



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos



Dissertação de Mestrado

Análise Comparativa entre Métodos de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão via RTDSTM

Área de Concentração: Processamento da Energia

Proponente: Yonatha Marques Pereira de Melo
Orientadores: Washington L. A. Neves, Ph.D.
Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Yonatha Marques Pereira de Melo, Outubro de 2013.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos

Análise Comparativa entre Métodos de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão via RTDS™

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

Área de Concentração: Processamento da Energia

PROPONENTE:

Yonatha Marques Pereira de Melo

ORIENTADORES:

Washington Luiz Araújo Neves

Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande – Paraíba – Outubro de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M528a

Melo, Yonatha Marques Pereira de.

Análise comparativa entre métodos de localização de faltas em linhas de transmissão via RTDS™ / Yonatha Marques Pereira de Melo. – Campina Grande, 2013.

74 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2013.

"Orientação: Prof. Ph.D. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. D.Sc. Damásio Fernandes Júnior".

Referências.


1. Linhas de Transmissão - Faltas. 2. Transitórios Eletromagnéticos. 3. Ondas Viajantes. 4. Componentes de Frequência Fundamental. 5. RTDS™. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Fernandes Júnior, Damásio. III. Título.

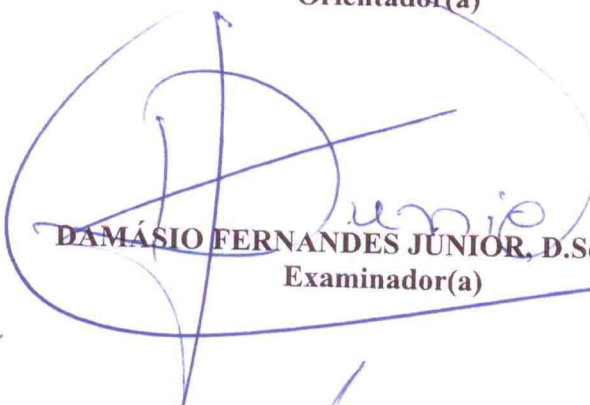
CDU 621.372.2(043)


**"ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO VIA RTDS TM"**

YONATHA MARQUES PEREIRA DE MELO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/10/2013


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)


DAMÁSIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Aos meus pais, Bismarck e Clores,
que sempre me apoiaram ao longo
desta caminhada, DEDICO.

Yonatha Marques Pereira de Melo

Agradecimentos

A Deus por me dar forças, sabedoria e paciência para enfrentar os momentos mais difíceis, por ter colocado pessoas em meu caminho que estão sempre dispostas a me auxiliar e animaizinhos que estavam sempre dispostos a me alegrar e amar.

Aos meus pais, Bismarck e Clores, e minha irmã Yamê por toda dedicação, pelo amor, companheirismo, pelas palavras de apoio e incentivo constantes.

À todos os familiares e amigos que foram tomados de mim, mas que estão e estarão sempre guardados em minha memória e aos quais serei sempre grata por tantos momentos de alegria e apoio, em especial a minha avó Albertina (*In Memoriam*), a minha tia Iane (*In Memoriam*) e minha tia Giessen (*In Memoriam*).

À minha tia Maria de Lourdes, minha tia Celeida e a todo o restante de minha família: tias, tios, primos e primas por tantos momentos de união, descontração e apoio.

A Daphne por sua amizade de longa data, pelo auxílio constante, pelas palavras de incentivo e toda compreensão.

A Rodrigo Massao pela confiança em mim depositada, pelos sorrisos, por tanto apoio, por todo amor e por toda a paz transmitida apenas por estar em sua companhia.

Aos professores Washington Luiz Araújo Neves e Damásio Fernandes Júnior pela orientação e pela amizade.

Aos amigos Raphael, Helder, João Cabral, Jamile, Mariana, Pedro, Raphaela e todos os amigos dos tempos de graduação do período 2006.1 por todo apoio, força e amizade.

A Célio Anésio, Felipe Lopes e demais colegas do LARCA/GSE por todo auxílio e pela paciência para retirar as dúvidas que surgiram ao longo deste trabalho.

Aos amigos do LIEC, Agripino, Maurício e Tony, que tanto me auxiliaram e tantos sorrisos me proporcionaram.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A Ângela e os demais funcionários da COPELE pela presteza e atenção a mim dedicadas.

Yonatha Marques Pereira de Melo

Sumário

Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas	vii
Glossário.....	ix
Lista de Símbolos	xi
Resumo	xiv
Abstract	xv
Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Contribuições.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura da Dissertação.....	3
Revisão Bibliográfica	4
2.1 Métodos de Localização de Faltas em LTs Baseados na Análise de Componentes de Frequência Fundamental.....	4
2.1.1 TAKAGI <i>et al.</i> (1982).....	5
2.1.2. JOHNS & JAMALI (1990).....	7
2.1.3. GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	9
2.1.4. RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009).....	11
2.2. Métodos de Localização de Faltas em LTs Baseados na Teoria das Ondas Viajantes	12
2.2.1. GALE <i>et al.</i> (1993).....	12
2.2.2. JIAN <i>et al.</i> (1998).....	14
2.2.3. LOPES (2011)	16
2.3. Métodos de Localização de Faltas em LTs Mistos.....	17
2.3.1. CRUZ (2010).....	17
2.4. Síntese Bibliográfica	18
Fundamentação Teórica	19
3.1. Faltas em Linhas de Transmissão	19
3.2. Detecção de Faltas por meio da Transformada de Park (Tdq0)	21
3.3. Detecção de Faltas por meio da Transformada <i>Wavelet</i>	25
3.4. Filtragem	26
3.5. Estimação Fasorial.....	27

Simulações em Tempo Real	29
4.1. <i>Hardware</i> do RTDS™	30
4.1.1. <i>Giga Transceiver Workstation Interface Card (GTWIF)</i>	31
4.1.2. <i>Giga Processor Card (GPC)</i>	32
4.1.3. <i>Gigabit Transceiver – Input/Output (GT-I/O)</i>	33
4.2. <i>Software</i> do RTDS™	35
4.2.1. <i>File Manager</i>	35
4.2.2. <i>Draft</i>	36
4.2.3. <i>T-Line</i>	37
4.2.4. <i>Runtime</i>	38
4.2.5. <i>C-Builder</i>	38
Implementação dos Métodos de Localização	40
5.1. Implementação no ATP e no MATLAB®	40
5.1.1. Implementação do Método LOPES (2011) no MATLAB®	41
5.1.2. Implementação do Método CRUZ (2010) no MATLAB®	42
5.2. Implementação dos Métodos no RSCAD	43
Análise dos Resultados.....	45
6.1. Cálculo dos Erros de Localização de Falta	45
6.2. Resultados <i>Off-line</i>	46
6.3. Resultados via RTDS™	50
Conclusões.....	61
Referências Bibliográficas	63
Apêndice A	66
Apêndice B	70

Lista de Figuras

Figura 2.1: Falta em um circuito monofásico analisada pelo método de TAKAGI <i>et al.</i> (1982).....	5
Figura 2.2: Erros de localização de faltas pelo método de TAKAGI <i>et al.</i> (1982).	6
Figura 2.3: Análise de uma falta em uma LT de dois terminais proposta por JOHNS & JAMALI (1990).....	7
Figura 2.4: Análise de uma falta em uma LT de dois terminais proposta por GIRGIS <i>et al.</i> (1992).....	9
Figura 2.5: Análise de uma falta em uma LT proposta por RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009). 12	
Figura 2.6: Diagramas de reflexões para faltas em LTs.....	13
Figura 2.7: Esquema de diferentes velocidades de propagação das ondas viajantes.....	15
Figura 2.8: Detecção de transitórios usando a Tdq0: (a) Tensão trifásica; (b) Coeficientes $[C_{dif}]^2$	17
Figura 3.1: Diagrama dos eixos referenciais obtidos via Tdq0.	22
Figura 3.2: Detecção de transitórios: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Energia ξ_{dif}	24
Figura 3.3: Filtro passa-baixas do tipo Butterworth.	27
Figura 4.1: <i>Racks</i> típicos do RTDS TM	31
Figura 4.2: Cartão GTWIF.	32
Figura 4.3: Cartão GPC.....	32
Figura 4.4: Cartões para a entrada e saída de sinais analógicos e digitais: (a) GTA0; (b) GTAI; (c) GTDO; (d) GTDI.....	34
Figura 4.5: Cartão GTFPI.....	34
Figura 4.6: Cartão GTNET.....	35
Figura 4.7: Arquivos contidos no <i>File Manager</i> do RSCAD.....	36
Figura 4.8: Tela do módulo <i>Draft</i> do RSCAD.	37
Figura 4.9: Tela do módulo <i>T-Line</i> do RSCAD.	37
Figura 4.10: Tela do módulo <i>Runtime</i> do RSCAD.....	38
Figura 4.11: Tela do módulo <i>C-Builder</i> do RSCAD.	39
Figura 6.1: Comparação entre os métodos proposto por LOPES (2011) e CRUZ (2010) sem compensação série na LT.	48
Figura 6.2: Comparação entre os métodos proposto por LOPES (2011) e CRUZ (2010) com compensação série nos dois terminais da LT.....	49
Figura 6.3: Diagrama da divisão dos casos simulados.....	51

Figura 6.4: Localização de faltas para a LT real variando os ângulos de incidência de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.	52
Figura 6.5: Localização de faltas para a LT fictícia variando os ângulos de incidência de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.	53
Figura 6.6: Localização de faltas para a LT real variando as resistências de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.	54
Figura 6.7: Localização de faltas para a LT fictícia variando as resistências de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.	54
Figura 6.8: Localização de faltas para a LT real variando os tipos de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.	56
Figura 6.9: Localização de faltas para a LT fictícia variando os tipos de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.	56
Figura 6.10: Localização de faltas para a LT real variando os locais de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.	57
Figura 6.11: Localização de faltas para a LT fictícia variando os locais de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.	58
Figura A.1: Diagrama do sistema CHESF simplificado de 230 kV.	66
Figura A.2: Modelo do TPC utilizado para estimar os parâmetros R, L e C lineares. ...	67

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação dos métodos de localização de faltas em LTs do tipo A, B, C e D.....	13
Tabela 2.2: Resumo da revisão bibliográfica referente à localização de faltas em LTs.	18
Tabela 4.1: Resumo dos principais tipos de cartões presentes no RTDS TM e suas funções.	31
Tabela 6.1: Detecção de faltas pela Transformada de Park sem compensação série.	47
Tabela 6.2: Detecção de faltas pela Transformada <i>Wavelet</i> sem compensação série.....	47
Tabela 6.3: Detecção de faltas pela Transformada de Park com compensação série.	48
Tabela 6.4: Detecção de faltas pela Transformada <i>Wavelet</i> com compensação série. ...	49
Tabela 6.5: Casos simulados no RTDS TM	51
Tabela 6.6: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs – Ângulos de Incidência de Falta.	59
Tabela 6.7: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs – Ângulos de Incidência de Falta.	59
Tabela 6.8: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série – Ângulos de Incidência de Falta.	59
Tabela 6.9: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série – Ângulos de Incidência de Falta.	60
Tabela A.1: Dados de sequência para a LT 04M1 do sistema CHESF.	66
Tabela A.2: Dados de sequência para a linha fictícia.	66
Tabela A.3: Dados das fontes para $V_{Base} = 230$ kV.....	67
Tabela A.4: Componentes de sequência das impedâncias das fontes.....	67
Tabela A.5: Parâmetros de um TPC de 230 kV (FERNANDES Jr., 2003).....	68
Tabela A.6: Dados da curva de saturação de TC de 230 kV.....	69
Tabela B.1: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs - Resistências de Falta.....	70
Tabela B.2: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs - Resistências de Falta.....	70
Tabela B.3: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série - Resistências de Falta.....	70
Tabela B.4: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série - Resistências de Falta.....	71

Tabela B.5: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs - Tipos de Falta	71
Tabela B.6: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs - Tipos de Falta	71
Tabela B.7: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série - Tipos de Falta	72
Tabela B.8: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série - Tipos de Falta	72
Tabela B.9: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs - Locais de Falta...	73
Tabela B.10: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs - Locais de Falta.	73
Tabela B.11: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série - Locais de Falta.	74
Tabela B.12: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série - Locais de Falta.	74

Glossário

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
BNB	Banabuiú.
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CBuilder	<i>Component Builder.</i>
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco.
COPELE	Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
CSF	Circuito supressor de ferorrressonância.
DSP	<i>Digital Signal Processor.</i>
EMTP	<i>Eletromagnetic Transients Program.</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
GBH	<i>Global Bus Hub.</i>
GC	Grau de compensação.
GOOSE	<i>Generic Object Oriented System Events.</i>
GPC	<i>Giga Processor Card.</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
GSE	Grupo de Sistemas Elétricos.
GSSE	<i>Generic Substation Status Event.</i>
GTFPI	<i>Gigabit Transceiver Front PaineL Interface Card.</i>
GT-I/O	<i>Giga Transceiver - Input/Output.</i>
GTNET	<i>Gigabit Transceiver Network Interface System Card.</i>
GTWIF	<i>Giga Transceiver Workstation InterFace.</i>
GUI	<i>Graphical User Interface.</i>
IED	<i>Intelligent Eletronic Devices.</i>
LAN	<i>Local Area Network.</i>
LARCA	Laboratório de Referência em Controle e Automação.
LIEC	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle.
LT(s)	Linha(s) de transmissão.
MATLAB[®]	<i>Matrix Laboratory.</i>
MLG	Milagres.
RDP	Registrador digital de perturbação.

RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer.</i>
RTDSTM	<i>Real Time Digital Simulator.</i>
SEP	Sistema elétrico de potência.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
TC	Transformador de corrente.
TDCM	Transformada Discreta de Cosseno Modificado.
TDF	Transformada Discreta de Fourier.
Tdq0	Transformada de Park.
TI	Transformador para instrumentos.
TLine	<i>Transmission Line.</i>
TNA	<i>Transient Network Analyzer.</i>
TP	Transformador de potencial.
TPC	Transformador de potencial capacitivo.
TW	Transformada <i>Wavelet</i> .
TWC	Transformada <i>Wavelet</i> Contínua.
TWD	Transformada <i>Wavelet</i> Discreta.
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande.

Lista de Símbolos

a	Variável inteira que indica o número de amostras do sinal de entrada
a_0	Parâmetro de dilatação fixo.
b_0	Fator de translação.
c	Velocidade da luz.
C_{dif}	Coefficiente utilizado para detecção de faltas.
$C_{dif}(n)$	N-ésima amostra do sinal C_{dif} .
C_m	Capacitância da linha de transmissão por unidade de comprimento (F/km).
d	Local do ponto de falta, em km.
d_2	Local de falta após compensação.
$d_{estimada}$	Local de falta estimado pelo algoritmo localizador.
d_{real}	Local real do ponto de falta.
$d_s(n)$	Sinal com ruído.
$d'_s(n)$	Sinal sem ruído.
EA	Erro absoluto.
E_{ad}	Erro Admissível.
ER	Erro Relativo.
F_s	Frequência de amostragem dos RDPs.
G	Ganho aplicado aos coeficientes C_{dif} .
G_m	Condutância por unidade de comprimento (mho/km).
i	Índice da amostra para a situação em que o $[C_{dif}]^2$ ultrapassa o limiar.
I_{abc1}	Fasor de corrente trifásica na linha.
I_{abc2}	Fasor de corrente trifásica na linha.
I_R	Fasores de corrente no domínio modal sincronizados no tempo.
I_R^N	Fasor de corrente de sequência negativa do terminal R.
I_R^P	Fasor de corrente de sequência positiva do terminal R.
I_S	Fasor de corrente no terminal S.
I_S''	Diferença entre a corrente pré-falta e a corrente após a falta no terminal S.
$I_S''^*$	Conjugado da corrente I_S'' .
I_S^N	Fasor de corrente de sequência negativa do terminal S.
I_S^P	Fasor de corrente de sequência positiva do terminal S.

I_{SF}''	Corrente de falta oriunda do terminal S.
k	Índice que varia de 0 a $2N - 1$.
k_0	Parâmetro inteiro que pertence ao intervalo aberto de 0 e N .
k_1	Parâmetro relacionado a k_0 , pela soma $k_0 + \frac{1}{2}$.
l	Comprimento da LT, em km.
L_m	Indutância da linha de transmissão por unidade de comprimento (H/km).
m	Modo do domínio modal considerado.
n	Número de coeficientes de decomposição.
N	Número de amostras por ciclo.
R_m	Resistência da linha de transmissão por unidade de comprimento (Ω /km).
t	Instante de tempo em análise.
t_{11}	Instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 1.
t_{12}	Instante de chegada da onda refletida no ponto da falta à Barra 1.
t_{21}	Instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 2.
t_{22}	Instante de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à Barra 2.
t_{22r}	Instante de chegada da onda refratada no ponto da falta à Barra 1.
t_{23}	Instante de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à Barra 2.
$t_{transitório}$	Instante de detecção da falta.
v	Velocidade de propagação das ondas viajantes.
V_0	Tensão desacoplada do modo terra.
v_1	Tensão no domínio modal.
V_1	Velocidade de propagação da onda incidente na Barra 1.
v_2	Tensão no domínio modal.
V_2	Velocidade de propagação da onda incidente na Barra 2.
v_3	Tensão no domínio modal.
v_a	Tensão no domínio de fase.
V_{abc1}	Fasor da tensão trifásica no terminal 1.
V_{abc2}	Fasor da tensão trifásica no terminal 2.
v_b	Tensão no domínio de fase.
v_c	Tensão no domínio de fase.
V_c	Velocidade de propagação da onda viajante aproximada.
V_d	Componente da tensão de eixo direto, obtida pela Tdq0.

$V_d(k)$	k-ésima amostra do sinal V_d .
V_F	Fasor de tensão no ponto de falta.
$V_{F_{abc}}$	Tensão no local da falta.
V_q	Componentes de eixo quadratura.
V_R	Fasores de tensão no terminal R.
V_R^N	Fasor de tensão de sequência negativa do terminal R.
V_R^P	Fasor de tensão de sequência positiva do terminal R.
V_S	Fasor de tensão no terminal S.
V_S''	Diferença entre a tensão pré-falta e a tensão após a falta.
V_S^N	Fasor de tensão de sequência negativa do terminal S.
V_S^P	Fasor de tensão de sequência positiva do terminal S.
V_α	Tensão desacoplada do modo aéreo.
V_β	Tensão desacoplada do modo aéreo.
X_C	Reatância capacitiva inserida na LT.
X_L	Reatância indutiva total dos condutores.
$x(n)$	n -ésima amostra do sinal de tensão ou corrente digitalizado.
y	Parâmetro inteiro.
Z	Impedância da LT por unidade de comprimento.
Z_{abc}	Matriz de impedância série por unidade de comprimento da linha.
Z_c	Impedância característica da LT.
Z_S	Impedância de surto da LT por unidade de comprimento.
β	Parte imaginária da constante de propagação.
γ	Constante de propagação da LT.
Δt	Período de amostragem dos sinais analisados.
η	Coefficiente do equacionamento proposto em JIAN <i>et al.</i> (1998).
η_s	Limiar baseado no máximo valor absoluto dos coeficientes.
θ	Ângulo de fase da tensão de eixo direto V_d .
$\xi_{dif}(k)$	Energia da k -ésima janela.
ω	Frequência angular fundamental do sistema.

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma análise comparativa entre quatro métodos de localização de faltas em linhas de transmissão. Os métodos de localização de faltas analisados se dividem em dois grupos: o método baseado na teoria das ondas viajantes e o método baseado na análise dos componentes de frequência fundamental. O primeiro grupo de métodos necessita que a falta seja previamente detectada por meio da análise dos transitórios eletromagnéticos, sendo utilizada para a detecção, a Transformada de Park. Em seguida, aplica-se o algoritmo localizador propriamente dito. O segundo grupo de métodos de localização de faltas em linhas de transmissão requer a filtragem dos sinais seguida da estimação fasorial, que foi realizada utilizando-se o filtro cosseno modificado. Os algoritmos de todos os métodos foram implementados no RSCAD, que é o *software* do RTDSTM (*Real-Time Digital Simulator*). As simulações em tempo real foram realizadas variando-se diversas condições de falta, como: o local da falta, a resistência de falta, o ângulo de incidência e o tipo de falta. Os estudos realizados durante a pesquisa permitiram destacar os métodos mais adequados para a localização de faltas usando tanto a análise dos componentes de frequência fundamental quanto a teoria das ondas viajantes.

Palavras-Chave: Faltas em linhas de transmissão; localização de faltas; transitórios eletromagnéticos; métodos baseados na teoria das ondas viajantes; métodos baseados na análise dos componentes de frequência fundamental; simulação em tempo real; RTDSTM.

Abstract

This work presents a comparison of four methods used to locate faults on transmission lines. The algorithms to locate faults are divided into two groups: the first group's methods is based on the travelling waves' theory and the second group's methods is based on steady-state short-circuit analysis, also named as phasor measurement unit (PMU) methods. The first group uses Park's transformation to detect electromagnetic transients induced by faults. Then the locator algorithm itself is applied. The second group uses a lowpass filter to pick up only fundamental frequency components and, finally, the Modified Discrete Cosine Transform to estimate current and voltage phasors. The comparison between such methods is performed through digital fault simulations using the software RSCAD. The real-time simulations were carried out varying the fault conditions, such as: the fault resistance, the fault type, the fault location and the angle of incidence of the fault. Studies conducted during the research allowed to highlight the most appropriate methods for locating faults, using both the PMU methods and the travelling waves' theory method.

Keywords—Transmission lines; fault location; Park's transformation; electromagnetic transients; travelling waves' theory; technique based on phasor measurement unit; RTDSTM (Real-Time Digital Simulator).

Capítulo 1

Introdução

As linhas de transmissão (LTs) constituem uma parte do sistema elétrico de potência (SEP) de grande importância, visto que estas são as responsáveis pela interligação do sistema de geração de energia elétrica ao sistema de distribuição. Portanto, é imprescindível que as LTs operem adequadamente para que o fornecimento de energia elétrica não seja cessado. Na ocorrência de faltas nas LTs, é importante que os locais dos defeitos sejam identificados o mais rápido possível, garantindo uma boa continuidade de serviço e evitando multas aplicadas pela agência fiscalizadora do sistema elétrico nacional, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

As faltas são geralmente classificadas como desligamentos não programados de seus componentes e podem ser ocasionadas por motivos diversos, como por queda de condutores devido a intempéries, por problemas de natureza elétrica, mecânica ou térmica, entre outros (COSTA, 2006). Segundo apresentado em SILVA (2003) e em CRUZ (2010), o problema da localização de faltas em LTs pode ser resolvido utilizando-se principalmente métodos de duas categorias: os métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental e os métodos baseados na teoria das ondas viajantes.

Dentro deste contexto, neste trabalho realizou-se uma comparação entre métodos clássicos de localização de faltas em LTs baseados na análise de componentes de frequência fundamental (JOHNS & JAMALI, 1990; GIRGIS *et al.*, 1992; RADOJEVIC *et al.*, 2009) e métodos baseados na teoria das ondas viajantes (CRUZ, 2010; LOPES, 2011), de maneira a observar quais métodos são mais apropriados para cada situação de operação. Foram avaliadas situações com diferentes valores de resistências da falta, ângulo de incidência de falta, compensação série e diferentes tipos de faltas. Inicialmente alguns métodos foram desenvolvidos de forma *offline* e, em seguida, foram modelados os algoritmos em tempo real via RTDSTM (*Real Time Digital Simulator*).

O trabalho proposto está relacionado com trabalhos do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) inseridos na linha de pesquisa denominada Transitórios Eletromagnéticos em SEPs, a exemplo do trabalho de LOPES (2011), em que é feita a localização de faltas em LTs utilizando a Transformada de Park para a detecção do instante inicial da falta por meio das componentes de alta frequência.

1.1. Objetivos

Constam como principais objetivos deste trabalho:

- Avaliar o estado da arte de diferentes métodos de localização de faltas em LTs;
- Realizar simulações em tempo real via RTDSTM para a localização de faltas em LTs, sendo feita uma análise comparativa entre quatro métodos.

1.2. Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Implementar, via *software*, alguns dos principais métodos de localização de faltas em LTs, utilizando-se um simulador em tempo real, o RTDSTM;
- Realizar estudos sobre o desempenho dos métodos para diversas situações, entre elas a variação das resistências da falta, do ângulo de incidência de falta, da compensação série e dos tipos de falta.

1.3. Metodologia

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica. Em seguida, modelou-se um sistema teste no *software* ATP – *Alternative Transients Program* (Leuven EMTP CENTER, 1987) e, por meio da linguagem MODELS, foram gerados registros oscilográficos de tensão e corrente nos dois terminais do SEP avaliado, de forma a simular dois registradores digitais de perturbação (RDPs). Então, estes dados foram importados para o *software* MATLAB[®]. No MATLAB[®] foram implementados dois algoritmos de localização de faltas em LTs, ambos utilizaram a teoria das ondas viajantes. Escolheu-se, então, o método que apresentou melhor desempenho para ser comparado, no simulador em tempo real, com três outros métodos baseados na análise de frequência fundamental.

Na etapa seguinte foi realizado um estudo sobre o RTDS, equipamento utilizado para realizar as simulações digitais em tempo real. O RTDSTM é um equipamento que pode ser dividido em duas partes, um *hardware* e um *software*. O seu *software* é formado por alguns módulos, nos quais se destacam o módulo *Draft* e o módulo *ComponentBuilder*, também denominado de *CBuilder*. No *Draft* foram modelados graficamente os equipamentos do sistema elétrico de potência, que na etapa anterior haviam sido modelos no ATP. Já no módulo *CBuilder* implementaram-se os algoritmos responsáveis pela localização das faltas, visto que este módulo permite a criação de novos componentes para o *software* e em seguida esses novos componentes podem ser importados para o módulo *Draft*. Após a criação dos novos componentes, utilizando-se a linguagem de programação C, e a importação destes para o módulo *Draft*, realizaram-se os testes em tempo real de alguns dos principais métodos de localização de faltas em LTs. Por fim, os métodos foram analisados, considerando-se a variação das resistências da falta, do ângulo de incidência de falta, da compensação série, dos tipos de falta e a influência do TC (transformador de corrente).

1.4. Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação está organizada em sete capítulos. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de alguns dos principais algoritmos de localização de faltas em linhas de transmissão.

Nos capítulo 3 apresenta-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido, como: conceitos da transformada de Park e da estimação fasorial.

No capítulo 4 é apresentada uma fundamentação teórica sobre o simulador em tempo real utilizado, o RTDSTM.

Os aspectos relativos à implementação dos métodos analisados são descritos no capítulo 5. Além da implementação dos métodos, no capítulo 5 é explicado como foi modelado o SEP.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e análises dos métodos estudados. Os resultados levaram em consideração diferentes condições de faltas, entre elas: o ângulo de incidência de falta e a resistência de falta.

Por fim, no capítulo 7 apresentam-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A localização de faltas em linhas de transmissão é um processo que deve ser realizado o mais rápido possível, para que a continuidade de transmissão de energia seja garantida pela maior parte do tempo. Geralmente, a localização de faltas em linhas de transmissão é realizada por carros ou por helicópteros após uma estimativa do local de falta por meio de relés. Portanto, devido à longa extensão das linhas de transmissão no Brasil, este processo de localização não é simples ou rápido.

Com o passar dos anos, houve um desenvolvimento considerável dos equipamentos de medição, controle e proteção. Entre esses equipamentos, os registradores digitais de perturbações, que além de armazenar os sinais de tensões e/ou correntes transitórias oriundas do distúrbio, podem ser utilizados para detectar e localizar os defeitos nas LTs.

É importante ressaltar que dentro dos possíveis algoritmos, os de maiores destaque são os pertencentes aos métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental e os métodos baseados na teoria das ondas viajantes.

2.1 Métodos de Localização de Faltas em LTs Baseados na Análise de Componentes de Frequência Fundamental

A localização de faltas em LTs pode ser realizada de diversas formas, entre elas se destacam os algoritmos baseados na análise de componentes de frequência fundamental. A utilização deste tipo de algoritmo requer a filtragem dos sinais e a estimativa fasorial. A seguir são apresentados alguns trabalhos que abordam este tipo de método.

2.1.1 TAKAGI *et al.* (1982)

O trabalho proposto por TAKAGI *et al.* (1982) apresenta um método de localização de faltas em LTs utilizando dados de correntes e tensões de apenas um terminal. Logo, uma das vantagens deste método é que não há a necessidade do uso do GPS (*Global Positioning System*) para realizar a sincronização dos dados.

Na Figura 2.1 observa-se um esquema do circuito utilizado para o desenvolvimento do algoritmo proposto por TAKAGI *et al.* (1982) e, em seguida, são apresentadas as principais equações utilizadas para o seu desenvolvimento.

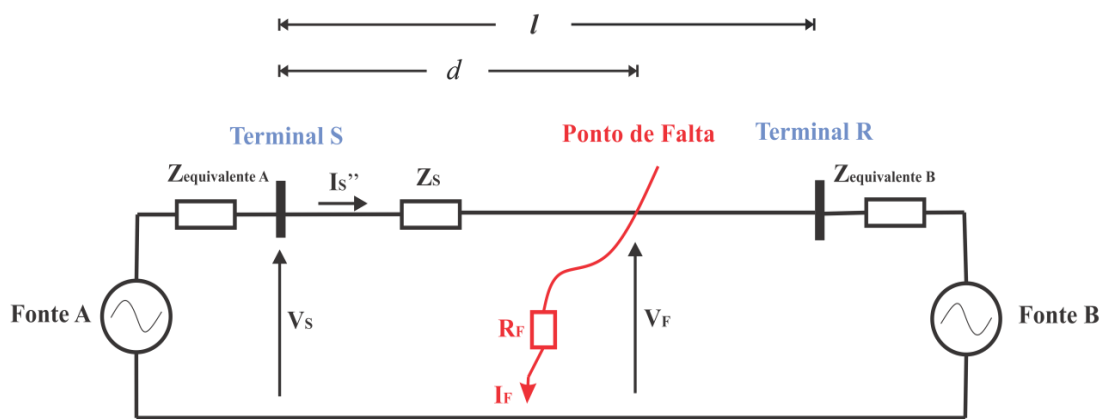


Figura 2.1: Falta em um circuito monofásico analisada pelo método de TAKAGI *et al.* (1982).

O método proposto é fundamentado no uso das equações (2.1) e (2.2).

$$V_F = V_S \cosh(\gamma d) - Z_S I_S \sinh(\gamma d), \quad (2.1)$$

$$I_{SF}'' = \left(\frac{V_S''}{Z_S} \right) \sinh(\gamma d) - I_S'' \cosh(\gamma d), \quad (2.2)$$

em que V_F é a tensão no ponto de falha, V_S e I_S são os fasores de tensão e corrente no terminal S, γ é a constante de propagação da LT, d é a distância até o ponto de falha, Z_S é a impedância de surto da LT por unidade de comprimento, I_{SF}'' é a corrente de falha oriunda do terminal S, V_S'' é a diferença entre a tensão pré-falta e a tensão após a falha, I_S'' é a diferença entre a corrente pré-falta e a corrente após a falha, ou seja, é a componente de corrente da falha, e $I_S''^*$ é o conjugado da corrente I_S'' .

Para as equações são adotadas as seguintes aproximações:

- i) $\tanh(\gamma d) = \gamma d$, porque a LT é suficientemente curta, ou seja, possui um comprimento inferior a 100 km;
- ii) O ângulo da corrente de falta I_F e a corrente do terminal S, I_{SF}'' , são iguais.

Portanto:

$$d = \frac{\text{Im}(V_S \cdot I_S''^*)}{\text{Im}(Z I_S \cdot I_S''^*)}, \quad (2.3)$$

sendo Z a impedância da LT por unidade de comprimento.

Este método considera um erro de aproximação, especialmente para os casos de LTs com comprimentos superiores a 100 km, visto que este é o limite das linhas consideradas curtas. Logo, deve ser realizada uma compensação regida pela equação (2.4) para estes casos de LTs com extensão superior a 100 km.

$$d_2 = d - \beta^2 \cdot d^3 \frac{1}{3}, \quad (2.4)$$

sendo β a parte imaginária da constante de propagação e d_2 é o local de falta com a compensação. Logo, o método proposto por TAKAGI *et al.* (1982) apresenta erros de localização de faltas em LTs com o comportamento descrito conforme Figura 2.2.

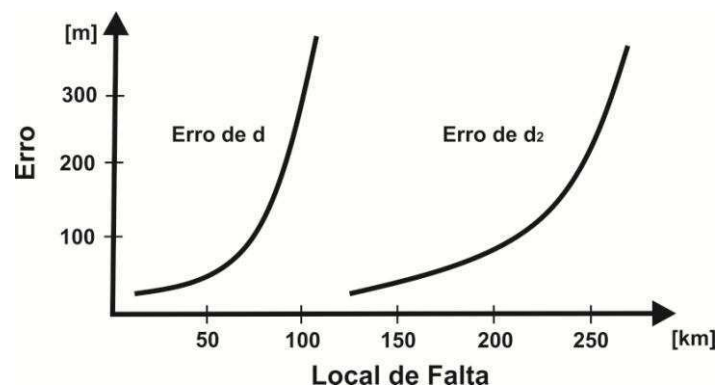


Figura 2.2: Erros de localização de faltas pelo método de TAKAGI *et al.* (1982).

2.1.2. JOHNS & JAMALI (1990)

O trabalho de JOHNS & JAMALI (1990) apresenta alguns dos principais fatores que influenciam na precisão da localização de faltas em LTs, fatores estes que se forem desprezados podem acarretar em fontes de erros. Os fatores citados neste trabalho são: a assimetria das LTs devido às diferenças entre as impedâncias e admitâncias próprias e mútuas de cada fase, a capacitância shunt, a ausência de informações do valor da resistência de falta, o ajuste remoto da impedância da fonte, ou seja, a utilização de valores inadequados para a impedância da fonte do SEP e o erro transmitido via TPC. O método é baseado em análise de componentes de frequências fundamentais de tensões e correntes de dois terminais da LT e leva em consideração todos os fatores mencionados.

O algoritmo desenvolvido por JOHNS & JAMALI (1990) utiliza a teoria de quadripólos e para facilitar a demonstração matemática, observa-se a Figura 2.3.

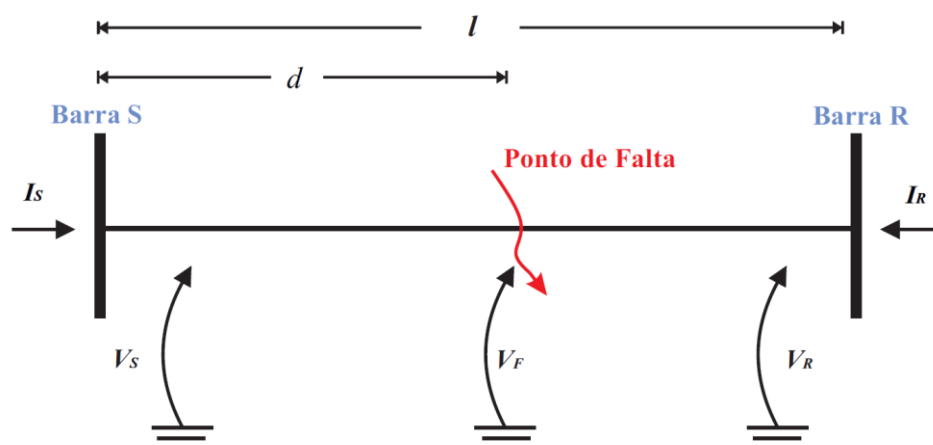


Figura 2.3: Análise de uma falta em uma LT de dois terminais proposta por JOHNS & JAMALI (1990).

A primeira etapa do algoritmo consiste na decomposição do domínio de fases para o domínio modal. Na equação (2.5), observa-se a expressão sugerida por JOHNS & JAMALI (1990) que possibilitou essa mudança de domínio.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & -3 \\ 2 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

em que v_a , v_b e v_c são tensões no domínio de fases e v_1 , v_2 e v_3 são as tensões no domínio modal. A mudança de domínio das correntes pode ser realizada de forma análoga.

Logo, considerando-se as componentes de tensão e corrente no domínio modal medidos nos terminais S e R, tem-se que o fasor de tensão no local da falta V_F é calculado pela equação (2.6), dados da barra S, e pela equação (2.7), dados da barra R.

$$V_F = \cosh(\gamma \cdot d) \cdot V_S - Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot d) \cdot I_S \quad (2.6)$$

$$V_F = \cosh[\gamma \cdot (l - d)] \cdot V_R - Z_c \cdot \sinh[\gamma \cdot (l - d)] \cdot I_R, \quad (2.7)$$

em que V_S , V_R , I_S e I_R são os fasores de tensões e correntes no domínio modal sincronizados no tempo, Z_c é a impedância característica da LT, γ a constante de propagação da LT, também no domínio modal, l é o comprimento da LT, em km, e d é o local da LT em que a falta ocorre, em km. Os valores de Z_c e γ são calculados pelas equações (2.8) e (2.9).

$$Z_c = \sqrt{\frac{(R_m + j \cdot \omega \cdot L_m)}{(G_m + j \cdot \omega \cdot C_m)}} \quad (2.8)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_m + j \cdot \omega \cdot L_m) \cdot (G_m + j \cdot \omega \cdot C_m)}, \quad (2.9)$$

sendo R_m , L_m e C_m os parâmetros resistência, indutância e capacitância da linha de transmissão por unidade de comprimento (Ω/km , H/km e F/km), G_m a condutância por unidade de comprimento (mho/km), ω a frequência angular fundamental do sistema e m o modo do domínio modal considerado.

Portanto, igualando as equações (2.6) e (2.7) e efetuando manipulações matemáticas, pode-se obter o local em que ocorreu a falta.

$$d = \operatorname{atanh} \left[\frac{V_S - V_R \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + Z_c \cdot I_R \cdot \sinh(\gamma \cdot l)}{Z_c \cdot I_S - V_R \cdot \sinh(\gamma \cdot l) + Z_c \cdot I_R \cdot \cosh(\gamma \cdot l)} \right] \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (2.10)$$

Observa-se que o valor obtido para d é um número complexo, entretanto leva-se em consideração apenas o valor real deste número. Ainda deve-se observar que para cada componente modal um valor de d é obtido, logo, dependendo do tipo de falta apenas um desses valores será o correto. Portanto, deve ser feita uma análise dos resultados para optar pelo correto. Este é um fator negativo para o método, visto que os operadores podem vir a optar pelo resultado errado.

2.1.3. GIRGIS *et al.* (1992)

O método proposto por GIRGIS *et al.* (1992), assim como o de JOHNS & JAMALI (1990), é um método baseado na análise de componentes de frequências fundamentais e que utilizam os dados sincronizados de tensões e correntes de dois terminais da LT. Entretanto, GIRGIS *et al.* (1992) ainda propuseram um método baseado na análise de dados não sincronizados de dois e de três terminais da LT, que não serão analisados neste trabalho, e que podem ser aproximados a partir de dados sincronizados de forma iterativa.

Considerando-se o método proposto por GIRGIS *et al.* (1992), o SEP apresentado na Figura 2.4, e assumindo que os dados dos dois terminais da linha estão sincronizados, tem-se as equações (2.11) e (2.12).

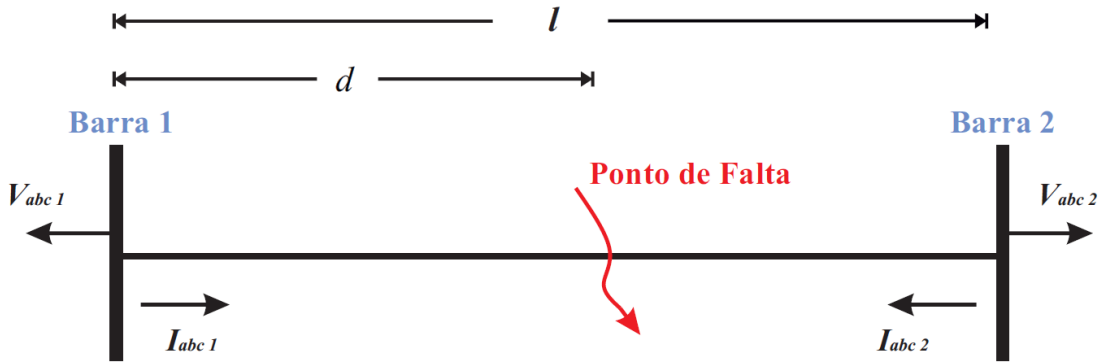


Figura 2.4: Análise de uma falta em uma LT de dois terminais proposta por GIRGIS *et al.* (1992).

$$V_{abc1} = VF_{abc} + dZ_{abc}I_{abc1} \quad (2.11)$$

$$V_{abc2} = VF_{abc} + (l - d)Z_{abc}I_{abc2}, \quad (2.12)$$

em que V_{abc1} e V_{abc2} são os fasores das tensões trifásicas nos terminais 1 e 2, respectivamente; I_{abc1} e I_{abc2} são os fasores de correntes trifásicos na linha; VF_{abc} é a tensão no local da falta; d é o local da falta, em km, em relação ao terminal 1 da LT; l é o comprimento da linha em km e Z_{abc} é a matriz de impedância série por unidade de comprimento da linha, dada pela expressão $Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix}$, sendo $Z_M = \frac{Z_0 - Z_1}{3}$

e $Z_P = Z_M + Z_1$, onde Z_P é a impedância própria da LT, Z_M é a impedância mútua da

LT, Z_0 é a impedância de sequência zero da LT e Z_1 a impedância de sequência positiva da LT.

Em seguida, colocando-se o termo VF_{abc} em evidência nas equações (2.11) e (2.12) e igualando-as, obtém-se a equação (2.13).

$$V_{abc1} - V_{abc2} + lZ_{abc}I_{abc2} = dZ_{abc}(I_{abc1} + I_{abc2}) \quad (2.13)$$

É interessante ressaltar que as tensões e correntes mencionadas na equação (2.13) devem ser estimadas ou filtradas para que sejam obtidos os fasores fundamentais. A equação (2.13) ainda pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot d, \quad (2.14)$$

em que:

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

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji}(I_{i1} + I_{i2})$$

$$j = a, b, c.$$

Utilizando o método dos mínimos quadrados, encontra-se como solução, o resultado da equação (2.15).

$$d = (M^+M)^{-1}M^+Y, \quad (2.15)$$

sendo M^+ a matriz conjugada da matriz transposta de M .

Portanto, devido à complexidade das equações do algoritmo, ele requer maior esforço em sua implementação e por envolver muitas variáveis há uma maior probabilidade de ocorrer algum erro. Entretanto, o método proposto por GIRGIS *et al.* (1992) pode ser considerado generalista por não depender do tipo de falta e pela baixa sensibilidade às variações da resistência de falta.

2.1.4. RADOJEVIC *et al.* (2009)

O método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009), diferentemente dos métodos anteriormente explicitados, possibilita a estimação dos locais de faltas em LTs por meio de um algoritmo numérico que não requer os parâmetros das LTs. O algoritmo é baseado na análise de componentes de frequências fundamentais e utiliza dados sincronizados de tensões e correntes de dois terminais da LT. Logo, uma das principais desvantagens deste método é a necessidade do uso do GPS (*Global Positioning System*) e a susceptibilidade a erros de sincronismo entre os registros oscilográficos.

O algoritmo desenvolvido por RADOJEVIC *et al.* (2009), possibilita a localização de qualquer tipo de falta, inclusive faltas trifásicas, sem a necessidade da utilização de técnicas auxiliares. E por utilizar as componentes de sequência positiva e negativa, não está susceptível ao acoplamento de sequência zero.

Por ser um algoritmo baseado na análise de componentes de frequência fundamental, é realizada a estimação fasorial dos fasores de tensão e corrente, utilizando-se para isto a Transformada Rápida de Fourier ou FFT (*Fast Fourier Transform*).

O trabalho proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) traz resultados de simulações realizadas no *software* ATP, um programa do tipo EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) para o caso de faltas monofásicas, porém pode-se obter uma solução mais generalista por meio do algoritmo desenvolvido pelos autores.

Observando-se o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) e tomando-se o SEP presente na Figura 2.5, tem-se as equações (2.16) e (2.17).

$$V_S^P - zdI_S^P = V_R^P - z(l - d)I_R^P \quad (2.16)$$

$$V_S^N - zdI_S^N = V_R^N - z(l - d)I_R^N \quad (2.17)$$

sendo V_S^P e V_S^N os fasores de tensão de sequência positiva e negativa do terminal S, V_R^P e V_R^N os fasores de tensão de sequência positiva e negativa do terminal R, I_S^P e I_S^N os fasores de corrente de sequência positiva e negativa do terminal S, I_R^P e I_R^N os fasores de corrente de sequência positiva e negativa do terminal R, z é a impedância de sequência positiva ou negativa, d é o local da falta e l é o comprimento total da LT em km.

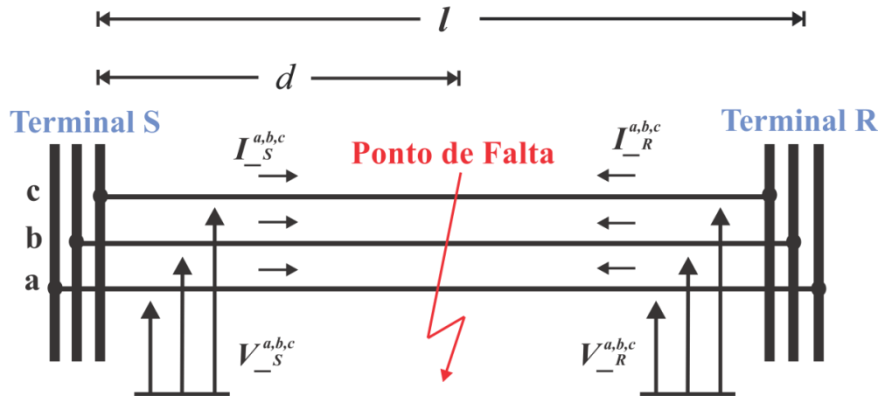


Figura 2.5: Análise de uma falta em uma LT proposta por RADOJEVIC *et al.* (2009).

Por meio das equações (2.16) e (2.17), tem-se que o local da falta em percentual do comprimento total da LT é dado pela equação (2.18).

$$l\% = 100 \cdot \frac{(V_S^P - V_R^P)I_R^N - (V_S^N - V_R^N)I_R^P}{(V_S^P - V_R^P)(I_S^N + I_R^N) - (V_S^N - V_R^N)(I_S^P + I_R^P)} \quad (2.18)$$

Pela equação (2.18), observa-se que quando o local da falta é obtido em percentual se tornam desnecessárias as informações dos parâmetros da LT, sendo esta a principal vantagem do método. Entretanto, uma desvantagem do método é que a implementação do algoritmo em RDPs ou relés digitais pode ser mais complexa devido à presença de operações com números imaginários.

2.2. Métodos de Localização de Faltas em LTs Baseados na Teoria das Ondas Viajantes

Os algoritmos de localização de faltas em LTs baseados na teoria das ondas viajantes necessitam primeiramente que a falta seja detectada. Esta detecção de faltas em LTs pode ser realizada de diversas formas, entre elas se destacam a Transformada *Wavelet* e a Transformada de Park. Em sequência são apresentados alguns trabalhos que retratam este tipo de método.

2.2.1. GALE *et al.* (1993)

GALE *et al.* (1993) propuseram quatro métodos para a localização de faltas em LTs. Todos estes métodos utilizam a teoria das ondas viajantes e podem ser classificados de acordo com a Tabela 2.1. As características que distinguem os quatro

tipos são: a utilização da geração de pulsos, a quantidade de terminais da LT utilizados e a utilização de ondas viajantes refletidas.

Tabela 2.1: Classificação dos métodos de localização de faltas em LTs do tipo A, B, C e D.

Tipo do Método	Utiliza a geração de pulsos	Número de terminais utilizados		Utiliza ondas refletidas
		1	2	
Tipo A		X		X
Tipo B	X		X	X
Tipo C	X	X		X
Tipo D			X	

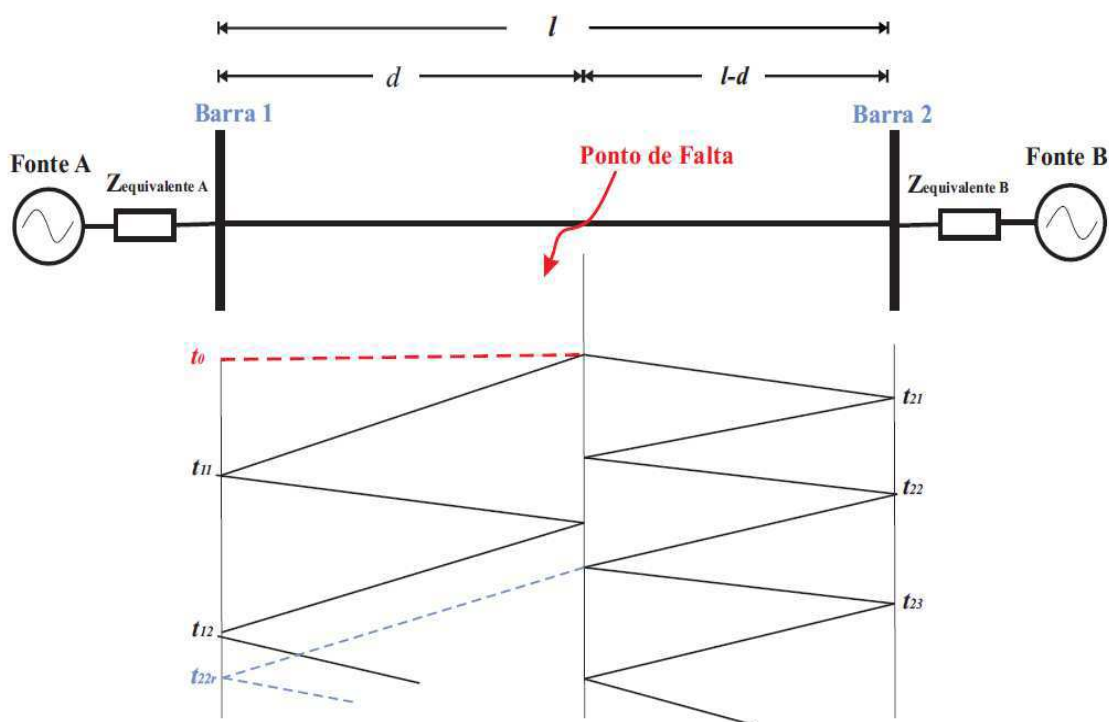


Figura 2.6: Diagramas de reflexões para faltas em LTs.

Observa-se na Figura 2.6 o diagrama de reflexões das ondas para facilitar a análise dos métodos de um e dois terminais. Na Figura 2.6, tem-se que: t_{11} é o instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 1; t_{21} é o instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 2; t_{12} é o instante de chegada da onda refletida no ponto da falta à Barra 1; t_{22} e t_{23} são os instantes de chegada das ondas refletidas no ponto da falta à Barra 2; e, t_{22r} é o instante de chegada da onda refratada no ponto da falta à Barra 1.

Os métodos de localização de faltas com apenas um terminal, segundo GALE *et al.* (1993), apresentam dificuldades relacionadas à detecção dos instantes em que ocorrem as faltas, pois são mais susceptíveis a erros, visto que utilizam os dados de tempo obtidos por meio de ondas refletidas. Entretanto, apesar de serem mais complexos pelo fato de analisarem as ondas refletidas, eles evitam a necessidade de sincronização dos dados obtidos nos dois terminais das LTs via GPS.

Logo, sabendo-se que v é a velocidade de propagação das ondas viajantes, o método proposto por GALE *et al.* (1993) para apenas um terminal, utiliza a equação (2.19) para a localização de faltas em LTs.

$$d = \frac{(t_{12} - t_{11})}{2} \cdot v \quad (2.19)$$

Com o intuito de evitar a necessidade de distinção da onda refletida da Barra 1 com a onda refratada da Barra 2, analisa-se as duas barras, por meio da equação (2.20).

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2} \quad (2.20)$$

Portanto, para os métodos em que são utilizados dados dos dois terminais das LTs não são necessários os instantes de chegada das ondas refletidas e a detecção do início dos transitórios é realizada por meio dos instantes de chegada das primeiras ondas às Barras 1 e 2.

Três testes, sendo dois para o tipo A e um para o tipo D, e as suas referentes análises foram realizadas por GALE *et al.* (1993). Observou-se que o método do tipo A é um método viável, entretanto, requer uma análise mais elaborada dos dados obtidos, fator que pode ser ainda mais agravante para sistemas mais complexos. Os resultados obtidos em campo para o método do tipo D mostrou que esse método deve ser usado preferencialmente devido à sua simplicidade na análise dos dados.

2.2.2. JIAN *et al.* (1998)

O método de localização de faltas em LTs proposto JIAN *et al.* (1998) analisou LTs com dois terminais e utilizou a teoria de ondas viajantes. A detecção da falta foi

realizada utilizando-se a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC). A TWC permitiu uma melhor resolução dos transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo.

JIAN *et al.* (1998) utilizaram técnicas de superposição para analisar o comportamento dos transitórios eletromagnéticos na incidência da falta e utilizaram a análise modal para desacoplar os sinais referentes a cada fase do SEP.

No trabalho é ainda afirmada a possibilidade das ondas viajantes em uma mesma LT apresentarem diferentes velocidades de propagação como mostrado na Figura 2.7, a depender das componentes de frequência dominantes. A maioria dos métodos existentes na literatura utiliza velocidades de propagação iguais, ou aproximadas, à velocidade da luz. No entanto, estas aproximações podem acarretar em erros na localização de faltas.

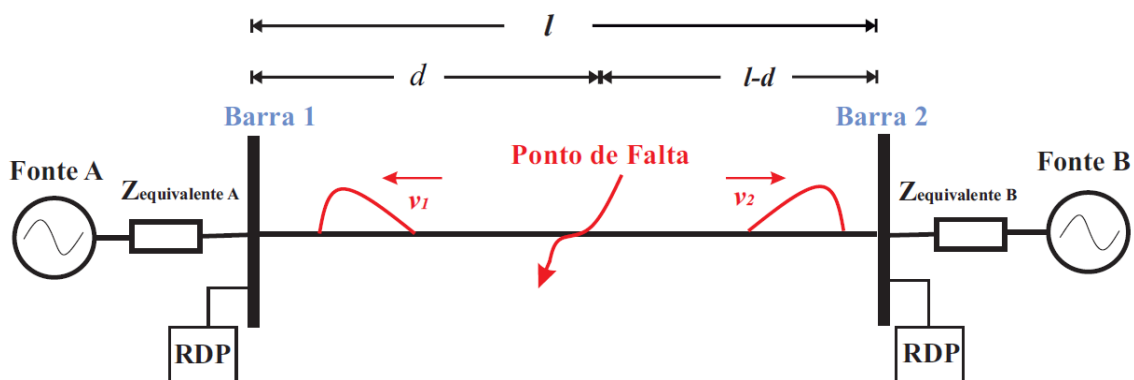


Figura 2.7: Esquema de diferentes velocidades de propagação das ondas viajantes.

O método proposto por JIAN *et al.* (1998) apresenta melhores desempenhos para situações em que a falta ocorre próxima às extremidades da LT. A detecção da falta é realizada por meio da análise dos valores obtidos para o coeficiente η , que pode ser calculado pela equação (2.21).

$$\eta = \frac{|t_{21} - t_{11}|}{l} \cdot V_c, \quad (2.21)$$

$$\text{Para: } \eta \text{ pequeno} \Rightarrow d = \frac{V_1 V_2 \cdot (t_{11} - t_{21}) + V_1 l}{V_1 + V_2}, \quad (2.22a)$$

$$\text{Para: } \eta \text{ grande} \Rightarrow d = \frac{V \cdot (t_{11} - t_{21}) + l}{2}, \quad (2.22b)$$

em que V_c é a velocidade de propagação da onda viajante aproximada e igual a 98% da velocidade da luz, V_1 é a velocidade de propagação da onda incidente na barra 1 e V_2 a

velocidade de propagação da onda incidente na barra 2. O método utiliza a análise espectral dos sinais para observar a influência das frequências dominantes nos sinais transitórios sobre as velocidades de propagação das ondas.

Os resultados de diversas simulações apresentadas no trabalho de JIAN *et al.* (1998), realizadas em programas do tipo EMTP, mostraram que este método proposto é preciso e confiável comparado com métodos mais tradicionais de localização de faltas em LTs com dois terminais. Entretanto, o método possui como principal desvantagem a dificuldade de implementação em tempo real. Esta dificuldade é devido à realização da análise espectral dos sinais, pois em tempo real não se tem o registro oscilográfico completo.

2.2.3. LOPES (2011)

Em LOPES (2011) foi proposto um método de localização de faltas em LTs baseado na teoria das ondas viajantes e que utiliza dados sincronizados de dois terminais. Logo, este método requer a utilização de um GPS. A detecção dos transitórios eletromagnéticos foi realizada por meio da Transformada de Park (Tdq0) e da Transformada de Clarke dos sinais trifásicos de tensão dos dois terminais da LT.

O autor utilizou para a detecção dos instantes iniciais de falta um coeficiente denominado de $[C_{dif}]^2$, o qual possibilita a avaliação das três fases simultaneamente. Este coeficiente pode ser calculado conhecendo-se apenas amostras do sinal atual e uma amostra imediatamente anterior, conforme a equação (2.23).

$$[C_{dif}(t)]^2 = \left[\frac{V_d(t) - V_d(t - \Delta t)}{\Delta t} \right]^2, \quad (2.23)$$

em que V_d é a componente da tensão de eixo direto, obtida pela Tdq0 e Δt é o período de amostragem dos sinais analisados.

Logo, este método proposto por LOPES (2011) requer menor capacidade de armazenamento dos RDPs e é facilmente adaptável para algoritmos em tempo real. A expressão utilizada para a localização da falta foi a proposta por GALE *et al.* (1993) para LTs com sinais oriundos de dois terminais, conforme a equação (2.20). Os resultados obtidos por LOPES (2011) foram satisfatórios para 99,51% dos casos, ou

seja, os erros foram inferiores aos erros admissíveis para este percentual dos casos simulados.

Na Figura 2.8 é observada a detecção de uma falta, utilizando-se o coeficiente $[C_{dif}]^2$.

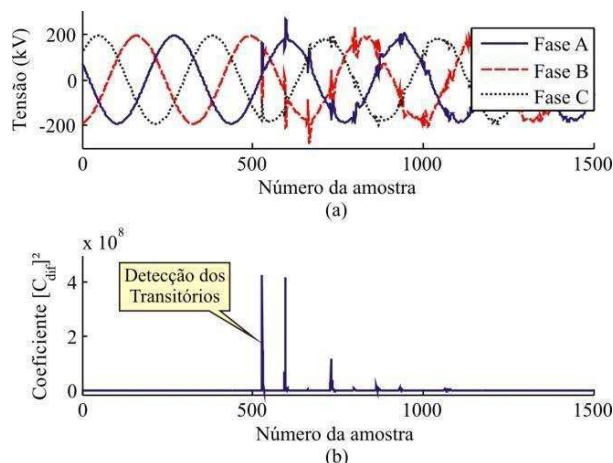


Figura 2.8: Detecção de transitórios usando a Tdq0: (a) Tensão trifásica; (b) Coeficientes $[C_{dif}]^2$.

Fonte: MELO *et al.* (2012).

2.3. Métodos de Localização de Faltas em LTs Mistos

Os métodos denominados de métodos de localização de faltas em LTs mistos são aqueles que requerem tanto as informações dos componentes de frequência fundamental quanto às informações das ondas viajantes.

2.3.1. CRUZ (2010)

O método proposto por CRUZ (2010) permite a localização de faltas em LTs com dados de dois e três terminais, podendo ser sincronizados ou não. A detecção da falta é feita aplicando-se a Transformada *Wavelet* discreta (TWD) nos sinais de corrente por apresentarem uma variação mais perceptível quando há uma incidência de falta. A *wavelet* mãe utilizada foi da família Daubechies. Os coeficientes *wavelets* obtidos foram submetidos a um algoritmo de redução de ruídos para que em seguida esses coeficientes fossem analisados e determinados os instantes iniciais da falta para os terminais da LT (GAOUDA *et al.*, 2002).

Após a detecção da falta e da redução dos ruídos, foi realizada a estimação fasorial utilizando-se a Transformada Discreta de Fourier (TDF). O algoritmo de

localização utilizado por CRUZ (2010) foi o proposto por GIRGIS *et al.* (1992), conforme apresentado na equação (2.11).

Os resultados obtidos por este método foram satisfatórios, até mesmo para variações dos ângulos de incidência e variação do local da falta. No entanto, o método apresentou uma sensibilidade para os casos de faltas de alta impedância, comuns em sistemas de distribuição.

2.4. Síntese Bibliográfica

Cada um dos trabalhos mencionados apresentam vantagens e desvantagens considerando aspectos como: precisão, custo, generalidade do método e velocidade de resposta. Logo, é necessária uma comparação destes métodos para observar quais são mais adequados para cada situação. É com o objetivo de propor essa análise comparativa, em tempo real, que este trabalho será realizado.

A seguir, observa-se na Tabela 2.2 um resumo da revisão bibliográfica.

Tabela 2.2: Resumo da revisão bibliográfica referente à localização de faltas em LTs.

Referências	NTM			Sinais Analisados		GPS	Técnicas para a detecção da falta		
	1	2	3	Tensão	Corrente		MCFF	Wavelet	Tdq0
TAKAGI <i>et al.</i> (1982)	X			X	X		X		
JOHNS & JAMALI (1990)		X		X	X	X	X		
GIRGIS <i>et al.</i> (1992)		X	X	X	X		X		
GALE <i>et al.</i> (1993)	X	X		X	X	X			
JIAN <i>et al.</i> (1998)		X		X		X		X	
RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)		X		X	X	X	X		
CRUZ (2010)		X	X	X	X		X	X	
LOPES (2011)		X		X		X			X

Legenda:

NTM = Número de Terminais Monitorados;

GPS = Dados Sincronizados via GPS;

MCFF = Método Baseado na Análise de Componentes de Frequência Fundamental;

Wavelet = Transformada Wavelet;

Tdq0 = Transformada de Park.

No Capítulo 3 será apresentada uma fundamentação teórica sobre as faltas em LTs, a detecção destas faltas por meio da Transformada de Park e *Wavelet*, a filtragem e a estimação fasorial dos sinais de tensão e corrente.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

As linhas de transmissão presentes no SIN (Sistema Interligado Nacional) são geralmente de grandes extensões, ou seja, apresentam comprimentos superiores a 240 km. Este fato ocorre devido ao Brasil ser um país de grandes dimensões territoriais e possuir suas maiores usinas geradores de energia elétrica localizadas distantes dos grandes centros consumidores. Logo, é de fundamental importância que os distúrbios que ocorrem nas LTs possam ser detectados de forma precisa para que os mesmos possam ser sanados de maneira mais rápida e garantir a maior continuidade do serviço de transmissão de energia elétrica.

3.1. Faltas em Linhas de Transmissão

Os parâmetros das linhas de transmissão na frequência da rede são praticamente constantes, logo qualquer situação que venha a alterar os parâmetros R , L e C das linhas pode acarretar em uma sobretensão (LOPES, 2011). As linhas de transmissão são susceptíveis a diversos tipos de distúrbios, entre eles: as sobretensões de manobras e as faltas.

As faltas são classificadas em monofásicas, bifásicas, bifásicas para a terra e trifásicas. Estes tipos de faltas ainda podem ser inseridos em dois grupos: as faltas simétricas e as faltas assimétricas. O grupo das faltas simétricas é formado pela falta trifásica, enquanto que o grupo das faltas assimétricas é constituído por todos os tipos restantes de falta.

Sabe-se que a maioria das faltas que ocorrem nas linhas de transmissão são faltas do tipo fase-terra. Devido à natureza de acoplamento entre as fases, a falta fase-terra acarreta em uma elevação da tensão nas demais fases e esta elevação depende do grau de aterramento do sistema no ponto em questão (D'AJUZ *et al*, 1987). Logo, a

resistência de aterramento é um fator de grande relevância e deve ser levada em consideração para uma análise mais detalhada.

Observa-se que qualquer perturbação, seja ocasionada por faltas, chaveamentos, ou incidência de descargas atmosféricas resulta na propagação de ondas eletromagnéticas, também denominada de ondas viajantes. A velocidade que estas ondas se propagam nas LTs são cerca de 98% da velocidade da luz, (JIAN *et al.*, 1998; ZIMATH *et al.*, 2010), variando de acordo com as condições climáticas, com as características mecânicas e elétricas das LTs.

Logo, conhecendo-se os tempos de propagação das ondas de tensão e corrente desde o ponto de falta até os pontos monitorados e a velocidade de propagação destas ondas, pode-se localizar onde ocorreu o defeito. Esta forma de localização de faltas é denominada de método baseado na teoria das ondas viajantes e utiliza as componentes de alta frequência. Além disso, requer inicialmente a detecção dos transitórios eletromagnéticos durante a falta. Esta detecção pode ser realizada através de diversas técnicas, dentre as quais se destacam a Transformada *Wavelet* (JIAN *et al.*, 1998; ELHAFFAR & LEHTONEN, 2004; CRUZ, 2010) e a Transformada de Park (LOPES, 2011).

Outra maneira para solucionar o problema da localização de faltas é a análise das componentes de frequência fundamental que consiste na análise dos fasores trifásicos de tensão e corrente, como realizado em JOHNS & JAMALI (1990), GIRGIS *et al.* (1992) e em RADOJEVIC *et al.* (2009).

Sabe-se que um dos fatores que dificultam a localização de faltas em LTs é a inserção de bancos de capacitores em série nas LTs. A compensação série capacitiva é realizada com o intuito de aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica. A inserção de bancos de capacitores em série em LTs promove a redução das perdas por meio da compensação das componentes reativas indutivas, reduzindo consequentemente, a impedância série equivalente das LTs (ANDERSON, 1999). A reatância indutiva é responsável pela queda de tensão e pelo ângulo de potência da linha de transmissão, portanto, pelo seu grau de estabilidade estática e dinâmica (OLIVEIRA, 2007). Logo, a compensação série capacitiva melhora todos esses fatores.

O grau de compensação (GC) das LTs pode ser calculado pela relação entre a reatância capacitiva inserida e a reatância indutiva total da LT, de acordo com a equação (3.1), proposta em ANDERSON (1999).

$$GC(\%) = \frac{X_C}{X_L} \cdot 100, \quad (3.1)$$

em que: X_C é a reatância capacitiva inserida na LT e X_L é a reatância indutiva total dos condutores.

As faltas em LTs são detectadas pelo sistema de proteção e este sistema tem como equipamentos fundamentais os transformadores para instrumentos (TIs), que são: os transformadores de correntes (TCs) e os transformadores de potencial (TPs) que reduzem os níveis de correntes e tensões, respectivamente, para alimentar os equipamentos de medição, controle e proteção, em especial os relés.

A modelagem do SEP com e sem TCs também possibilitou a análise da influência destes na localização de faltas nas LTs em tempo real. Sabe-se que os TCs são responsáveis pelo fornecimento de dados da corrente para os equipamentos de controle e permitem a redução dos níveis de corrente para a ordem de 5 A.

Os transformadores de potencial capacitivos (TPCs) são utilizados para realizar a diminuição da tensão para 115 V, além de possibilitar a isolação elétrica entre o circuito de alta tensão e o de baixa tensão, garantindo, desta forma, certa segurança aos operadores. Este equipamento tem como função a reprodução da tensão no primário do transformador (circuito de alta tensão) para o seu secundário (circuito de baixa tensão). Portanto, através do TPC tem-se ideia dos fenômenos transitórios e de regime permanente que ocorrem no sistema de alta tensão para que os instrumentos de controle, medição e proteção, atuem quando necessário.

3.2. Detecção de Faltas por meio da Transformada de Park (Td_{q0})

Como dito anteriormente, as faltas em LTs devem ser localizadas o mais rápido possível para que o fornecimento de energia seja reestabelecido. Sabe-se que um grupo dos algoritmos localizadores de faltas em LTs, os métodos baseados na teoria das ondas viajantes, necessitam inicialmente realizar a detecção das faltas, e entre as diversas técnicas de detecção de faltas, a Transformada de Park se destaca por sua robustez.

A Transformada de Park (Td_{q0}) é assim chamada por ter sido desenvolvida por R. H. Park e seus associados nos Estados Unidos. Esta transformada também é conhecida como transformada dq0 e foi proposta inicialmente para o estudo de máquinas elétricas, em que era aplicada visando à realização da transformação das grandezas trifásicas de um estator sob um sistema referencial fixo em componentes de

eixo direto e em quadratura sob um sistema referencial rotativo. Em resumo, pode-se dizer que a Tdq0 decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, sendo uma delas alinhada com o eixo do enrolamento de campo, que é a componente de eixo direto d , e a outra em quadratura com este mesmo eixo, chamada de componente de eixo em quadratura q (FITZGERALD *et al.*, 2006).

Diante desta teoria, LOPES (2011) propôs que a Tdq0 fosse utilizada para fins de detecção de distúrbios em LTs. Neste caso, a transformação fará com que o sistema referencial gire na frequência da rede em sincronismo com os fasores de fase do sistema trifásico. Logo, em regime permanente, não serão identificadas variações de frequência, pois a velocidade angular relativa entre os referidos fasores e o sistema referencial será nula. Entretanto, em situações de ocorrência de transitórios, a velocidade relativa entre os fasores e a referência passa a ser diferente de zero, o que faz com que os sinais gerados possuam amplitudes não nulas e comportamento oscilatório. Observa-se na Figura 3.1 o diagrama dos eixos referenciais obtidos via Tdq0.

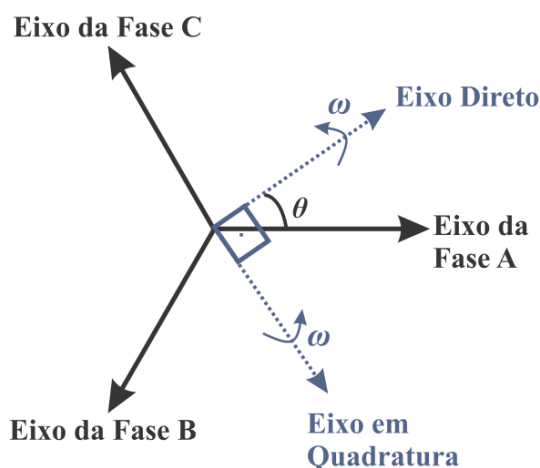


Figura 3.1: Diagrama dos eixos referenciais obtidos via Tdq0.

As variáveis de entrada utilizadas pela Tdq0 são os dados das tensões e correntes, porém no trabalho de LOPES (2011) apenas as tensões são consideradas. Essas tensões podem ser obtidas pela Transformada de Clarke, conforme apresentado na equação (3.2). Já a Transformada de Park é realizada através da expressão (3.3).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t + \theta) & \text{sen}(\omega t + \theta) \\ 0 & -\text{sen}(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

em que V_0 é a tensão desacoplada do modo terra; V_α e V_β são as tensões desacopladas dos modos aéreos; V_A , V_B e V_C são as tensões de fase do sistema trifásico analisado; V_d e V_q são as componentes de eixo direto e em quadratura, respectivamente; ω é a frequência angular nominal das tensões e correntes da rede; θ é o ângulo de fase da tensão de eixo direto V_d ; e, t é o instante de tempo em análise.

Sabe-se que os transitórios variam de acordo com certas características da falta. Assim, a depender do ângulo de incidência da falta, da resistência da falta, do fluxo de potência na linha, do local da falta, entre outros fatores, o sistema pode apresentar transitórios amortecidos e com frequências próximas à frequência da rede. Desta forma, a detecção do instante inicial dos transitórios através dos coeficientes de eixo direto (V_d) pode ser prejudicada, pois a falta pode não ser observada.

Com isto, foi proposta em LOPES (2011) a utilização de um coeficiente mais robusto para detectar o início dos transitórios em situações de falta com transitórios amortecidos, visto que não se podem prever as condições em que um distúrbio irá ocorrer. Basicamente, utiliza-se o coeficiente C_{dif} que é mais sensível à ocorrência de componentes de alta frequência e que pode ser obtido utilizando-se informações do valor de V_d atual e de sua amostra imediatamente anterior, conforme apresentado na equação (3.4).

$$C_{dif}(t) = \frac{V_d(t) - V_d(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (3.4)$$

em que Δt é o período de amostragem dos sinais analisados. A equação (3.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$C_{dif}(k) = G \cdot [V_d(k) - V_d(k - 1)], \quad (3.5)$$

sendo G o ganho aplicado aos coeficientes* C_{dif} e com valor igual a 1000 e $V_d(k)$ é a k -ésima amostra do sinal V_d .

Em seguida, LOPES *et al.* (2012) decidiram tornar a detecção de falta mais robusta com relação à presença de ruídos utilizando o cálculo da energia dos coeficientes de diferença, por meio de uma janela retangular deslizando no tempo de tamanho igual a $\Delta k_{EN} = \frac{N}{2}$, sendo N igual ao número de amostras por ciclo em regime permanente. O cálculo da energia dos coeficientes pode ser realizado pela equação (3.6).

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k C_{dif}(n)^2, \quad (3.6)$$

em que $\xi_{dif}(k)$ é a energia da k -ésima janela e $C_{dif}(n)$ é a n -ésima amostra do sinal C_{dif} . Na Figura 3.2 é possível observar a detecção utilizando-se a energia do coeficiente $[C_{dif}]^2$.

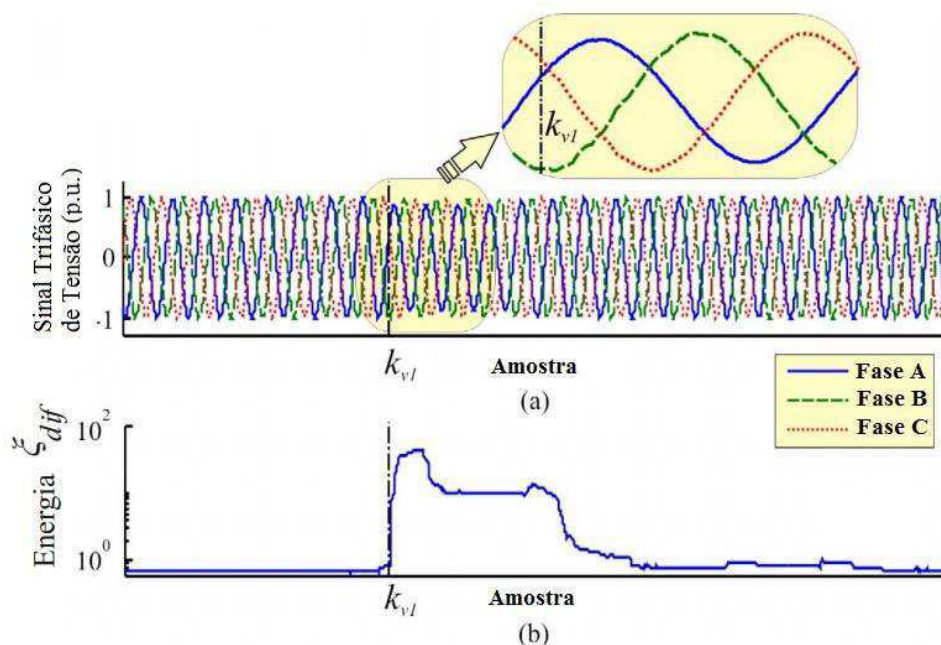


Figura 3.2: Detecção de transitórios: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Energia ξ_{dif} .

*O ganho G utilizado por LOPES *et al.* (2012) não exerce influência direta sobre o desempenho do algoritmo, ele é utilizado somente para garantir que os valores de energia ξ_{dif} muito baixos durante o regime permanente não sejam aproximados erroneamente por zero.

3.3. Detecção de Falhas por meio da Transformada *Wavelet*

Assim como a Tdq0, a transformada *Wavelet* é uma ferramenta poderosa para a detecção de faltas em LTs. A *Wavelet* é uma transformada consolidada, visto que possibilita a representação de funções em termos de funções bases em diferentes escalas e posições (COSTA, 2006). Sabe-se ainda que, o termo *wavelet* significa “onda pequena” por estas serem de curta duração e com uma energia finita.

A transformada *Wavelet* pode ser dividida em dois grandes grupos: a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) e a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). A TWC de uma função $f(t)$ é definida como o produto interno entre $f(t)$ e as funções *Wavelets* filhas, as quais são obtidas a partir de uma função protótipo $\psi(t)$, chamada de *Wavelet* mãe. Já a TWD é a versão digital da TWC, permitindo a sua implementação em relés digitais e registradores digitais de perturbações (RDPs). Na equação (3.7) é apresentada a fórmula para o cálculo dos coeficientes *Wavelet* discretos de uma função $x(n)$ no domínio digital.

$$W_f(m, a) = \frac{1}{\sqrt{a_0^y}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{a - na_0^y b_0}{a_0^m}\right), \quad (3.7)$$

em que y é um parâmetro inteiro; a é uma variável inteira que indica o número de amostras do sinal de entrada; $a_0 > 1$ é um parâmetro de dilatação fixo e b_0 é um fator de translação.

A transformada *Wavelet* é utilizada para decompor os sinais de correntes e/ou tensões e possibilitar a detecção dos instantes de incidência das faltas em cada um dos terminais. Neste trabalho, foram utilizados os sinais trifásicos de correntes conforme CRUZ (2010), por apresentarem uma variação mais perceptível quando há uma incidência de falta, e os instantes iniciais de falta foram obtidos pela transformada *Wavelet* discreta. A *Wavelet* mãe utilizada foi da família Daubechies com quatro níveis de decomposição, a db4. A família Daubechies, db4, foi escolhida para a detecção de faltas devido ao grande número de trabalhos que mostram a eficiência das wavelets dessa família na área de sistemas de energia (CRUZ, 2010).

Em seguida, os coeficientes *Wavelets* obtidos foram submetidos a um algoritmo de redução de ruídos para que em seguida esses coeficientes fossem analisados e determinados os instantes iniciais da falta para os dois terminais. Utilizou-se para a

redução de ruídos o algoritmo proposto por MISITI *et al.* (2000) *apud* CRUZ (2010), representado na equação (3.8).

$$d'_s(n) = \begin{cases} d_s(n) - \eta_s & \text{se } |d_s(n)| \geq \eta_s \text{ e } d_s(n) \geq 0 \\ d_s(n) + \eta_s & \text{se } |d_s(n)| \geq \eta_s \text{ e } d_s(n) < 0, \\ 0 & \text{se } |d_s(n)| < \eta_s \end{cases} \quad (3.8)$$

em que $n = 1, 2, \dots, N$, é o número de coeficientes de decomposição, N é o número de amostras, $d_s(n)$ é o sinal com ruído, $d'_s(n)$ é o novo sinal sem ruído e η_s é um limiar baseado no máximo valor absoluto dos coeficientes de cada nível de decomposição considerado. Adotou-se 5% do valor absoluto dos coeficientes de cada nível de decomposição, de acordo com CRUZ (2010).

3.4. Filtragem

Neste trabalho, realizou-se uma filtragem dos sinais de tensão e corrente após a detecção da falta pela TWD, no caso do método proposto por CRUZ, ou ainda pelos métodos de frequência fundamental JOHNS & JAMALI (1990), GIRGIS *et al.* (1992) e RADOJEVIC *et al.* (2009). O processo de filtragem é utilizado para retirar os componentes de altas frequências e evitar que estes sejam fontes de erros tanto nos métodos baseados na análise de frequência fundamental, como no algoritmo proposto por GIRGIS *et al.* (1992).

Utilizou-se um filtro passa-baixas do tipo Butterworth de terceira ordem e com uma frequência de corte, ω_c , igual a 180 Hz. Esta escolha foi tomada porque, segundo PHADKE & THORP (2009), os filtros Butterworth até terceira ordem são os mais utilizados em RDPs e relés digitais, por não apresentarem oscilações ao longo da faixa de passagem e não promoverem desvios consideráveis na fase do sinal filtrado.

O filtro passa-baixas do tipo Butterworth apresenta a configuração como se pode observar na Figura 3.3.

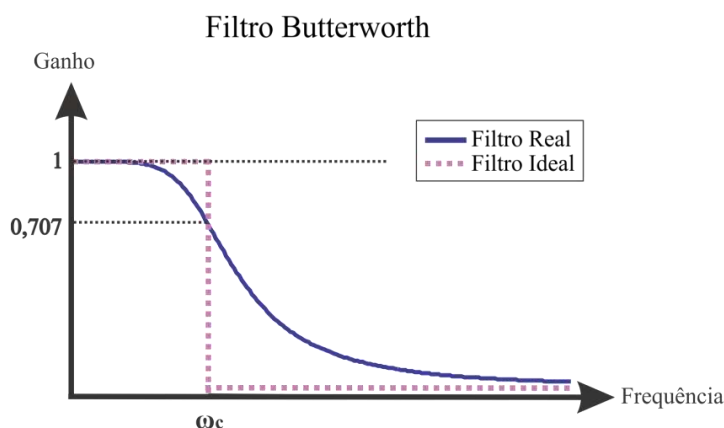


Figura 3.3: Filtro passa-baixas do tipo Butterworth.

3.5. Estimação Fasorial

Os métodos baseados na análise de componentes fundamentais de frequência necessitam que seja realizada a estimação fasorial para que apenas os fasores na frequência da rede sejam utilizados nos algoritmos localizadores. Logo, a estimação fasorial atua como um filtro para a obtenção dos fasores de componentes fundamentais para as tensões e correntes de um SEP.

Sabe-se que são transformadas reconhecidas a Transformada Discreta de Fourier (TDF), a Transformada Discreta do Cosseno e a Transformada Discreta do Seno (PRINCEN & BRADLEY, 1986). Todavia, mesmo que a Transformada Discreta de Fourier seja largamente utilizada e reconhecida pela sua capacidade de eliminar frequências indesejadas por meio de uma transformação espectral, a TDCM (Transformada Discreta do Cosseno Modificado) apresenta uma capacidade notável para a representação espectral do sinal no domínio do tempo. A TDCM tem a vantagem de utilizar valores reais em sua transformada e, assim, ela fornece uma representação do sinal mais eficiente que a TDF (KUECH & EDLER, 2007). A TDCM tem uma característica interessante que é a de sobreposição dos blocos de dados, de forma que a última metade de um bloco atual coincide com a primeira metade do bloco seguinte. Esta característica faz com que essa transformada seja extremamente útil para a compressão de dados (PRINCEN & BRADLEY, 1986), além de facilitar sua aplicação em tempo real.

A equação geral do método é dada pela equação (3.9), conforme JIANXIN & ZAIWANG (1996).

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \frac{(2n+1)(k+k_1)\pi}{2N}, \quad (3.9)$$

em que N é o número de pontos por ciclo, $k = 0, 1, \dots, 2N - 1$, $k_1 = k_0 + \frac{1}{2}$, e k_0 é um inteiro, $0 < k_0 < N$. Como se deseja obter apenas a frequência fundamental, $k = 1$, $x(n)$ é a n -ésima amostra dos sinais de corrente ou tensão digitalizadas, com n variando de 0 a $N - 1$.

No capítulo seguinte serão retratadas as funções de cada parte do *hardware* e do *software* do RTDSTM para que sejam realizadas as simulações em tempo real.

Capítulo 4

Simulações em Tempo Real

Os sistemas elétricos de potência são analisados, na maioria dos casos, por meio de simulações computacionais. Entre os programas utilizados para essa análise, destacam-se os programas do tipo EMTP, em especial o ATP – *Alternative Transients Program* (Leuven EMTP CENTER, 1987). O ATP é um *software* que realiza o processo de integração por meio da regra trapezoidal, e sabendo-se que este é um processo discreto, ele necessita de um passo de integração para realizar a solução de equações algébricas. Logo, computadores convencionais geralmente necessitam de um tempo de processamento para a solução das equações do sistema elétrico superiores a vários segundos, o que indica que eles simulam em tempo de execução, porém não consiste em uma simulação em tempo real.

Ao longo dos anos, o desenvolvimento dos processadores e de toda a tecnologia digital possibilitou que os cálculos fossem realizados de forma extremamente rápida, em instantes inferiores ao passo de integração. Portanto, estes computadores de maior desempenho possibilitam a simulação em tempo real, permitindo a análise dos SEPs de maneira mais realista.

O RTDSTM – *Real Time Digital Simulator* foi especialmente projetado para o estudo de transitórios eletromagnéticos em tempo real e é um equipamento constituído de duas partes: um *hardware* e um *software*. O RTDSTM se assemelha a um analisador de rede, também conhecido como TNA – *Transient Network Analyzer*. A diferença entre estes equipamentos é que o primeiro analisa o sistema de forma discreta, enquanto que o segundo tradicionalmente realiza a análise no domínio contínuo do tempo.

Conforme mencionado anteriormente, o RTDSTM é formado por *hardware* e *software*, e o seu *hardware* é composto por um processador digital de sinais (*Digital Signal Processor* – DSP) e um computador com quantidade de instruções reduzidas (*Reduced Instruction Set Computer* – RISC) baseados em técnicas avançadas de

processamento paralelo, de maneira a alcançar a velocidade adequada para manter a operação contínua em tempo real.

O *software* do RTDSTM inclui modelos dos componentes do sistema de potência necessários para representar diversos elementos complexos que formam o sistema elétrico de potência. A técnica utilizada no RTDSTM na solução de toda a rede é a análise nodal, sendo utilizados os algoritmos desenvolvidos por DOMMEL (1969). O algoritmo de solução de DOMMEL (1969) é utilizado em praticamente todos os programas de modelagem de simulação digital no estudo de transitórios eletromagnéticos. Além disto, o *software* do RTDSTM também possui uma poderosa ferramenta de Interface Gráfica para o usuário (*Graphical User Interface - GUI*), denominada de RSCAD, através da qual o usuário é capaz de construir, compilar e analisar os casos simulados.

4.1. Hardware do RTDSTM

Os simuladores digitais, diferentemente dos simuladores analógicos, nos quais as saídas são contínuas no domínio do tempo, são capazes de avaliar o modelo do SEP apenas em instantes discretos no tempo. O tempo entre cada instante discreto é denominado de passo de discretização (Δt). Centenas de milhares de cálculos devem ser realizados durante cada passo de discretização, de forma a avaliar o estado do sistema em cada instante. O tempo de discretização utilizado pelo RTDSTM é de 50 μ s.

A operação em tempo real é garantida pelo RTDSTM devido à atuação de diversos processadores de alta velocidade trabalhando em paralelo. Esta operação em tempo real foi possível a partir do início da década de 90 para sistemas elétricos relativamente simples (DURIE & POTTLE, 1993).

O RTDSTM, que é o simulador digital em tempo real utilizado neste trabalho, foi desenvolvido possuindo unidades denominadas *racks*. Juntas essas unidades formam a estrutura modular do equipamento. Em cada *rack* do RTDSTM são instalados cartões de processamento e de comunicação, possuindo a capacidade de simular sistemas elétricos com até 18 nós trifásicos. Na Figura 4.1 pode-se observar *racks* típicos do RTDSTM. A simulação de SEPs mais complexos pode ser realizada utilizando-se *racks* em conjunto.



Figura 4.1: Racks típicos do RTDS™.

Observa-se na Tabela 4.1 um resumo dos principais cartões presentes no RTDS™.

Tabela 4.1: Resumo dos principais tipos de cartões presentes no RTDS™ e suas funções.

GTWIF (Giga Transceiver Workstation InterFace)	Comunicação entre o simulador e a rede local
GPC (Giga Processor Card)	Resolução das equações dos SEPs
GT-I/O (Giga Transceiver - Input/Output)	Possibilita a realização de testes com dispositivos de controle e proteção

4.1.1. Giga Transceiver Workstation Interface Card (GTWIF)

Em cada *rack* do RTDS™ é instalado um cartão de interface da estação de trabalho ou cartão GTWIF. Este cartão possibilita a comunicação entre a rede local (LAN) e o simulador e para cada cartão deste tipo é atribuído um endereço IP, fazendo com que qualquer computador que esteja conectado à LAN possa se comunicar com o RTDS™. O GTWIF é o responsável pelo comando de início e parada das simulações, controla ainda a sincronização dos processadores, garantindo a coordenação adequada dos cálculos realizados, garantindo que os cálculos não excedam o passo de integração, e a sincronização dos demais cartões do simulador.

No caso de simuladores que incluem três ou mais *racks* é necessário um *Global Bus Hub* (GBH). O GBH é instalado na parte de trás de um dos cubículos do RTDS™ e é utilizado para facilitar a comunicação direta de certos sinais entre os *racks* do RTDS™ durante a simulação. Para o caso do RTDS™ da UFCG em que os simuladores

utilizam apenas um *rack* não é necessário um GBH. Já na situação de dois *racks*, o cartão WIF é conectado diretamente por cabos de fibra ótica. Na Figura 4.2 pode-se observar um cartão GTWIF.



Figura 4.2: Cartão GTWIF.

4.1.2. Giga Processor Card (GPC)

O cartão GPC é um cartão de processamento que é utilizado geralmente para solucionar mais de um modelo de componente do sistema ao mesmo tempo. Cada cartão GPC é constituído de dois processadores RISC, onde cada um opera com um *clock* de 1 GHz. Um cartão GPC por cada *rack* é destinado para a resolução de equações da rede. Outro processador GPC deve ser reservado para a solução dos componentes dos modelos simulados na rede. Os dois cartões GPC se comunicam através de um barramento em anel de alta velocidade. Na Figura 4.3 está o cartão de processamento do RTDSTM, o GPC.

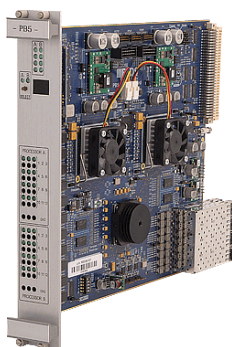


Figura 4.3: Cartão GPC.

4.1.3. Gigabit Transceiver – Input/Output (GT-I/O)

O RTDSTM possui interfaces para a entrada e saída de dados do sistema elétrico que permitem a realização de testes com dispositivos de proteção e de controle. Para a realização destas funções o RTDSTM utiliza a uma família de cartões denominada de GT-I/O. Os cartões desta família são conectados ao GPC através de fibra ótica de 2 GHz e permitem uma isolamento ótica em relação ao simulador.

- *Gigabit Transceiver Analog Output (GTAO)*

O GTAO é um cartão que possibilita a isolamento ótica da saída analógica da simulação de um equipamento externo. O GTAO possui 12 canais de saída, cada um com 16 bits e permitem gerar sinais analógicos com valores de pico entre ± 10 V. O cartão GTAO realiza o processo de *oversampling* quando opera com passos de simulação regulares e a saída é fornecida a cada intervalo de 1 μ s. Na Figura 4.4 (a) pode-se observar um cartão GTAO.

- *Gigabit Transceiver Analog Input (GTAI)*

O GTAI é um cartão utilizado para possibilitar a entrada de sinais analógicos externos ao RTDSTM. O GTAI permite atualizações para o cartão GPC em intervalos de no mínimo 6 μ s. O cartão GTAI é constituído de dois canais conversores de sinais analógicos para digitais de 16 bits, sendo cada um desses canais formados por 6 entradas. Assim como GTAO, o GTAI pode gerar sinais analógicos com valores de pico entre ± 10 V. Na Figura 4.4 (b) é ilustrado um cartão GTAI.

- *Gigabit Transceiver Digital Output (GTDO)*

O GTDO é um cartão que possui um total de 64 saídas digitais, os sinais gerados variam de 7 V a 24 V e uma fonte de corrente que pode atingir até 100 mA. Este cartão é utilizado para a comunicação com os equipamentos externos e pode-se observá-lo na Figura 4.4 (c).

- *Gigabit Transceiver Digital Input (GTDI)*

O GTDI é um cartão que possui 64 canais de entradas digitais e estas são utilizadas como interface para os sinais digitais provenientes de equipamentos externos ao RTDSTM, onde esses sinais externos devem estar entre 0 V e 5 V. Um cartão GTDI é ilustrado na Figura 4.4 (d).

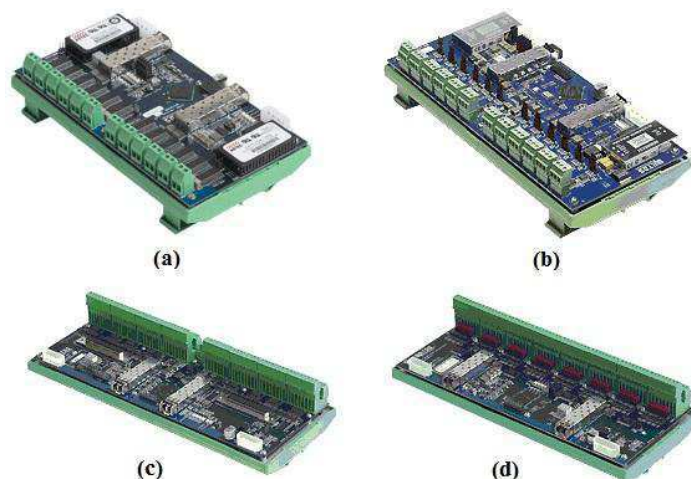


Figura 4.4: Cartões para a entrada e saída de sinais analógicos e digitais: (a) GTAO; (b) GTAI; (c) GTDO; (d) GTDI.

- *Gigabit Transceiver Front Panel Interface Card (GTFPI)*

O cartão GTFPI é utilizado para a interface de entrada ou saída de sinais digitais através do painel frontal do RTDSTM e ainda sinais de alta tensão. O GTFPI se conecta ao GPC através de fibra ótica e é necessário pelo menos um cartão GTFPI por cubículo. Na Figura 4.5 pode-se observar um cartão GTFPI.

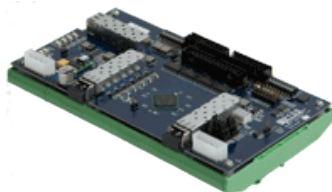


Figura 4.5: Cartão GTFPI.

- *Gigabit Transceiver Network Interface System Card (GTNET)*

O cartão GTNET é utilizado para garantir uma comunicação em tempo real de envio e retorno de informações para o simulador do RTDSTM via ethernet. O GTNET é o cartão destinado para a interface de protocolos de rede, estando pré-instalado no mesmo o protocolo IEC 61850. Logo, o GTNET permite o envio de mensagens GSSE (*Generic Substation Status Event*) ou GOOSE (*Generic Object Oriented System Events*) com até 32 saídas binárias do simulador ou ainda possibilita o recebimento deste tipo de mensagens de 5 IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) externos.

O GTNET também apresenta a funcionalidade *playback*, que está presente nas caixas de teste de relés. Esta função permite que os registros oscilográficos que foram capturados pelos IEDs possam ser reproduzidos pelo RTDSTM. A reprodução destas

informações pelo simulador possibilita a análise das prováveis causas de falhas de operação do sistema de proteção quando um distúrbio for registrado. Na Figura 4.6 é ilustrado um cartão GTNET.



Figura 4.6: Cartão GTNET.

4.2. Software do RTDS™

O *software* do RTDS™ é organizado em uma hierarquia que possui três níveis: a interface gráfica do usuário de alto nível; a comunicação e execução em nível médio; e o sistema de operação de multi-tarefas WIF de baixo nível. Entretanto, o usuário do RTDS™ interage apenas com o *software* de alto nível, sendo os *softwares* de níveis mais baixos acessados automaticamente pelo nível mais alto. O nível mais alto do *software* do RTDS™ contém a família RSCAD de ferramentas, onde o RSCAD foi uma parte desenvolvida para garantir uma interface totalmente gráfica ao usuário do RTDS™. O RSCAD é formado por diversos módulos, dentre estes, destacam-se: o módulo *File Manager*, o módulo *Transmission Line (TLine)*, o módulo *Draft*, o módulo *Runtime* e o módulo *Component Builder (CBuilder)*.

4.2.1. File Manager

O *File Manager*, ou simplesmente *fileman*, representa o ponto de partida para a interface do RSCAD. O *fileman* é utilizado para projetar, realizar o gerenciamento de casos e facilitar as trocas de informações entre os usuários. Todos os demais programas do RSCAD estão contidos no módulo *fileman*, como observado na Figura 4.7.

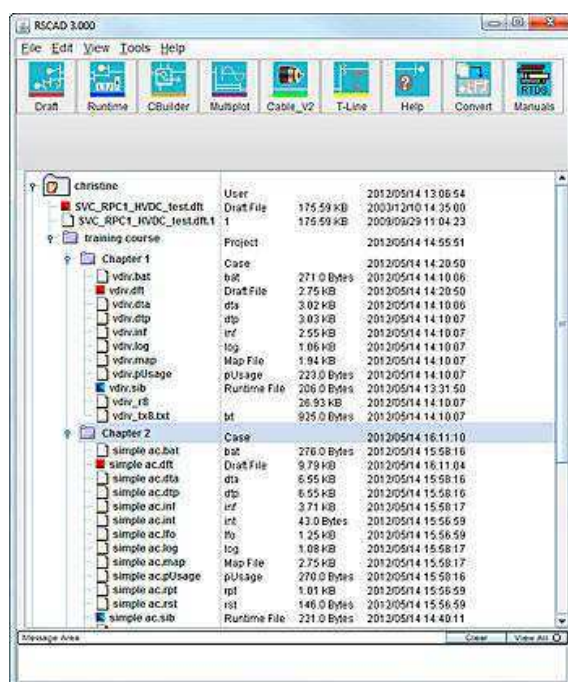


Figura 4.7: Arquivos contidos no *File Manager* do RSCAD.

4.2.2. Draft

O *Draft* é usado para modelar circuitos e parâmetros de entrada. A tela do *Draft* é dividida em duas partes: a parte da biblioteca e a da modelagem do sistema. Os ícones individuais de cada componente são selecionados a partir da biblioteca e colocados em seguida na parte referente à modelagem. Na Figura 4.8 observa-se a tela do *Draft*.

O *Draft* possui uma biblioteca destinada à elaboração da lógica dos sistemas de controle, denominada de *Controls*. A biblioteca *Controls* é formada por geradores de sinais, portas lógicas, botões, chaves, entre outros componentes. Outra biblioteca de grande aplicação é a que possui os componentes de um sistema de potência intitulada de *Power System*. A biblioteca *Power System* possui entre seus componentes resistores, indutores, capacitores, fontes de tensão, transformadores, TCs, linhas de transmissão, máquinas elétricas, disjuntores e barramentos.

No módulo *Draft* também é permitida a criação de uma biblioteca própria do usuário, seja importando componentes já modelados de outras bibliotecas do *Draft*, ou por componentes criados pelo próprio usuário.

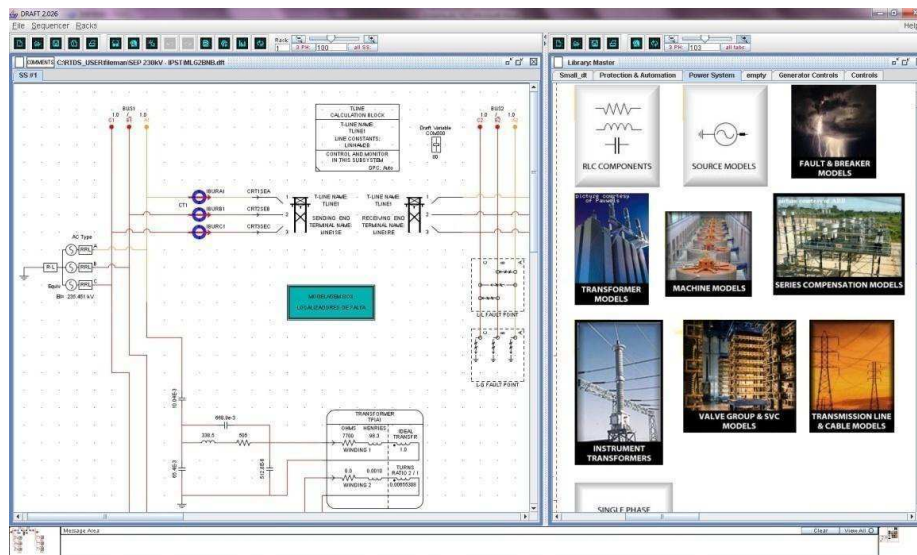


Figura 4.8: Tela do módulo *Draft* do RSCAD.

4.2.3. T-Line

O *T-Line* é utilizado para definir as propriedades das linhas de transmissão aéreas e, de uma maneira geral, os dados de entrada são em termos da geometria e configuração física da linha. As constantes das LTs, assim como as equações são resolvidas e permitindo o uso das mesmas no programa *Draft*. Pode-se observar na Figura 4.9 a tela do programa *T-Line*. O *T-Line* permite que o usuário selecione o modelo da linha e se a mesma é idealmente transposta, transposta ou não é transposta.

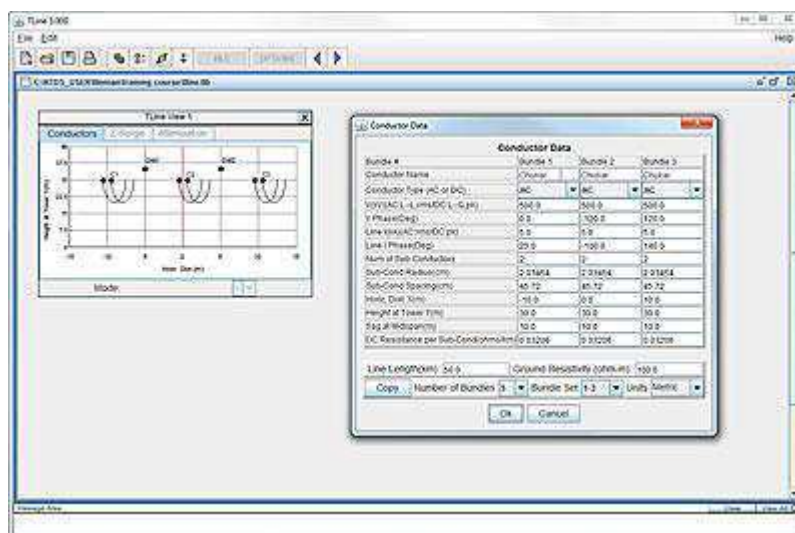


Figura 4.9: Tela do módulo *T-Line* do RSCAD.

4.2.4. Runtime

O *Runtime* é utilizado para controlar os casos de simulação que são executados no *hardware* do RTDS™. O controle da simulação, incluindo os comandos de início e parada, a aplicação de faltas e a operação dos disjuntores são executadas através do *Runtime*. Os componentes que permitem estes comandos são os botões, as chaves e os *sliders*. Além disto, o *Runtime* também analisa as medições *online* e a aquisição de dados/distúrbios. Na Figura 4.10 pode-se observar a tela do *Runtime*.



Figura 4.10: Tela do módulo *Runtime* do RSCAD.

4.2.5. C-Builder

O *C-Builder* é uma parte do *software* do RTDS™ que permite a criação de novos componentes, sejam estes componentes de controle ou do sistema elétrico. A criação dos novos componentes se dá através de algoritmos feitos pelo usuário na linguagem C de programação e de modelos para os componentes. Logo, podem-se interagir os componentes já fornecidos pelo RTDS™ com os componentes criados pelo usuário através do *C-Builder* e realizar em seguida as simulações em tempo real. Os novos modelos criados no *C-Builder* devem ser importados para a biblioteca do módulo *Draft* e em seguida, simulam-se os sistemas elétricos no módulo *Runtime*. Na Figura 4.11 observa-se a tela do módulo *C-Builder*.

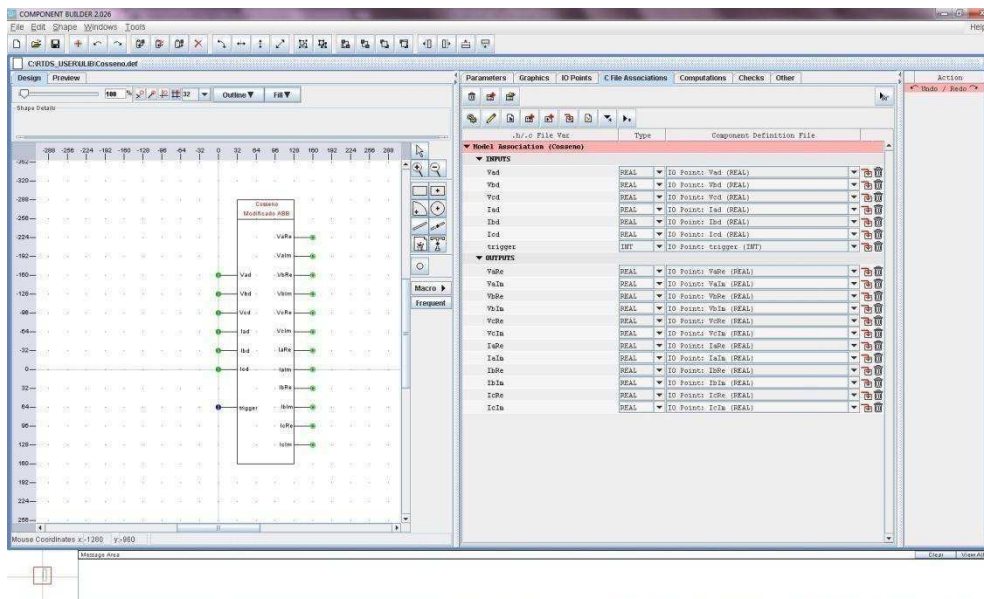


Figura 4.11: Tela do módulo *C-Builder* do RSCAD.

No Capítulo 5 será apresentado como foram realizadas a detecção e a localização de faltas em LTs. Então, será detalhada a implementação do modelo do sistema, assim como será feito o detalhamento dos métodos utilizados.

Capítulo 5

Implementação dos Métodos de Localização

A detecção de faltas é necessária pelos métodos baseados na teoria das ondas viajantes. Enquanto que, os métodos baseados nos componentes de frequência fundamental não necessitam dessa detecção, entretanto, eles requerem que sejam realizadas a filtragem e a estimação fasorial dos sinais que serão analisados.

Conforme visto no Capítulo 1, realizou-se previamente uma comparação entre dois dos métodos que utilizam a teoria das ondas viajantes (LOPES, 2011 e CRUZ, 2010). Em seguida, foi escolhido o método que apresentou melhor desempenho para ser comparado com três métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental (JOHNS & JAMALI, 1990; GIRGIS *et al.*, 1992; RADOJEVIC *et al.*, 2009).

5.1. Implementação no ATP e no MATLAB®

A implementação de ambos os métodos foi realizada utilizando-se o *software* MATLAB®. Além deste *software*, também se utilizou o ATP e a linguagem MODELS para a geração dos registros oscilográficos de tensão e corrente nos dois terminais do SEP avaliado, de forma a simular dois RDPs. Considerou-se que os dados obtidos nos dois terminais da LT fictícia estavam sincronizados via GPS.

As simulações no ATP contemplaram apenas casos de faltas monofásicas, uma vez que cerca de 70% a 80% dos casos de faltas nas LTs ocorrem entre um condutor e a terra (STEVENSON Jr., 1986). Entretanto, em etapas seguintes do trabalho foram avaliados todos os tipos de faltas.

Foram analisados 11 casos de faltas monofásicas em uma LT sem compensação série e 11 casos de faltas monofásicas em uma LT com compensação série capacitiva, adotando-se um grau de compensação de 50% com bancos de capacitores inseridos em

ambos os terminais. Segundo ANDERSON (1999), os valores mais comuns do grau de compensação para um sistema de transmissão estão entre 50% e 70%.

O SEP analisado é composto por duas fontes, dois barramentos e uma LT fictícia de 230 kV com uma extensão de 500 km. Considerou-se a LT perfeitamente transposta e a mesma foi modelada a parâmetros distribuídos constantes na frequência, conforme apresentado no Apêndice A.

5.1.1. Implementação do Método LOPES (2011) no MATLAB®

Após a modelagem do sistema no ATP, realizou-se a localização de faltas como proposto por LOPES (2011). Para isso, utilizou-se o *software* MATLAB®, que foi o responsável pela obtenção dos fasores de tensão, pela normalização dos vetores, pela aplicação da transformada de Clarke e dq0 e pelo cálculo dos coeficientes $[C_{dif}]^2$. O valor do Δt utilizado para o cálculo dos coeficientes $[C_{dif}]^2$ foi 50 μs .

O início dos transitórios eletromagnéticos foi detectado através da análise dos valores dos coeficientes $[C_{dif}]^2$, ou seja, quando estes coeficientes tivessem um valor superior a um determinado limiar detectou-se um distúrbio na LT. Este limiar foi considerado devido à presença de ruídos ou oscilações de baixa frequência que estão presentes mesmo em regime permanente. O limiar foi calculado por meio da análise dos sinais obtidos em regime permanente (SANTOSO *et al.*, 1996). Logo, o instante inicial dos transitórios nos terminais monitorados foi calculado através da equação (5.1).

$$t_{transitório} = \frac{(i-1)}{F_s}, \quad (5.1)$$

em que F_s é a frequência de amostragem dos RDPs utilizados na aquisição de dados e foi igual a 20 kHz; i é o índice da amostra para a situação em que o $[C_{dif}]^2$ assume valores superiores ao limiar e $t_{transitório}$ é o instante inicial dos transitórios.

Em seguida, ainda no *software* MATLAB®, calculou-se a velocidade de propagação das ondas viajantes, de acordo com a equação (5.2).

$$v = \frac{\omega}{\text{Im}[\sqrt{(R+j\omega L) \cdot (j\omega C)}]}, \quad (5.2)$$

sendo R , C e L os valores de resistência, capacitância e indutância por unidade de comprimento da linha, respectivamente; e ω a frequência angular nominal do sistema.

A partir da equação proposta por GALE *et al.* (1993) para localização de faltas em LTs por meio de dados de tensão obtidos por dois terminais, localizou-se as faltas na linha de transmissão fictícia.

5.1.2. Implementação do Método CRUZ (2010) no MATLAB®

O método proposto por CRUZ (2010) foi simulado utilizando-se os dados de tensões e correntes obtidos no *software* ATP para o MATLAB®, de maneira análoga ao realizado na análise do método de LOPES (2011).

Assim como no método baseado na teoria das ondas viajantes, o primeiro passo nos componentes fundamentais foi a identificação dos instantes iniciais de falta. Entretanto, para esta nova situação, utilizou-se os sinais trifásicos de correntes, por apresentarem uma variação mais perceptível quando há uma incidência de falta, e os instantes iniciais de falta foram obtidos pela transformada *Wavelet* discreta (CRUZ, 2010). A *Wavelet* mãe utilizada foi da família Daubechies com quatro níveis de decomposição.

Em seguida, os coeficientes *Wavelets* obtidos foram submetidos a um algoritmo de redução de ruídos para que em seguida esses coeficientes fossem analisados e determinados os instantes iniciais da falta para os dois terminais.

A etapa seguinte consistiu na detecção do distúrbio. Fez-se uso do algoritmo desenvolvido por GAOUDA *et al.* (2002), tomando como base a equação (5.3). Ou seja, quando $m(n)$ for igual a 1 é porque ocorreu um distúrbio na LT.

$$m(n) = \begin{cases} 0, & \text{se } [d'_s(n)]^2 < \sigma \\ 1, & \text{se } [d'_s(n)]^2 \geq \sigma \end{cases} \quad (5.3)$$

em que σ é o desvio padrão de $[d'_s(n)]^2$.

Após a identificação do início da falta, realizou-se a etapa de filtragem, na qual utilizou-se um filtro passa-baixas Butterworth de terceira ordem com uma frequência de corte de 180 Hz. Em seguida, foi realizada a estimação fasorial dos sinais de corrente e tensão via a Transformada Discreta de Fourier de um ciclo. Para a realização da transformada, utilizou-se uma taxa de amostragem de 16 amostras/ciclo. A TDF com o

algoritmo de um ciclo foi adotada por ser uma técnica já consolidada em aplicações de proteção em SEPs e por ser a estimação utilizada no método proposto por CRUZ (2010). A equação geral do método é dada pela equação (5.4), conforme DINIZ *et al.* (2010).

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}, \quad (5.4)$$

em que N é o número de pontos por ciclo, k é um múltiplo da relação entre a frequência de amostragem e a taxa de amostragem. Como deseja-se obter apenas a frequência fundamental, $k = 1$, $x(n)$ é a n -ésima amostra dos sinais de corrente ou tensão digitalizadas, com n variando de 0 a $N - 1$.

Por fim, realizou-se a localização da falta por meio da equação (2.15) proposta por GIRGIS *et al.* (1992).

5.2 Implementação dos Métodos no RSCAD

A implementação de quatro métodos foi realizada utilizando-se o *software* RSCAD, presente no RTDSTM. O sistema elétrico analisado possui duas fontes, dois barramentos, uma LT, seis TCs e seis TPs. Entretanto, foram analisadas duas LTs individualmente, ambas com tensão igual a 230 kV: uma linha fictícia, porém com dados reais da CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), com uma extensão igual 500 km; e, uma linha real da CHESF denominada LT 04M1, que é a linha responsável pela interligação entre Milagres e Banabuiú, e com uma extensão de 225,9 km.

A modelagem das LTs foi realizada no módulo *T-Line* do RSCAD e ambas consideradas perfeitamente transpostas e modeladas a parâmetros distribuídos constantes na frequência. Em seguida, estas linhas foram utilizadas no módulo *Draft*, onde o restante do sistema foi modelado. Os dados de modelagem das LTs, assim como os dados das fontes, dos TPs e dos TCs podem ser observados em Apêndice.

O modelo utilizado neste trabalho para os TPCs foi proposto por FERNANDES Jr. (2003) e, segundo este, cada TPC pode ser dividido em pelo menos quatro partes: o divisor de tensão capacitivo, o reator de compensação, o transformador de potencial indutivo e o circuito supressor de ferorrressonância (CSF).

Após a modelagem do sistema elétrico de potência no *Draft*, realizou-se a implementação dos métodos propriamente ditos, utilizando-se parte de uma biblioteca do módulo no *Draft* referente aos sistemas de controle, denominada *Controls*, e por meio da criação de novos blocos no módulo *C-Builder*. Os métodos baseados na análise dos componentes de frequência fundamental, JOHNS & JAMALI (1990), GIRGIS *et al.* (1992) e RADOJEVIC *et al.* (2009), tiveram os mesmos processos de filtragem e estimação fasorial.

A filtragem dos sinais de tensão e corrente foi realizada por meio de um filtro passa-baixas do tipo Butterworth de terceira ordem e com uma frequência de corte igual a 180 Hz. Em seguida, estimaram-se os dados de tensão e corrente pela Transformada Discreta de Cosseno Modificado (TDCM). O filtro passa-baixas do tipo Butterworth já fazia parte da biblioteca *Controls*, enquanto que o estimador fasorial foi modelado primeiramente no módulo *C-Builder* e em seguida foi importado para o módulo *Draft*.

Cada um dos três métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental foram implementados, fazendo-se uso de componentes pertencentes à biblioteca *Controls* do módulo do *Draft*. Entretanto, o método baseado na teoria das ondas viajantes proposto por LOPES (2011) necessitou que a modelagem da Transformada Park fosse implementada no *C-Builder*.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos pelos diversos métodos implementados, considerando-se os erros relativos na localização de faltas em linhas de transmissão.

Capítulo 6

Análise dos Resultados

Neste capítulo, serão mostrados e analisados os resultados dos métodos de localização de faltas em LTs para diferentes situações de faltas. Entretanto, antes de realizar qualquer análise é necessário definir os principais tipos de erros, para que possa ser feita uma comparação entre os métodos.

6.1. Cálculo dos Erros de Localização de Falta

O erro de localização de faltas é um dos principais fatores de análise de desempenho dos algoritmos de localização de faltas em LTs. Pode-se definir três erros distintos.

- Erro Absoluto (*EA*)

O erro absoluto é obtido apenas pela diferença entre a distância real em que ocorreu a falta e o local da falta estimado pelo algoritmo localizador. Observa-se que o erro absoluto neste trabalho será dado em km. Com o intuito de tornar mais simples a análise, utiliza-se o módulo desta diferença, de acordo com a equação (6.1).

$$EA = |d_{real} - d_{estimada}|, \quad (6.1)$$

sendo d_{real} o local real do ponto de falta e $d_{estimada}$ é o local de falta estimado pelo algoritmo localizador.

- Erro Relativo (*ER*)

O erro relativo é indicado para uma análise mais generalista, pois independe do comprimento da LT. Este tipo de erro é dado em porcentagem e é calculado pela razão entre *EA* e o comprimento da LT, conforme a equação (6.2).

$$ER = \frac{|d_{real} - d_{estimada}|}{l} \cdot 100 \quad (6.2)$$

em que l é o comprimento da LT.

- Erro Admissível (E_{ad})

O erro admissível é um erro utilizado para os métodos baseados na teoria das ondas viajantes, pois estes apresentam limitações devido aos dispositivos físicos. Ou seja, é o erro que é admissível devido à frequência de amostragem utilizada pelos conversores analógico-digital (conversores A/D). O desvio máximo esperado para as localizações de faltas em LT, em módulo, é proporcional à metade do período de amostragem Δt , de acordo com a equação (6.3).

$$E_{ad} \approx \frac{\Delta t \cdot c}{2}, \quad (6.3)$$

em que c é a velocidade da luz ($\approx 300.000 \text{ km/s}$). Tomando-se como base os dados do RTDSTM, em que a taxa de amostragem é igual a $50 \mu\text{s}$ (RTDS Technologies Inc., 2008), tem-se que o erro admissível é igual a $7,5 \text{ km}$, em módulo.

Neste trabalho, utilizou-se o erro relativo como principal critério de análise dos desempenhos dos métodos localizadores, devido à análise de duas linhas de transmissão de comprimentos distintos.

6.2. Resultados *Off-line*

Foram simulados 22 casos para avaliar o desempenho da Tdq0 e da Transformada *Wavelet* a fim de verificar se as transformadas influenciam no desempenho final de cada um dos métodos, sendo 11 casos sem a inserção da compensação série capacitiva e 11 casos com a inserção da compensação série nos terminais da LT.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 são apresentados os resultados para a detecção dos distúrbios na LT quando não há a inserção da compensação série reativa.

Tabela 6.1: Detecção de faltas pela Transformada de Park sem compensação série.

Local da Falta (km)	Terminal 1 - t_{11} (s)	Terminal 2 - t_{21} (s)
15	0,0997	0,1013
50	0,0998	0,1011
100	0,1000	0,1010
150	0,1001	0,1008
200	0,1003	0,1006
250	0,1005	0,1005
300	0,1006	0,1003
350	0,1008	0,1001
400	0,1010	0,1000
450	0,1011	0,0998
485	0,1013	0,0997

Tabela 6.2: Detecção de faltas pela Transformada *Wavelet* sem compensação série.

Local da Falta (km)	Terminal 1 - t_{11} (s)	Terminal 2 - t_{21} (s)
15	0,0997	0,1013
50	0,0998	0,1011
100	0,1000	0,1010
150	0,1001	0,1008
200	0,1003	0,1006
250	0,1005	0,1005
300	0,1006	0,1003
350	0,1008	0,1001
400	0,1010	0,1000
450	0,1011	0,0998
485	0,1013	0,0997

Sabe-se que t_{11} é o instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 1 e t_{21} é o instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 2.

Observando-se as Tabelas 6.1 e 6.2, tem-se que os instantes iniciais de detecção para os dois métodos foram idênticos para os 11 casos analisados. Logo, a detecção dos instantes iniciais de faltas não será uma fonte de erros que influenciará a comparação da localização de faltas para os dois algoritmos de localização nas situações em que não há a inserção de bancos de capacitores para realizar a compensação reativa.

Por meio da equação (6.2) e pelos algoritmos propostos por LOPES (2011) e CRUZ (2010) foram construídos os gráficos das Figuras 6.1 e 6.2.

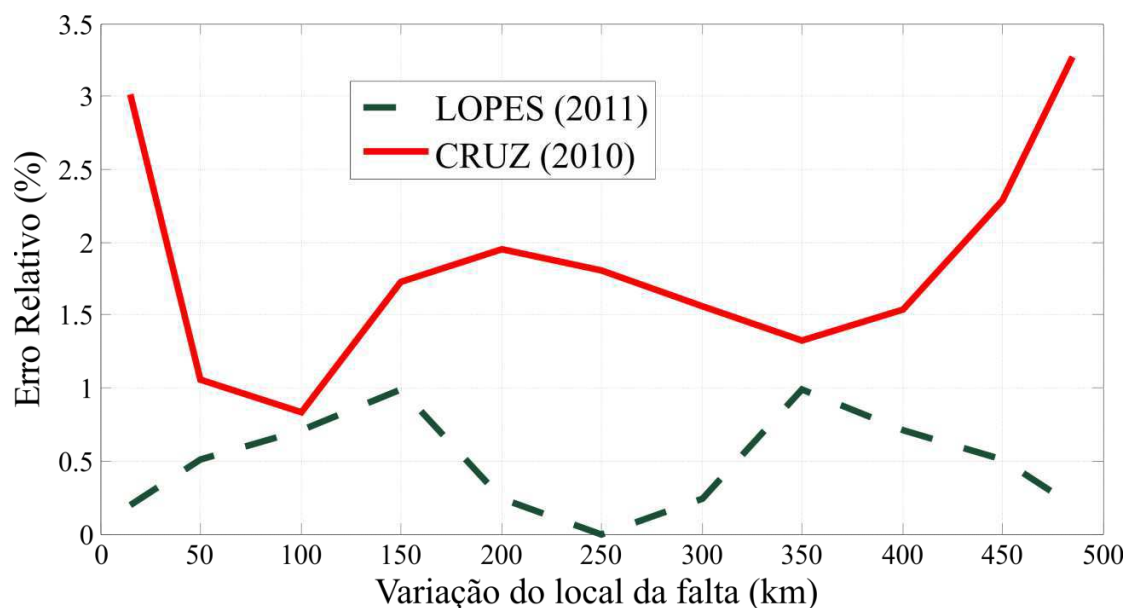


Figura 6.1: Comparação entre os métodos proposto por LOPES (2011) e CRUZ (2010) sem compensação série na LT.

Na Figura 6.1, observa-se o melhor desempenho do método proposto por LOPES (2011) e que este método não apresentou erro relativos superiores a 1%. Logo, este método não apresentou erros absolutos superiores a 5 km. Este valor indica que, em todos os 11 casos, o método das ondas viajantes não ultrapassou o erro admissível que era de 7,5 km, para a frequência de amostragem de 50 μ s.

Em seguida foram simulados 11 casos para a aplicação de uma falta monofásica na LT com a inserção de bancos de capacitores nos dois terminais da LT para exercer o papel de compensação reativa.

Tabela 6.3: Detecção de faltas pela Transformada de Park com compensação série.

Local da Falta (km)	Terminal 1 - t_{11} (s)	Terminal 2 - t_{21} (s)
15	0,0997	0,1013
50	0,0998	0,1011
100	0,1000	0,1010
150	0,1001	0,1008
200	0,1003	0,1006
250	0,1005	0,1005
300	0,1006	0,1003
350	0,1008	0,1001
400	0,1010	0,1000
450	0,1011	0,0998
485	0,1013	0,0997

Tabela 6.4: Detecção de faltas pela Transformada *Wavelet* com compensação série.

Local da Falta (km)	Terminal 1 - t_{11} (s)	Terminal 2 - t_{21} (s)
15	0,0997	0,1013
50	0,0998	0,1011
100	0,1371	0,1010
150	0,1001	0,1008
200	0,1003	0,1006
250	0,1005	0,1005
300	0,1006	0,1003
350	0,1008	0,1001
400	0,1010	0,1372
450	0,1011	0,0998
485	0,1013	0,0997

Observa-se na Tabela 6.3 que a Transformada de Park não teve sua detecção alterada em nenhum dos casos após a inserção do banco de capacitores na LT. Entretanto, a detecção via TWD (Transformada *Wavelet* Discreta) apresentou erros para os casos da falta aplicada a 100 km e a 400 km da barra 1. Neste caso é importante frisar que a escolha correta dos limiares é crucial para o bom funcionamento do sistema detector de transitórios e, portanto, acredita-se que os erros verificados podem ser minimizados através de um cálculo mais preciso dos referidos limiares utilizados durante a identificação do instante de chegada das ondas viajantes aos terminais monitorados.

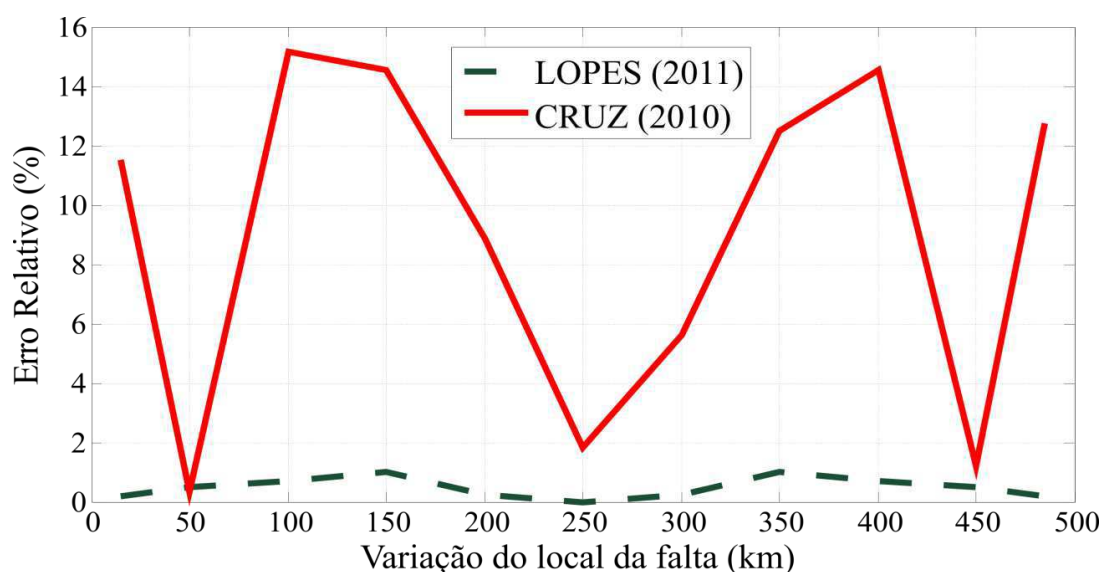


Figura 6.2: Comparação entre os métodos proposto por LOPES (2011) e CRUZ (2010) com compensação série nos dois terminais da LT.

Na Figura 6.2 são mostrados os resultados obtidos pelos algoritmos localizadores em uma LT com a compensação reativa com um grau de compensação de 50%. Novamente, obteve-se um campo de busca inferior a 5 km para os métodos baseados na teoria das ondas viajantes, o que garante que os erros estejam inferiores ao erro admissível.

Observa-se na Figura 6.2 que o método proposto CRUZ (2010) divergiu e atingiu erros superiores a 15%. Logo, este método não é recomendado para casos de LTs com compensação série capacitiva.

Como observado nas Figuras 6.1 e 6.2, o método das ondas viajantes apresentou um resultado bastante satisfatório, visto que em nenhum dos 22 casos analisados obteve um erro relativo superior a 1%. Enquanto que o método proposto por CRUZ (2010) demonstrou não ser uma aproximação adequada para esta situação, sendo a não inclusão do efeito capacitivo shunt da LT uma possível fonte de erro.

Logo, por apresentar maior precisão, quase que na totalidade dos casos analisados, por ser mais robusto frente à compensação série e por ser de mais fácil implementação, optou-se inicialmente pelo método proposto por LOPES (2011) para ser o método baseado na teoria das ondas viajantes a ser simulado em tempo real no RTDSTM. Em seguida, acrescentou-se ao método proposto por LOPES (2011) a técnica para detecção dos distúrbios proposta por LOPES *et al.* (2012), que garante mais precisão na detecção de faltas em LTs devido ao cálculo da energia dos coeficientes de diferença ξ_{dif} . O cálculo da energia dos coeficientes de diferença ξ_{dif} tem como principal potencialidade a robustez frente à presença de ruídos elétricos, evitando operações indevidas do sistema localizador em caso de propagação de ondas viajantes na LT durante o regime permanente.

6.3. Resultados via RTDSTM

Os resultados obtidos via RTDSTM foram de quatro métodos de localização de faltas, sendo um método baseado na teoria das ondas viajantes (LOPES, 2011) e três métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental (JOHNS & JAMALI, 1990), (GIRGIS *et al.*, 1992) e (RADOJEVIC *et al.*, 2009).

Foram analisados 3300 casos de faltas em cada LT. Logo, para a LT real foram simulados 1650 casos, para cada um dos quatro métodos, sem o TC e, em seguida, foram simulados 1650 casos com a presença do TC. Simulou-se ainda 3300 casos de

faltas para a LT fictícia, sendo 1650 casos sem compensação série capacitiva e 1650 casos com a compensação série, cujo grau de compensação foi de 50% e os bancos de capacitores foram inseridos apenas no primeiro terminal da LT. Para cada um desses blocos de 1650 situações de faltas, variaram-se: a resistência de falta, o ângulo de incidência de falta, os tipos de faltas e o local da falta, conforme a Tabela 6.5. Pode-se observar na Figura 6.3 um diagrama no qual é retratada a divisão desses blocos de 1650 casos.

Tabela 6.5: Casos simulados no RTDS™.

Características das faltas analisadas	Valores de cada característica	Número de possibilidades
Local de Falta (%)	7; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 e 93	11
Tipos de Faltas	AT; BT; CT; AB; AC; BC; ABT; ACT; BCT e ABC	10
Resistência de Falta (Ω)	0,01; 3; 10; 50 e 90	5
Ângulo de Incidência de Falta ($^\circ$)	0; 45 e 90	3
Total de casos simulados		1650

Portanto, foram simulados 6.600 casos para cada um dos métodos, o que resultou num total de 26.400 simulações.



Figura 6.3: Diagrama da divisão dos casos simulados.

Na Figura 6.4, observam-se os erros relativos médios obtidos para a localização de faltas na LT 04M1 da CHESF, variando-se o ângulo de incidência de falta considerando a presença e a ausência dos TCs. Já na Figura 6.5 podem ser observados os erros relativos médios obtidos para a LT fictícia de 500 km. Também foi feita a

variação do ângulo de incidência de falta, mas, além disto, foi levada em consideração a presença e a ausência da compensação série capacitiva com um GC de 50% em um terminal da LT.

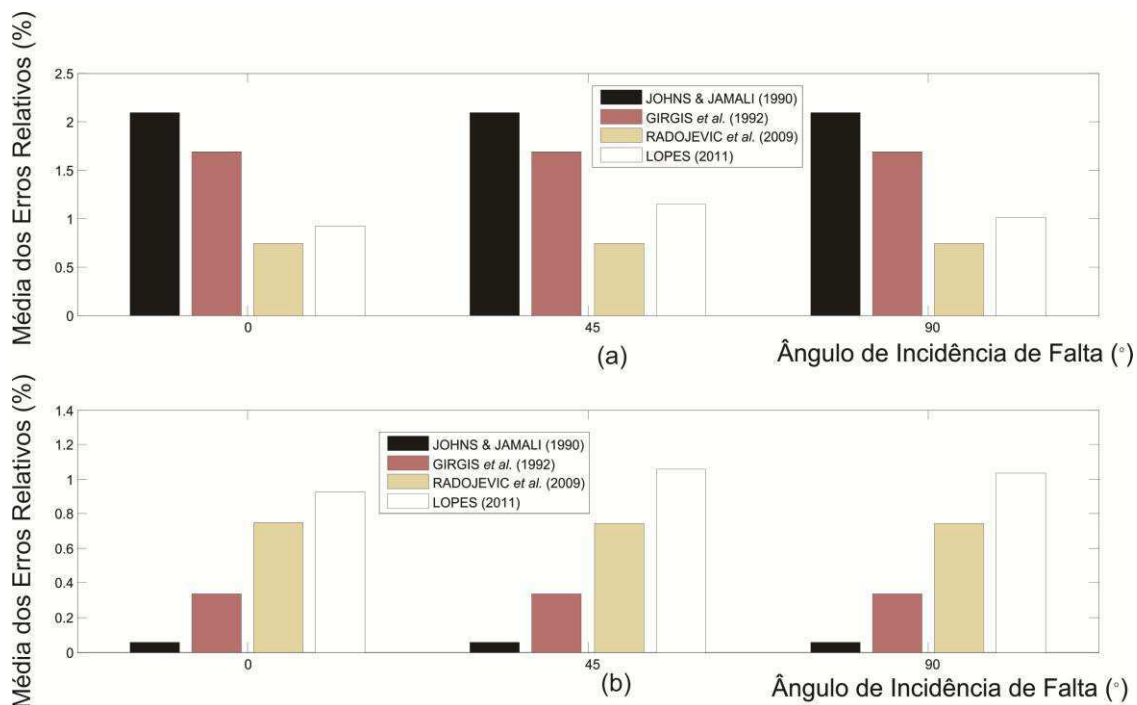


Figura 6.4: Localização de faltas para a LT real variando os ângulos de incidência de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.

Na análise da Figura 6.4 tem-se que o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) é o mais exato para as simulações realizadas sem os TCs, enquanto que os métodos propostos por RADOJEVIC *et al.* (2009) e LOPES (2011) foram os menos susceptíveis a presença dos TCs. Este fato ocorre porque o método proposto por LOPES (2011) utiliza apenas fasores de tensão para estimar a localização de faltas. Enquanto que o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) também é robusto perante a inserção de TCs devido à independência do algoritmo diante das alterações dos parâmetros do sistema, como a constante de propagação e a impedância equivalente.

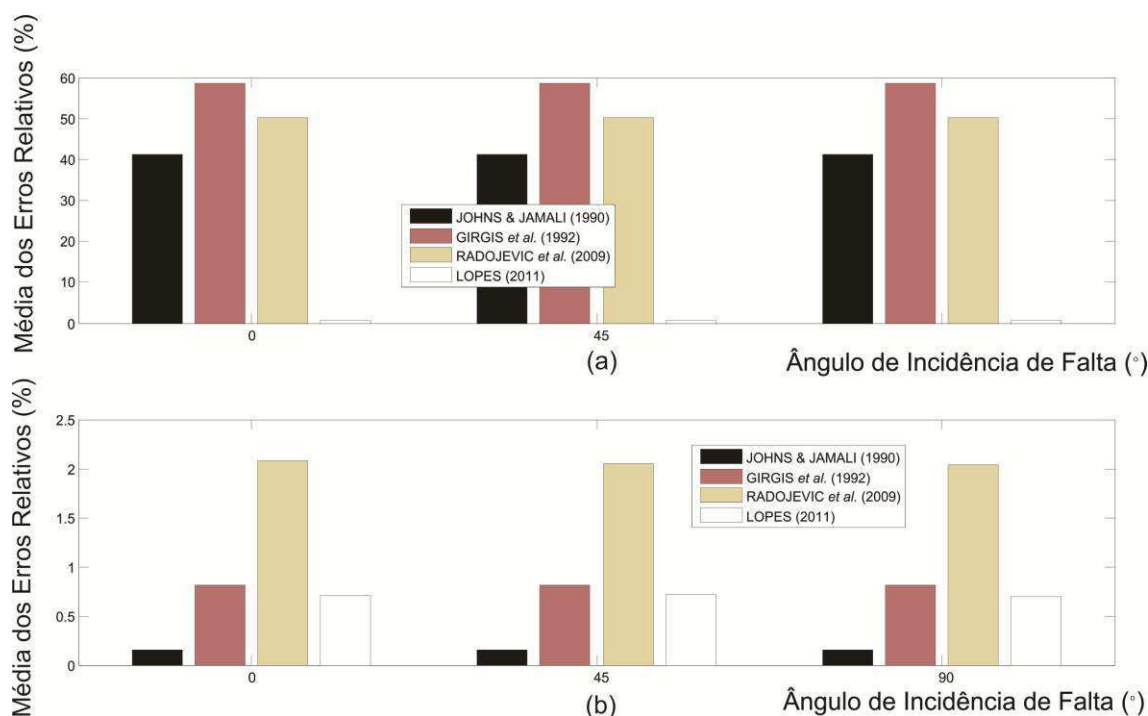


Figura 6.5: Localização de faltas para a LT fictícia variando os ângulos de incidência de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.

Na Figura 6.5 nota-se que o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) é o mais exato para o sistema no qual a LT fictícia não teve a compensação série capacitiva, porém na presença da compensação série apresenta um grande erro relativo, o que inviabiliza o uso deste método para este caso. Observa-se ainda pela Figura 6.5 que o método proposto por LOPES (2011) foi o único método que suportou a inserção dos bancos de capacitores em um dos terminais da LT sem sofrer grandes alterações, mostrando que este é o mais robusto, para o caso, entre os métodos analisados.

Ainda nas Figuras 6.4 e 6.5 observa-se que a influência com relação à variação do ângulo de incidência de falta é pequena, para todos os métodos analisados, se comparada às influências da compensação série e dos TCs. Entretanto, mesmo sofrendo pouca influência é interessante ressaltar que o desempenho do algoritmo de LOPES (2011) é melhor para faltas com ângulos de incidência iguais a 90°. Este fato ocorre porque em 90° é onde os sinais de tensão se encontram nos seus picos, fazendo com que a detecção das faltas seja facilitada.

Na Figura 6.6, observam-se os erros relativos médios obtidos para a localização de faltas em LT real, variando-se resistência de falta na presença e na ausência dos TCs.

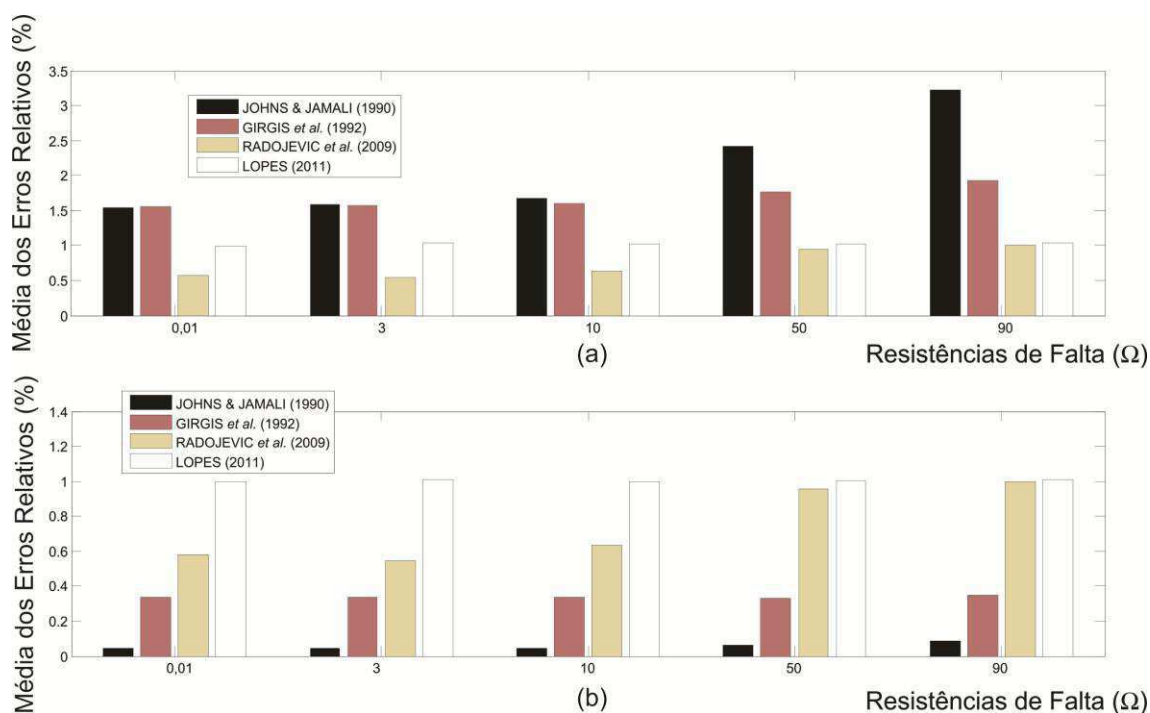


Figura 6.6: Localização de faltas para a LT real variando as resistências de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.

Na Figura 6.7 observam-se os erros relativos médios obtidos para a LT fictícia realizando-se a variação das resistências de falta na presença e na ausência da compensação série capacitiva.

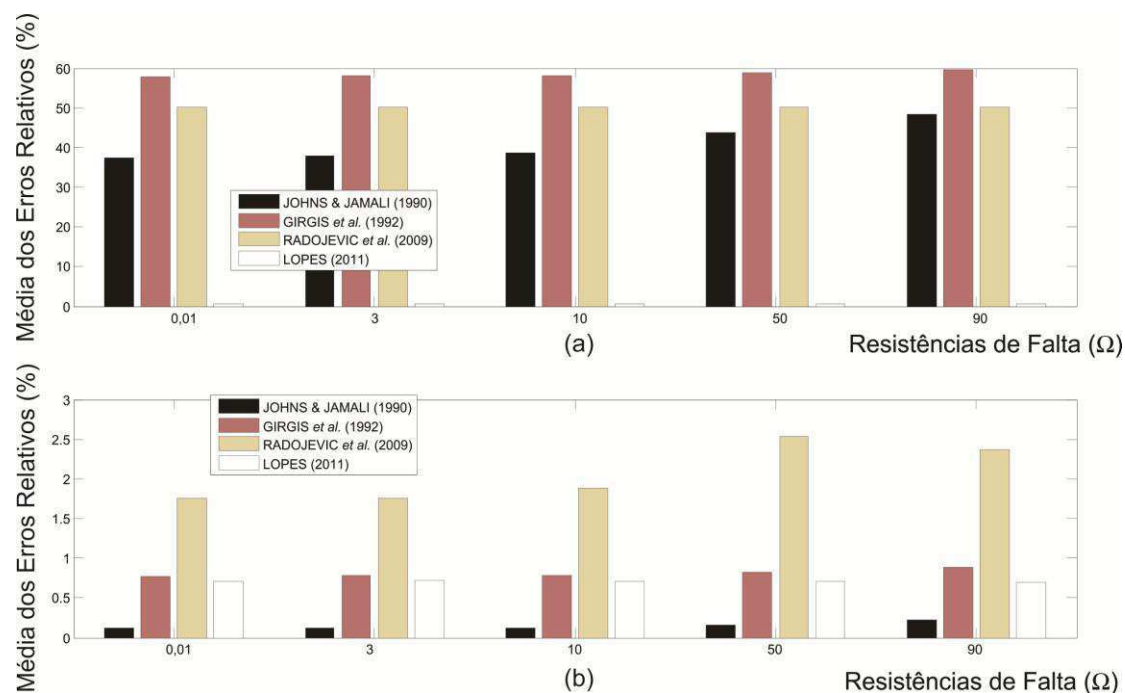


Figura 6.7: Localização de faltas para a LT fictícia variando as resistências de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.

Na análise da Figura 6.6 tem-se que o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) é o mais preciso para as simulações realizadas sem os transformadores de corrente e, os métodos propostos por RADOJEVIC *et al.* (2009) e LOPES (2011) foram os menos susceptíveis a presença dos TCs.

Nota-se na Figura 6.7 que o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) é o mais exato novamente para o sistema no qual a LT fictícia não teve a compensação série capacitiva. Porém, na presença da compensação série o método de JOHNS & JAMALI (1990) apresenta um grande erro relativo médio, assim como os métodos de GIRGIS *et al.* (1992) e RADOJEVIC *et al.* (2009). O método proposto por LOPES (2011) se destacou por ser o único método, dentre os analisados, que foi robusto diante da compensação série capacitiva.

Nas Figuras 6.6 e 6.7 nota-se que os métodos de JOHNS & JAMALI (1990) e de RADOJEVIC *et al.* (2009) foram os que sofreram uma maior influência, dentre os quatro métodos, da variação da resistência de falta. Entretanto, essa influência não foi significativa e capaz de comprometer o uso destes métodos nestes casos, visto que para o caso da Figura 6.6 (a) o método de JONHS & JAMALI (1990) teve um aumento no erro relativo médio inferior a 2%, mesmo variando-se a resistência de falta de 0,01 Ω para uma resistência de falta de alta impedância. De forma semelhante, observa-se na Figura 6.7 (b) que o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) sofreu um aumento do erro relativo médio inferior a 1%.

Na Figura 6.8 são apresentados os erros relativos médios obtidos para a localização de faltas na LT real variando-se os 10 tipos de falta na presença e na ausência dos TCs.

Nota-se na Figura 6.8 que os erros relativos médios obtidos pelos métodos de JOHNS & JAMALI (1990) e GIRGIS *et al.* (1992) aumentaram mais de três vezes devido à presença dos TCs, enquanto que os métodos de LOPES (2011) e RADOJEVIC *et al.* (2009) não tiveram grandes variações devido à presença dos TCs. O método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) se destacou por ter como resultados erros relativos baixos, mesmo na presença dos TCs, entretanto houve um aumento considerável para a falta do tipo ABC. Este aumento considerável do algoritmo de RADOJEVIC *et al.* (2009) para faltas do tipo ABC é justificável pelo método ser baseado no estudo das componentes de sequência positiva e negativa do SEP. Logo, para faltas ABC, existem apenas as componentes de sequência positiva, fato este que provavelmente implica nos erros verificados.

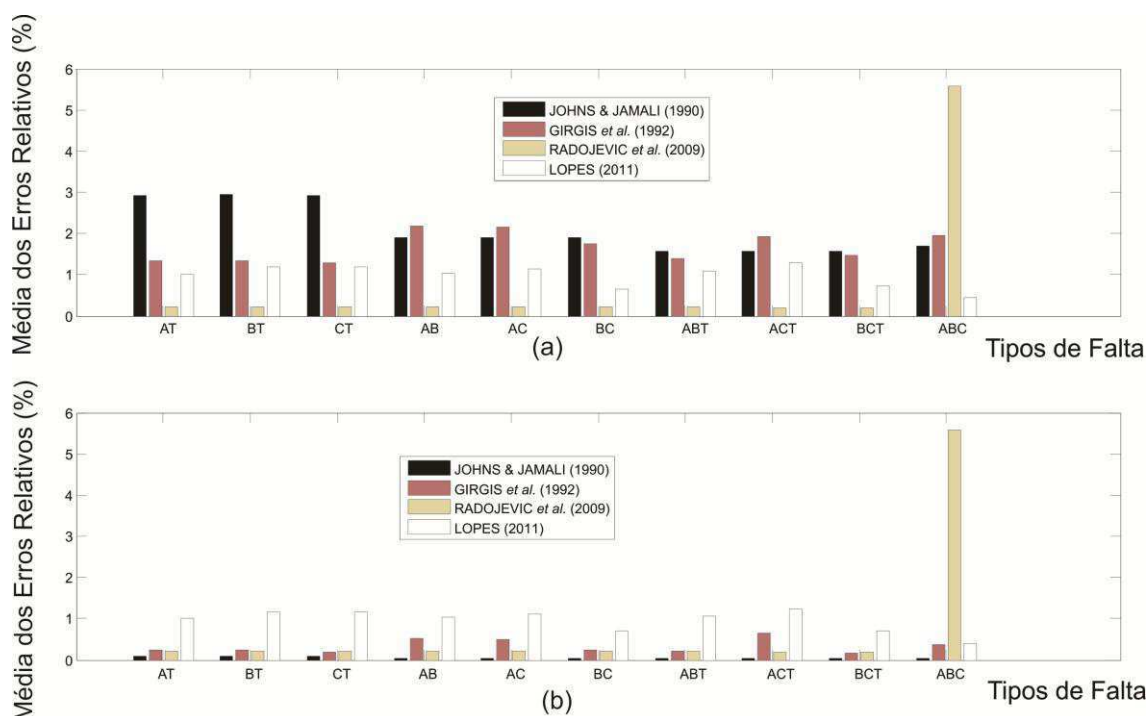


Figura 6.8: Localização de faltas para a LT real variando os tipos de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.

Já na Figura 6.9 (a) podem ser vistos os erros relativos médios obtidos para a LT fictícia, sendo variados os tipos de faltas e inseridos bancos de capacitores em série na LT. Em seguida os bancos de capacitores são retirados e têm-se os resultados apresentados na Figura 6.9 (b).

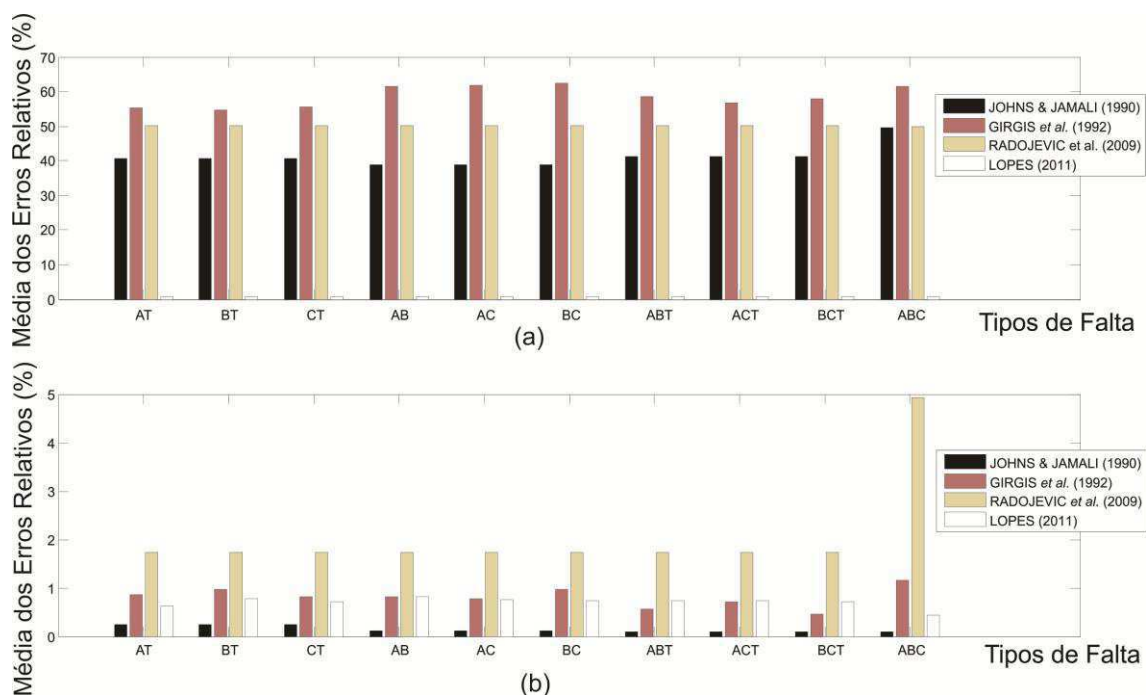


Figura 6.9: Localização de faltas para a LT fictícia variando os tipos de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.

Analisando-se a Figura 6.9, nota-se novamente que o método proposto por LOPES (2011) é o único, dos métodos analisados, robusto para realizar a localização de faltas após a inserção dos bancos de capacitores em série com a LT. Este fato ocorre porque o método proposto por LOPES (2011) é um método baseado na teoria das ondas viajantes, logo não têm seu desempenho afetado de forma relevante por alterações nos perfis de tensão e corrente do SEP. Quando houve a retirada da compensação série capacitiva, o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) se destacou por ter os erros relativos médios mais baixos para todos os tipos de faltas.

Já nas Figuras 6.10 e 6.11 podem ser vistos os erros relativos médios obtidos para a LT real (Figura 6.10) e para a LT fictícia (Figura 6.11), sendo variados os locais das LTs em que cada falta foi aplicada. Na Figura 6.10 ainda modificou-se o sistema com a inserção e retirada de TCs, enquanto que, na Figura 6.11 foram inseridos bancos de capacitores em série em um dos terminais da LT fictícia e em seguida esses bancos foram retirados do sistema elétrico.

Na Figura 6.10, observa-se mais uma vez que os algoritmos propostos por LOPES (2011) e RADOJEVIC *et al.* (2009) são os mais robustos diante da presença dos TCs, e o método de JOHNS & JAMALI (1990) é o mais exato na ausência dos TCs.

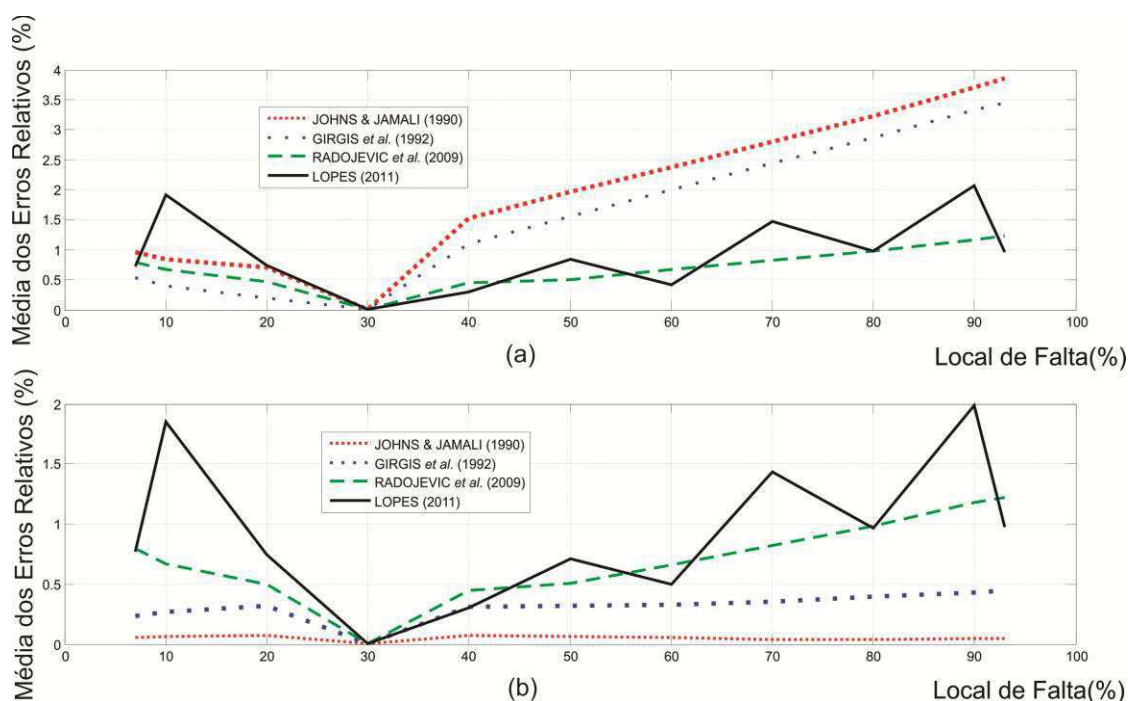


Figura 6.10: Localização de faltas para a LT real variando os locais de falta: (a) Com os TCs; Sem os TCs.

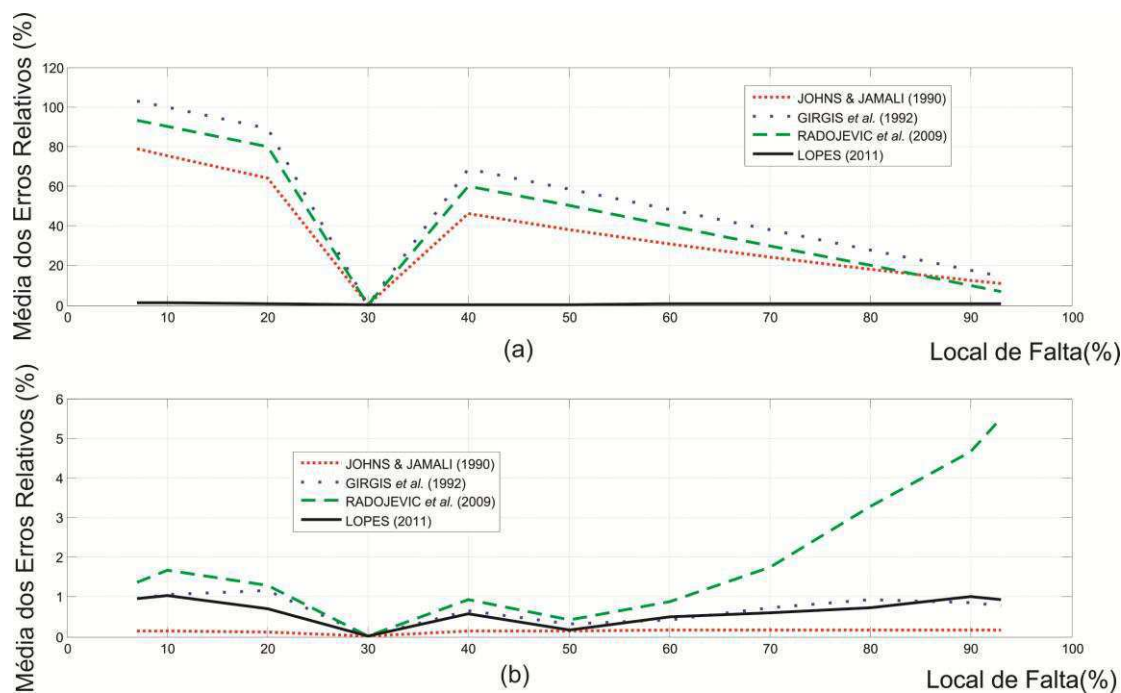


Figura 6.11: Localização de faltas para a LT fictícia variando os locais de falta: (a) Com a compensação série; Sem a compensação série.

Na Figura 6.11 pode ser observado um resultado interessante, mais uma vez o método proposto por LOPES (2011) mostrou ser robusto quando na presença de compensação série capacitiva, porém na Figura 6.11 (a) observa-se que o erro relativo médio, dos métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental, diminui quando o local de falta se afasta do local no qual o banco de capacitores foi inserido, que é o terminal mais à esquerda ou o primeiro terminal da LT. Enquanto que, na Figura 6.11 (b) observa-se que os erros relativos médios do método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) aumentam à medida que a falta é aplicada próxima aos terminais da LT. Este fato ocorre, provavelmente, devido ao efeito capacitivo da LT, pois mesmo o método sendo considerado independente dos parâmetros da LT, o efeito capacitivo da LT afeta diretamente nas tensões.

Além dos erros relativos médios, obteve-se o desvio padrão para as mesmas situações. Porém neste capítulo será analisada apenas a situação em que o ângulo de incidência de falta é variado, os resultados das demais situações se encontram no Apêndice B.

Nas Tabelas 6.6 e 6.7 estão presentes os desvios padrão para a LT real quando os ângulos de incidência das falta são variados e quando há a presença e a ausência dos transformadores de corrente.

Tabela 6.6: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs – Ângulos de Incidência de Falta.

Ângulos de Incidência (°)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0	1,6107	1,2386	2,1426	0,8654
45	1,6107	1,2385	2,1402	0,9982
90	1,6108	1,2389	2,1291	0,9434

Tabela 6.7: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs – Ângulos de Incidência de Falta.

Ângulos de Incidência (°)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0	0,0539	0,2177	2,1433	0,8772
45	0,0539	0,2172	2,1409	0,9500
90	0,0538	0,2182	2,1306	0,9592

É interessante observar nas Tabelas 6.6 e 6.7 que o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) é um método extremamente preciso nas condições ideais. Porém quando os TCs são inseridos no sistema essa precisão diminui, assim como o método proposto por GIRGIS *et al.* (1992). Os métodos propostos por RADOJEVIC *et al.* (2009) e por LOPES (2011) se destacaram por obter resultados precisos nas duas situações. Nota-se ainda nas Tabelas 6.6 e 6.7 que para todos os métodos a influência do ângulo de incidência de falta foi pequena.

Nas Tabelas 6.8 e 6.9 também podem ser observados os desvios padrão para as LTs quando os ângulos de incidência das falta são variados. A Tabela 6.8 apresenta os resultados considerando a inserção de bancos de capacitores em série com um dos terminais da LT e a Tabela 6.9 apresenta os resultados quando a compensação série foi retirada.

Tabela 6.8: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série – Ângulos de Incidência de Falta.

Ângulos de Incidência (°)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0	25,1930	30,6858	29,7761	0,3933
45	25,1928	30,6858	29,7768	0,3898
90	25,1930	30,6858	29,7762	0,3854

Observa-se na Tabela 6.8 que mais uma vez apenas o método proposto por LOPES (2011) foi robusto quando houve a inserção da compensação série, permanecendo com uma boa precisão.

Tabela 6.9: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série – Ângulos de Incidência de Falta.

Ângulos de Incidência (°)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0	0,1284	0,4590	2,6524	0,3871
45	0,1284	0,4592	2,7132	0,3936
90	0,1284	0,4593	2,8184	0,3841

Na Tabela 6.9 observa-se novamente que a influência do ângulo de incidência de falta foi pouca e que em condições ideais o método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) apresenta melhor precisão.

Analisando-se todos os gráficos e tabelas, conclui-se que o que o método de LOPES (2011) é bastante robusto, visto que é o único que não sofre grandes influências quando o SEP possui transformadores de corrente e quando a LT apresenta compensação série capacitiva. O algoritmo proposto por GIRGIS *et al.* (1992) apresenta bons resultados em situações em que não há a compensação série na LT e, nas situações em que há a presença dos TCs no SEP há um aumento no erro relativo, entretanto este aumento não é capaz de comprometer a utilização do método. O método de JOHNS & JAMALI (1990) foi o mais exato nas situações em que a LT não é compensada, porém, quando há a compensação série a localização ficou comprometida e este método não deve ser utilizado nestes casos de LTs compensadas. Já o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) não apresentou mudanças significativas mesmo quando os TCs faziam parte do SEP analisado. Entretanto, assim como os demais métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental, o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) apresentou um aumento do erro relativo na localização quando a compensação série capacitiva foi inserida na LT, este aumento do erro relativo nesses casos é capaz de inviabilizar a utilização do método.

No capítulo seguinte são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma análise comparativa de quatro métodos de localização de faltas em linhas de transmissão utilizando um simulador em tempo real, o RTDS™.

Inicialmente, foram implementados dois métodos que utilizam a teoria das ondas viajantes, o método proposto por CRUZ (2010) e o método de LOPES (2011), de maneira *off-line* através do programa ATP, que é um *software* do tipo EMTP. O método proposto por CRUZ (2010) utiliza a transformada *Wavelet* para a detecção de faltas, enquanto que o método de LOPES (2011) utiliza a Tdq0. Após a simulação de 22 casos, observou-se o desempenho desses dois métodos sobre diferentes locais de faltas ao longo de uma LT fictícia, porém com dados reais. Ainda de maneira *off-line* analisou-se o desempenho dos métodos de CRUZ (2010) e LOPES (2011) perante a compensação série capacitiva na LT de 500 km de extensão. Os resultados indicaram que o método de LOPES (2011) é mais robusto, especialmente quando a LT é compensada.

A etapa seguinte consistiu na análise comparativa do método de LOPES com outros três métodos de localização de faltas: JOHNS & JAMALI (1990), GIRGIS *et al.* (1992) e RADOJEVIC *et al.* (2009). A implementação dos quatro métodos foi realizada utilizando-se o *software* RSCAD, contido no RTDS™. O sistema elétrico analisado possuía duas fontes, dois barramentos, uma LT, seis TCs e seis TPs. Foram realizadas simulações com duas LTs distintas de 230 kV. A primeira LT foi uma linha real da CHESF, denominada LT 04M1, responsável pela interligação entre Milagres e Banabuiú, e com uma extensão de 225,9 km. A segunda LT é uma linha fictícia, porém com dados reais da CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco), com uma extensão igual 500 km.

Foram simulados 6.600 casos para cada um dos métodos. Os casos simulados contemplaram a variação da resistência de falta, do ângulo de incidência de falta, do tipo de falta, a variação do local da falta, da presença ou não dos TCs e da inserção ou não de bancos de capacitores.

Em seguida, definiram-se os principais tipos de erros, para depois ser realizada uma comparação entre os métodos. Dentre os tipos de erros, utilizou-se o erro relativo por ser o tipo de erro mais apropriado quando são realizadas análises entre LTs distintas.

Após a análise dos erros relativos médios e dos desvios padrão, concluiu-se que o método de JOHNS & JAMALI (1990) foi o mais exato nas situações em que a LT não é compensada, porém, quando há a compensação série a localização ficou comprometida e este método não deve ser utilizado. O método proposto por JOHNS & JAMALI (1990) também sofreu influência considerável quando houve a inserção dos TCs no SEP, entretanto, essa diminuição na precisão não compromete o uso do método.

O método proposto por LOPES (2011) é bastante robusto, por ser é o único método, dentre os métodos analisados, que não sofreu grandes influências quando o SEP possui TCs e quando a LT apresenta compensação série capacitiva. Logo, este método é indicado para casos de LTs compensadas por apresentar uma detecção satisfatória com erros relativos médios inferiores a 2% em todos os casos simulados.

O algoritmo proposto em GIRGIS *et al.* (1992) apresentou resultados satisfatórios para os casos em que não houve a compensação série na LT e, nas situações em que os TCs estavam presentes no SEP ocorreu um aumento no erro relativo, porém este aumento não é inviabilizou a utilização do método.

Por fim, teve-se que o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) não apresentou mudanças significativas mesmo quando os TCs faziam parte do SEP, podendo dessa forma, ser utilizado em sistemas elétricos que não apresentem LTs compensadas. Nos casos em que ocorreu a compensação série capacitiva, o algoritmo de RADOJEVIC *et al.* (2009) apresentou um aumento do erro relativo na localização considerável que comprometeu o uso do método para estes casos.

As atividades seguintes são propostas como trabalhos futuros:

1. Avaliação do desempenho dos métodos de localização considerando a influência de outros equipamentos do SEP, como o TPC, o disjuntor e o para-raios;
2. Avaliação do desempenho dos métodos considerando a influência de uma possível falta de sincronismo entre os RDPs utilizados devido ao uso do GPS.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- COSTA, F. B. *Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, agosto de 2006.
- CRUZ, M. C. S. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de Múltiplos Terminais a partir de Registros Oscilográficos Sincronizados via Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio grande do Norte, Natal, RN, agosto de 2010.
- D'AJUZ, A., FONSECA, C. S., CARVALHO, F. M. S., FILHO, J. A., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., ESMERALDO, P. C. V., VAISMAN, R., FRONTIN, S. O. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*. Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- DINIZ, P. S. R., SILVA, E. A. B., NETTO, S. L. *Digital Signal Processing*. Cambridge University Press. United States of America, 2010.
- DOMMEL, H. W. "Digital Computer Solution of Eletromagnetic Transient in Single and Multiphase Networks". *IEEE*, April 1969.
- DURIE, R., POTTLE, C. "An Extensible Real-time Digital Transient Network Analyzer". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, pp. 84-89, February 1993.
- ELHAFFAR, A., LEHTONEN, M. "Travelling Waves Based Earth Fault Location in 400 kV Transmission Network Using Single End Measurement". *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, pp. 53- 56, 2004.
- FERNANDES Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, dezembro de 2003.
- FITZGERALD, A. E, KINGSLEY Jr., C., UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas* - 6a edição. Porto Alegre, RS – Brasil: Editora Bookman, 2006.
- GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., BINGYIN, X., YAOZHONG, G., CORY, B. J., BARKER, J. R. G. "Fault Location Based on Travelling Waves". *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 54- 59, 1993.

- GAOUDA, A. M., KANOUN, S. H., SALAMA, M. M. A., CHIKHANI, A. Y. “Wavelet-based Signal Processing for Disturbance Classification and Measurement”. *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, No. 3, pp. 310- 318, 2002.
- GIRGIS, A. A., HART, D. G., PETERSON, W. L. “A New Fault Location Technique for Two and Three Terminal Lines”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.7, No. 1, 1992.
- JIAN, Q., XIANGXUN, C., JIANCHAO, Z. “Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform”. *Internation Conference on Power System Technology*, Vol. 1, pp. 533- 537, Beijing, China, 1998.
- JIANXIN, W., ZAIWANG, D. “A Fast Algorithm for Modified Discrete Cosine Transform”. *International Conference on Communication Technology Proceedings*, Vol. 1, pp. 445- 448, Beijing, China, 1996.
- JOHNS, A. T., JAMALI, S. “Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines”. *IEE Proceedings*, Vol. 137, Pt. C, No. 6, pp. 395- 402, 1990.
- KUECH, F., EDLER, B. “Aliasing Reduction for Modified Discrete Cosine Transform Domain Filtering and its Application to Speech Enhancement”. *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New York, United States of America, 2007.
- LEUVEN EMTP CENTER, *ATP - Alternative Transients Program: Rule Book*. Heverlee, Belgium, 1987.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2011.
- LOPES, F. V., Fernandes Jr, D., Neves, W. L. A. “Transients Detection in EHV Transmission Lines Using Park’s Transformation”. *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Orlando, FL, 2012.
- MELO, Y. M. P., LOPES, F. V., FERNANDES Jr., D., NEVES, W. L. A. “Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Estudo de Métodos Baseados na Teoria das Ondas Viajantes e na Análise de Componentes de Frequência Fundamental”. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2012)*, Campina Grande-PB, Brasil, 02-06 de setembro, 2012.
- MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, J. *Wavelet Toolbox For Use With MATLAB®*. User’s Guide Version 2, The MathWorks, Inc., 2000.

- OLIVEIRA, A. L. P. *Avaliação do Comportamento da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série Fixa Através da Simulação Digital em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.
- PHADKE, A. G., THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd Edition, New York, USA: John Willey & Sons Inc, 2009.
- PRINCEN, J. P., BRADLEY, A. B. “Analysis/Synthesis Filter Bank Design Based on Time Domain Aliasing Cancellation” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986.
- RADOJEVIC, Z. M., KIM, C. H., POPOV, M., PRESTON, G., TERZIJA, V. “New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters”. International Conference on Power Systems Transients, IPST 2009, Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- RTDS TECHNOLOGIES INC. *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual:RSCAD Version*. Winnipeg, Manitoba, Canada, 2008.
- SANTOSO, S., POWERS, E. J., GRADY, W. M., HOFMANN, P. “Power Quality Assessment Via Wavelet Transform Analysis”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, pp. 924- 930, 1996.
- SILVA, M. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.
- STEVENSON Jr., W.D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGrawHill do Brasil, Edição 2, São Paulo, 1986.
- ZIMATH, S. L., RAMOS, M. A. F., FILHO, J. E. S. “Comparison of Impedance and Travelling Wave Fault Location Using Real Faults”. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, USA, April 19-22, 2010.

Apêndice A

Dados do Sistema Elétrico

O sistema elétrico de potência analisado e simulado foi um sistema da CHESF simplificado de 230 km, composto primordialmente pela LT 04M1, responsável pela interligação entre Milagres (MLG) e Banabuiú (BNB), conforme Figura A.1. Os dados da LT seguem na Tabela A.1.

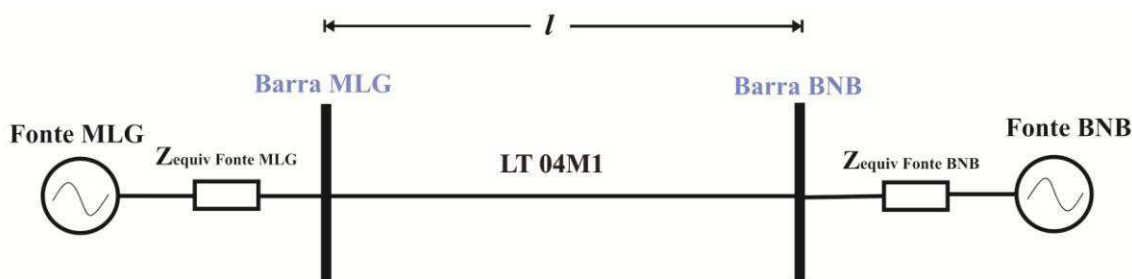


Figura A.1: Diagrama do sistema CHESF simplificado de 230 kV.

Tabela A.1: Dados de seqüência para a LT 04M1 do sistema CHESF.

Seqüência	R (Ω /km)	X (Ω /km)	C(μ h/km)
Zero	0,4111	1,3723	2,490
Positiva	0,0975	0,5199	3,144

É interessante frisar que a LT 04M1 possui 225,9 km de extensão. Na Tabela A.2 são apresentados os dados utilizados para a linha fictícia com um comprimento de 500 km.

Tabela A.2: Dados de seqüência para a linha fictícia.

Seqüência	R (Ω /km)	X (Ω /km)	C(μ h/km)
Zero	0,2360	1,0350	2,4900
Positiva	0,0540	0,5270	3,1440

Nas Tabelas A.3 e A.4 são apresentados os dados utilizados para a modelagem das duas fontes.

Tabela A.3: Dados das fontes para $V_{Base} = 230$ kV.

Fonte	Módulo (p.u.)	Fase (°)
MLG	1,0237	0
BNB	1,0237	-8

Tabela A.4: Componentes de sequência das impedâncias das fontes.

Fonte	Sequência Zero		Sequência Positiva	
	R_0 (Ω/km)	X_0 (Ω/km)	R_1 (Ω/km)	X_1 (Ω/km)
MLG	0,6538	9,2342	1,4260	12,4850
BNB	4,5018	34,9960	5,3471	31,7160

Além das LTs e das fontes, o SEP analisado apresentou seis TPCs de 230 kV cujas configurações são mostradas na Figura A.2 (FERNANDES Jr., 2003). Os parâmetros do TPC de 230 kV encontram-se na Tabela A.5.

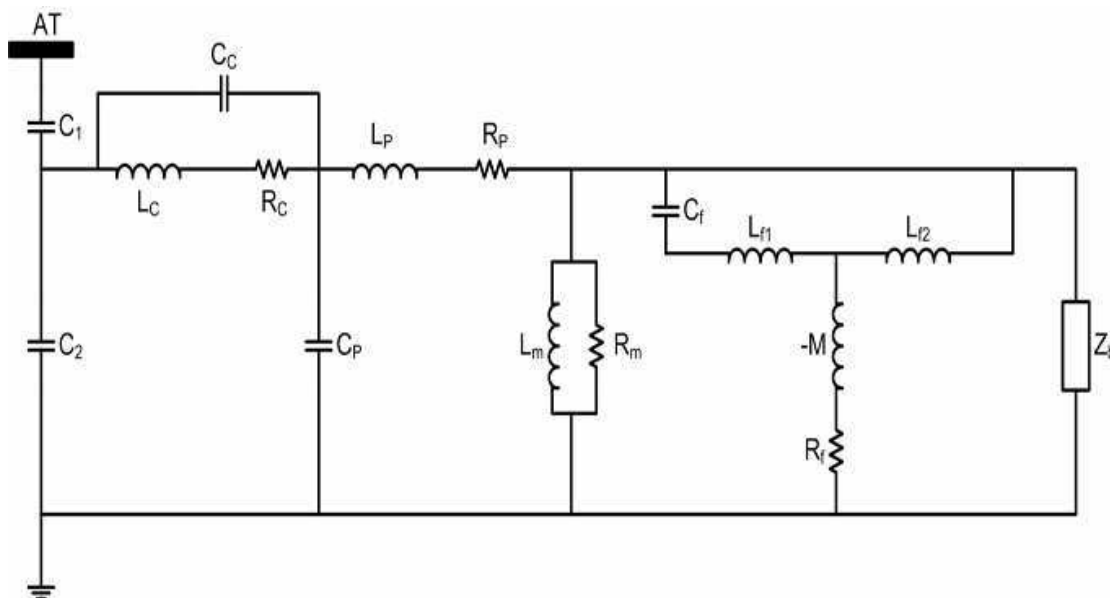


Figura A.2: Modelo do TPC utilizado para estimar os parâmetros R, L e C lineares.

Tabela A.5: Parâmetros de um TPC de 230 kV (FERNANDES Jr., 2003).

TPC 230 kV	
Parâmetro	Valor
C_1 (nF)	10,4
C_2 (nF)	65,4
C_c (nF)	493,2
C_p (pF)	9,3
C_f (μ F)	166,39
L_c (H)	86,3
L_p (H)	114,7
L_{f1} (mH)	10,87
L_{f2} (mH)	47,39
M (mH)	-9,31
R_c (k Ω)	9,1
R_p (Ω)	920
R_m (Ω)	50,6
R_f (Ω)	4,99

Os componentes do TPC são divididos em quatro grupos: o divisor de tensão capacitivo, o reator de compensação, o transformador de potencial indutivo e o circuito supressor de ferorrressonância (CSF). O divisor de tensão capacitivo possui o objetivo de proporcionar uma diminuição no nível da tensão para cerca de 10 kV. Já o reator de compensação opera de maneira a garantir que não ocorra defasagem entre as tensões no lado de alta e de baixa tensão, na frequência do sistema, para que a reprodução da forma de onda da tensão no secundário seja fidedigna a do primário. O transformador de potencial indutivo é o responsável pela diminuição do nível da tensão para valores aceitáveis para a alimentação dos equipamentos de controle, medição e proteção. Enquanto que o CSF opera para amenizar o fenômeno da ferorrressonância, que é oriundo da ressonância entre as capacitâncias do circuito e alguma indutância não linear proveniente de elementos com núcleo ferromagnético (FERNANDES Jr., 2003).

O TC utilizado no trabalho possui uma configuração de acordo com o sistema do IEEE, cuja relação de transformação foi de 2000:5 e uma resistência igual a 0,75. Na Tabela A.6 são apresentados os dados da curva de saturação deste TC.

Tabela A.6: Dados da curva de saturação de um TC de 230 kV.

Corrente (A)	Fluxo (Wb)
0.0198	0.2851
0.0281	0.6040
0.0438	1.1141
0.0565	1.5343
0.0694	1.8607
0.1025	2.2771
0.2167	2.6522
0.7002	3.0234
1.0631	3.1098
15.903	3.2261

Vale salientar que os TCs podem ser utilizados para o serviço de medição ou de proteção. Quando utilizados para a medição, os TCs apresentam geralmente uma classe de exatidão de 0,3; 0,6 ou 1,2%. Estes TCs devem manter sua precisão para correntes de carga no regime permanente, já nas situações de distúrbios os TCs de medição saturam e essa saturação é um fator positivo, visto que é uma forma de proteger os demais equipamentos de medição.

Os TCs de proteção, que foram os utilizados nas simulações deste trabalho, devem ser precisos para o seu erro aceitável até mesmo em situações de curto-circuitos cuja corrente atinja valores de até 20 vezes a corrente nominal.

Apêndice B

Análise dos Desvios Padrão do Erro Relativo

Nas Tabelas B.1 e B.2 são observados os desvios padrão para os erros relativos de localização de faltas na LT 04M1 da CHESF quando há a variação das resistências de faltas e quando os TCs são inseridos e retirados do SEP analisado. De forma semelhante, nas Tabelas B.3 e B.4 são mostrados os desvios padrão para os casos em que na LT fictícia são variados os valores das resistências de faltas, considerando ou não compensação capacitiva da LT.

Tabela B.1: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs - Resistências de Falta.

Resistências de Faltas (Ω)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0,01	1,0034	1,1468	1,4321	0,9262
3	1,0309	1,1546	1,3005	0,9558
10	1,1140	1,1723	1,5667	0,9347
50	1,5905	1,2785	2,6842	0,9408
90	2,2371	1,3868	3,0459	0,9505

Tabela B.2: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs - Resistências de Falta.

Resistências de Faltas (Ω)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0,01	0,0200	0,2363	1,4262	0,9265
3	0,0203	0,2347	1,2962	0,9357
10	0,0240	0,2301	1,5584	0,9235
50	0,0560	0,2049	2,6992	0,9286
90	0,0914	0,1764	3,0446	0,9369

Tabela B.3: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série - Resistências de Falta.

Resistências de Faltas (Ω)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0,01	22,9338	30,7255	29,7962	0,3920
3	23,0333	30,7238	29,7965	0,3877
10	23,3156	30,7189	29,7900	0,3904
50	25,7887	30,6760	29,7987	0,3899
90	28,6626	30,6389	29,7909	0,3895

Tabela B.4: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série - Resistências de Falta.

Resistências de Faltas (Ω)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
0,01	0,0716	0,4563	1,5132	0,3879
3	0,0724	0,4529	1,5770	0,3892
10	0,0742	0,4444	1,8236	0,3902
50	0,1206	0,4138	3,9403	0,3891
90	0,2126	0,5151	3,6209	0,3864

Tabela B.5: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs - Tipos de Falta.

Tipos de Faltas	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
AT	2,0787	0,9860	0,2296	0,9360
BT	2,0788	0,9948	0,2292	1,0189
CT	2,0786	0,9593	0,2292	1,0111
AB	1,3082	1,4899	0,2297	0,8968
AC	1,3076	1,4816	0,2296	0,9886
BC	1,3082	1,2112	0,2291	0,5653
ABT	1,0600	0,9662	0,2294	0,9736
ACT	1,0589	1,3308	0,2321	1,0736
BCT	1,0599	1,0072	0,2309	0,6380
ABC	1,1728	1,3385	4,3775	0,6269

Tabela B.6: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs - Tipos de Falta.

Tipos de Faltas	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
AT	0,0793	0,1934	0,2296	0,9411
BT	0,0801	0,1932	0,2293	1,0062
CT	0,0795	0,1547	0,2292	0,9997
AB	0,0250	0,0771	0,2297	0,8955
AC	0,0250	0,0777	0,2296	0,9724
BC	0,0249	0,1094	0,2291	0,6336
ABT	0,0145	0,1431	0,2294	0,9589
ACT	0,0160	0,2291	0,2320	1,0561
BCT	0,0145	0,0874	0,2307	0,6125
ABC	0,0143	0,1147	4,3911	0,5222

Nas Tabelas B.5 e B.6 tem-se o desvio padrão para a LT real para todos os tipos de falta, considerando ou não a presença dos TCs no sistema elétrico. Já nas Tabelas B.7 e B.8 são mostrados os desvios padrão para casos em que há a inserção ou retirada dos

bancos de capacitores em série com a LT fictícia, analisando-se ainda a situação de cada tipo de falta.

Tabela B.7: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série - Tipos de Falta.

Tipos de Faltas	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
AT	32,2419	30,5633	29,8361	0,3946
BT	32,2260	30,3361	29,8363	0,3949
CT	32,2394	30,6914	29,8364	0,3872
AB	19,9630	30,8507	29,8362	0,3929
AC	19,9629	30,9467	29,8362	0,3907
BC	19,9616	30,7557	29,8362	0,3892
ABT	21,2517	30,4610	29,8365	0,3963
ACT	21,2519	30,3935	29,8363	0,3860
BCT	21,2502	30,3602	29,8365	0,3890
ABC	24,8796	30,7760	29,8716	0,3702

Tabela B.8: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série - Tipos de Falta.

Tipos de Faltas	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
AT	0,1807	0,3983	1,5147	0,3856
BT	0,1807	0,4870	1,5148	0,3883
CT	0,1808	0,4074	1,5157	0,3920
AB	0,0555	0,5242	1,5144	0,3765
AC	0,0557	0,5008	1,5152	0,3890
BC	0,0551	0,4344	1,5157	0,3916
ABT	0,0580	0,2786	1,5125	0,3930
ACT	0,0584	0,2370	1,5132	0,3847
BCT	0,0576	0,2646	1,5155	0,3876
ABC	0,0500	0,5090	6,7062	0,2510

Nas Tabelas B.9 e B.10 são observados os desvios padrão para faltas aplicadas em diferentes locais da LT real com e sem a presença dos TCs no sistema elétrico.

Tabela B.9: Desvio padrão para a LT real com a presença dos TCs - Locais de Falta.

Locais de Falta (%)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
7	0,6874	0,1895	0,4412	0,1752
10	0,8055	0,1619	0,3227	0,6077
20	1,1267	0,1927	0,6549	0,2320
30	0,0437	0,0536	0,1141	0,0304
40	1,2788	0,3688	1,2234	0,4122
50	1,2721	0,4180	1,6426	1,4277
60	1,2556	0,4634	2,0481	0,6899
70	1,2358	0,5146	2,4903	1,1415
80	1,2196	0,5807	2,9778	0,6349
90	1,2101	0,6761	3,4515	0,5124
93	1,2096	0,7118	3,6154	0,6416

Tabela B.10: Desvio padrão para a LT real sem a presença dos TCs - Locais de Falta.

Locais de Falta (%)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
7	0,0889	0,1401	0,4314	0,3412
10	0,0870	0,1536	0,3204	0,6349
20	0,0768	0,2001	0,7820	0,2301
30	0,0042	0,0229	0,0624	0,0304
40	0,0484	0,2362	1,2177	0,4137
50	0,0313	0,2181	1,6368	1,3469
60	0,0137	0,2162	2,0465	0,8151
70	0,0102	0,2089	2,4842	1,1366
80	0,0135	0,2147	2,9709	0,6262
90	0,0235	0,2279	3,4888	0,5658
93	0,0271	0,2305	3,5858	0,6533

Nas Tabelas B.11 e B.12 são mostrados os desvios padrão para casos em que há a inserção ou retirada dos bancos de capacitores em série com a LT real analisando-se ainda casos de faltas aplicadas em diferentes locais da LT.

Analisando-se as tabelas, conclui-se que o que o método de LOPES (2011) é bastante robusto, visto que é o único que não sofre grandes influências em sua precisão quando o SEP possui TCs e quando a LT apresenta compensação série capacitiva. O algoritmo proposto por GIRGIS *et al.* (1992) apresenta boa precisão em situações em que não há a LT compensada. Nas situações em que há a presença dos TCs no SEP há um aumento no erro relativo, porém não compromete a utilização do método proposto

por GIRGIS *et al.* (1992). O método de JOHNS & JAMALI (1990) foi o mais preciso nas condições ideais. Já o método proposto por RADOJEVIC *et al.* (2009) apresentou uma diminuição da precisão considerável para as faltas do tipo ABC, conforme Tabelas B.5, B.6 e B.8. Esta redução em sua precisão é devido ao método ser baseado no estudo das componentes de sequência positiva e negativa.

Tabela B.11: Desvio padrão para a LT fictícia com compensação série - Locais de Falta.

Locais de Faltas (%)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
7	16,2317	3,2437	0,0102	0,1814
10	14,5315	3,2156	0,0219	0,1811
20	10,7949	3,1356	0,0832	0,1320
30	3,4620	5,0081	4,4190	0,0365
40	8,4027	3,0259	0,0781	0,0000
50	7,9595	2,9896	0,0260	0,4492
60	7,4048	2,9587	0,0180	0,4327
70	6,5663	2,9278	0,0618	0,0821
80	5,4350	2,8894	0,0189	0,1254
90	4,1405	2,8422	0,0349	0,3723
93	3,8146	2,8353	0,0971	0,2964

Tabela B.12: Desvio padrão para a LT fictícia sem compensação série - Locais de Falta.

Locais de Faltas (%)	JOHNS & JAMALI (1990)	GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	RADOJEVIC <i>et al.</i> (2009)	LOPES (2011)
7	0,1814	0,4543	0,6329	0,2993
10	0,1811	0,4512	3,1390	0,3012
20	0,1320	0,4242	1,0537	0,1297
30	0,0365	0,0765	0,1154	0,0365
40	0,0000	0,3116	1,9009	0,4203
50	0,4492	0,2405	1,3889	0,4789
60	0,4327	0,2903	1,1391	0,3747
70	0,0821	0,4194	0,6870	0,0793
80	0,1254	0,4426	2,4621	0,1354
90	0,3723	0,3987	2,7872	0,3321
93	0,2964	0,3844	4,6121	0,3076