-align: center;">Ciclos Pós-Falta Considerados</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">1</td> <td style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">2</td> <td style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">3</td> <td style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">4</td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">n</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input checked="" type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> <td style="text-align: center;">.</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> <td style="text-align: center;">...</td> <td style="text-align: center;"><input type="radio"/></td> </tr> </table>	1	2	3	4	...	n	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>
1	2	3	4	...	n																																																								
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>																																																								
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>																																																								
<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>																																																								
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>																																																								
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>																																																								
.	.	.	.	.	.																																																								
.	.	.	.	.	.																																																								
.	.	.	.	.	.																																																								
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	...	<input type="radio"/>																																																								

Total de Estimativas do Ponto de Falta Avaliadas

Figura 6.6: Proposta de Benetti.

No estudo realizado neste trabalho, referente à metodologia da Proposta de Benetti, particulariza-se a utilização de três métodos de localização de faltas aplicados a cada diferente ciclo pós-falta. Acerca do tratamento estatístico, tal se restringe ao cálculo da média dos valores associados às estimativas do ponto de falta e à exclusão das estimativas com valores mais distantes desta média, até a obtenção de um conjunto com somente duas estimativas. É utilizado o Método de Brahma Alterado, o Método Proposto por Wang e o Método Proposto por Silveira, tendo-se, portanto cinco estimativas iniciais do ponto de falta.

A Figura 6.7 traz ilustrado o fluxograma que descreve a particularização da Proposta de Benetti, explicitando as etapas realizadas para a obtenção da estimativa final do ponto de falta.

Na Tabela 6.9, têm-se os resultados referentes às faltas simuladas, nas mesmas condições já apresentadas nas seções anteriores.

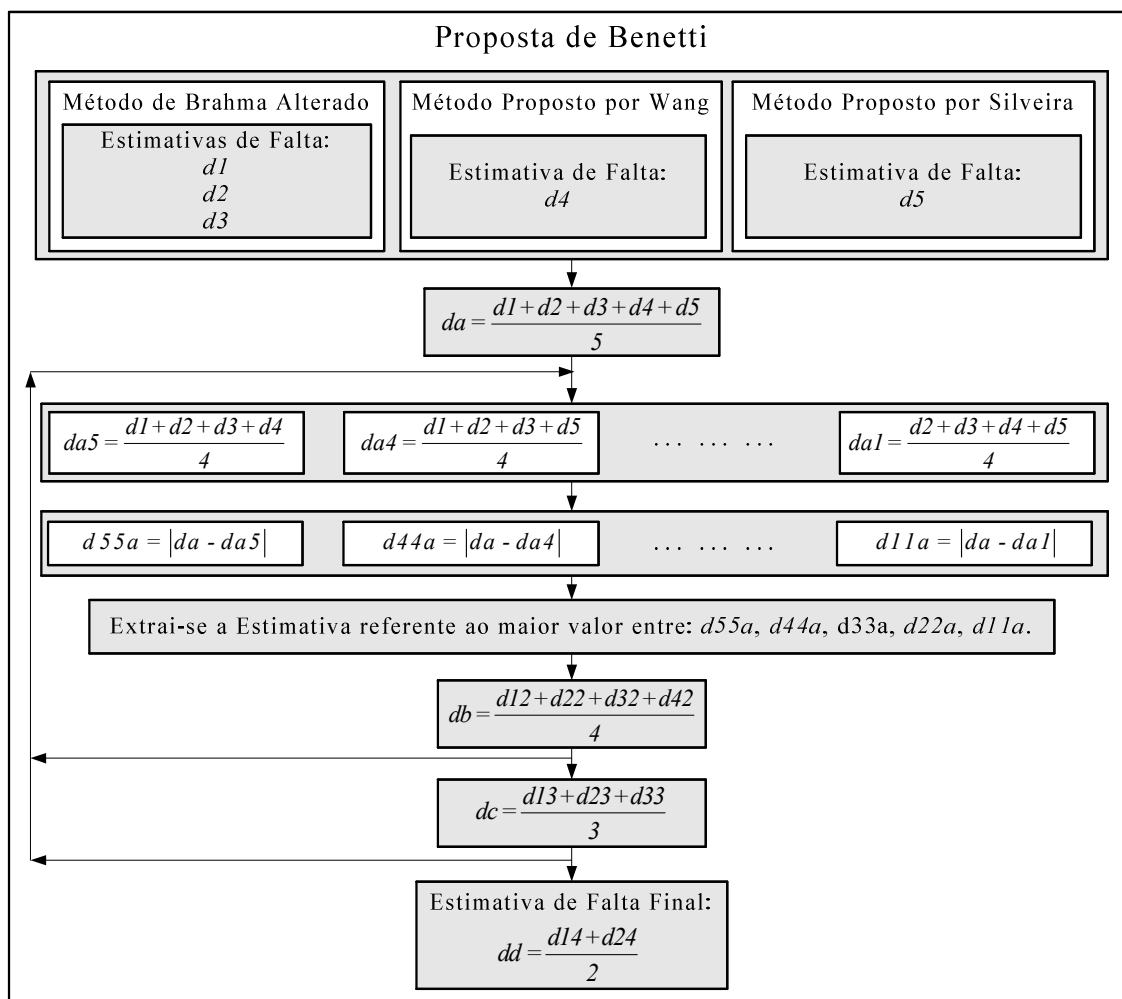


Figura 6.7: Particularização da Proposta de Benetti implementada.

<b>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</b>					
<b>Características da Falta</b>		<b>Tipo de Falta</b>			
<b>Resistência (Ω):</b>	<b>Local (km):</b>	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>1,5</b>	<b>30</b>	0,5997	0,5354	0,6018	0,5968
<b>1,5</b>	<b>110</b>	0,1194	0,1008	0,1114	0,1297
<b>70</b>	<b>30</b>	0,5892	0,5908	0,5939	0,5655
<b>70</b>	<b>110</b>	0,1359	0,1217	0,1264	0,1792

Tabela 6.9: Estimativas de falta – Proposta de Benetti.

Cabe salientar que, na Proposta de Benetti, a estratégia para o tratamento das estimativas do ponto de falta, descrita anteriormente, apresentou os melhores resultados nas simulações empreendidas. Por isso, a sua adoção.

## 6.3 Análise de Sensibilidade

Descritos os algoritmos implementados e as simulações empreendidas para a estimação do ponto de falta na LT considerada, realizaram-se então investigações referentes à sensibilidade dos algoritmos, quando modificadas as condições apresentadas na Figura 6.1, que descreve o cenário utilizado para as simulações.

Tais modificações se referem a: variação do processo para obtenção dos fasores; mudança na técnica de estimação dos parâmetros da linha; e perda no sincronismo dos terminais da LT.

Utilizou-se, nas simulações para a análise da sensibilidade, a mesma LT apresentada no início do Capítulo 6, cujas características foram já explicitadas. Em relação às faltas simuladas, adotaram-se, para todos os tipos, resistências de falta de  $1,5 \Omega$  e considerou-se  $30 \text{ km}$ , como o ponto real da falta, em referência ao Terminal S.

A seguir, é apresentada cada uma das variações nos cenários utilizados para as simulações, e verificada a sensibilidade dos algoritmos a tais variações.

### 6.3.1 Geração de Fasores

É modificado, nesta seção, o processo de obtenção dos fasores trifásicos de tensão e corrente, referentes aos terminais da LT.

No *software* ATP, são simulados quatro diferentes tipos de falta (AB, ABC, ACT e BT) e obtidos os dados de oscilografia. As configurações dos circuitos referentes a estes tipos de falta estão expostos no Apêndice B.

No *software* Matlab, a partir de um algoritmo que emprega a DFT, calculam-se então os fasores trifásicos de tensão e corrente. Utilizou-se uma frequência de amostragem de  $15360 \text{ Hz}$ . Foram processados fasores referentes ao ciclo anterior ao instante de ocorrência da falta na LT, e ao terceiro ciclo imediatamente posterior ao instante da falta.

A Figura 6.8 exhibe o cenário em que as simulações foram empreendidas e a Tabela 6.10 traz os resultados obtidos pelos algoritmos de localização de faltas.

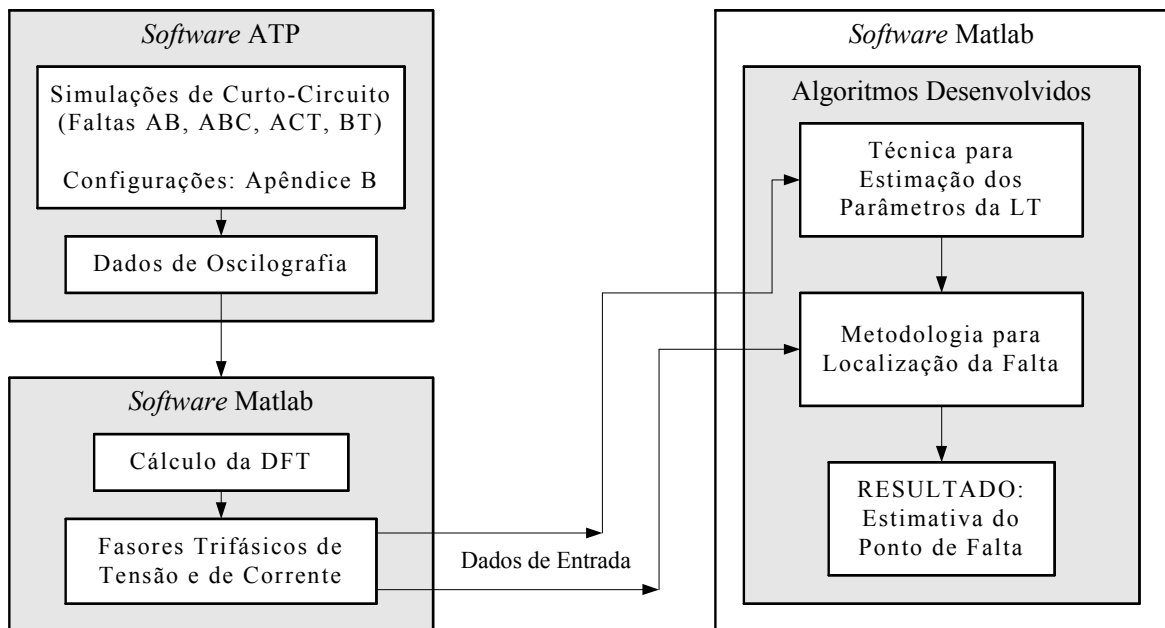


Figura 6.8: Fluxograma para análise da sensibilidade – geração de fasores.

<b>Configurações das Falhas: Apêndice B</b>				
<b>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</b>				
<b>Metodologia:</b>	<b>Tipo de Falta:</b>			
	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>Brahma – Ponto 1</b>	1,2417	2,0949	2,6948	32,4580
<b>Brahma – Ponto 2</b>	3,2910	2,2081	23,3724	2,3602
<b>Brahma – Ponto 3</b>	19,8402	2,2453	1,8212	16,2392
<b>Brahma Alterado – Ponto 1</b>	0,3573	0,6426	0,0279	20,1680
<b>Brahma Alterado – Ponto 2</b>	0,1421	0,7079	12,4116	2,5038
<b>Brahma Alterado – Ponto 3</b>	0,1123	0,4587	0,5884	19,9705
<b>Wang</b>	0,5859	0,6014	0,5929	0,5743
<b>Silveira</b>	0,3667	0,5867	0,4956	0,3213
<b>Proposta de Benetti</b>	0,4763	0,5941	0,5442	0,4478

Tabela 6.10: Estimativas de falta – Sensibilidade à geração de fasores.

Verifica-se, a partir da comparação entre os resultados das estimativas expostos na Tabela 6.10 com aqueles obtidos na Seção 6.1, que o Método Proposto por Brahma apresenta um decréscimo elevado em sua precisão. No Método de Brahma Alterado, para as faltas do tipo fase-fase (AB) e trifásica (ABC), a precisão das estimativas se mantém na mesma ordem de grandeza. Para a falta fase-fase-terra (ACT), tem-se uma estimativa, dentre as três que a metodologia proporciona, bastante imprecisa. Por fim, para a falta fase-

terra (BT), verifica-se um aumento considerável da imprecisão. No Método Proposto por Wang, constata-se que o processo de geração de fasores, ilustrado na Figura 6.8, não afeta a precisão das estimativas. Para o Método Proposto por Silveira, no entanto, pode-se verificar que, para todos os tipos de falta, há perda de precisão nas estimativas do ponto de falta.

Com relação à Proposta de Benetti, os resultados obtidos nesta seção ilustram uma manutenção da ordem de grandeza das precisões relacionadas às estimativas do ponto de falta.

### 6.3.2 Estimação de Parâmetros

Adotando-se o cenário anterior de simulações, ilustrado pela Figura 6.8, verifica-se a sensibilidade do Método Proposto por Wang e do Método Proposto por Silveira, quando utilizadas diferentes estruturas para a obtenção dos parâmetros da LT.

A Tabela 6.11 traz os resultados, para o Método Proposto por Wang, referentes aos quatro tipos de falta: AB, ABC, ACT e BT. Na Tabela 6.12, têm-se as médias obtidas das faltas, para cada configuração simulada.

<i>Método Proposto por Wang – Configurações: Apêndice B</i>				
<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>				
<b>Técnica para Estimação dos Parâmetros da LT:</b>	<b>Tipo de Falta:</b>			
	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>Quadripolos (Adotada)</b>	<i>0,5859</i>	<i>0,6014</i>	<i>0,5929</i>	<i>0,5743</i>
<b>Circuitos <math>\pi</math> de Seqüência</b>	<i>0,4570</i>	<i>0,9587</i>	<i>0,6478</i>	<i>0,3561</i>
<b>Circuito Trifásico <math>\pi</math></b>	<i>11,4065</i>	<i>1,0277</i>	<i>0,3183</i>	<i>1,1387</i>
<b>Parâmetros Conhecidos</b>	<i>0,1156</i>	<i>0,1156</i>	<i>0,1155</i>	<i>0,1191</i>

Tabela 6.11: Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Wang.

<b><i>Método Proposto por Wang – Configurações: Apêndice B</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i></b>	
<b>Técnica para Estimação dos Parâmetros da LT:</b>	<b>Média Total:</b>
<b>Quadripolos (Adotada)</b>	<i>0,5886</i>
<b>Circuitos <math>\pi</math> de Seqüência</b>	<i>0,6049</i>
<b>Circuito Trifásico <math>\pi</math></b>	<i>3,4728</i>
<b>Parâmetros Conhecidos</b>	<i>0,1165</i>

Tabela 6.12: Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Wang – Médias Totais.

Pode-se observar que a técnica para a estimação dos parâmetros da LT adotada (Representação em Quadripolos), desconsiderando-se o conhecimento prévio dos valores referentes a tais parâmetros, mostra-se a mais precisa quando comparada às demais técnicas.

Na Tabela 6.13, têm-se os resultados das simulações referentes ao Método Proposto por Silveira. A Tabela 6.14 ilustra as médias totais obtidas. Cabe salientar que, em uma determinada configuração, obteve-se a estimativa de um ponto de falta fora das dimensões da LT. Tal estimativa é representada por (\*).

<b><i>Método Proposto por Silveira – Configurações: Apêndice B</i></b>				
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i></b>				
<b>Técnica para Estimação dos Parâmetros da LT:</b>	<b>Tipo de Falta:</b>			
	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>Quadripolos</b>	<i>0,5860</i>	<i>0,6015</i>	<i>0,5929</i>	<i>0,5744</i>
<b>Circuitos <math>\pi</math> de Seqüência (Adotada)</b>	<i>0,3667</i>	<i>0,5867</i>	<i>0,4956</i>	<i>0,3213</i>
<b>Circuito Trifásico <math>\pi</math></b>	<i>(*)</i>	<i>0,1510</i>	<i>0,4172</i>	<i>1,0785</i>
<b>Parâmetros Conhecidos</b>	<i>0,1160</i>	<i>0,1158</i>	<i>0,1158</i>	<i>0,1196</i>

Tabela 6.13: Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Silveira.



<i>Método Proposto por Silveira – Configurações: Apêndice B</i>	
<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>	
<b>Técnica para Estimação dos Parâmetros da LT:</b>	<b>Média Total:</b>
<b>Quadripolos</b>	<i>0,5887</i>
<b>Circuitos <math>\pi</math> de Seqüência (Adotada)</b>	<i>0,4426</i>
<b>Circuito Trifásico <math>\pi</math></b>	<i>0,5489</i>
<b>Parâmetros Conhecidos</b>	<i>0,1168</i>

Tabela 6.14: Sensibilidade à estimação de parâmetros – Método Proposto por Silveira – Médias Totais.

Os resultados das estimativas do ponto de falta, para o Método Proposto por Silveira, justificam o emprego da técnica adotada (Circuitos Equivalentes  $\pi$  de Seqüência), por se mostrar a mais precisa em comparação às demais.

Verifica-se, ao analisarem-se conjuntamente os Métodos Propostos por Wang e por Silveira, que as estimativas do ponto de falta se mostram quase idênticas quando conhecidos os parâmetros da LT, apresentando elevada precisão. Desta forma, pode-se constatar que, nestes métodos, a variação na precisão das estimativas está relacionada à utilização de diferentes técnicas para a estimação dos parâmetros da linha.

### 6.3.3 Diferenças Angulares

Para analisar-se a sensibilidade dos algoritmos desenvolvidos, estes foram submetidos finalmente à perda de sincronismo angular entre os terminais da LT. Os fasores trifásicos de tensão e corrente, referentes aos Terminais *S* e *R*, passaram a conter uma diferença angular de 10°, 45° e 110°. Na seqüência, são apresentados os impactos de tais desvios nas metodologias.

#### 6.3.3.1 Diferença de 10° entre os Fasores dos Terminais da LT

Primeiramente, analisou-se o impacto da ocorrência de desvios angulares de 10° nos terminais da LT. Os algoritmos desenvolvidos foram simulados na estrutura descrita pela

Figura 6.1. A Tabela 6.15 traz os resultados.

<i>Desvio Angular de 10° – Configurações: Apêndice A</i>				
<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>				
<b>Metodologia:</b>	<b>Tipo de Falta:</b>			
	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>Brahma – Ponto 1</b>	0,6295	0,6299	0,6296	0,6134
<b>Brahma – Ponto 2</b>	0,6305	0,6300	0,6012	0,6293
<b>Brahma – Ponto 3</b>	0,6470	0,6297	0,6295	0,6263
<b>Brahma Alterado – Ponto 1</b>	0,6165	0,6259	0,6225	0,6264
<b>Brahma Alterado – Ponto 2</b>	0,6414	0,6385	0,6307	0,6473
<b>Brahma Alterado – Ponto 3</b>	0,6296	0,6314	0,6298	0,6267
<b>Wang</b>	0,4663	0,4689	0,4675	0,4633
<b>Silveira</b>	0,2092	0,2119	0,2104	0,2060
<b>Proposta de Benetti</b>	0,6355	0,6287	0,6303	0,6265

Tabela 6.15: Sensibilidade ao desvio angular de 10° – Configurações: Apêndice A.

### 6.3.3.2 Diferença de 45° entre os Fasores dos Terminais da LT

Os testes, acerca do impacto dos desvios angulares nas metodologias, passaram a conter o valor de 45°. Os algoritmos foram submetidos a simulações no cenário descrito pela Figura 6.1, sendo os resultados expostos na Tabela 6.16.

<i>Desvio Angular de 45° – Configurações: Apêndice A</i>				
<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>				
<b>Metodologia:</b>	<b>Tipo de Falta:</b>			
	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>Brahma – Ponto 1</b>	1,2335	1,2339	1,2334	1,2172
<b>Brahma – Ponto 2</b>	1,2343	1,2339	1,2017	1,2332
<b>Brahma – Ponto 3</b>	1,2472	1,2335	1,2336	1,2268
<b>Brahma Alterado – Ponto 1</b>	1,3144	1,2544	1,2596	1,2346
<b>Brahma Alterado – Ponto 2</b>	1,2198	1,2298	1,2368	1,2120
<b>Brahma Alterado – Ponto 3</b>	1,2361	1,2215	1,2255	1,2347
<b>Wang</b>	2,2501	2,2482	2,2493	2,2525
<b>Silveira</b>	0,3413	0,3441	0,3426	0,3382
<b>Proposta de Benetti</b>	1,2280	1,2257	1,2312	1,2347

Tabela 6.16: Sensibilidade ao desvio angular de 45° – Configurações: Apêndice A.

### 6.3.3.3 Diferença de $110^\circ$ entre os Fasores dos Terminais da LT

Por fim, os terminais da LT foram submetidos a uma diferença angular de  $110^\circ$ . A Tabela 6.17 traz os resultados dos algoritmos, referentes ao arranjo de simulação descrito pela Figura 6.1. Salienta-se que, no Método Proposto por Wang, verificaram-se estimativas do ponto de falta fora das dimensões da LT, o que é representado por (\*) na tabela.

<i>Desvio Angular de <math>110^\circ</math> – Configurações: Apêndice A</i>				
<i>Estimação do Ponto de Falta – Erro Percentual Absoluto</i>				
<b>Metodologia:</b>	<b>Tipo de Falta:</b>			
	<b>AB</b>	<b>ABC</b>	<b>ACT</b>	<b>BT</b>
<b>Brahma – Ponto 1</b>	4,4160	4,4170	4,4173	4,3812
<b>Brahma – Ponto 2</b>	4,4185	4,4172	4,3709	4,4167
<b>Brahma – Ponto 3</b>	4,4524	4,4172	4,4167	4,4151
<b>Brahma Alterado – Ponto 1</b>	4,8987	4,7358	4,7570	4,3940
<b>Brahma Alterado – Ponto 2</b>	4,7619	4,6217	4,4146	4,7138
<b>Brahma Alterado – Ponto 3</b>	4,4335	4,7807	4,6341	4,4407
<b>Wang</b>	(*)	(*)	(*)	(*)
<b>Silveira</b>	0,8510	0,8538	0,8523	0,8480
<b>Proposta de Benetti</b>	4,8303	4,7583	4,6956	4,4174

Tabela 6.17: Sensibilidade ao desvio angular de  $110^\circ$  – Configurações: Apêndice A.

Observa-se, para todas as metodologias, que o aumento da perda de sincronismo angular entre os terminais da LT implica em aumento da imprecisão nas estimativas do ponto de falta.

### 6.3.3.4 Análise do Impacto dos Desvios Angulares nas Metodologias

A fim de analisar-se, de forma conjunta, o impacto da perda de sincronismo angular entre os terminais da LT no desempenho dos algoritmos implementados, estão organizados, nesta seção, os resultados obtidos para o caso da falta do tipo fase-terra (BT), desde o cenário em que há sincronismo, até a diferença angular máxima de  $110^\circ$ .

As Figuras 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 trazem respectivamente os resultados acerca:

do Método Proposto por Brahma, do Método de Brahma Alterado, do Método Proposto por Wang, do Método Proposto por Silveira e da Proposta de Benetti. Em cada figura, há simulações referentes ao arranjo descrito pela Figura 6.1 (Configurações das Falhas: Apêndice A).

E necessário destacar que, no Método Proposto por Brahma e no Método de Brahma Alterado há três estimativas do ponto de falta, para cada simulação empreendida. O Método Proposto por Wang, por sua vez, quando submetido à diferença angular de  $110^\circ$ , apresenta uma estimativa que se encontra fora das dimensões da LT. Por isso, na Figura 6.11, tal cenário não está representado.

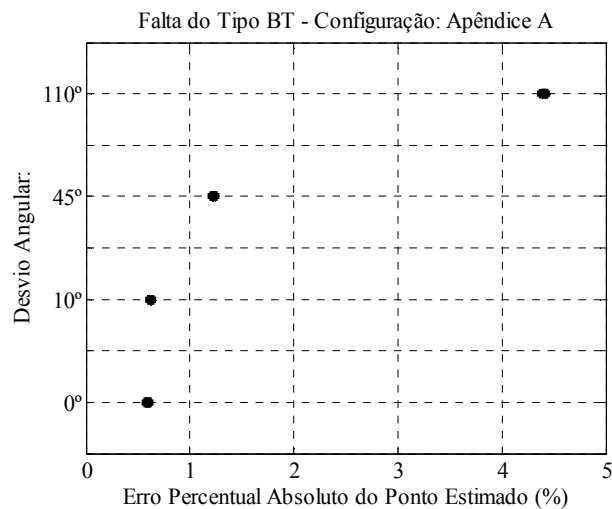


Figura 6.9: Impacto dos desvios angulares no Método Proposto por Brahma.

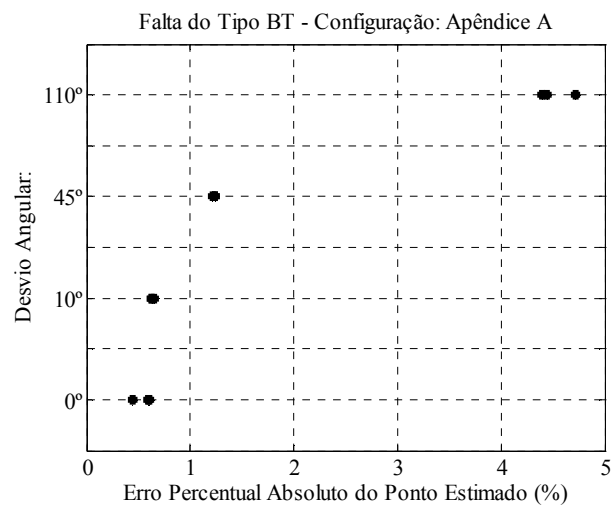


Figura 6.10: Impacto dos desvios angulares no Método de Brahma Alterado.

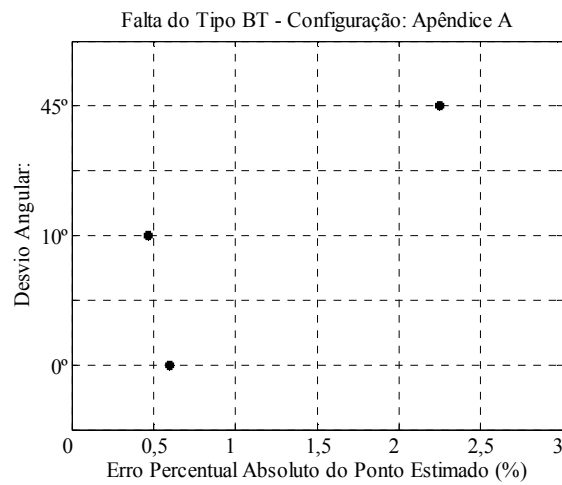


Figura 6.11: Impacto dos desvios angulares no Método Proposto por Wang.

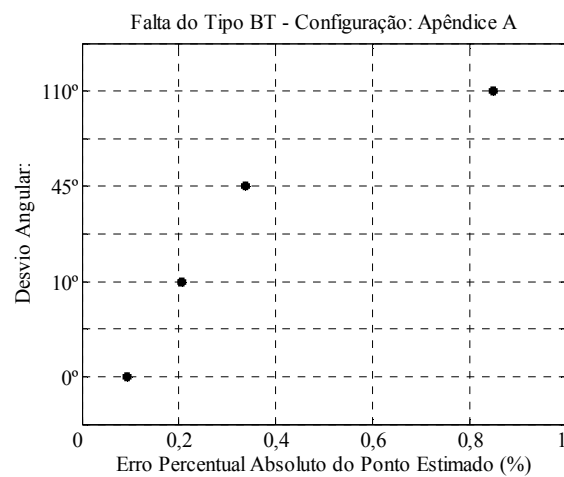


Figura 6.12: Impacto dos desvios angulares no Método Proposto por Silveira.

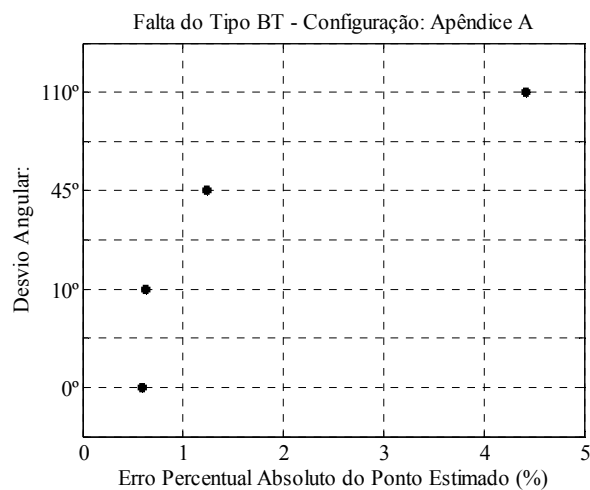


Figura 6.13: Impacto dos desvios angulares na Proposta de Benetti.

Pode-se constatar que o Método Proposto por Brahma e o Método de Brahma Alterado apresentam comportamento semelhante com relação à estimativa do ponto de falta, quando submetidos à perda de sincronismo angular entre os terminais da LT. O decréscimo da precisão não se mostra demasiadamente elevado.

O Método Proposto por Wang, para pequenas diferenças angulares, tem suas estimativas do ponto de falta pouco afetadas. No entanto, quando submetido a diferenças angulares elevadas, os pontos de falta estimados perdem validade, encontrando-se fora dos limites da LT.

No Método Proposto por Silveira, a inserção da perda de sincronismo angular entre os terminais da linha acarretou o menor decréscimo nas precisões das estimativas do ponto de falta. Cabe salientar que, em testes de simulação, quando utilizados os valores conhecidos dos parâmetros da LT, este método apresentou total independência em relação à perda de sincronismo angular. Portanto, pode-se inferir que o pequeno decréscimo da precisão das estimativas, quando inseridas diferenças angulares, está relacionado ao processo de estimação dos parâmetros da linha. Esta constatação confirma a proposição feita em seu equacionamento, de independência em relação ao sincronismo angular dos terminais da LT.

Por fim, com relação à Proposta de Benetti, pode-se constatar um pequeno aumento da imprecisão nas estimativas, à medida que maiores desvios angulares são inseridos. Cabe destacar o descarte da estimativa relacionada ao Método Proposto por Wang, quando submetido a um desvio angular de  $110^\circ$ , não comprometendo a estimativa final da falta.

## 6.4 Aplicação em um Caso Real

Por fim, na análise das implementações desenvolvidas e descritas ao longo deste trabalho, são expostos os resultados acerca de uma ocorrência real verificada no SIN.

No Informativo Preliminar Diário da Operação (IPDO) do dia 08 de setembro de 2009, elaborado pelo ONS, tem-se a seguinte descrição:

“\* OCORRÊNCIAS NA REDE DE OPERAÇÃO

1) À 01h44min houve o desligamento automático da LT 525kV Areia/Ivaiporã (ELETROSUL) e da Barra A de 525kV da subestação Areia (ELETROSUL).  
Causa: Queda das torres nº 181 e 182 da referida linha de transmissão.

Conseqüências: Não houve outras conseqüências para o SIN.”

A ocorrência citada foi registrada pelo protótipo de medição fasorial sincronizada implementado no sistema de transmissão da Eletrosul Centrais Elétricas S.A. Tal protótipo, resultado do Projeto MedFasee Eletrosul, está descrito na Seção 2.5.4 [43], [44].

Na Figura 6.14, têm-se as imagens das duas torres caídas ao chão, referentes à LT Ivaiporã - Areia, e a Figura 6.15 traz representadas as dimensões associadas às estruturas componentes desta LT.



Figura 6.14: Torres caídas da LT Ivaiporã - Areia em 08/09/2009 – Fonte: Eletrosul.

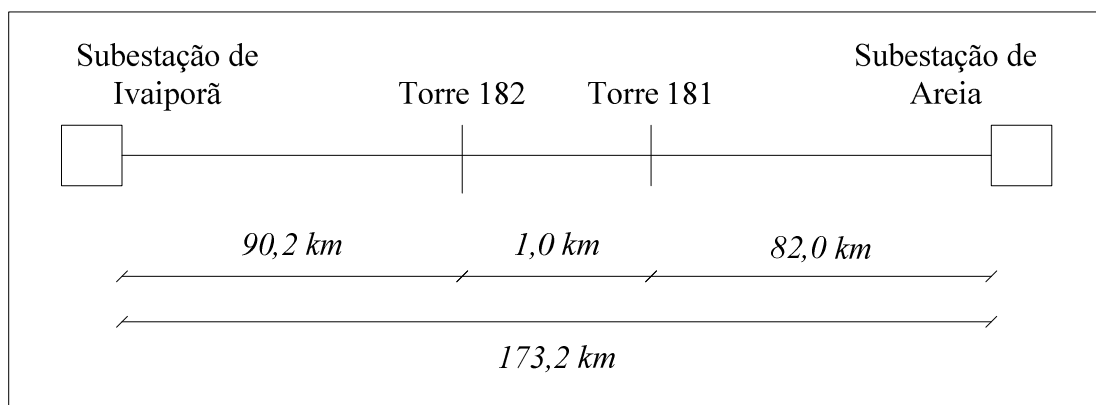


Figura 6.15: Representação das dimensões da LT Ivaiporã - Areia – Fonte: Eletrosul.

Na Tabela 6.18, encontram-se os valores associados aos parâmetros da LT Ivaiporã - Areia, disponibilizados pelo ONS.

<i>Parâmetros da LT Ivaiporã - Areia – Fonte: ONS</i>	
<b>Descrição:</b>	<b>Valor:</b>
Tensão Nominal (kV)	525
Comprimento (km)	173,2
Capacidade oper. longa duração (A)	2378
Capacidade oper. curta duração (A)	2996
Resistência de seqüência positiva (%)	0,159
Reatância de seqüência positiva (%)	2,012
Suceptância de seqüência positiva (Mvar)	245,771

Tabela 6.18: Parâmetros da LT Ivaiporã - Areia – Fonte: ONS.

A partir do SPMS implementado no sistema de transmissão da Eletrosul, pôde-se registrar o evento da queda das duas torres na LT Ivaiporã - Areia. Com uma PMU instalada em cada terminal da LT, são registrados os valores trifásicos de tensão e corrente, a uma taxa de 60 sincrofases por segundo (um sincrofasor a cada ciclo). Na Figura 6.16, estão expostos os valores da corrente trifásica da LT sob análise, registrados pelas PMUs instaladas nas Subestações de Ivaiporã e de Areia, respectivamente.

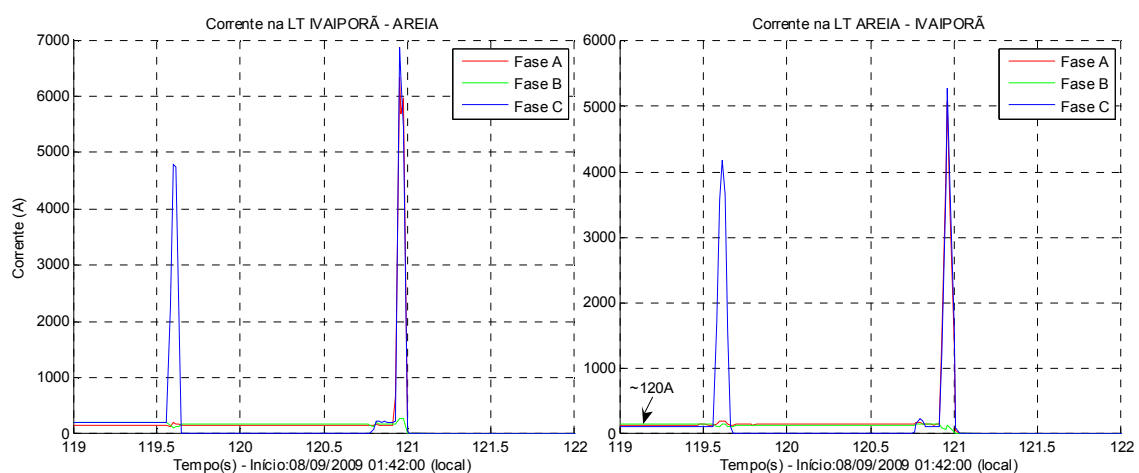


Figura 6.16: Gráficos da corrente trifásica medida nos terminais da LT Ivaiporã - Areia.

Os gráficos expostos na Figura 6.16 foram gerados considerando-se uma mesma



faixa de tempo. A análise inicia no instante *01:43:59* (horário de Brasília) e finda no instante *01:44:02*. Pode-se verificar, a partir dos gráficos da Figura 6.16, que há dois curto-circuitos na LT. Primeiramente, tem-se um curto-circuito entre a Fase C e a Terra e, após, verifica-se um curto-circuito envolvendo as Fases A e C.

As estimativas do ponto de falta obtidas a partir das metodologias implementadas, para este caso real, são divididas em dois cenários. No primeiro, utilizam-se os fasores de tensão e corrente relacionados à falta do tipo fase-terra (Fase C e Terra). Já no segundo cenário, a análise faz uso dos fasores referentes ao instante de ocorrência da falta do tipo fase-fase (Fases A e C).

Utilizando-se os dados registrados pelo protótipo e considerando-se que a LT Ivaiporã - Areia possui *173,2 km* de extensão, referencia-se a Subestação de Ivaiporã como o Terminal *S* e a Subestação de Areia como o Terminal *R*. Considera-se, como ponto real da falta, a distância intermediária entre as duas torres caídas (Torres 181 e 182), correspondendo, portanto a *90,7 km* de distância da Subestação de Ivaiporã.

Na seção seguinte, é explorada a falta do tipo fase-terra registrada pelo protótipo de SPMS na LT Ivaiporã - Areia.

### 6.4.1 Curto-Circuito entre Fase C e Terra

A Figura 6.17 traz ilustrada a corrente trifásica da LT Ivaiporã - Areia, registrada a partir do Terminal de Ivaiporã. A Figura 6.18 traz, no entanto, o registro a partir do Terminal de Areia.

Pode-se observar que, nas Figuras 6.17 e 6.18, o instante de tempo utilizado tem início em *01:43:59,52* e se encerra em *01:43:59,66*.

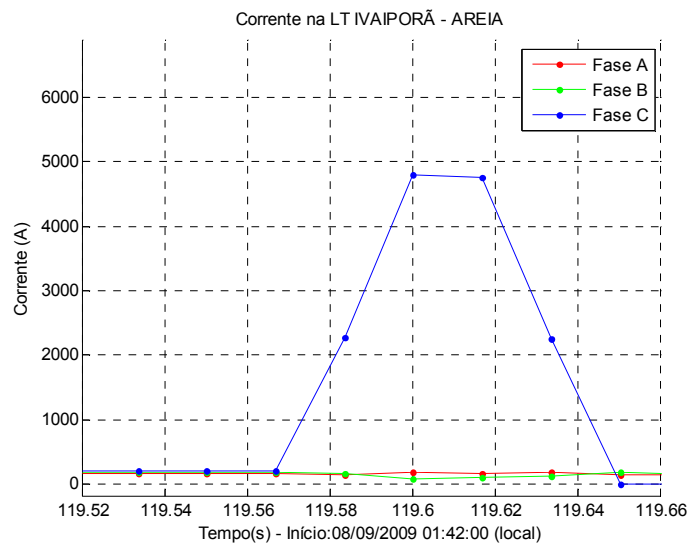


Figura 6.17: Corrente trifásica – Terminal de Ivaiporã – Curto-circuito: Fase C e Terra.

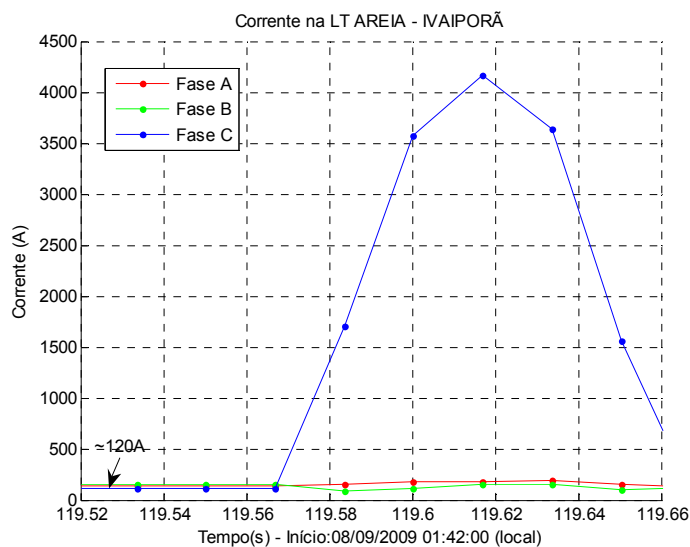


Figura 6.18: Corrente trifásica – Terminal de Areia – Curto-circuito: Fase C e Terra.

A partir então das informações fasoriais de tensão e corrente, referentes ao instante de tempo exibido nas figuras anteriores, passam a serem estimados os pontos de falta, utilizando-se as metodologias implementadas. Para cada metodologia, são empreendidas simulações que consideram o ciclo anterior à ocorrência da falta (fasores pré-falta) e os quatro ciclos imediatamente posteriores ao início da falta (fasores pós-falta).

Na Tabela 6.19, têm-se os resultados das estimativas do ponto de falta obtidos a partir

do Método de Brahma Alterado. Tais resultados estão divididos em relação a cada ciclo pós-falta utilizado (1º, 2º, 3º e 4º). Na tabela, há o resultado da média entre as estimativas dos quatro diferentes ciclos utilizados, com o respectivo erro percentual (considerando-se 173,2 km como extensão total da LT e 90,7 km como o ponto real da falta).

<b>Falta Fase-Terra (CT) – Método de Brahma Alterado</b>		
<b>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</b>		
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>		<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
<i>Ponto 1:</i>	70,7244	1º
<i>Ponto 2:</i>	70,3687	
<i>Ponto 3:</i>	70,9331	
<i>Ponto 1:</i>	71,6033	2º
<i>Ponto 2:</i>	71,3574	
<i>Ponto 3:</i>	71,1909	
<i>Ponto 1:</i>	77,8786	3º
<i>Ponto 2:</i>	77,9200	
<i>Ponto 3:</i>	78,2138	
<i>Ponto 1:</i>	103,1967	4º
<i>Ponto 2:</i>	102,7033	
<i>Ponto 3:</i>	103,1692	
<b>Média entre 1º, 2º, 3º e 4º Ciclos</b>		
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>		<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
<i>Ponto 1: 80,8508 km</i>		- 5,6866 %
<i>Ponto 2: 80,5874 km</i>		- 5,8387 %
<i>Ponto 3: 80,8768 km</i>		- 5,6716 %

Tabela 6.19: Estimativas – Método de Brahma Alterado – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

Pode-se constatar que a precisão da estimativa considerando-se a média entre os quatro ciclos é ligeiramente maior que a obtida a partir somente do quarto ciclo. Comparativamente em relação a cada um dos outros três ciclos (1º, 2º e 3º), a média total apresenta uma precisão ainda maior. Observa-se também que, para cada ciclo, as três estimativas fornecidas pela metodologia apresentam valores bastante próximos.

A Tabela 6.20 traz ilustrados os resultados das estimativas do ponto de falta, referentes ao Método Proposto por Wang. Tal tabela está organizada de forma semelhante à tabela anteriormente descrita.

<b><i>Falta Fase-Terra (CT) – Método Proposto por Wang</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
66,8479	1°
70,4382	2°
77,9157	3°
102,6691	4°
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>	<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
79,4677 km	- 6,4852 %

Tabela 6.20: Estimativas – Método Proposto por Wang – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

Verifica-se também que o resultado obtido a partir da média dos ciclos apresenta precisão ligeiramente maior do que a estimativa obtida utilizando-se somente o quarto ciclo. O comportamento, para cada ciclo, é análogo ao observado no Método de Brahma Alterado. Ou seja, a estimativa do ponto de falta se torna maior (em referência ao Terminal S), à medida que são utilizados ciclos mais distantes do início da falta.

Na Tabela 6.21 estão expostos os resultados acerca do Método Proposto por Silveira.

<b><i>Falta Fase-Terra (CT) – Método Proposto por Silveira</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
55,0611	1°
61,2657	2°
80,8016	3°
158,0985	4°
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>	<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
88,8067 km	- 1,0931 %

Tabela 6.21: Estimativas – Método Proposto por Silveira – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

Em relação ao Método Proposto por Silveira, a média das estimativas do ponto de falta, considerando-se os quatro ciclos posteriores à falta, apresenta elevada precisão. No entanto, verifica-se grande variação nos valores das estimativas, para os diferentes ciclos. À medida que são utilizados ciclos mais distantes do início da falta, maiores são as estimativas do ponto, considerando-se o Terminal *S* (Subestação de Ivaiporã) como referencial.

A Tabela 6.22 traz, por fim, as estimativas do ponto de falta obtidas com a Proposta de Benetti.

<b><i>Falta Fase-Terra (CT) – Proposta de Benetti</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
70,8287	1°
71,2742	2°
77,9178	3°
103,1830	4°
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>	<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
80,8009 km	- 5,7154 %

Tabela 6.22: Estimativas da Proposta de Benetti – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

Observa-se que os resultados das estimativas da Proposta de Benetti, para cada ciclo, consolidam os valores fornecidos pelas metodologias anteriormente descritas, descartando-se as medidas cujos resultados se distanciam das médias totais.

A precisão da estimativa, considerando-se a média entre os quatro ciclos, mostra-se ligeiramente superior ao valor obtido somente com o quarto ciclo. Em comparação individual aos três primeiros ciclos, a estimativa da média total se mostra ainda mais precisa.

Analisando-se os resultados fornecidos pelas metodologias, acerca de cada ciclo considerado, verifica-se que a utilização da média entre o 3° e o 4° ciclo pós-falta proporciona as melhores estimativas do ponto de falta. A Tabela 6.23 ilustra esta

consideração.

<i>Falta Fase-Terra (CT)</i>		
<i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i>		
<i>Média entre 3º e 4º Ciclos</i>		
<b>Metodologia</b>	<b>Estimativa</b>	<b>Erro Percentual</b>
<i>Brahma Alterado – Ponto 1:</i>	<i>90,5377 km</i>	<i>- 0,0937 %</i>
<i>Brahma Alterado – Ponto 2:</i>	<i>90,3117 km</i>	<i>- 0,2242 %</i>
<i>Brahma Alterado – Ponto 3:</i>	<i>90,6915 km</i>	<i>- 0,0049 %</i>
<i>Wang:</i>	<i>90,2924 km</i>	<i>- 0,2353 %</i>
<i>Silveira:</i>	<i>119,4501 km</i>	<i>+ 16,5994 %</i>
<i>Proposta de Benetti:</i>	<i>90,5504 km</i>	<i>- 0,0864 %</i>

Tabela 6.23: Estimativas das metodologias – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia – Média entre 3º e 4º ciclos.

Exceção feita ao Método Proposto por Silveira, cujos resultados para os quatro diferentes ciclos pós-falta apresentaram as maiores variações das estimativas, as demais metodologias, quando considerada a média entre o 3º e 4º ciclo, fornecem uma estimativa quase exata.

Utilizando-se os valores dos parâmetros da LT Ivaiporã - Areia, fornecidos pelo ONS (ilustrados na Tabela 6.18), são avaliados os resultados da estimação do ponto de falta para este caso de curto-circuito de duas diferentes metodologias bastante citadas na literatura: Método Proposto por Johns e Jamali [74] e Método Proposto por Dalcastagnê [57]. Estes são métodos que fazem uso dos fasores da frequência fundamental dos dois terminais da linha para seu desenvolvimento.

Os métodos foram implementados em ambiente Matlab e utilizaram-se somente componentes simétricos de seqüência positiva. Cabe salientar que no Método Proposto por Dalcastagnê não foram implementadas todas as salvaguardas para o tratamento dos casos de risco descritos no seu desenvolvimento. Nas simulações realizadas, fez-se uso, de forma individual, dos quatro ciclos posteriores ao início da falta. Nas Tabelas 6.24 e 6.25, têm-se exibidos os resultados para os Métodos Propostos por Johns e Jamali e por Dalcastagnê respectivamente.

<i>Falta Fase-Terra (CT) – Método Proposto por Johns e Jamali</i>	
<i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
53,2146	1°
62,7779	2°
81,5675	3°
165,5532	4°

Tabela 6.24: Estimativas do ponto de falta – Método Proposto por Johns e Jamali – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

<i>Falta Fase-Terra (CT) – Método Proposto por Dalcastagnê</i>	
<i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
40,3449	1°
61,0461	2°
81,6883	3°
165,4028	4°

Tabela 6.25: Estimativas do ponto de falta – Método Proposto por Dalcastagnê – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

Já na Tabela 6.26, tem-se ilustrada a média considerando-se os quatro ciclos pós-falta e a média entre o 3° e o 4° ciclo pós-falta.

Também na Tabela 6.26, são exibidos os resultados do algoritmo utilizado pela Eletrosul Centrais Elétricas S.A. para a localização de faltas. Tal algoritmo está estruturado em uma metodologia que considera os dados de oscilografia referentes a um dos terminais da linha. Por isso, são expostos os valores obtidos das estimativas, a partir dos registros do Terminal de Ivaiporã e de Areia.

<b><i>Falta Fase-Terra (CT)</i></b>		
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>		
Média entre 1º, 2º, 3º e 4º Ciclos		
Metodologia	Estimativa	Erro Percentual
<i>Johns e Jamali:</i>	<i>90,7783 km</i>	<i>+ 0,0452 %</i>
<i>Dalcastagnê:</i>	<i>87,1205 km</i>	<i>- 2,0667 %</i>
Média entre 3º e 4º Ciclos		
Metodologia	Estimativa	Erro Percentual
<i>Johns e Jamali:</i>	<i>123,5604 km</i>	<i>+ 18,9725 %</i>
<i>Dalcastagnê:</i>	<i>123,5456 km</i>	<i>+ 18,9640 %</i>
Dados de Oscilografia a partir de Registradores de Perturbação		
Algoritmo Eletrosul	Estimativa	Erro Percentual
<i>Terminal de Ivaiporã:</i>	<i>71,2 km</i>	<i>- 11,2587 %</i>
<i>Terminal de Areia:</i>	<i>104,5 km</i>	<i>+ 7,9677 %</i>

Tabela 6.26: Estimativas comparativas do ponto de falta de diferentes metodologias – Falta CT – LT Ivaiporã - Areia.

Pode-se constatar que os resultados obtidos com os Métodos Propostos por Johns e Jamali e por Dalcastagnê, quando considerada a média total dos quatro ciclos pós-falta, apresenta boa precisão. Quando considerados somente o 3º e o 4º ciclos, a precisão se deteriora e o resultado, entre os métodos, aproxima-se bastante.

Com relação ao algoritmo utilizado pela Eletrosul Centrais Elétricas S.A., baseado em informações de somente um terminal, pode-se verificar que a precisão do resultado não se mostra muito elevada, havendo ainda uma elevada diferença entre as estimativas fornecidas pelos terminais.

Na próxima seção, é analisada a falta do tipo fase-fase, acerca das Fases A e C, registrada pelo protótipo de SMPS do Projeto MedFasee Eletrosul, em um instante de tempo posterior ao referenciado nesta seção.



### 6.4.2 Curto-Circuito entre as Fases A e C

De forma análoga à seção anterior, está ilustrado, nas Figuras 6.19 e 6.20, o comportamento da corrente trifásica da LT Ivaiporã - Areia, em relação ao Terminal de Ivaiporã e, posteriormente, ao Terminal de Areia. Nas figuras, tem-se representado um instante de tempo que inicia em 01:44:00,90 e se estende até 01:44:01,04 (em referência ao horário de Brasília).

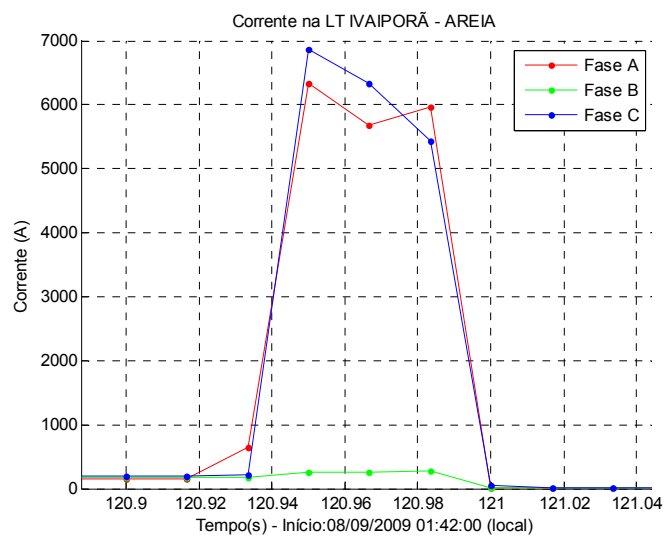


Figura 6.19: Corrente trifásica – Terminal de Ivaiporã – Curto-circuito: Fases A e C.

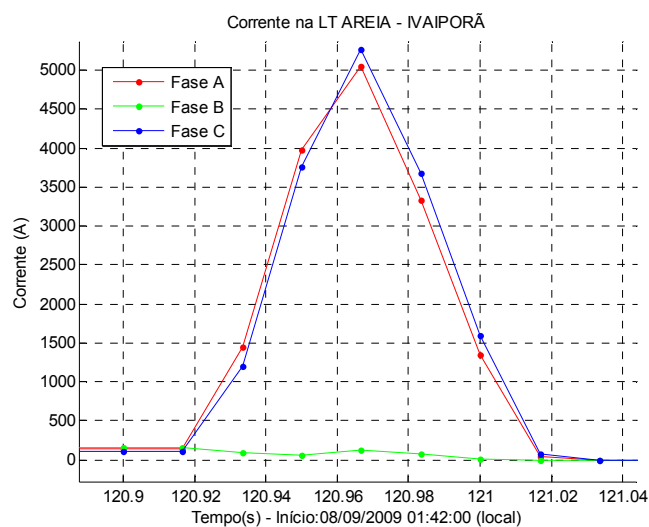


Figura 6.20: Corrente trifásica – Terminal de Areia – Curto-circuito: Fases A e C.

A Tabela 6.27 traz ilustrados os resultados obtidos a partir do Método de Brahma Alterado para este caso de falta do tipo fase-fase, entre as Fases A e C.

<b><i>Falta Fase-Fase (AC) – Método de Brahma Alterado</i></b>		
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>		
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>		<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
<i>Ponto 1:</i>	<i>130,0311</i>	<b>1°</b>
<i>Ponto 2:</i>	<i>134,4811</i>	
<i>Ponto 3:</i>	<i>148,7442</i>	
<i>Ponto 1:</i>	<i>62,5848</i>	<b>2°</b>
<i>Ponto 2:</i>	<i>63,6631</i>	
<i>Ponto 3:</i>	<i>66,1884</i>	
<i>Ponto 1:</i>	<i>79,5081</i>	<b>3°</b>
<i>Ponto 2:</i>	<i>78,8136</i>	
<i>Ponto 3:</i>	<i>81,2551</i>	
<i>Ponto 1:</i>	<i>90,1945</i>	<b>4°</b>
<i>Ponto 2:</i>	<i>69,9253</i>	
<i>Ponto 3:</i>	<i>67,7622</i>	
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>		
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>		<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
<i>Ponto 1: 90,5796 km</i>		<i>- 0,0695 %</i>
<i>Ponto 2: 86,7208 km</i>		<i>- 2,2975 %</i>
<i>Ponto 3: 90,9875 km</i>		<i>+ 0,1660 %</i>

Tabela 6.27: Estimativas – Método de Brahma Alterado – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia.

Observam-se variações elevadas da estimativa do ponto de falta, quando considerados diferentes ciclos pós-falta. As estimativas mais elevadas, adotando-se o Terminal *S* como referência, são verificadas no primeiro ciclo pós-falta. As menores estimativas, por sua vez, estão referenciadas ao segundo ciclo. O terceiro e o quarto ciclo pós-falta apresentam estimativas intermediárias. Constata-se que a utilização da média entre os quatro ciclos proporciona a obtenção dos resultados mais precisos para as estimativas.

A seguir, a Tabela 6.28 exhibe as estimativas do ponto de falta fornecidas pelo Método Proposto por Wang.

<b><i>Falta Fase-Fase (AC) – Método Proposto por Wang</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
<i>135,8163</i>	1°
<i>62,7698</i>	2°
<i>79,3959</i>	3°
<i>65,5547</i>	4°
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>	<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
<i>85,8842 km</i>	<i>- 2,7805 %</i>

Tabela 6.28: Estimativas – Método Proposto por Wang – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia.

O comportamento dos resultados apresentados por este método se mostra análogo à descrição realizada anteriormente para o Método de Brahma Alterado. A precisão da estimativa obtida a partir da média dos quatro ciclos pós-falta se verifica ligeiramente inferior à média referente ao método anterior.

Na Tabela 6.29, têm-se reunidos os resultados obtidos a partir do Método Proposto por Silveira.

<b><i>Falta Fase-Fase (AC) – Método Proposto por Silveira</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km)</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
<i>151,1279</i>	1°
<i>49,6176</i>	2°
<i>82,0271</i>	3°
<i>103,4387</i>	4°
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>	<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
<i>96,5528 km</i>	<i>+ 3,3792 %</i>

Tabela 6.29: Estimativas – Método Proposto por Silveira – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia.

Verificam-se, a partir da Tabela 6.29, resultados com as maiores variações nas estimativas do ponto de falta. A maior estimativa (*151,1279 km*) se relaciona ao primeiro ciclo pós-falta e o menor valor (*49,6176 km*), no entanto, ocorre quando utilizado o segundo ciclo. A estimativa calculada a partir da média dos quatro ciclos pós-falta apresenta a melhor precisão, como verificado nas demais metodologias.

Por fim, apresentam-se, na Tabela 6.30, os resultados das estimativas do ponto de falta obtidos a partir da Proposta de Benetti.

<b><i>Falta Fase-Fase (AC) – Proposta de Benetti</i></b>	
<b><i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado (km):</b>	<b>Ciclo Pós-Falta:</b>
<i>135,1487</i>	<b>1°</b>
<i>62,6773</i>	<b>2°</b>
<i>79,4520</i>	<b>3°</b>
<i>68,8437</i>	<b>4°</b>
<b><i>Média entre 1°, 2°, 3° e 4° Ciclos</i></b>	
<b>Ponto de Falta Estimado:</b>	<b>Erro Percentual da Estimativa:</b>
<i>86,5304 km</i>	<i>- 2,4074 %</i>

Tabela 6.30: Estimativas da Proposta de Benetti – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia.

Verifica-se que a Proposta de Benetti mantém, para cada ciclo, a estimativa predominante das metodologias anteriormente discutidas. Assim, o comportamento apresentado se mantém semelhante. Maior valor da estimativa relacionado ao primeiro ciclo pós-falta e menor valor quando utilizado o segundo ciclo. Sendo as estimativas associadas ao terceiro e quarto ciclo, as intermediárias. Considerando-se a média obtida a partir dos quatro ciclos pós-falta, obtém-se a precisão mais elevada.

De forma análoga à seção anterior, na Tabela 6.31, segue comparação entre os resultados obtidos a partir das implementações do Método Proposto por Johns e Jamali [74] e do Método Proposto por Dalcastagnê [57]. Na tabela, têm-se também as estimativas fornecidas pelo algoritmo da Eletrosul Centrais Elétricas S.A., que faz uso de informações referentes a apenas um dos terminais da linha.

<i>Falta Fase-Terra (AC)</i>		
<i>Estimação do Ponto de Falta – LT de 525 kV Ivaiporã - Areia</i>		
Média entre 1º, 2º, 3º e 4º Ciclos		
Metodologia	Estimativa	Erro Percentual
<i>Johns e Jamali:</i>	<i>98,4570 km</i>	<i>+ 4,4786 %</i>
<i>Dalcastagnê:</i>	<i>73,6290 km</i>	<i>- 9,8562 %</i>
Dados de Oscilografia a partir de Registradores de Perturbação		
Algoritmo Eletrosul	Estimativa	Erro Percentual
<i>Terminal de Ivaiporã:</i>	<i>78,5 km</i>	<i>- 7,0439 %</i>
<i>Terminal de Areia:</i>	<i>93,4 km</i>	<i>+ 1,5589 %</i>

Tabela 6.31: Estimativas comparativas do ponto de falta de diferentes metodologias – Falta AC – LT Ivaiporã - Areia.

Os resultados associados aos Métodos Propostos por Johns e Jamali e por Dalcastagnê, considerando-se a média obtida a partir dos quatro ciclos pós-falta, mostram resultados distantes, sendo a estimativa fornecida pelo Método Proposto por Johns e Jamali a mais precisa. Comparativamente ao curto-circuito do tipo fase-terra (Seção 6.4.1), houve uma deterioração na precisão dos resultados e um aumento na diferença do ponto estimado pelos métodos implementados.

Para este caso de falta do tipo fase-fase (Fases A e C), os Métodos Propostos por Johns e Jamali e por Dalcastagnê, individualmente para cada ciclo pós-falta, apresentaram comportamento análogo ao observado na falta entre a Fase A e a Terra. Ou seja, há uma dispersão nos resultados, havendo estimativas diferentes quando modificado o ciclo pós-falta considerado.

Acerca dos resultados obtidos a partir do algoritmo utilizado pela Eletrosul Centrais Elétricas S.A., verifica-se um aumento na precisão das estimativas e uma aproximação em relação ao ponto estimado a partir dos registros do Terminal de Ivaiporã e do Terminal de Areia. Tais comparações considerando-se os resultados referentes à Seção 6.4.1, para o caso do curto-circuito envolvendo a Fase C e a Terra.

## 6.5 Comentários Finais

Neste capítulo, foram descritas as implementações computacionais de algoritmos para a localização de faltas em LTs e apresentados os resultados obtidos a partir de diversos cenários de simulação.

Apresentou-se primeiramente a implementação do Método Proposto por Brahma, cujo conhecimento acerca dos parâmetros da LT se faz necessário. A partir desta metodologia, estendeu-se uma implementação a que se denominou Método de Brahma Alterado, onde se passou a estimar os parâmetros da linha e os equivalentes Thevenin.

Estas duas implementações, quando submetidas ao cenário de simulação descrito na Seção 6.3.1, onde os fasores são gerados a partir dos dados de oscilografia, calculando-se a DFT, passaram a apresentar um decréscimo na precisão das estimativas do ponto de falta. Em relação às diferenças angulares a que foram submetidos, em ambos os métodos, quanto maiores as diferenças, maiores foram os erros percentuais acerca da estimativa do ponto de falta.

O Método Proposto por Wang, apresentado na seqüência, mostrou-se bastante preciso, tanto nas simulações empreendidas a partir das configurações de falta expostas no Apêndice A, quanto nas simulações realizadas com fasores gerados a partir dos dados de oscilografia. Para este método, analisou-se o impacto de variações nas técnicas para a estimação dos parâmetros da LT, constatando-se que a Representação em Quadripolos se mostra a mais precisa. Referente à perda de sincronização angular entre os terminais da linha, este método se mostrou bastante sensível. Para desvios angulares da ordem de  $110^\circ$ , foram estimados pontos de falta fora das dimensões da LT.

O Método Proposto por Silveira, que se caracteriza pela sua independência em relação à sincronização dos terminais da linha, foi implementado utilizando-se a representação por Circuitos Equivalentes  $\pi$  de Seqüência para a estimação dos parâmetros da LT. Esta forma de representação se mostrou a mais precisa, o que fica evidenciado na Seção 6.3.2. Este método apresentou estimativas de falta bastante precisas para diversas condições de simulação testadas. Mesmo quando submetido à variação no processo de obtenção dos fasores e à inserção de desvios angulares, a precisão das estimativas se manteve elevada. Cabe salientar que, quando utilizados os valores conhecidos dos

parâmetros da linha, as estimativas do ponto de falta não se deterioram com a perda de sincronismo angular, o que corrobora as proposições feitas em seu equacionamento.

Como extensão dos métodos de localização de faltas implementados, apresentou-se a Proposta de Benetti, que se caracteriza pela combinação de tais métodos. Neste arranjo, são descartadas algumas estimativas do ponto de falta, obtendo-se, por fim, a média entre as duas estimativas restantes. Desta forma, obtém-se maior robustez no resultado, pois, caso haja valores de estimativas com erros grosseiros, tais valores são descartados, preservando-se a estimativa final.

Salienta-se que os erros percentuais absolutos associados às estimativas de falta das metodologias implementadas, em ambiente de simulação, estão associados a erros numéricos computacionais e a diferenças entre o modelo de linha empregado no *software* ATP e os modelos sob os quais as técnicas tiveram seus equacionamentos desenvolvidos.

Por fim, analisou-se, neste capítulo, o caso real de uma falta ocorrida no SIN e registrada pelo protótipo implementado no Projeto MedFasee Eletrosul. Obtiveram-se resultados bastantes satisfatórios referentes à estimativa do ponto de falta, dadas as condições reais de curto-circuito a que a LT foi submetida. Nesta ocorrência, evidencia-se a importância da consideração de diferentes ciclos posteriores ao início da falta, para a obtenção dos resultados das estimativas do ponto de falta. Para o caso real descrito, subdividido em um curto-circuito entre a Fase C e a Terra e posteriormente em um curto-circuito entre as Fases A e C, os quatro ciclos posteriores à ocorrência da falta proporcionaram resultados satisfatórios acerca das estimativas. Quanto às metodologias, verifica-se que a Proposta de Benetti vem a consolidar, para cada ciclo, as estimativas dos métodos individuais. A partir do valor obtido para cada ciclo, podem-se analisar quais os ciclos, em suas combinações, proporcionam as melhores estimativas.

No caso da falta entre a Fase C e a Terra, verifica-se que o Método Proposto por Silveira, quando considerados os quatro ciclos, proporciona a melhor estimativa. No entanto, para cada ciclo individual este método apresenta os resultados mais imprecisos, exceção feita ao terceiro ciclo. Por tanto, este método mostrou-se, para este caso, o mais instável. Utilizando-se as médias obtidas da consideração do terceiro e quarto ciclos, as precisões das estimativas do ponto de falta melhoraram significativamente, o que não se verifica somente no Método Proposto por Silveira. Com a Proposta de Benetti, utilizados o terceiro e quarto ciclos, obtém-se uma estimativa quase exata, com um erro percentual de

somente - 0,0864 % .

No curto-circuito entre as Fases A e C, para cada uma das metodologias, as estimativas do ponto de falta se modificam consideravelmente quando utilizados diferentes ciclos posteriores à falta. As amplitudes das estimativas são elevadas, quando considerados os quatro ciclos. As maiores variações foram observadas no Método Proposto por Silveira, cuja estimativa, para o primeiro ciclo, apresentou erro percentual de + 34,8891 % e, quando considerado o segundo ciclo, um erro de - 23,7196 %. Desta forma, tal método mostra ser, para este caso, novamente o mais instável. De maneira geral, os melhores resultados obtidos pelas metodologias são verificados quando se consideram os quatro ciclos posteriores ao início da falta. A partir da média obtida desta consideração, a Proposta de Benetti apresentou uma estimativa do ponto de falta com erro percentual de - 2,4074 %, o que se mostra bastante satisfatório.

Para o caso real de falta ocorrido no SIN, foram também expostos resultados referentes: às implementações dos Métodos Propostos por Johns e Jamali [74] e por Dalcastagnê [57], e ao algoritmo para localização de faltas utilizado pela Eletrosul Centrais Elétricas S.A. Comparando-se tais resultados aos obtidos pelas metodologias implementadas ao longo deste trabalho, pode-se verificar, para este caso real de falta analisado, a validação das implementações empreendidas.

Cabe ressaltar que os Métodos Propostos por Johns e Jamali e por Dalcastagnê foram abordados e estudados ao longo deste trabalho. Algoritmos em ambiente Matlab, baseados em tais metodologias, foram implementados e investigações acerca de diferentes cenários de simulação foram realizadas. A sua não utilização, no cenário proposto neste trabalho, fez-se em função da instabilidade dos parâmetros da LT, associados à constante de propagação ( $\gamma$ ) e à impedância característica ( $Z_c$ ), quando estimados a partir das informações fasoriais de tensão e corrente referentes aos terminais da linha.



# Capítulo 7

## Conclusões

Concluídas as implementações descritas no capítulo anterior, chega-se à finalização das etapas propostas neste trabalho. Dentre os objetivos iniciais descritos, a utilização da tecnologia de medição fasorial sincronizada, implementando-se metodologias de localização de faltas em Linhas de Transmissão, conduziu a resultados bastante satisfatórios e promissores. Acerca dos objetivos específicos apontados; referentes à análise do estado da arte da tecnologia de medição fasorial sincronizada, ao estudo de metodologias de localização de faltas em linhas, ao emprego de técnicas para a estimação dos parâmetros destas linhas, e ao desenvolvimento de algoritmos que concatenassem tais metodologias e técnicas; o escopo do trabalho contempla todos os itens.

Os capítulos, ao longo deste trabalho, foram segmentados na disposição descrita a seguir.

No Capítulo 1, realizou-se uma introdução acerca da estrutura de um sistema elétrico de potência. Enfatizou-se o contexto no qual estão inseridos, sua importância e relevância à vida moderna atual e situou-se o leitor com relação aos modelos que norteiam a indústria de energia elétrica, desde um apanhado histórico, até as tendências que se apresentam. Pode-se salientar o aumento da complexidade dos sistemas elétricos e a proximidade cada vez maior de limites operativos. Cenário este que aumenta o risco de grandes *blackouts* e a importância do aperfeiçoamento das ferramentas de monitoração. Posteriormente, apresentaram-se os principais elementos e características de um sistema de medição fasorial sincronizada. Por fim, foram descritos os objetivos gerais e específicos do trabalho e os capítulos que o constituem.

No Capítulo 2, abordou-se a tecnologia de medição fasorial sincronizada em detalhes. De forma inicial, tem-se a descrição do funcionamento de cada elemento que

constitui um sistema de medição fasorial sincronizada. Posteriormente foram discriminadas as implementações e os desenvolvimentos verificados na bibliografia. Realizou-se uma descrição do avanço e da consolidação desta tecnologia nos sistemas de energia elétrica dos Estados Unidos. Na seqüência, foram discorridas as experiências verificadas em outros países, observando-se graus diferentes de desenvolvimento. Na finalização desta etapa, foram contempladas as experiências ocorridas no Brasil e descrito o cenário atual que se observa. Pode-se verificar, tanto a nível internacional, quanto em referência ao Sistema Interligado Nacional, que a introdução da medição fasorial sincronizada nos sistemas de monitoração e controle de sistemas de potência é uma realidade. Esta inserção tem um caráter complementar às tecnologias já implementadas, agregando-se novas funções e possibilidades.

No Capítulo 3, foi realizada toda uma abordagem do tema de localização de faltas, situando-se o problema, salientando-se sua importância e apresentando-se as técnicas descritas na bibliografia. Inicialmente, foram citados os fatores que originam as faltas e qual a importância da rápida localização delas. Após, foram descritos os tipos possíveis de faltas e seus índices de ocorrência, abordando-se as classificações das metodologias de localização de faltas. O enfoque se deu com relação às metodologias baseadas em fasores da frequência fundamental. Foram introduzidos e discutidos seus princípios básicos e apresentados os modelos e o equacionamento, referentes a este tipo de metodologia. Por fim, foram referenciados os erros associados e as etapas necessárias à implementação de um algoritmo para a localização de faltas. Neste capítulo, o conteúdo exposto foi apresentado de uma forma tal, que contempla o avançar tecnológico e a introdução de novas ferramentas às metodologias. A partir disto, pode-se verificar que o desafio consiste no aproveitamento dos recursos tecnológicos disponibilizados para a melhoria das técnicas já empregadas, buscando-se a implementação de novas abordagens, antes não viáveis.

No Capítulo 4, foram apresentadas três metodologias de localização de faltas em Linhas de Transmissão, implementadas no trabalho. Todas elas baseadas em fasores da frequência fundamental dos dois terminais, sendo que, destas, duas necessitam que os fasores, referentes aos terminais da linha, estejam sincronizados. Na outra metodologia, no entanto, não é preciso que haja tal sincronização. Os equacionamentos das abordagens foram detalhados, partindo-se dos modelos e das considerações iniciais adotadas até a obtenção da equação final que fornece o ponto de estimação da falta na linha. Dentre os

dados necessários para a implementação das metodologias, têm-se os parâmetros característicos de uma linha. Isto motivou a investigação de técnicas para a estimação de tais parâmetros. Desta forma, utilizando-se valores processados e obtidos de maneira *on-line*, eliminam-se erros associados a projeto, alterações estruturais e modificações climáticas.

No Capítulo 5, foram detalhadas três técnicas para a estimação dos parâmetros de uma Linha de Transmissão. Em duas delas, utilizou-se a decomposição em componentes simétricos na elaboração do equacionamento. Na outra técnica, adotou-se uma abordagem trifásica, no que concerne às grandezas elétricas. Obtiveram-se, a partir das equações desenvolvidas, os valores das impedâncias série e das indutâncias em derivação da linha. De posse destes valores, as metodologias de localização de faltas, exploradas no Capítulo 4, puderam ser aplicadas. Neste cenário, os dados necessários para a implementação de algoritmos de localização de faltas consistem nos fasores trifásicos de corrente e tensão, provenientes de seus dois terminais.

No Capítulo 6, foram descritos os experimentos computacionais realizados e discutidos os resultados obtidos. Implementaram-se cinco diferentes algoritmos para a localização de faltas:

- Método Proposto por Brahma;
- Método de Brahma Alterado;
- Método Proposto por Wang;
- Método Proposto por Silveira;
- Proposta de Benetti.

A Proposta de Benetti consiste em uma combinação das demais metodologias implementadas. Construiu-se um arranjo tal que descarta algumas estimativas de falta, calculando-se a média final das duas estimativas restantes. Desta forma, agrega-se robustez ao resultado, pois caso um valor esteja contaminado por algum erro grosseiro, tal valor é descartado.

Os algoritmos de localização de faltas foram implementados no *software* Matlab, sendo as faltas, utilizadas para os testes, simuladas no *software Alternative Transients Program*. As implementações computacionais foram submetidas à análise da sensibilidade, frente três variações: processo de geração de fasores; técnicas para estimação dos

parâmetros da linha; e perda de sincronismo angular entre os terminais da linha.

Ao término do Capítulo 6, apresentou-se um caso real de falta, ocorrido no Sistema Interligado Nacional e registrado pelo protótipo do Projeto MedFasee Eletrosul.

Como contribuição deste trabalho, pode-se destacar a implementação de algoritmos para a localização de faltas em Linhas de Transmissão, que utilizam somente informações fasoriais trifásicas de tensão e corrente dos terminais da linha. Neste ambiente de desenvolvimento, considerando-se instaladas PMUs em ambos os terminais, os parâmetros da linha são estimados de maneira *on-line*, o que torna as metodologias implementadas independentes de registros históricos.

Cabe salientar o desenvolvimento, em particular, do Método de Brahma Alterado. A metodologia descrita na bibliografia teve o seu equacionamento alterado, a fim de que as informações necessárias para o seu processamento fossem as mesmas das outras metodologias abordadas. Os resultados evidenciaram êxito neste desenvolvimento.

Ressalta-se ainda a Proposta de Benetti, cuja implementação objetivou a inserção de robustez à estimativa do ponto de falta, prevendo-se o descarte de medidas contaminadas por erros grosseiros.

## 7.1 Sugestões para Desenvolvimentos Futuros

Dentre os aspectos a serem inseridos e aperfeiçoados nos algoritmos implementados neste trabalho, tem-se a detecção do instante de ocorrência da falta e o desenvolvimento de um aplicativo que colete os dados, provenientes de um sistema de medição fasorial sincronizada, em tempo real, processando-os e estimando-se o ponto de falta. Estas são questões pouco exploradas nas simulações e testes aqui empreendidos e que merecem ser investigadas em desenvolvimentos futuros.

Outro ponto a investigar-se diz respeito à consideração de outros modelos de Linha de Transmissão, para a avaliação do desempenho das metodologias implementadas. Modelos que considerem uma transposição entre suas fases não perfeita, que possuam compensações série ao longo de sua extensão, que sejam formados por mais de dois terminais e que contenham circuitos duplos.

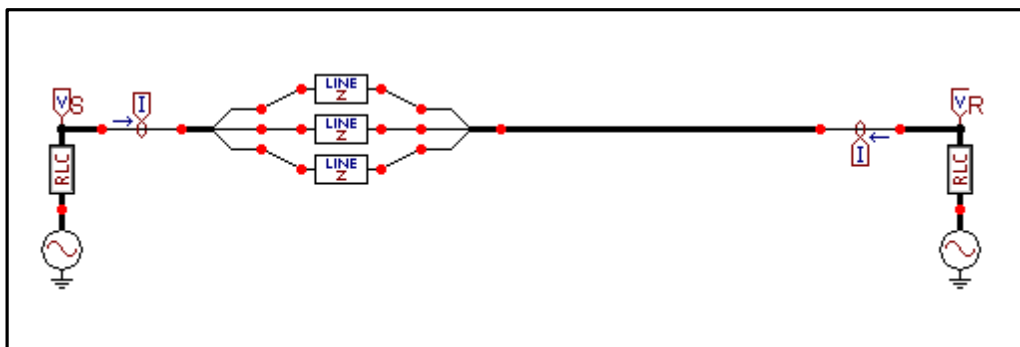
Por fim, em termos de desenvolvimentos futuros a serem realizados, pode-se salientar

o aprimoramento da metodologia associada à Proposta de Benetti. Neste trabalho, foram adotadas estimativas do ponto de falta associadas a um determinado ciclo posterior à ocorrência da falta e consideradas três metodologias de localização de faltas. Uma possibilidade de continuidade deste trabalho é a avaliação de um maior número de casos reais para a consolidação de quais metodologias de localização de faltas se mostram mais precisas e quantos ciclos pós-falta podem ser considerados, bem como quais apresentam os resultados mais precisos. A partir desta investigação de casos reais, poderá ainda ser realizado o ajuste e a definição de parâmetros estatísticos para a exclusão de medidas contaminadas com erros grosseiros.

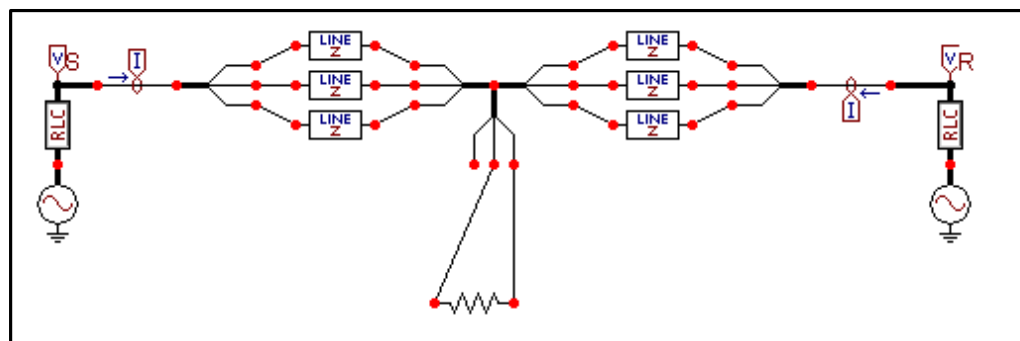
# Apêndice A

## Configurações das Faltas Simuladas no *Software ATP* para Obtenção dos Fasores

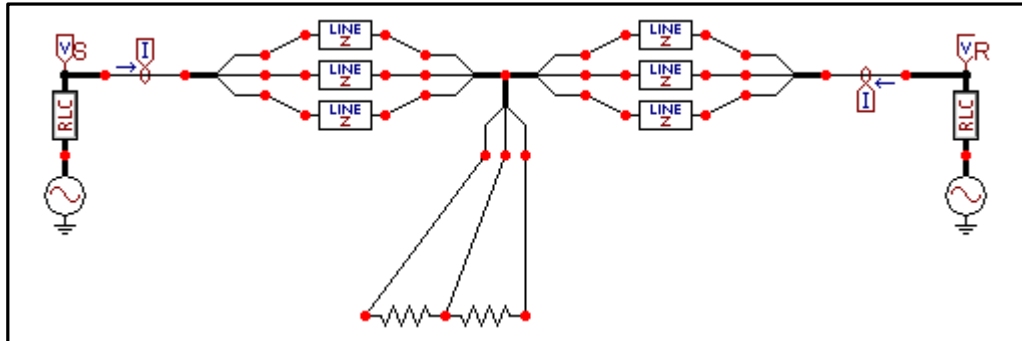
### A.1 Configuração Pré-Falta



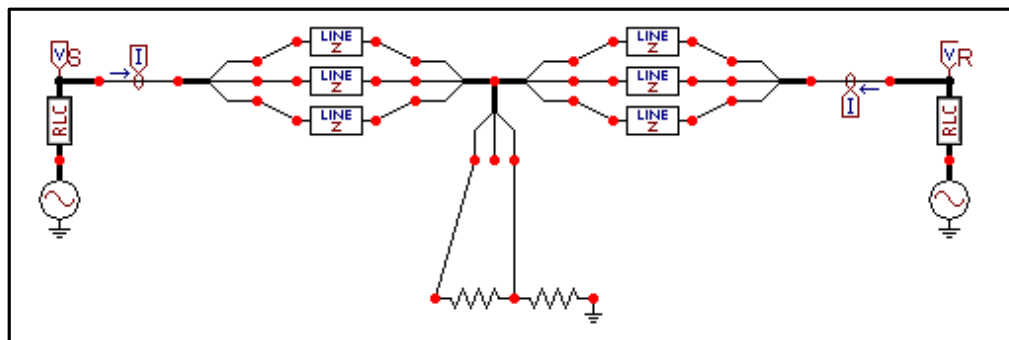
### A.2 Falta do Tipo AB



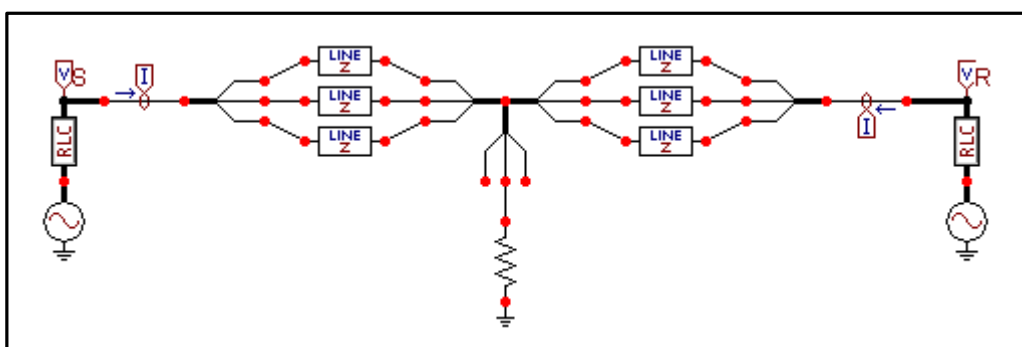
### A.3 Falta do Tipo ABC



### A.4 Falta do Tipo ACT



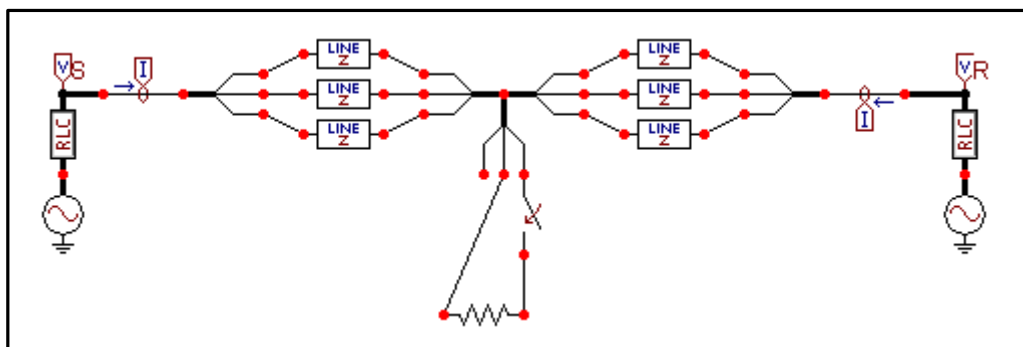
### A.5 Falta do Tipo BT



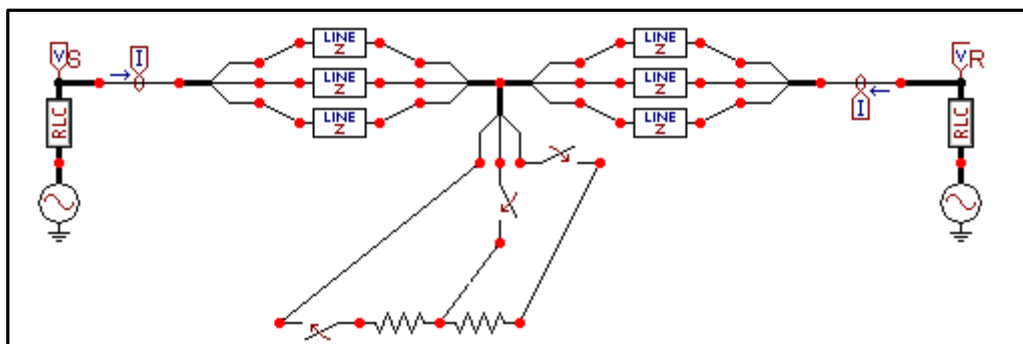
## Apêndice B

# Configurações das Faltas Simuladas no *Software* ATP para Obtenção dos Dados de Oscilografia

### B.1 Falta do Tipo AB

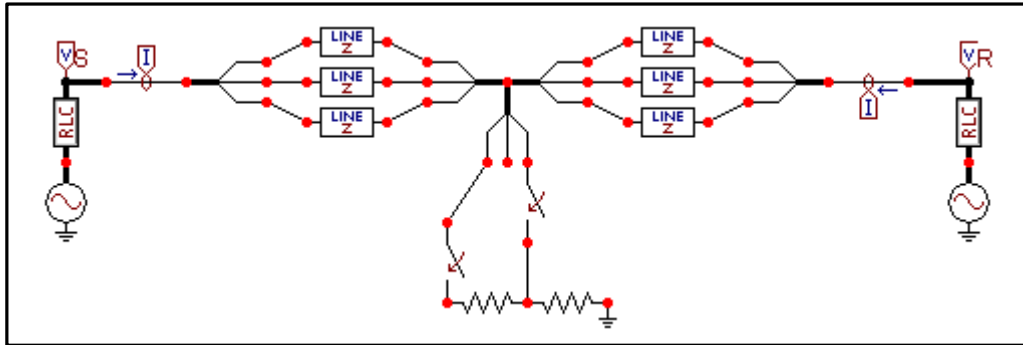


### B.2 Falta do Tipo ABC

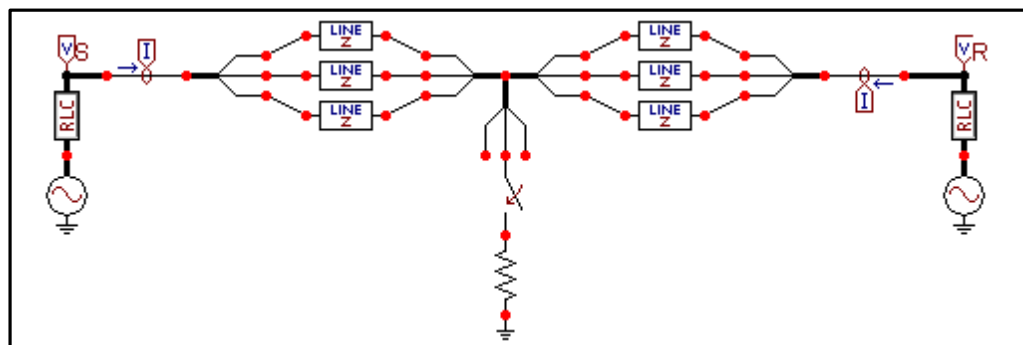




### B.3 Falta do Tipo ACT



### B.4 Falta do Tipo BT



# Referências Bibliográficas

- [1] Hunt, S.; Shuttleworth, G. *Competition and Choice in Electricity*, John Wiley & Sons Ltd, England, 1999.
- [2] Silva, E. L. *Formação de Preço em Mercados de Energia Elétrica*, Editora SagraLuzzatto, Porto Alegre – RS, 2001.
- [3] Penna, E. C. *Metodologia para Avaliação do Risco de Desligamento de Linhas de Transmissão*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2002.
- [4] *Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica – MedFasee*, Relatório Técnico Final, Florianópolis – SC, 2006.
- [5] Andersson, G.; Donalek, P.; Farmer, R. et al. *Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance*, IEEE Transactions on Power Systems, p. 1922-1928, Nov. 2005.
- [6] Dy-Liacco, T. E. *Control Centers Are Here To Stay*, IEEE Computer Applications in Power, p. 18-23, Oct. 2002.
- [7] Novosel, D.; Vu, K.; Centeno, V. et al. *Benefits of Synchronized-Measurement Technology for Power-Grid Applications*, HICSS 40<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 118-118, Jan. 2007.
- [8] Phadke, A. J.; Thorp, J. S. *History and Applications of Phasor Measurements*, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, p. 331-335, Nov. 2006.
- [9] Hu, Y.; Novosel, D. *Challenges in Implementing a Large-Scale PMU System*, PowerCon International Conference on Power System Technology, p. 1-7, Oct. 2006.
- [10] Ehrensperger, J. G. *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia*

- Elétrica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2004.
- [11] Martin, K. E.; Hauer, J. F.; Faris, T. J. *PMU Testing and Installation Considerations at the Bonneville Power Administration*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 1-6, June 2007.
- [12] Phadke, A. G. *Synchronized Phasor Measurements in Power Systems*, IEEE Computer Applications in Power, p. 10-15, Apr. 1993.
- [13] Mensah-Bonsu, C.; Heydt, G. T. *Real-Time Digital Processing of GPS Measurements for Transmission Engineering*, IEEE Transactions on Power Delivery, p. 177-182, Jan. 2003.
- [14] Decker, I. C.; Dotta, D.; Agostini, M. N. et al. *Performance of a Synchronized Phasor Measurements System in the Brazilian Power System*, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, p. 150-150, Nov. 2006.
- [15] Zuo, J.; Carroll, R.; Trachian, P. et al. *Development of TVA SuperPDC: Phasor Applications, tools, and Event Replay*, IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21<sup>st</sup> Century, p. 1-8, July 2008.
- [16] Yi, K. K.; Choo, J. B.; Yoon, S. H. et al. *Development of Wide Area Measurement and Dynamic Security Assessment Systems in Korea*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, p. 1495-1499, July 2001.
- [17] Liu, C.-W. *Phasor Measurement Applications in Taiwan*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, p. 490-493, Oct. 2002.
- [18] Dotta, D.; e Silva, A. S.; Decker, I. C. *Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay*, IEEE Transactions on Power Systems, p. 208-216, Feb. 2009.
- [19] Marini, R. L. V. *Uso da Medição Fasorial Sincronizada Visando a Melhoria da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2005.
- [20] Zadeh, K. N.; Meyer, R. C.; Cauley, G. *Practices and New Concepts in Power System Control*, IEEE Transactions on Power Systems, p. 3-10, Feb. 1996.

- [21] Cai, J. Y.; Huang, Z.; Hauer, J. F. et al. *Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, p. 1-7, 2005.
- [22] Hauer, J. F.; Mittelstadt, W. A.; Martin, K. E. et al. *Use of the WECC WAMS in Wide-Area Probing Tests for Validation of System Performance and Modeling*, IEEE Transactions on Power System, p. 250-257, Feb. 2009.
- [23] Bhargava, B. *Synchronized Phasor Measurement System Project at Southern California Edison Co*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, p. 16-22, July 1999.
- [24] Martin, K. E. *Phasor Measurement Systems in the WECC*, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, p. 132-138, Nov. 2006.
- [25] Donnelly, M.; Ingram M.; Carroll, J. R. *Eastern Interconnection Phasor Project*, IEEE Proceedings of the 39<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 245a-245a, Jan. 2006.
- [26] *IEEE Power Engineering Society 2008 General Meeting Control Center Issues NERC Reliability Standards Development*, Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21<sup>st</sup> Century, July 2008.
- [27] Galvan, F. *The Eastern Interconnect Phasor Project – Modernizing North America’s Electric Grid*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition , p. 1343-1345, May 2006.
- [28] Dagle, J. E. *North American SynchroPhasor Initiative*, IEEE 41<sup>st</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 7-10, Jan. 2008.
- [29] Dagle, J. E. *North American SynchroPhasor Initiative – An Uptade of Progress*, IEEE 42<sup>nd</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences, p. 1-5, Jan. 2009.
- [30] Min, J. *Phasor Measurement Applications in China*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, p. 485-489, Oct. 2002.
- [31] Wu, J. *New Implementations of Wide Area Monitoring System in Power Grid of China*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, p. 1-7, 2005.

- [32] Yang, Q.; Bi, T.; Wu, J. *WAMS Implementation in China and the Challenges for Bulk Power System Protection*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 1-6, June 2007.
- [33] Xie, X.; Xin, Y.; Xiao, J. et al. *WAMS Applications in Chinese Power Systems*, IEEE Power and Energy Magazine, p. 54-63, Feb. 2006.
- [34] Wu, J.; Zhou, J.; Zhang, D. et al. *PMU Standard of China*, IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, p. 639-641, Dec. 2008.
- [35] Saitoh, H. *GPS Synchronized Measurement Applications in Japan*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, p. 494-499, Oct. 2002.
- [36] Martínez, H.; Juárez, N.; Guzmán, A. et al. *Using Synchronized Phasor Angle Difference for Wide-Area Protection and Control*, Comisión Federal de Electricidad (CFE), México and Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) Inc., 2006.
- [37] Akk, M.; Karlsson, D. *Phasor Measurement Applications in Scandinavia*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, p. 480-484, Oct. 2002.
- [38] Leirbukt, A.; Breidablik, O.; Gjerde, J. O. et al. *Deployment of a SCADA Integrated Wide Area Monitoring System*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, p. 1-6, Aug. 2008.
- [39] Leirbukt, A. B.; Gjerde, J. O.; Korba, P. et al. *Wide Area Monitoring Experiences in Norway*, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, p. 353-360, Nov. 2006.
- [40] Uhlen, K.; Warland, L.; Gjerde, J. O. et al. *Monitoring Amplitude, Frequency and Damping on Power System Oscillations with PMU Measurements*, IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21<sup>st</sup> Century, p. 1-7, July 2008.
- [41] Rasmussen, J.; Jorgensen, P. *Synchronized Phasor Measurements of a Power System Event in Eastern Denmark*, IEEE Transactions on Power Systems, p. 278-284, Feb. 2006.
- [42] Skok, S.; Ivankovic, I.; Cerina, Z. *Applications Based on PMU Technology for Improved Power System Utilization*, IEEE Power Engineering Society

- General Meeting, p. 1-8, June 2007.
- [43] *Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement*, Working Group C4.601 – CIGRÉ, Aug. 2007.
- [44] Decker, I. C.; Agostini, M. N.; Dotta D. et al. *Sistema de Medição Fasorial Sincronizada: Desenvolvimentos e Aplicação na Monitoração de Frequência do Sistema Elétrico Brasileiro*, XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Out. 2005.
- [45] Decker, I. C.; Agostini, M. N.; Meyer, B. T. et al. *Experiências da Instalação e Monitoramento do Primeiro Sistema de Medição Fasorial Sincronizada Instalado no Sistema Interligado Nacional*, IX Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC, Jun. 2008.
- [46] Decker, I. C.; Dotta, D.; Agostini, M. N. et al. *Installation and Monitoring Experiences of the First Synchronized Measurement System in the Brazilian National Grid*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, p. 1-7, Aug. 2008.
- [47] Santos, M. M. *Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2008.
- [48] Dotta, D. *Controle Hierárquico Usando Sinais de Medição Fasorial Sincronizada*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2009.
- [49] Volskis, H.; Mano, R.; Sollero, R. et al. *Aplicações de PMU e seu Impacto na Operação do SIN*, X Encontro para Debates de Assuntos de Operação – EDAO, Nov. 2008.
- [50] Rodrigues, M.; Volskis, H.; Sollero, R. et al. *Análise de sincrofasores para detecção de oscilações em sistemas elétricos interligados*, IX Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC, Jun. 2008.
- [51] Silva, E. L.; Ortiz, J. M.; Oliveira, G. C. et al. *Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach*, IEEE Transactions on Power System, p. 62-68, Feb. 2001.
- [52] Domijian, A.; Heydt, G. T.; Meliopoulos, A. P. et al. *Directions of Research on Electric Power Quality*, IEEE Transactions on Power Delivery, p. 429-

- 436, Jan. 1993.
- [53] Melhorn, C. J.; McGranaghan, M. F. *Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements*, IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, p. 1-9, May 1995.
- [54] Hussain, A.; Sukairi, M. H.; Mohamed, A. et al. *Automatic Detection of Power Quality Disturbances and Identification of Transient Signals*, IEEE International Symposium on Signal Processing and its Applications, p. 462-465, Aug. 2001.
- [55] Arrillaga, J.; Bollen, M. H.; Watson, N. R. *Power Quality Following Deregulation*, Proceedings of the IEEE, p. 246-261, Feb. 2000.
- [56] Gross, C. A. *Power System Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [57] Dalcastagnê, A. L. *Método Iterativo para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão a partir de Fasores Não-Sincronizados*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2007.
- [58] Machado, J. M; Junior, G. C.; Nunes, M. A. et al. *Avaliação Técnica dos Afundamentos de Tensão no Sistema de Transmissão da Eletronorte*, VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, Ago. 2005.
- [59] Oliveira, T. C.; Abreu, J. G.; Filho, J. C. et al. *Estimação de Parâmetros de Afundamentos de Tensão*, VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica – SBQEE, Ago. 2005.
- [60] Tang, Y.; Wang, H. F.; Aggarwal, R. K. et al. *Fault Indicators in Transmission and Distribution Systems*, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, p. 238-243, Apr. 2000.
- [61] Sekine, Y.; Akimoto, Y.; Kunugi, M. et al. *Fault Diagnosis of Power Systems*, Proceedings of the IEEE, p. 673-683, May 1992.
- [62] Järventausta, P.; Verbo, P.; Partanen, J. *Using Fuzzy Sets to Model the Uncertainty in the Fault Location Process of Distribution Networks*, IEEE Transactions on Power Delivery, p. 954-960, Apr. 1994.
- [63] Hsu, Y.-Y., Lu, F. C.; Chien, Y. et al. *An Expert System for Locating Distribution System Faults*, IEEE Power Engineering Review, p. 62, Jan.

- 1991.
- [64] Novosel, D.; Bachmann, B.; Hart, D. et al. *Algorithms for Locating Faults on Series Compensated Lines Using Neural Network and Deterministic Methods*, IEEE Transactions on Power Delivery, p. 1728-1736, Oct. 1996.
- [65] Xiangjun, Z.; Li, K. K.; Zhengyi, L. et al. *Fault Location Using Traveling Wave for Power Networks*, IEEE Industry Applications Conference, p. 2426-2429, Oct. 2004.
- [66] Sneddom, M.; Gale, P. *Fault Location on Transmission Lines*, IEE Colloquium on Operational Monitoring of Distribution and Transmission Systems, p. 2/1-2/3, Jan. 1997.
- [67] Chunju, F.; Xiuhua, D.; Shengfang, L. et al. *An Adaptive Fault Location Technique Based on PMU for Transmission Line*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 1-6, June 2007.
- [68] Takagi, T.; Yamakoshi, Y.; Baba, J. et al. *A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHT Transmission Lines: Part II – Laplace Transform Method*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p. 564-573, Mar. 1982.
- [69] Stevenson Jr. W. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, Editora McGraw-Hill, São Paulo – SP, 1986.
- [70] Hedman, D. E. *Transmission Line Theory – I*, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 1979.
- [71] Din, E. S.; Gilany, M.; Aziz, M. M. et al. *An PMU Double Ended Fault Location Scheme for Aged Power Cables*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, p. 80-86, June 2005.
- [72] Zimmerman, K.; Costello, D. *Impedance-Based Fault Location Experience*, IEEE Rural Electric Power Conference, p. 1-16, 2006.
- [73] Silveira, E. G. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento de Novos Algoritmos e Implementação de Sistema Computacional para Aplicações Práticas*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.
- [74] Johns, A. T.; Jamali, S. *Accurate fault location technique for power transmission lines*, IEEE Proceedings – Generation, Transmission and



- Distribution, p. 395-402, Nov. 1990.
- [75] Manassero Jr. G. *Sistema para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão com Subestações Conectadas em Derivação*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2006.
- [76] Brahma, S. M.; Girgis, A. A. *Fault Location on a Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, p. 1619-1622, Oct. 2004.
- [77] Wang, C.; Jia, Q.-Q.; Li, X.-B. et al. *Fault location using synchronized sequence measurements*, Electrical Power and Energy Systems, p. 134-139, June 2007.
- [78] Wang, C.; Dou, C.-X.; Li, X.-B. et al. *A WAMS/PMU-based fault location technique*, Electric Power Systems Research, p. 936-945, Aug. 2006.
- [79] Abaide, A. R. *Transmissão de Energia Elétrica I*, Notas de Aula – Graduação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2005.
- [80] Gray, P. R.; Hurst, P. J.; Lewis, S. H. et al. *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [81] Salgado, R. S. *Aspectos Estáticos do Controle de Sistemas de Potência*, Notas de Aula – Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2007.
- [82] Issicaba, D. *Desenvolvimento de Metodologias e Aplicações para a Análise das Condições de Operação do Sistema Interligado Nacional utilizando Medição Fasorial Sincronizada*, Relatório Final – Bolsa de Desenvolvimento Tecnológico Industrial, Florianópolis – SC, 2008.