



**ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DE  
ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NA  
ANÁLISE DE COMPONENTES FUNDAMENTAIS**

**JESSICA ROCHA GAMA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DE ALGORITMOS  
DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NA ANÁLISE DE  
COMPONENTES FUNDAMENTAIS**

**JESSICA ROCHA GAMA**

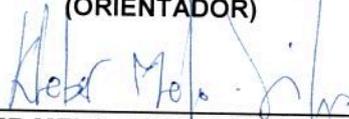
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



---

FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UNB  
(ORIENTADOR)



---

KLEBER MELO E SILVA, Dr., ENE/UNB  
(EXAMINADOR INTERNO)



---

CLEVER SEBASTIÃO PEREIRA FILHO, Dr., UFMG  
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 30 de novembro de 2018.

## FICHA CATALOGRÁFICA

GAMA, JESSICA ROCHA

Estudo de Sensibilidade Paramétrica de Algoritmos de Localização de Faltas Baseados na Análise das Componentes Fundamentais. [Distrito Federal] 2018.

xi, 111p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. ATP

3. Linhas de transmissão

I. ENE/FT/UnB

2. Fasores fundamentais

4. Localização de faltas

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GAMA, J. R. (2018). Estudo de Sensibilidade Paramétrica de Algoritmos de Localização de Faltas Baseados na Análise das Componentes Fundamentais, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação 711/2018 DM PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

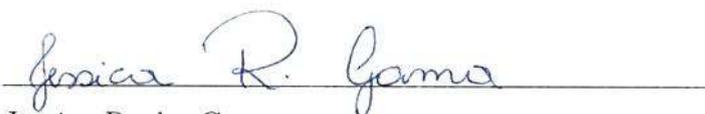
## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jessica Rocha Gama

TÍTULO: Estudo de Sensibilidade Paramétrica de Algoritmos de Localização de Faltas Baseados na Análise das Componentes Fundamentais

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Jessica Rocha Gama

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

*A Maggie, DEDICO.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me protegido e abençoado ao longo desses anos, sempre me dando forças para continuar mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Irlan e Emília, pelo carinho e suporte. Minhas conquistas são um reflexo da excelente educação e exemplo que me deram.

Ao professor Felipe, que disponibilizou seu tempo para me acompanhar e orientar desde o início do trabalho, sempre com uma enorme dedicação. Sou imensamente grata por todos os ensinamentos compartilhados nessa jornada.

A todos os colegas do LAPSE, que sempre se disponibilizaram a ajudar. Aprendi muito com vocês, em especial agradeço ao Caio e Eduardo, que não me deixaram desistir mesmo após tantas dificuldades ao longo do percurso.

À minha irmã caçula, Victória, que me motiva a ser uma pessoa melhor.

Às amigas, que são irmãs que a vida felizmente me presenteou, Carina e Karol, obrigada por terem sempre me apoiado e ajudado a superar os momentos difíceis, obrigada por sempre se fazerem presentes mesmo quando estão distantes fisicamente. Sem vocês com certeza a vida seria mais árdua e com menos sorrisos.

Ao Vinicius pelo apoio, paciência e companheirismo, acima de tudo por acreditar em mim.

Quando finalizamos um trabalho, percebemos que muitos nomes o compuseram. Gostaria de agradecer a todos que não foram citados aqui, que direta ou indiretamente fizeram parte dessa longa trajetória acadêmica.

*Jessica Rocha Gama*

## RESUMO

Neste trabalho é realizada uma análise de um número significativo de algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes de frequência fundamental. Avalia-se o desempenho dessas técnicas frente a fontes de erros importantes para o desempenho dos métodos, como carregamento do sistema, *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR), tipos de falta, resistência de falta e imprecisões nos parâmetros da linha. Para tanto, diversos cenários de falta são aplicados em uma linha de transmissão de 500 kV/60 Hz, usando o *Alternative Transients Program* (ATP). Uma vez implementados os algoritmos de localização de faltas em plataforma computacional matemática, tornou-se possível uma análise detalhada do desempenho das técnicas, frente a uma grande variedade de cenários de falta, destacando-se as limitações e potencialidades de cada solução. Dos resultados obtidos, percebe-se que, quando aplicados corretamente, os métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais são métodos que garantem precisão satisfatória e que requerem pouco esforço computacional para sua implementação, visto que não necessitam de elevadas taxas de amostragem, nem de formulações matemáticas sofisticadas, apresentando, portanto, menor custo agregado quando comparados a outras técnicas. De fato, os algoritmos de dois terminais que consideram o modelo  $\pi$ -exato da linha apresentaram precisão da ordem de 300 metros, correspondendo a aproximadamente um vão de torre, quando os parâmetros da LT são conhecidos sem erro, precisão esta esperada para métodos baseados na teoria de ondas viajantes.

**Palavras-chave:** ATP, componentes de frequência fundamental, fasores fundamentais, linhas de transmissão, localização de faltas.

## ABSTRACT

This work presents a thorough analysis of impedance-based fault location algorithms. The performance of these techniques is analyzed considering important sources of error, namely system loading, source-to-line impedance ratio (SIR), fault type, fault resistance, and uncertainties in line parameters. To do so, different fault scenarios are simulated to a 500 kV/60 Hz transmission line by means of the Alternative Transients Program (ATP). Once the evaluated algorithms are implemented in a computational mathematical platform, a detailed analysis on the performance of the techniques became possible, considering a wide variety of fault scenarios and pointing out limitations and potentialities of each approach. From the obtained results, it is noticed that, when correctly applied, the impedance-based fault location methods result in a satisfactory accuracy with little computational burden requirements, since they do not require neither high sampling rates nor sophisticated formulations, thereby they present less aggregated cost when compared with other techniques. Indeed, the two-terminal algorithms based on the exact-pi line model result in errors of the order of 300 meter, a typical tower span, when using the exact line parameters, which is an accuracy expected for traveling wave-based fault location algorithms.

**Keywords:** ATP, fundamental frequency components, fundamental phasors, transmission lines, fault location.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Lista de Símbolos</b>	viii
<b>Glossário</b>	xii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Localização de Faltas em Linhas de Transmissão . . . . .	3
1.3 Objetivos do Trabalho . . . . .	5
1.4 Contribuições da Dissertação . . . . .	5
1.5 Organização do Texto . . . . .	6
<b>Capítulo 2 – Fundamentação Teórica</b>	7
2.1 Componentes Simétricas . . . . .	7
2.2 Modelos de LT . . . . .	9
2.2.0.1 Modelo a Parâmetros Concentrados . . . . .	9
2.2.0.2 Modelo a Parâmetros Distribuídos . . . . .	11
2.3 Princípio da Superposição . . . . .	13
2.4 Fundamentos da Estimação de Fasores . . . . .	15
2.5 Classificação de Faltas e <i>Loops</i> de Faltas . . . . .	17
2.6 Síntese do Capítulo . . . . .	23
<b>Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica</b>	24
3.1 Localização de Faltas Baseada na Análise de Componentes de Frequência Fundamental . . . . .	26
3.2 Localização de Faltas Baseada na Teoria de Ondas Viajantes . . . . .	30

3.3	Localização de Faltas Baseada na Análise de Componentes de Alta Frequência . . . . .	32
3.4	Localização de Faltas Baseada em Algoritmos de Inteligencia Artificial . . . . .	34
3.5	Síntese do Capítulo . . . . .	35
<b>Capítulo 4 – Descrição dos Métodos de Localização de Faltas Avaliados e Metodologia de Avaliação</b>		<b>37</b>
4.1	Notação Adotada . . . . .	37
4.2	Métodos Baseados em Dados de um Terminal . . . . .	38
4.2.1	Método IM (ZIEGLER, 2010) . . . . .	39
4.2.2	Método RS (ÇAPAR; ARSOY, 2015) . . . . .	39
4.2.3	Método TK (TAKAGI, 1982) . . . . .	40
4.2.4	Método TK zero e TK modificado (TAKAGI, 1982) . . . . .	41
4.2.5	Método ER (ERIKSSON <i>et al.</i> , 1985) . . . . .	42
4.2.6	Método WS (WISZNIEWSKI, 1983) . . . . .	43
4.3	Métodos Baseados em Dados de Dois Terminais . . . . .	44
4.3.1	Método GG (GIRGS <i>et al.</i> , 1992) . . . . .	44
4.3.2	Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990) . . . . .	46
4.3.3	Método PR (PRESTON <i>et al.</i> , 2011) . . . . .	47
4.3.4	Método HE (HE <i>et al.</i> , 2011) . . . . .	48
4.3.5	Método IZ1 (IZYKOWSKI <i>et al.</i> , 2005) . . . . .	49
4.3.6	Método IZ2 (IZYKOWSKI <i>et al.</i> , 2010) . . . . .	50
4.3.7	Método TZ (TZIOUVARAS <i>et al.</i> , 2001) . . . . .	51
4.3.8	Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013) . . . . .	53
4.3.9	Método MH (D.MOHAMED <i>et al.</i> , 2012) . . . . .	54
4.4	Metodologia de Avaliação Empregada . . . . .	55
4.5	Síntese do Capítulo . . . . .	58
<b>Capítulo 5 – Avaliação dos Métodos de Localização de Faltas</b>		<b>59</b>
5.1	Análise da Influência das Características de Falta . . . . .	60
5.2	Análise da Influência de Imprecisões nos Parâmetros da LT . . . . .	67
5.3	Análise da Influência do Carregamento do Sistema . . . . .	73
5.4	Análise da Influência do SIR . . . . .	77
5.5	Síntese do Capítulo . . . . .	80
<b>Capítulo 6 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros</b>		<b>83</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>86</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação de um (a) sistema desequilibrado e os três conjuntos de componentes de sequência: (b) componentes de sequência zero ; (c) componentes de sequência positiva ; (d) componentes de sequência negativa. . . . .	7
2.2	Representação de uma (a) linha de transmissão curta; (b) linha de transmissão média modelo $\pi$ ; (c) linha de transmissão média modelo T. . . . .	10
2.3	Modelo de LT a parâmetros distribuídos. . . . .	12
2.4	Princípio da superposição aplicado a análise de um curto-circuito franco. . . . .	14
2.5	Esquema de janelamento aplicado a um sinal de corrente. . . . .	16
2.6	Tipos de faltas. . . . .	17
2.7	Diagrama unifilar de um circuito trifásico com uma falta aplicada no ponto F. . . . .	19
2.8	Circuitos de sequência para uma falta monofásica na fase "a". . . . .	19
2.9	Circuitos de sequência para uma falta bifásica entre as fases "b" e "c". . . . .	20
2.10	Circuitos de sequência para uma falta bifásica para a terra entre as fases "b" e "c". . . . .	21
2.11	Circuitos de sequência para uma falta trifásica. . . . .	22
3.1	Sistema de Transmissão Brasileiro - Horizonte 2017. . . . .	24
4.1	Diagrama unifilar do sistema teste avaliado. . . . .	38
4.2	Fluxograma dos processos aplicados. . . . .	55

- 5.1 Influência da resistência de falta em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983). . . . . 61
- 5.2 Influência da resistência de falta em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012). . . . . 62
- 5.3 Influência da resistência de falta em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (e) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983). . . . . 64
- 5.4 Influência da resistência de falta para curtos trifásicos, bifásicos AB e bifásicos terra ABT em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005). . . . . 65
- 5.5 Influência da resistência de falta em algoritmos de 2 terminais: (a) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (b) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (c) Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013); (d) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012). . . . . 66
- 5.6 Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado. 69
- 5.7 Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 1 terminal: (a) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985) (b) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983). 70

- 5.8 Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005). . . . . 71
- 5.9 Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 2 terminais: (a) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (b) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (c) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (d) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012). . . . . 72
- 5.10 Influência do carregamento em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983). . . . . 74
- 5.11 Influência do carregamento em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012). . . . . 75
- 5.12 Influência do SIR em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983). . . . . 78
- 5.13 Influência do SIR em algoritmos de 2 terminais:(a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012). . . . . 79

- 5.14 Erros verificados na localização de faltas AT: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983). . . . . 81
- 5.15 Erros verificados na localização de faltas AT: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOU-VARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012). . . . . 81

## LISTA DE TABELAS

2.1	Classificação das linhas de transmissão. . . . .	9
2.2	Unidades de entrada dos métodos de um terminal. . . . .	22
3.1	Resumo da revisão bibliográfica. . . . .	36
4.1	Parâmetros da linha de transmissão. . . . .	55
4.2	Dados do circuito equivalente de Thévenin. . . . .	56
4.3	Resumo dos casos analisados. . . . .	57
5.1	Lista de métodos de um terminal avaliados. . . . .	59
5.2	Lista de métodos de dois terminais avaliados. . . . .	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbf{A}$	Número complexo qualquer.
$\mathbf{A}^*$	Conjugado de um número complexo qualquer.
$Im(A)$	Parte imaginária de $\mathbf{A}$ .
$Re(A)$	Parte real de $\mathbf{A}$ .
$d_S$	Fator de distribuição de correntes.
$\bar{d}$	Distância estimada em p.u. entre a falta e o terminal local.
$d$	Distância em p.u. entre a falta e o terminal local.
$E_L$	Fonte do circuito equivalente de Thévenin local.
$E_R$	Fonte do circuito equivalente de Thévenin remoto.
$e^{j\theta}$	Operador de sincronismo.
$F$	Ponto de falta.
$\hat{I}_L$	Fasor de corrente medido no terminal local.
$\hat{I}_R$	Fasor de corrente medido no terminal remoto.
$\hat{I}_F$	Fasor de corrente medido no ramo de falta.
$\hat{I}_L^a$	Fasor de corrente medido pelo terminal remoto na fase $a$ .
$\hat{I}_L^b$	Fasor de corrente medido pelo terminal remoto na fase $b$ .
$\hat{I}_L^c$	Fasor de corrente medido pelo terminal remoto na fase $c$ .
$\hat{I}_{pré}$	Fasor de corrente de pré-falta.
$\hat{I}_{L1}$	Fasor de corrente de sequência positiva medidos no terminal local.

---

$\hat{I}_{L0}$	Fasor de corrente de sequência zero medido no terminal local.
$\hat{I}_{L2}$	Fasor de corrente de sequência negativa medido no terminal local.
$\hat{I}_{R1}$	Fasor de corrente de sequência positiva medido no terminal remoto.
$\hat{I}_{R0}$	Fasor de corrente de sequência zero medido no terminal remoto.
$\hat{I}_{R2}$	Fasor de corrente de sequência negativa medido no terminal remoto.
$K_0$	Fator compensação de sequência zero.
L	Terminal local.
$l$	Comprimento da linha de transmissão.
$\ell$	Indutância série da linha de transmissão.
R	Terminal remoto.
$R_L^0$	Resistência de sequência zero do equivalentes de Thévenin no terminal local.
$R_L^1$	Resistência de sequência positiva do equivalentes de Thévenin no terminal local.
$R_R^0$	Resistência de sequência zero do equivalentes de Thévenin no terminal remoto.
$R_R^1$	Resistência de sequência positiva do equivalentes de Thévenin no terminal remoto.
$R_F$	Resistência de falta.
$S_1$	Circuito de Thévenin conectado ao terminal local.
$S_2$	Circuito de Thévenin conectado ao terminal remoto.
$\hat{V}_F$	Fasor de tensão no ponto de falta.
$\hat{V}_L$	Fasor de tensão medido pelo terminal local.
$\hat{V}_L^a$	Fasor de tensão medido pelo terminal remoto na fase $a$ .
$\hat{V}_L^b$	Fasor de tensão medido pelo terminal remoto na fase $b$ .
$\hat{V}_L^c$	Fasor de tensão medido pelo terminal remoto na fase $c$ .
$\hat{V}_{L0}$	Fasor de tensão de sequência zero medido pelo terminal local.

---

$\hat{V}_{L1}$	Fasor de tensão de sequência zero medido pelo terminal local.
$\hat{V}_{L2}$	Fasor de tensão de sequência positiva medido pelo terminal local.
$\hat{V}_R$	Fasor de tensão medido pelo terminal remoto.
$\hat{V}_{R0}$	Fasor de tensão de sequência negativa medido pelo terminal remoto.
$\hat{V}_{R1}$	Fasor de tensão de sequência positiva medido pelo terminal remoto.
$\hat{V}_{R2}$	Fasor de tensão de sequência negativa medido pelo terminal remoto.
$X_G$	Reatância medida.
$X_{L1}$	Reatância total da linha.
$Y_L$	Admitância em derivação da linha de transmissão.
$Z_S$	Impedância do equivalente de Thévenin conectada ao circuito local.
$Z_R$	Impedância do equivalente de Thévenin conectada ao circuito remoto.
$Z_L$	Impedância série da linha de transmissão.
$Z_{L1}$	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão.
$Z_{L0}$	Impedância de sequência zero da linha de transmissão.
$Z_F$	Impedância de falta.
$Z_G$	Impedância de falta ligada ao solo.
$Z_S^1$	Impedância de sequência positiva da fonte L.
$Z_R^1$	Impedância de sequência positiva da fonte R.
$Z_S^0$	Impedância de sequência zero da fonte L.
$Z_R^0$	Impedância de sequência zero da fonte R.
$Z_{abc}$	Matriz da impedância série da LT por unidade de comprimento.
$Z_P$	Impedância própria da LT.
$Z_M$	Impedância mútua da LT.
$Z_c$	Impedância característica da LT.

---

$\alpha$	Operador complexo $1\angle 120^\circ$ .
$\beta$	Ângulo do fator de distribuição de correntes.
$\Delta \hat{I}_L$	Fasor de corrente incremental medido no terminal local.
$\epsilon$	Erro na localização da falta em km.
$\gamma$	Constante de propagação da linha.
$\phi_{L1}$	Ângulo da linha.
$\theta$	Ângulo de sincronismo.
$\varsigma$	Limiar.

## GLOSSÁRIO

A/D	Analógico Digital
AIEE	<i>American Institute of Electrical Engineers</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
DC	<i>Direct Current</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
p.u.	Por unidade
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Source-to-line Impedance Ratio</i>
UnB	Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica é considerada um recurso fundamental na promoção do conforto e bem-estar da sociedade, além de ser essencial para o desenvolvimento econômico de um país. O crescimento tecnológico, industrial e a melhoria do padrão de vida de uma sociedade são acompanhados pela evolução do consumo de energia. Por tal razão, os sistemas elétricos de potência precisam assegurar um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento de energia.

Para que a energia elétrica seja disponibilizada aos usuários finais, um complexo sistema composto por um grande número de equipamentos e dispositivos precisa operar em harmonia. No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável por operar esse sistema: o Sistema Interligado Nacional (SIN), de forma a garantir segurança, continuidade e economicidade do suprimento de energia elétrica no país. O SIN garante a interconexão dos sistemas elétricos pelas malhas de transmissão, propiciando a transferência de energia entre subsistemas, formados principalmente por geradores, transformadores de potência e linhas de transmissão (LT). A interligação do sistema elétrico brasileiro resulta em um enorme efeito sinérgico e amplo potencial econômico e de melhorias da qualidade do serviço, além de garantir confiabilidade do atendimento aos consumidores (ONS, 2018).

Os diversos componentes de um sistema elétrico de potência estão propensos ao mau funcionamento e a acidentes. Entretanto, as LT apresentam uma maior susceptibilidade ao surgimento de distúrbios, denominados popularmente como faltas. Estes distúrbios, classificam-se como os de maior preocupação aos sistemas elétricos de potência, pois são mais frequentes (SAHA *et al.*, 2010). Segundo o relatório de Indicadores de Desempenho do SIN, no ano de 2016 cerca de 70% das perturbações na rede básica teve origem nas LT (ONS, 2016).

Em consequência, almejando o aperfeiçoamento da operação e levando em consideração os impactos negativos que as perturbações podem ocasionar no SIN, o ONS, em conjunto com os agentes de operação, tem coordenado ações que objetivam diagnosticar as principais fragilidades do sistema e indicar as providências a serem tomadas para revitalização das instalações existentes, adequando-as aos padrões de segurança estabelecidos para o sistema. Tais padrões estão apresentados nos Procedimentos de Rede (ONS, 2016).

A confiabilidade dos sistemas elétricos e a qualidade do atendimento ao mercado de energia estão intimamente relacionadas à eficiência de sua expansão. De fato, o SIN está em constante expansão, e conseqüentemente, vem aumentando a sua complexidade, o que torna necessário estudos para garantir que o sistema opere no adequado desempenho da rede (EPE, 2011). Os componentes dos sistemas estarão sempre expostos a faltas, contudo, é cada vez mais importante que os elementos onde ocorreram esses distúrbios sejam desconectados no menor tempo possível, de forma a minimizar os efeitos da falta (PAITHANKAR; BHIDE, 2007).

De acordo com Procedimentos de Rede, as LT devem possuir dois sistemas de proteção independentes: proteção principal e proteção alternada. Os sistemas de proteção principal e alternada devem ser capazes de detectar faltas em toda a extensão da linha e eliminá-las em um tempo inferior a 100 ms (ONS, 2016). Tão importante quanto a detecção do distúrbio é a localização da falta com a maior exatidão possível, reduzindo o tempo de busca pelo defeito após desligamentos não programados. De fato, caso uma falta demore a ser localizada, prejuízos econômicos, normalmente associados a multas, podem ocorrer para as concessionárias envolvidas, além de problemas de outras naturezas decorrentes de desligamentos nos centros consumidores.

Diante do exposto, nas últimas décadas, incitado pela regulamentação e competitividade do setor, tem-se crescido a necessidade de investimento em medidas que assessorem a restauração dos sistemas em decorrência das faltas (SAHA *et al.*, 2010). Tendo em vista o elevado dispêndio de tempo para a realização das checagens físicas e a vulnerabilidade das LT, se faz presente um grande empenho no diagnóstico e localização de faltas (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

A crescente busca por minimizar a duração dos desligamentos ocorridos, em decorrência das faltas nos sistemas elétricos de potência, tem aguçado o desenvolvimento de técnicas de localização de faltas que se mostrem mais eficientes. De acordo com a prospecção tecnológica

no setor de energia elétrica (CGEE, 2017), realizada em 2017 pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) o desenvolvimento de funções de localização de faltas transitórias é apontado como a terceira macrotemática mais importante para estudos de P&D no Brasil. De fato, há na literatura uma vasta gama de algoritmos propostos para realizar a identificação da região onde tenha ocorrido a falta (SAHA *et al.*, 2010).

## 1.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

O amplo conjunto de técnicas para localização de faltas existentes na literatura, normalmente, pode ser subdividido em quatro grupos, a saber: métodos baseados na teoria de ondas viajantes; métodos baseados em inteligência artificial; métodos baseados na análise de componentes de alta frequência e métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental (SAHA *et al.*, 2010). Nos últimos anos, devido ao advento da tecnologia, viabilizando assim processadores de elevado desempenho, as técnicas baseadas na teoria das ondas viajantes vêm ganhando mais visibilidade junto aos fabricantes de localizadores de falta (SCHWEITZER *et al.*, 2014), todavia os relés de proteção que fazem uso de funções de localização de faltas por ondas viajantes, possuem também funções fasoriais, para os casos onde não há lançamento de ondas viajantes. Entretanto, os métodos baseados na análise de componentes da frequência fundamental ainda são os mais utilizados. De fato, quando aplicados corretamente, os métodos de localização baseados em componentes fundamentais garantem precisão satisfatória e requerem pouco esforço computacional para sua implementação, visto que não necessitam de elevadas taxas de amostragem, nem de formulações matemáticas sofisticadas, apresentando, portanto, menor custo agregado (SCHWEITZER, 1988).

No contexto de métodos de localização baseados em componentes fundamentais, destacam-se os baseados em dados de um e dois terminais. Os métodos de um terminal possuem a vantagem de serem mais simples, todavia, estão sujeitos a uma série de erros, como a interferência da resistência de falta, fluxo de potência, efeito capacitivo, não homogeneidade do sistema, entre outros (SAHA *et al.*, 2010). Os métodos de dois terminais são mais robustos nesses quesitos. No entanto, existe uma classe que requer o uso de dados sincronizados, o que pode ser viabilizado por meio do *Global Positioning System* (GPS), que fornece uma referência de tempo comum para os dispositivos utilizados (SCHWEITZER, 1988). Apesar disso, muito se discute a respeito

do uso do GPS, porque em caso de perda de sinal de sincronização, os dados passam a ser registrados de forma assíncrona, gerando erros nos processos de localização de falta, a depender da formulação empregada. Para solucionar esse problema, existe uma classe de métodos que usa dados não sincronizados (SAHA *et al.*, 2010).

Entre as técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes, destacam-se as dificuldades relacionadas à sincronização de dados e à detecção de transitórios que são atenuados devido ao ângulo de incidência e resistência da falta (SAHA *et al.*, 2010). Apesar das técnicas baseadas nas componentes de frequência fundamental apresentarem uma série de limitações, estas técnicas apresentam uma implementação mais simples, facilitando sua aplicação em tempo real, o que tem-se tornado fundamental devido às redes inteligentes (*Smart Grids*) (LOPES, 2014).

Em outra vertente de pesquisa, técnicas baseadas em algoritmos de inteligência artificial têm sido investigadas. Nota-se que atrelado ao fato dessas técnicas serem complexas e demandarem alto esforço computacional, estes métodos são dependentes das características do sistema monitorado, requerendo normalmente etapas de treinamento (SAHA *et al.*, 2010). Assim, necessita-se que ocorra a atualização do algoritmo sempre que alterações na configuração do sistema forem realizadas, justificando assim seu limitado uso em campo (TEKLIC *et al.*, 2013).

Em relação às técnicas baseadas na análise de componentes de alta frequência, destaca-se que estas não requerem sincronização de dados, pois dependem apenas da análise espectral de transitórios de falta, não dependendo da análise de estampas de tempo dos registros (FAYBISOVICH *et al.*, 2010). Entretanto, esses métodos são mais apropriados para aplicações *off-line*, tendo em vista que requerem o registro oscilográfico durante boa parte do período de falta. Ademais, essas técnicas usualmente requerem maior esforço computacional, sendo portanto mais onerosas (BO *et al.*, 1999).

Diante do apresentado, percebe-se que os métodos baseados em componentes da frequência fundamental apresentam algumas vantagens em termos práticos frente aos demais grupos (SOUZA *et al.*, 2005). Portanto, neste trabalho, visando uma análise mais detalhada de métodos existentes, realiza-se uma avaliação de sensibilidade paramétrica de várias técnicas, considerando vários cenários de falta, através dos quais são destacadas as limitações e potencialidades de cada algoritmo avaliado.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

São definidos dois objetivos principais: 1) Fazer uma revisão bibliográfica dos métodos de localização de faltas baseados na análise de componentes fundamentais; 2) Realizar uma análise de sensibilidade paramétrica dos principais algoritmos frente a fontes de erro importantes para o desempenho dos métodos, viabilizando assim uma análise detalhada do desempenho das técnicas. Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão da evolução dos métodos de localização de faltas existentes na literatura, que se baseiam na análise de componentes fundamentais;
- Revisar os conceitos básicos aplicados nos métodos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental;
- Simular cenários de falta em um sistema elétrico através do software ATP (*Alternative Transients Program*);
- Implementar os algoritmos de localização de faltas revisados, avaliando-os por meio de análises de sensibilidade paramétrica.

### 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Dentre as contribuições dessa dissertação, ressalta-se a avaliação de desempenho de um elevado número de algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes fundamentais (fasores) frente a uma grande variedade de cenários de falta, destacando-se as limitações e potencialidades de cada solução. Em geral, na literatura, os métodos existentes são avaliados de forma isolada, desconsiderando-se fatores operacionais da rede elétrica importantes que são contemplados nesse trabalho.

Em relação à divulgação dos resultados obtidos nesta dissertação, enumeram-se a seguir, em ordem cronológica, as publicações de artigos em anais de conferências nacionais:

- GAMA, J. R.; LOPES, F. V. On Compensating Synchronization Errors in Two-Terminal Based Fault Location Approaches. In: *Workshop on Communication Networks and Power Systems (II WCNPS)*. Brasília, Brasil: Novembro, 2017.
- GAMA, J. R.; LEITE, E. J. Jr; LOPES, F. V. Parametric Analysis of Two-Terminal Fault

Location Methods Based on Unsynchronized Data. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (VII SBSE)*. Rio de Janeiro, Brasil: Maio, 2018.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como segue:

- No Capítulo 2, realiza-se a fundamentação teórica do tema, abordando os principais conceitos no âmbito de localização de faltas: os modelos de LT, fundamentos da estimação de fasores, o princípio da superposição e tipos de falta.
- No Capítulo 3, realiza-se a revisão bibliográfica de publicações relevantes no contexto de localização de faltas.
- No Capítulo 4, discriminam-se os métodos a serem analisados nessa dissertação, e são evidenciadas as potencialidades e limitações de cada técnica.
- No Capítulo 5, são apresentados os resultados e análises de simulações de falta no ATP.
- Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas conclusões sobre os resultados obtidos, indicando propostas para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao estudo realizado nessa dissertação.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

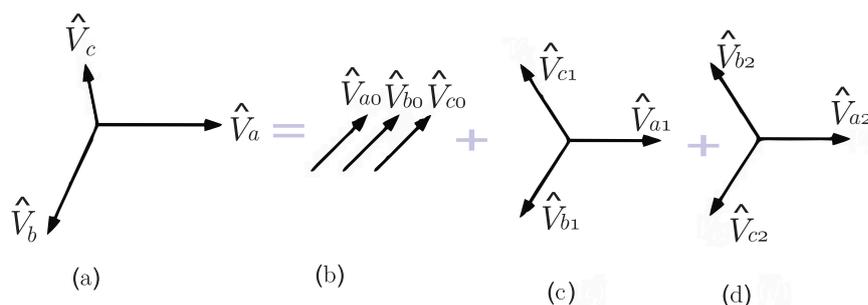
Nesse capítulo serão apresentados os princípios básicos necessários para o entendimento dos algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes de frequência fundamental que serão avaliados nessa dissertação.

### 2.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Grande parte dos algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes da frequência fundamental consideram as componentes simétricas durante a elaboração de suas formulações matemáticas, sendo essenciais para a compreensão dos algoritmos avaliados nos próximos capítulos (SAHA *et al.*, 2010).

O método de componentes simétricas proposto em Fortescue (1918) é utilizado para simplificar as análises de circuitos com falta, convertendo um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas simétricos desacoplados, chamados de sistemas de sequência ou componentes de sequência zero, positiva e negativa. A Figura 2.1 ilustra a representação gráfica dos sistemas de sequência, os quais podem ser definidos como (SCHWEITZER, 2004):

**Figura 2.1.** Representação de um (a) sistema desequilibrado e os três conjuntos de componentes de sequência: (b) componentes de sequência zero ; (c) componentes de sequência positiva ; (d) componentes de sequência negativa.



**Fonte:** autoria própria.

- Sequência positiva: Sistema simétrico equilibrado trifásico, composto por três fasores em equilíbrio, defasados em  $120^\circ$ , com a mesma sequência de fases do sistema original.
- Sequência negativa: Sistema simétrico equilibrado trifásico, composto por três fasores em equilíbrio, defasados em  $120^\circ$ , com sequência de fases inversa ao sistema original.
- Sequência zero ou homopolar: três fasores simétricos com a mesma fase e magnitude.

Por intermédio da transformada de Fortescue, qualquer conjunto de grandezas de fase pode ser convertido em componentes simétricas. Para tanto, utiliza-se a seguinte expressão para um sistema de sequência ABC:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

na qual  $\hat{I}_0$ ,  $\hat{I}_1$  e  $\hat{I}_2$  são correntes de sequência zero, positiva e negativa relativas a fase a, respectivamente,  $\hat{I}_a$ ,  $\hat{I}_b$  e  $\hat{I}_c$  são as correntes nas fases a, b, e c, e  $\alpha$  é um operador complexo definido como:  $\alpha = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle 120^\circ$ . Assim, de (2.1) obtém-se:

$$\hat{I}_0 = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c), \quad (2.2)$$

$$\hat{I}_1 = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \alpha\hat{I}_b + \alpha^2\hat{I}_c), \quad (2.3)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{1}{3}(\hat{I}_a + \alpha^2\hat{I}_b + \alpha\hat{I}_c). \quad (2.4)$$

Por ser uma transformada linear, após o problema ser solucionado no domínio das componentes simétricas, os resultados podem ser transformados novamente para o domínio de fase, bastando utilizar o seguinte equacionamento:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

resultando em:

$$\hat{I}_a = \frac{1}{3}(\hat{I}_0 + \hat{I}_1 + \hat{I}_2), \quad (2.6)$$

$$\hat{I}_b = \frac{1}{3}(\hat{I}_0 + \alpha^2\hat{I}_1 + \alpha\hat{I}_2), \quad (2.7)$$

$$\hat{I}_c = \frac{1}{3}(\hat{I}_0 + \alpha\hat{I}_1 + \alpha^2\hat{I}_2). \quad (2.8)$$

Analogamente, pode-se obter as equações relacionadas às tensões  $\hat{V}_0$ ,  $\hat{V}_1$  e  $\hat{V}_2$ .

## 2.2 MODELOS DE LT

De forma geral, os algoritmos de localização de faltas se baseiam predominantemente em dois modelos de linhas: modelo a parâmetros concentrados e modelo a parâmetros distribuídos (ALMEIDA; FREITAS, 1995). O primeiro representa a linha monitorada por elementos pontuais, cujos parâmetros são calculados em uma frequência única, normalmente a fundamental. Trata-se de uma modelagem simplificada com elementos discretos. Por outro lado, o modelo de parâmetros distribuídos é usado para uma representação mais precisa da linha, garantido maior precisão na localização de faltas, especialmente quando os parâmetros da LT são conhecidos sem erro (SAHA *et al.*, 2010).

### 2.2.0.1 Modelo a Parâmetros Concentrados

O modelo de LT a parâmetros concentrados é uma aproximação adequada para representar linhas curtas e médias. Em diversas referências na literatura, a classificação das LT que dão suporte à escolha de modelos é abordada como sendo dependente apenas do comprimento da linha  $l$ . Entretanto, conforme apresentado por Almeida & Freitas (1995), é possível classificar as LT considerando o nível de tensão  $V_L$  e o comprimento  $l$ , conforme Tabela 2.1.

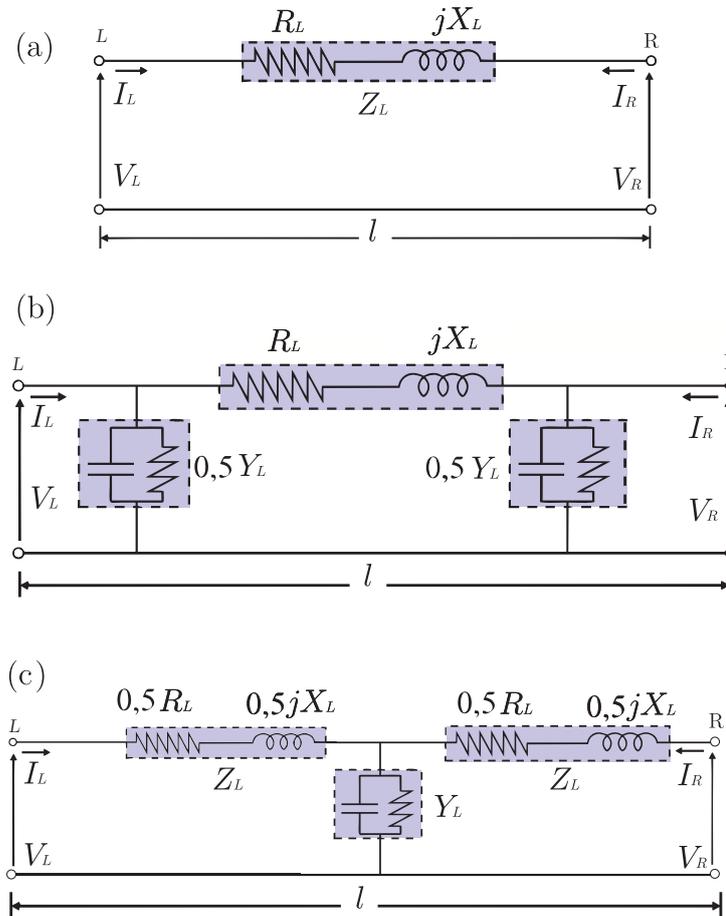
Na Figura 2.2 estão apresentadas as representações de linha curtas e médias a parâmetros concentrados. O circuito que representa linhas curtas é composto apenas por uma impedância série  $Z_L$ , ligada aos terminais local e remoto, L e R, respectivamente, calculada para uma dada frequência, usualmente a frequência fundamental. Dessa forma, despreza-se o efeito capacitivo da LT. Para linhas médias é comum a inserção das admitâncias em derivação  $Y_L$ , onde nor-

**Tabela 2.1.** Classificação das linhas de transmissão.

	$V_L < 150$ kV	$150$ kV $< V_L < 400$ kV	$V_L > 400$ kV
Linha Curta	$l < 80$ km	$l < 400$ km	$l < 20$ km
Linha Média	$80 < l < 200$ km	$40 < l < 200$ km	$20 < l < 100$ km
Linha Longa	$l > 200$ km	$l > 200$ km	$l > 100$ km

**Fonte:** (ALMEIDA; FREITAS, 1995).

**Figura 2.2.** Representação de uma (a) linha de transmissão curta; (b) linha de transmissão média modelo  $\pi$ ; (c) linha de transmissão média modelo T.



**Fonte:** (ALMEIDA; FREITAS, 1995) com adaptações.

malmente as condutâncias são desprezadas, deixando apenas as reatâncias capacitivas para a representação do efeito capacitivo dos condutores (ALMEIDA; FREITAS, 1995).

Existem duas representações formalmente válidas para linhas médias a parâmetros concentrados: o modelo  $\pi$ , onde a impedância série é ladeada por capacitores em derivação, e o modelo T, onde toda a admitância em derivação da linha é concentrada no ramo em derivação, e a impedância série nesse caso é igualmente dividida entre os ramos em série (ALMEIDA; FREITAS, 1995). As impedâncias e admitâncias próprias e mútuas de cada fase da LT são determinadas pela geometria da torre e não são idênticas para todas as fases. Em geral, a matriz de impedância de linha  $Z_{abc}$  não é perfeitamente balanceada, ou seja, não possui os elementos da diagonal principal idênticos, se aplicando o mesmo aos elementos fora da diagonal principal. Isso é satisfeito se a linha estiver perfeitamente transposta, o que pode ser realizado trocando as posições dos condutores ao longo do linha, de tal forma que cada fase (a, b e c) ocupe cada

uma dada posição por parcelas equivalentes do comprimento total (SAHA *et al.*, 2010). Assim, para uma LT perfeitamente transposta, tem-se:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

sendo  $Z_P$  e  $Z_M$  são as impedâncias própria e mútua dadas por (DOMMEL, 1969):

$Z_M = (Z_{L0} - Z_{L1})/3$ ,  $Z_P = Z_M + Z_{L1} = (Z_{L0} + 2Z_{L1})/3$ , em que  $Z_{L0}$  e  $Z_{L1}$  as impedâncias de sequência zero e positiva da LT, respectivamente.

Neste modelo de LT, como o próprio nome remete, os parâmetros estão concentrados. Portanto, as variações em um terminal da linha são instantaneamente percebidos no outro terminal. Para linhas curtas, onde o tempo de propagação da onda é pequeno, este pode ser desprezado conforme apresentado no modelo (LOPES, 2014). Entretanto, para LT longas, as variações nas formas de ondas medidas em um terminal da LT levam um tempo para se propagar entre os condutores e serem percebidas no terminal oposto e, portanto, faz-se necessário o uso de modelos mais precisos, que contemplem essa propagação, como o modelo a parâmetros distribuídos apresentado a seguir.

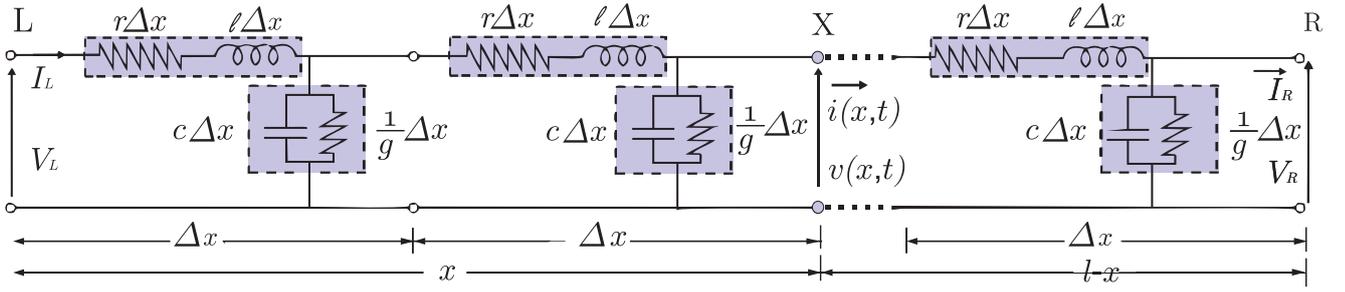
### 2.2.0.2 Modelo a Parâmetros Distribuídos

Neste modelo de LT, o fenômeno da propagação de ondas é representado, e por consequência, a influência do comprimento dos condutores é considerado. Assim, o circuito equivalente de uma LT longa de comprimento  $l$  é representada por vários elementos incrementais de uma LT monofásica de comprimento  $\Delta x$ , como apresentado na Figura 2.3, na qual  $r$ ,  $\ell$ ,  $c$  e  $g$  representam, respectivamente, a resistência série, a indutância série e a capacitância e a condutância em derivação, por unidade de comprimento.  $X$  é o ponto de medição a ser analisado, com tensão  $v(x, t)$  e corrente  $i(x, t)$  e encontra-se a uma distância  $x$  do terminal 1.

A tensão  $v(x, t)$  e a corrente  $i(x, t)$  podem ser relacionadas aos parâmetros da LT para um único elemento incremental, de forma que (GLOVER *et al.*, 2010):

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = ri(x, t) + \ell \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.10)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = gv(x, t) + c \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (2.11)$$

**Figura 2.3.** Modelo de LT a parâmetros distribuídos.

**Fonte:** (LOPES, 2014) com adaptações.

As expressões que solucionam as equações diferenciais lineares (2.10) e (2.11) são conhecidas como equações telegráficas, e descrevem o comportamento da tensão  $v(x, t)$  e corrente  $i(x, t)$  na LT em função da distância e do tempo (WENTWORTH, 2009).

Para uma LT sem perdas, na qual  $r = g = 0$ , tem-se:

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{dx^2} = \ell c \frac{\partial^2 v(x, t)}{dt^2}, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = \ell c \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2}. \quad (2.13)$$

De acordo com Glover *et al.* (2010), pela avaliação de grandezas desacopladas é possível realizar a análise de componentes na frequência fundamental para linhas longas, através da representação de quadripolos, onde cada terminal da LT monitorada possui dois polos. Considerando a  $i$ -ésima componente simétrica, onde  $i = 0, 1, 2$  para sequência zero, positiva e negativa, a constante de propagação  $\gamma_i$ , e a impedância característica  $Z_{ci}$  da LT são dadas por:

$$\gamma_i = \sqrt{(r_i + j\omega\ell_i)(g_i + j\omega c_i)}, \quad (2.14)$$

$$Z_{ci} = \sqrt{\frac{(r_i + j\omega\ell_i)}{(g_i + j\omega c_i)}}, \quad (2.15)$$

em que  $\omega$  é a frequência angular  $f$ ,  $r_i$ ,  $\ell_i$ ,  $g_i$  e  $c_i$  são a resistência série, indutância série, condutância em derivação e capacitância em derivação, respectivamente, por unidade de comprimento, para a  $i$ -ésima componente simétrica.

Para uma LT perfeitamente transposta, tem-se que as componentes fundamentais das tensões e correntes no ponto  $x$  podem ser calculadas a partir de:

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{Xi} \\ \hat{I}_{Xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i x) & -Z_{ci} \sinh(\gamma_i x) \\ \frac{1}{-Z_{ci}} \sinh(\gamma_i x) & \cosh(\gamma_i x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_{Li} \\ \hat{I}_{Li} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Os termos da matriz de coeficientes apresentada em (2.16) consistem nos parâmetros ABCD da representação da linha em forma de quadripolo (GLOVER *et al.*, 2010). A partir dessa abordagem é possível avaliar as tensões e correntes do sistema monitorado, sem desprezar os efeitos dos parâmetros distribuídos na linha, e por isso se torna essencial para estudos de faltas em LT longas.

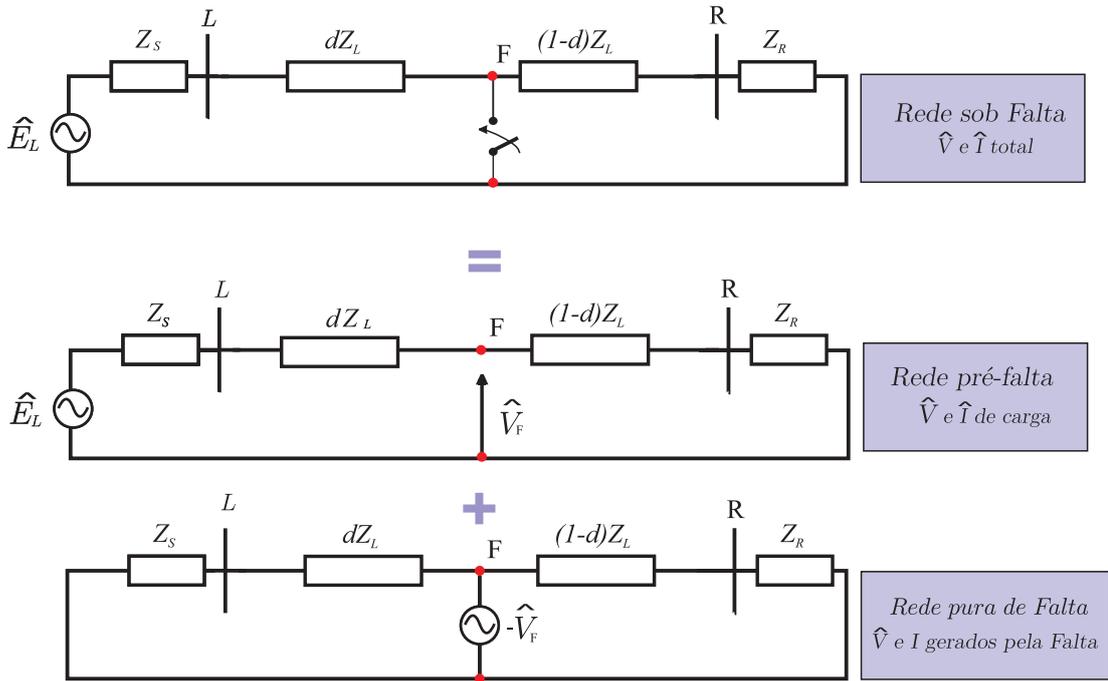
## 2.3 PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO

Alguns algoritmos de localização de faltas fazem uso do princípio da superposição para minimizar a influência do carregamento e resistência de falta do sistema sobre a precisão do ponto de falta estimado, como o método apresentado em Takagi (1982). O princípio se baseia no fato de que qualquer sistema linear contendo múltiplas fontes independentes de corrente ou tensão em qualquer ponto pode ser solucionado pela soma algébrica das contribuições individuais de cada fonte atuando isoladamente. Esta propriedade de reduzir sistemas complexos em vários problemas mais simples é denominada princípio da superposição (IRWIN; NELMS, 1939).

O princípio da superposição pode ser analogamente aplicado a uma rede elétrica sob falta. Dessa forma, são modeladas as contribuições provindas de um circuito pré falta, representando as correntes e tensões de carga durante a operação normal do sistema, e um circuito puro de falta, que reproduz as oscilações nos sinais de tensão e corrente geradas durante o curto-circuito. Assim, as tensões e correntes em qualquer ponto da rede sob falta são determinados pelo somatório das componentes de pré-falta e das componentes do circuito puro de falta.

Na Figura 2.4 é representado o princípio da superposição aplicado a um curto circuito franco, onde a variação de tensão no ponto de falta é representado por uma fonte de tensão de mesma amplitude e fase oposta à tensão medida no ponto de falta no instante anterior ao defeito,  $\hat{V}_F$ . Ressalta-se que o circuito puro de falta não existe antes da ocorrência de um curto-circuito, ou seja, as grandezas elétricas são nulas até a energização do circuito. As contribuições de corrente e tensão de pré falta e de curto-circuito podem ser avaliadas separadamente, viabilizando o entendimento e a análise do distúrbio.

No âmbito dos estudos de localização de faltas, o princípio da superposição é utilizado por meio da aplicação das grandezas incrementais em formulações diversas. Quando consideradas

**Figura 2.4.** Princípio da superposição aplicado a análise de um curto-circuito franco.

**Fonte:** autoria própria.

componentes fasoriais de frequência fundamental, uma corrente incremental ( $\Delta\hat{I}_L$ ) é obtida através da subtração das medições da corrente medida no período de falta ( $\hat{I}_L$ ) e da corrente medida no período pré-falta ( $\hat{I}_{pre}$ ), ou seja:

$$\Delta\hat{I}_L = \hat{I}_L - \hat{I}_{pre}. \quad (2.17)$$

Analogamente, tensões incrementais também podem ser também calculadas utilizando dados de tensão medidas nos períodos de pré-falta e de falta. Essas grandezas incrementais sejam de corrente ou tensão viabilizam a análise de variações impostas exclusivamente pelo distúrbio e, portanto, são usadas para fins diversos nos processos de localização de faltas, a exemplo da minimização da influência do carregamento do sistema e até para obter relações matemáticas confiáveis da corrente no ramo de falta, como reportado por Takagi (1982). Alguns algoritmos de dois terminais que usam grandezas de sequência negativa também propõem o uso de grandezas incrementais para curtos simétricos em situações nas quais não existe contribuição de sequência negativa, a exemplo os métodos apresentados por Saha & Rosolowski (2013) e Izykowski *et al.* (2010).

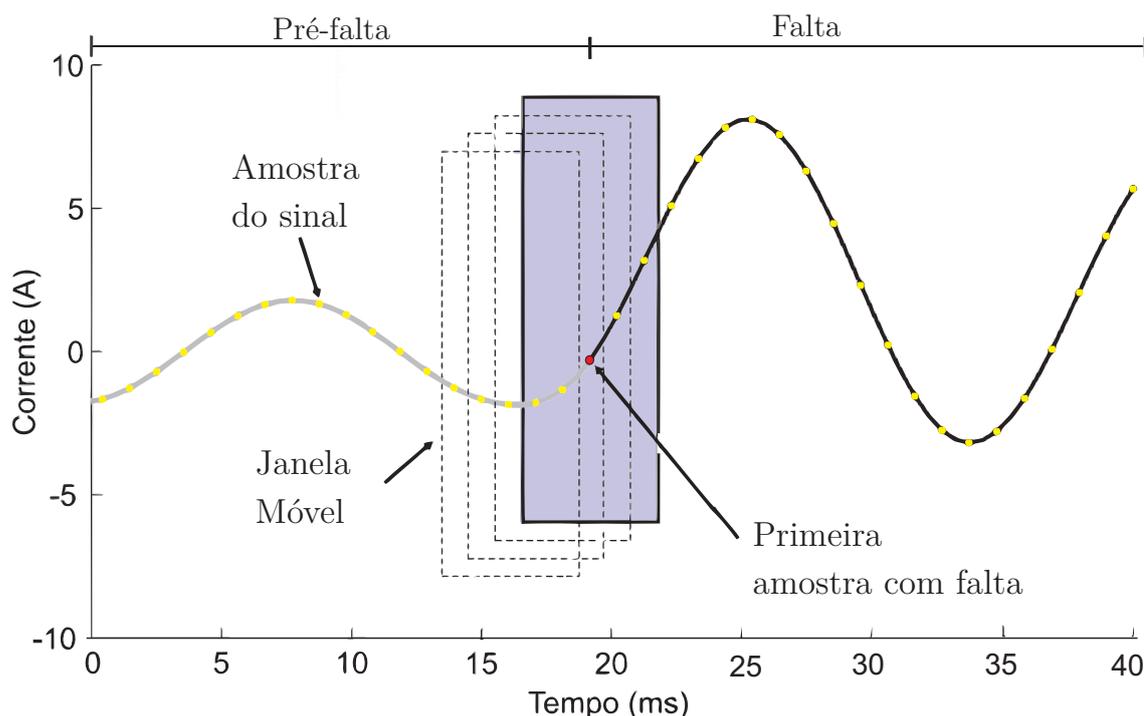
## 2.4 FUNDAMENTOS DA ESTIMAÇÃO DE FASORES

Em métodos de localização de faltas baseados na análise das componentes de frequência fundamental, consideram-se normalmente em seus equacionamentos a avaliação das variações de módulo e fase das tensões e/ ou correntes. Para tanto, faz-se uso de algoritmos de estimação de fasores, os quais recebem um conjunto de amostras janelas para então estimar os fasores de interesse (PHADKE; THORP, 2009). Esse processo consiste em uma filtragem digital, pois filtros digitais são empregados no cálculo do fasor.

Dentre os diversos métodos de estimação de fasores disponíveis na literatura, destacam-se os filtros de Fourier (PHADKE; THORP, 2009; JOHNS; SALMAN, 1995), o filtro cosseno modificado (HART *et al.*, 2000), além de algoritmos baseados na teoria dos mínimos quadrados na Transformada *Wavelet* (SILVA, 2009a). Apesar de apresentarem diferentes equacionamentos, todos os algoritmos de estimação fasorial requerem a discretização e janelamento dos sinais.

A primeira etapa do processo de estimação fasorial consiste na discretização dos sinais analógicos medidos. Assim, realiza-se inicialmente a limitação da banda de frequência do sinal, evitando-se a sobreposição de espectros (PHADKE; THORP, 2009). Para tanto, usam-se normalmente filtros *anti-aliasing* do tipo Butterworth passa-baixa, de 2ª ou 3ª ordem, cuja frequência de corte é determinada a partir do teorema de Nyquist, sendo esta menor que a metade da frequência de amostragem considerada (PHADKE; THORP, 2009). Na sequência, realiza-se o janelamento das amostras obtidas do sinal, de modo que a cada passo de processamento a janela é deslocada no tempo, fazendo com que uma nova amostra seja inserida na janela e outra amostra antiga seja descartada. Esse esquema é ilustrado na Figura 2.5, onde é esboçado o processo de janelamento de um sinal de corrente.

Para cada janela, a amplitude e a fase do fasor na frequência fundamental do sinal é estimado (PHADKE; THORP, 2009). Observam-se na Figura 2.5 os períodos de pré-falta e de falta. Na pré-falta a janela é composta apenas por amostras de sinal sem falta e, após a incidência do distúrbio, nota-se uma fase de transição na qual a janela contém amostras do sinal com e sem falta. Finalmente, após a fase de transição, a janela passa toda para o período de falta, contendo apenas amostras do sinal com falta.

**Figura 2.5.** Esquema de janelamento aplicado a um sinal de corrente.

**Fonte:** (SILVA, 2009b) com adaptações.

Ressalta-se que em casos reais ainda há uma fase pós-falta, que se inicia após a abertura do disjuntor em decorrência da atuação da proteção. Assim, sabendo que os algoritmos de estimação de fasores realizam o cálculo correto das componentes fundamentais fasoriais apenas quando consideradas janelas do sinal em regime permanente, sem falta ou com falta, os fasores calculados durante o período de transição não devem ser utilizados como entrada em algoritmos de localização de falta (LOPES, 2014), ou seja, os fasores um ciclo antes da abertura dos disjuntores devem ser considerados, visto que representam as medições mais estáveis do regime permanente de falta.

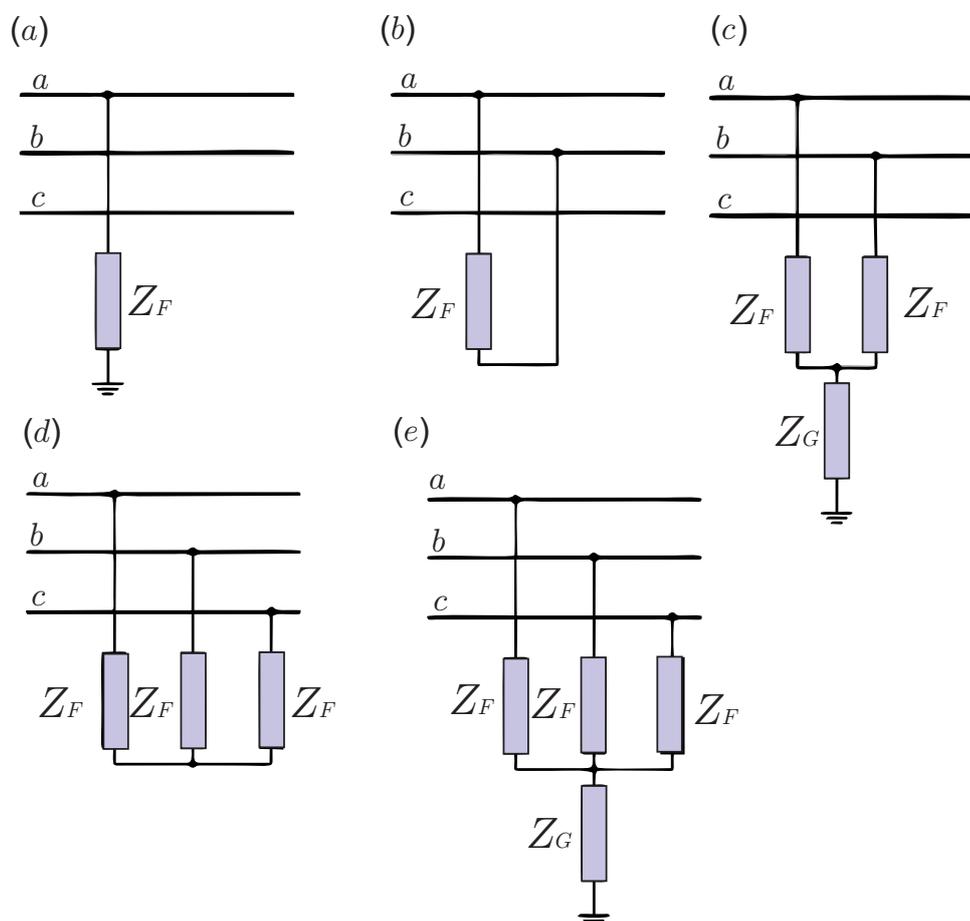
No entanto, em casos nos quais o período de falta tem duração reduzida, inevitavelmente janelas de dados sob o efeito de transitórios são utilizadas, incorrendo em erros adicionais. Este fato tem aguçado a busca por técnicas que permitam a estimação de fasores com janelas curtas, resultando em períodos de transição menores, que sejam capazes ainda assim de reduzir o efeito da componente de decaimento exponencial. No entanto, em dispositivos reais, ainda predominam os algoritmos com janelas de um ou mais ciclos (SAHA *et al.*, 2010).

## 2.5 CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS E *LOOPS* DE FALTAS

A classificação do tipo de falta se faz necessária para diversos algoritmos de localização, principalmente os que usam dados de apenas um terminal, pois fazem uso grandezas de *loop* de falta, cuja seleção depende da identificação das fases sob defeito (LOPES, 2014). Em geral, as faltas podem ser classificadas em cinco tipos clássicos: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, trifásica e trifásica terra, conforme ilustrado na Figura 2.6, onde  $Z_F$  e  $Z_G$  representam a impedância de falta e a impedância de conexão ao solo, respectivamente (SAHA *et al.*, 2010).

As faltas trifásicas são também chamadas de faltas equilibradas ou faltas simétricas, enquanto as demais são faltas desequilibradas ou assimétricas (SAHA *et al.*, 2010). Existem outros tipos de faltas, como por exemplo entre linhas de dois circuitos diferentes, mas neste trabalho iremos considerar os quatro tipos clássicos.

**Figura 2.6.** Tipos de faltas.



**Fonte:** autoria própria.

Na literatura, encontram-se diversas técnicas para a classificação de curtos-circuitos, cujos princípios se assemelham aos empregados em relés numéricos de proteção de distância (ZIEGLER, 2010). Dentre esses, destacam-se métodos baseados na impedância durante o período de falta (ZIEGLER, 2010), métodos que utilizam sobrecorrentes para a detecção das fases envolvidas no defeito (BUNYAGUL *et al.*, 2001), e com mais destaque, métodos que fazem uso das componentes simétricas para a classificação do tipo de faltas, conforme proposto em (KASZTENNY *et al.*, 2000). Como alternativa aos métodos tradicionais, métodos baseados em outras técnicas também têm sido propostos na literatura, a exemplo de técnicas baseadas na transformada de Park (LOPES *et al.*, 2013a) e na Transformada Wavelet Discreta (COSTA *et al.*, 2012). Todavia, em geral, predominam as análises de módulo e ângulo de fase de componentes simétricas (SAHA *et al.*, 2010). Neste trabalho, uma vez que se deseja avaliar apenas as formulações empregadas no processo de localização de faltas, considerar-se-á que a classificação de faltas encontra-se funcionando sem erro, conforme será apresentado no Capítulo 4.

Como citado anteriormente, os métodos de localização de faltas de um terminal necessitam da determinação do *loop* de falta, que é dado pela relação entre as tensões e correntes vistas pelo relé de distância (SILVA, 2009b). Afim de identificar os sinais usados em cada um dos *loops* de falta, considere o sistema apresentado na Figura 2.7, com comprimento,  $l$ , que interliga os terminais, L (local) e R (remoto), onde:  $\hat{V}_F$  é o fasor de tensão no ponto de falta  $F$ ;  $d$  é distância em km entre a falta e o terminal local;  $\hat{V}_{L0,1,2}$  e  $\hat{I}_{L0,1,2}$  representam os fasores de tensão e corrente de sequência zero, positiva e negativa medidos no terminal L. Considere ainda existir um sistema de medição conectado à barra L, e que as impedâncias equivalentes de Thévenin  $Z_S$  e  $Z_R$  se encontram conectadas a cada terminal da linha, assumindo que as impedâncias de sequência positiva e negativa representadas por  $Z_{L1}$  e  $Z_{L2}$ , respectivamente, são iguais.

Em um curto-circuito monofásico na fase "a" (AT), os três circuitos de sequência equivalentes estão conectados em série, conforme apresentado na Figura 2.8. Considerando um sistema trifásico equilibrado, a impedância vista pelo relé é dada por:

$$\hat{V}_{F0} = \hat{V}_{L0} - dZ_{L0}\hat{I}_{L0}, \quad (2.18)$$

$$\hat{V}_{F1} = \hat{V}_{L1} - dZ_{L1}\hat{I}_{L1}, \quad (2.19)$$

$$\hat{V}_{F2} = \hat{V}_{L2} - dZ_{L2}\hat{I}_{L2}. \quad (2.20)$$

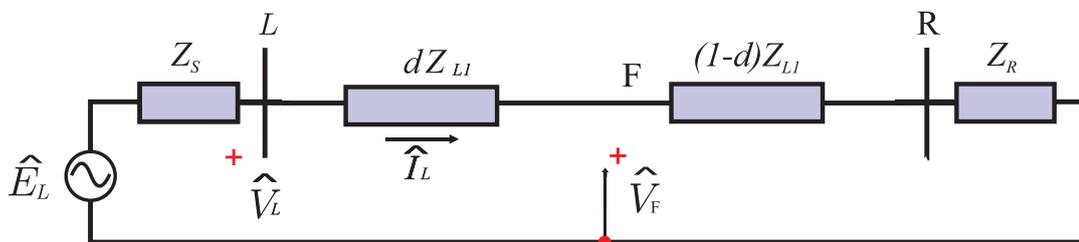
A tensão de falta na fase "a",  $\hat{V}_F^a$ , é dada pela soma das tensões de seqüência, conforme demonstrado em (2.6). Assim, obtém-se:

$$\hat{V}_F^a = \hat{V}_{F0} + \hat{V}_{F1} + \hat{V}_{F2}, \quad (2.21)$$

de modo que manipulando a expressão, tem-se que:

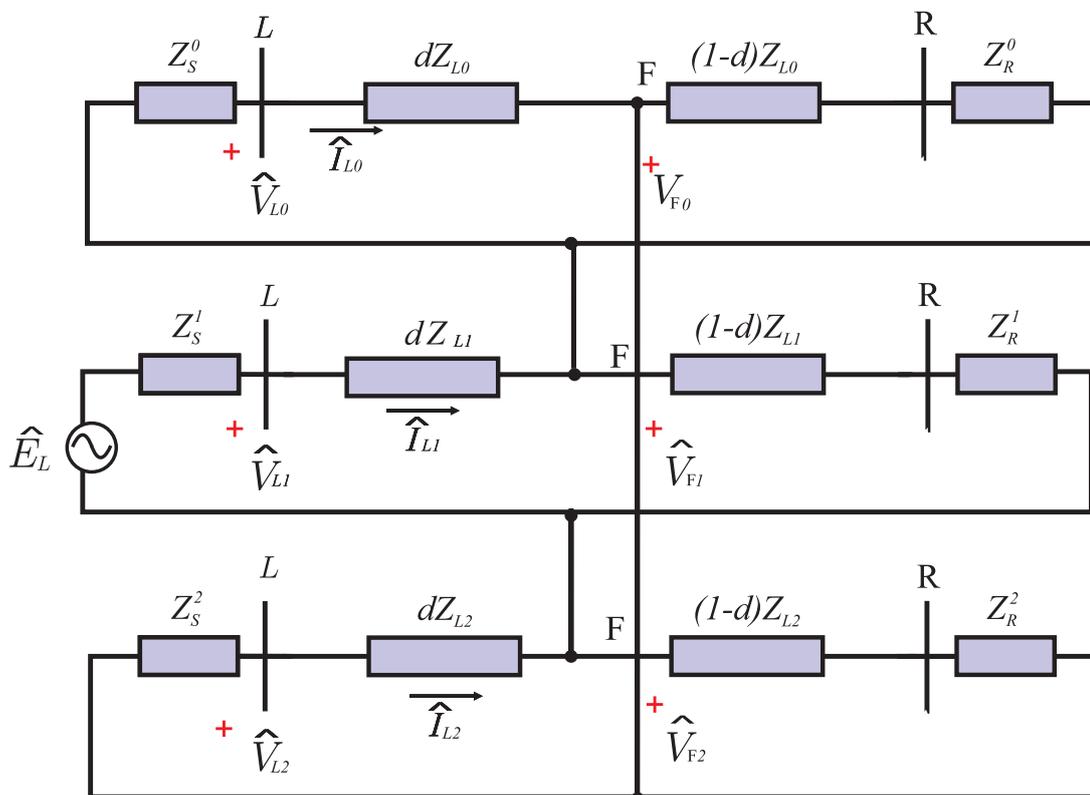
$$\hat{V}_F^a = \hat{V}_L^a - dZ_{L1} [\hat{I}_L^a + K_0 \hat{I}_{L0}], \quad (2.22)$$

**Figura 2.7.** Diagrama unifilar de um circuito trifásico com uma falta aplicada no ponto F.



**Fonte:** autoria própria.

**Figura 2.8.** Circuitos de seqüência para uma falta monofásica na fase "a".



**Fonte:** autoria própria.

em que  $K_0$  é o fator de compensação de sequência zero dado por:

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}. \quad (2.23)$$

O fator de compensação é responsável por contrabalancear o acoplamento mútuo de sequência zero entre a fase envolvida no curto-circuito e as que não estão (SILVA, 2009b). Para uma falta franca, a tensão na fase "a" no local da falta,  $\hat{V}_F^a$ , pode ser considerada nula, de modo que a medição de impedância vista pelo terminal local é dada por:

$$dZ_{L1} = \frac{\hat{V}_L^a}{\hat{I}_L^a + K_0 \hat{I}_{L0}}. \quad (2.24)$$

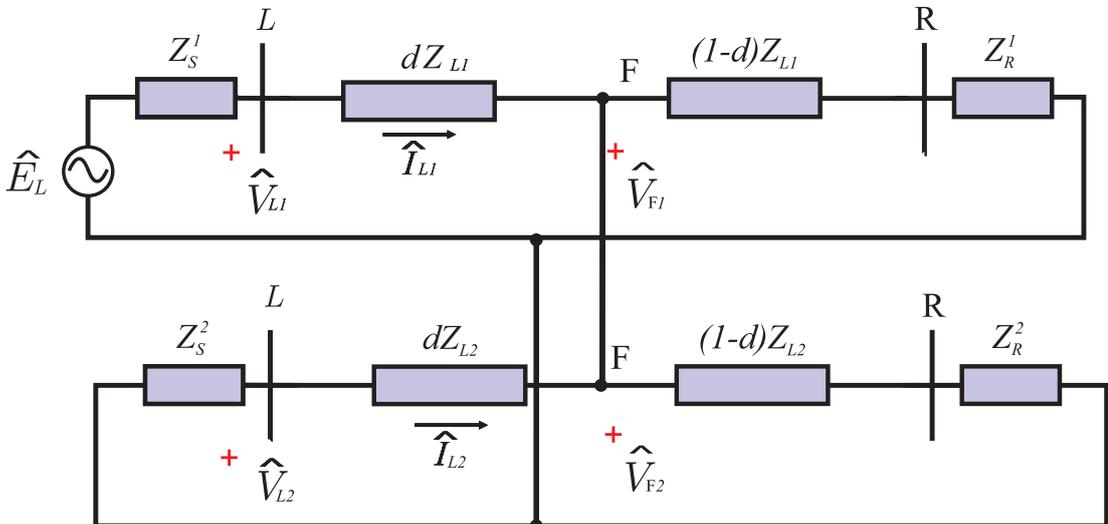
De forma análoga, podem ser obtidas as expressões das impedâncias vistas para faltas monofásicas BT e CT. Por outro lado, na Figura 2.9, ilustra-se a conexão dos circuitos de sequência para um curto bifásico BC. Nota-se a conexão em paralelo entre os circuitos de sequência positivo e negativo, de forma que:

$$\hat{V}_{F1} - dZ_{L1} \hat{I}_{L2} + \hat{V}_{L2} - \hat{V}_{L1} + dZ_{L1} \hat{I}_{L1} = 0. \quad (2.25)$$

Considerando uma falta sólida, ou seja  $\hat{V}_{F1} = 0$ , a impedância de sequência positiva do trecho da linha entre a unidade de medição na barra L e o local da falta em relação das grandezas de sequência é dado por:

$$dZ_{L1} = \frac{\hat{V}_{L1} - \hat{V}_{L2}}{\hat{I}_{L1} - \hat{I}_{L2}}. \quad (2.26)$$

**Figura 2.9.** Circuitos de sequência para uma falta bifásica entre as fases "b" e "c".



**Fonte:** autoria própria.

Substituindo as componentes de seqüência pelas grandezas de fase, que podem ser obtidas de acordo com 2.5, tem-se:

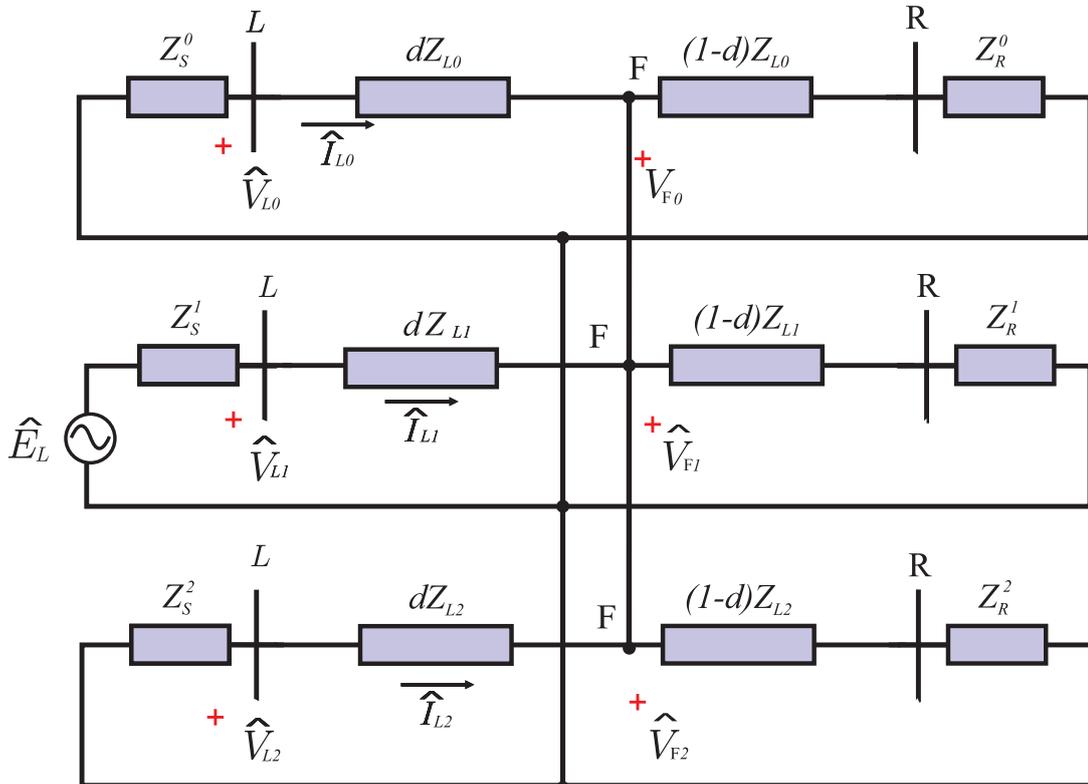
$$dZ_{L1} = \frac{\hat{V}_L^b - \hat{V}_L^c}{\hat{I}_L^b - \hat{I}_L^c}. \quad (2.27)$$

A conexão dos circuitos de seqüência no caso de uma falta bifásica para terra, entre as fases "b" e "c" no ponto F da linha, está ilustrada na Figura 2.10. Nota-se que, para um curto BCT, há conexão em paralelo entre os três circuitos de seqüência, de forma que:

$$\hat{V}_{F1} - dZ_{L1}\hat{I}_{L2} + \hat{V}_{L2} - \hat{V}_{L1} + dZ_{L1}\hat{I}_{L1} = 0. \quad (2.28)$$

Observa-se que a impedância vista pelo relé em um curto bifásico-terra é calculada de forma similar ao curto bifásico. Portanto, não importa a presença do terra, a impedância vista pelo relé será dada por:

**Figura 2.10.** Circuitos de seqüência para uma falta bifásica para a terra entre as fases "b" e "c".



**Fonte:** autoria própria.

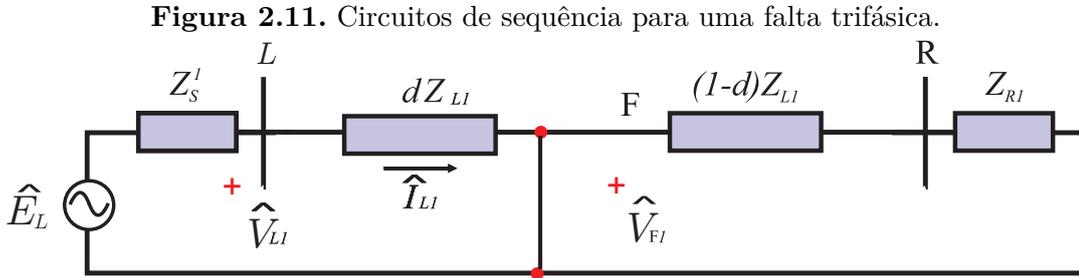
$$dZ_{L1} = \frac{\hat{V}_L^b - \hat{V}_L^c}{\hat{I}_L^b - \hat{I}_L^c}. \quad (2.29)$$

As relações para faltas AB, ABT, CA e CAT podem ser obtidas de forma similar. Para faltas trifásicas só há componentes de sequência positiva, conforme Figura 2.11, e para as unidades de entradas dos métodos, usa-se os elementos fase-fase, tipicamente AB por opção.

Na Tabela 2.2, estão sintetizados os sinais de entrada dos seis *loops* de falta considerados, onde  $\hat{V}_L^a$ ,  $\hat{V}_L^b$ ,  $\hat{V}_L^c$ ,  $\hat{I}_L^a$ ,  $\hat{I}_L^b$  e  $\hat{I}_L^c$  são os sinais de tensão e corrente medidos pelo terminal local nas fases "a", "b" e "c" respectivamente.  $\hat{I}_0$  é o fasor de corrente de sequência zero, dada por:

$$\hat{I}_0 = \frac{\hat{I}_L^a + \hat{I}_L^b + \hat{I}_L^c}{3}, \quad (2.30)$$

e  $K_0$  é o fator de compensação de sequência zero.



**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 2.2.** Unidades de entrada dos métodos de um terminal.

<i>Loop</i> de falta	Sinal de Tensão $\hat{V}_L$	Sinal de Corrente $\hat{I}_L$
AT	$\hat{V}_L^a$	$\hat{I}_L^a + K_0 \hat{I}_0$
BT	$\hat{V}_L^b$	$\hat{I}_L^b + K_0 \hat{I}_0$
CT	$\hat{V}_L^c$	$\hat{I}_L^c + K_0 \hat{I}_0$
AB	$\hat{V}_L^a - \hat{V}_L^b$	$\hat{I}_L^a - \hat{I}_L^b$
BC	$\hat{V}_L^b - \hat{V}_L^c$	$\hat{I}_L^b - \hat{I}_L^c$
CA	$\hat{V}_L^c - \hat{V}_L^a$	$\hat{I}_L^c - \hat{I}_L^a$

**Fonte:** (SAHA *et al.*, 2010).

## 2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento das técnicas de localização de faltas que serão apresentados no Capítulo 4, a exemplo das componentes simétricas, que são essenciais para as análises de curto-circuitos e são usadas na maioria dos algoritmos de localização de faltas baseados na análise das componentes fundamentais, por simplificar as análises, transformado um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos simétricos (SCHWEITZER, 2004).

Do mesmo modo, o entendimento do teorema da superposição se faz necessário, uma vez que diversos algoritmos fazem uso das grandezas incrementais para minimizar a influência do fluxo de carga no sistema, a exemplo o método proposto por (TAKAGI, 1982), e outros o aplicam para curtos simétricos. Nesse caso, ressalta-se a importância da classificação de faltas para os algoritmos que fazem uso de grandezas de sequência negativa, pois precisam da detecção entre curto simétrico e assimétrico, vide (IZYKOWSKI *et al.*, 2010), para substituir as grandezas de sequência negativa por incrementais. Ademais, destaca-se também a importância da classificação das fases com falta para determinação correta *loop* de falta, quando necessário.

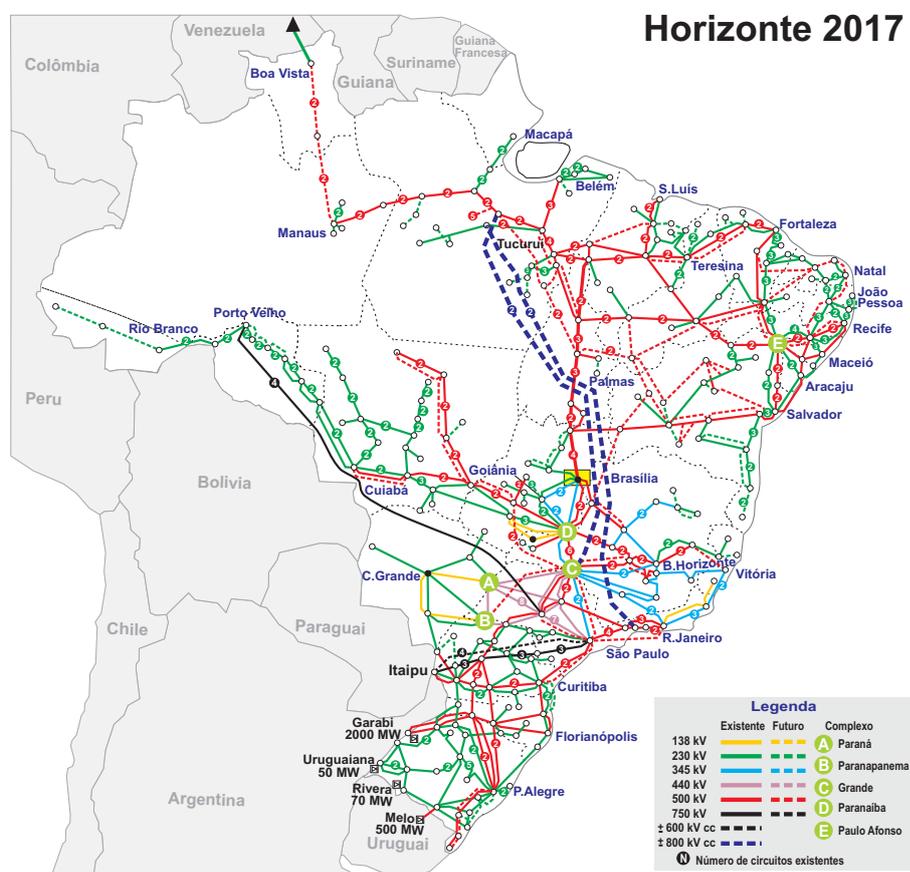
Adicionalmente, apresentaram-se questões associadas aos modelos de linha utilizados no equacionamento dos métodos, os quais têm relação com a precisão de algoritmo existentes, assim como com a sensibilidade dos métodos quanto a diversas fontes de erro, tradicionalmente verificadas nos processos de localização de faltas realizados por concessionárias.

Diante do exposto nesse capítulo, ressalta-se que a localização de faltas propriamente dita, é a última etapa de um processo que se inicia com a aquisição de dados por meio de transformadores de potencial e transformadores de corrente, os quais são filtrados, passando por uma etapa de conversão analógico-digital (A/D) e posterior janelamento para estimação dos fasores. Destaca-se que os métodos de estimação fasorial também podem resultar em erros, a depender das estratégias de filtragem adotadas.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas últimas décadas, os sistemas elétricos de potência cresceram bastante. Segundo o Plano de Ampliações e Reforços (PAR) (ONS, 2017), o Sistema Elétrico Brasileiro teve um incremento de 69% nas LT no último decênio, passando de uma extensão da ordem de 84.449 km em 2006 para 122.655 km em 2016. Além disso, ainda é previsto um crescimento de 66% até 2023, resultando em 185.484 km, o que equivale a mais de catorze voltas em torno do planeta Terra. As LT estendem-se por quase todo território nacional, com exceção de 237 localidades na região Norte que possuem um sistema isolado, conforme pode-se observar na Figura 3.1.

**Figura 3.1.** Sistema de Transmissão Brasileiro - Horizonte 2017.



Fonte: (ONS, 2018).

---

Ao mesmo tempo em que os sistemas de transmissão se tornaram mais susceptíveis à ocorrência de distúrbios, o mercado passou a apresentar exigências mais rigorosas quanto aos índices de continuidade e de confiabilidade do suprimento de energia elétrica, motivando assim estudos sobre métodos de localização de faltas, que forneçam estimativas precisas do local da falha, possibilitando o despacho mais rápido das equipes de manutenção com foco no pronto restabelecimento do sistema (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013).

Deve-se destacar que a busca por métodos de localização de faltas não é recente. Os primeiros estudos datam da década de 30, sendo que a energia elétrica foi transmitida em corrente alternada pela primeira vez em novembro de 1896, das Cataratas do Niágara para as usinas de Búffalo, a partir dos geradores da hidrelétrica Edward Dean Adams, marcando assim a vitória de Nikola Tesla, na famosa guerra das correntes (TESLA, 2002). A partir da possibilidade de transportar a eletricidade a grandes distâncias e custos reduzidos, as redes de transmissão começaram a crescer, e com isso a necessidade de localizar distúrbios. Com isso, em 1955, o *American Institute of Electrical Engineers* (AIEE) apresentou em Report (1955) uma revisão de técnicas de localização de faltas propostas entre a década de 1930 até o ano de 1995. Conforme reportado no trabalho, os métodos iniciais baseados em inspeção visual evoluíram, passando de patrulhas de solo para patrulhas aéreas e, mais recentemente, para testes com veículos aéreos não tripulados. A localização de faltas usando medições elétricas também evoluiu, atingindo níveis práticos atrativos a partir da evolução dos dispositivos eletromecânicos para os dispositivos microprocessadores, equipados com registradores digitais de perturbações e muitas vezes combinados com sistemas geoespaciais (SCHWEITZER, 2004).

O trabalho de Schweitzer (1988) faz referência a um dos primeiros métodos de localização de faltas integrado em relés de proteção. Esta integração acelerou a implantação de métodos de localização de faltas digitais, tornando o processo mais prático. Conforme mencionado em capítulos anteriores, as técnicas de localização de faltas existentes podem ser subdivididas em quatro grupos, a saber: métodos baseados na teoria de ondas viajantes, métodos baseados em inteligência artificial, métodos baseados na análise de componentes de alta frequência, e métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013), cuja evolução na literatura é brevemente comentada nas subseções a seguir.

### 3.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA NA ANÁLISE DE COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Os métodos de localização de faltas baseados na análise de componentes de frequência fundamental são os mais simples, baratos e não requerem altas taxas de amostragem. Como consequência, esses métodos requerem usualmente pouco esforço computacional, sendo os mais utilizados pelas concessionárias de energia elétrica. Dentre esses métodos, os de um terminal foram os pioneiros, os quais possuem como vantagem em relação aos métodos multi-terminais a independência de canais de comunicação ou da sincronização de dados (SAHA *et al.*, 2010).

Os primeiros métodos reportados na literatura seguem o princípio da proteção de distância, determinando a impedância aparente entre o dispositivo de medição e o ponto de ocorrência do distúrbio (ZIEGLER, 2010). Tradicionalmente, considera-se o modelo de linha curta nesse tipo de método, desprezando-se o efeito capacitivo. Além disso, esse tipo de método é normalmente influenciado pelo carregamento e resistência de falta, efeitos esses que se tornam mais proeminentes em sistemas não-homogêneos (TAKAGI, 1982).

Na tentativa de solucionar o problema com a impedância de falta, foi proposto o algoritmo que ficou conhecido como método da reatância simples (ÇAPAR; ARSOY, 2015). Este método propõe o uso apenas da parcela imaginária da impedância medida. Assim, assumindo que a impedância de falta tem tipicamente característica predominantemente resistiva, elimina-se o efeito desta em sistemas homogêneos. Entretanto, em casos de sistemas não-homogêneos, o efeito da impedância de falta ainda existe, mesmo que possua característica puramente resistiva.

Para contornar os problemas expostos, em 1979, Toshio Takagi e Yukinari Yamakoshi (TAKAGI, 1982) patentearam um novo método, que foi divulgado em um artigo no ano de 1982, essa nova técnica reduz os efeitos do carregamento e da impedância de falta, usando as grandezas incrementais. Para tanto, faz-se uso das grandezas de pré-falta, o que pode ser considerado como uma desvantagem em termos computacionais, especialmente quando considerados registros oscilográficos tomados de registradores digitais ajustados com um período de pré-falta curto. Além disso, o método se baseia no modelo de linha curta, desprezando o efeito capacitivo dos condutores, o que ocasiona erros nas localizações estimadas em linhas muito longas ou com níveis de tensão mais elevados. Anos depois foi proposto o uso do método apresentado em

(TAKAGI, 1982), substituindo as grandezas incrementais por componentes de sequência zero, e considerando um fator de distribuição de correntes. Dessa forma, foram obtidas melhorias para sistemas não homogêneos, muito embora o método só possa ser aplicado em casos de faltas com conexão para o terra, requerendo os dados dos equivalentes de Thévenin em torno da LT monitorada.

Em 1983, foi proposto em Wiszniewski (1983) um algoritmo que não requer o conhecimento das impedâncias dos circuitos equivalentes em torno da linha. Segundo os autores, o método não é afetado pela não homogeneidade do sistema, mas também é baseado no modelo de linha curta, desprezando-se assim o efeito capacitivo da LT monitorada. Em Alves (2008) é proposto adaptações para o método apresentado em (WISZNIEWSKI, 1983), considerando o efeito capacitivo da LT na reformulação, garantindo maior exatidão ao algoritmo. Em 1985, Eriksson *et al.* (1985) propuseram um algoritmo mais robusto, desenvolvido na tentativa de minimizar erros decorrentes da impedância de falta, do carregamento do sistema e da não homogeneidade da rede elétrica, usando os parâmetros dos equivalentes de Thévenin em torno da linha para a localização da falta. Como subproduto, o método possibilita estimar a resistência de falta, mas para tanto, é necessário conhecer as grandezas de pré-falta e também das impedâncias dos circuitos equivalentes em ambos os terminais local e remoto, o que pode consistir em uma fonte de erros a depender da forma como esses parâmetros são obtidos. Em 1997, Yibin *et al.* (1997) propuseram uma técnica usando a transformada *wavelet*. De acordo com os autores, este algoritmo apresenta melhores resultados quando comparados aos métodos que utilizam a Transformada de Fourier para estimação fasorial. No entanto, sendo a solução voltada para a otimização do processo de estimação fasorial, o método é influenciado pelas fontes de erro clássicas de métodos de um terminal já mencionadas.

Para minimizar as fontes de erro dos métodos de um terminal, as técnicas de localização de faltas evoluíram para soluções de dois terminais, usando medições sincronizadas ou não. Esses métodos são de fato mais robustos se comparados aos métodos de um terminal, sendo ainda menos onerosos em relação a algoritmos de multi-terminais que utilizam dados de três ou mais terminais. Uma das técnicas mais precisas de localização de faltas foi apresentada em 1990, em Johns & Salman (1995). O algoritmo apresentado se baseia no modelo de linha  $\pi$ -exato, o qual contempla os parâmetros distribuídos do sistema, eliminando erros relacionados ao efeito

capacitivo da LT. Entretanto, essa técnica apresenta grande sensibilidade a imprecisões nos parâmetros de sequência da LT, além de fazer uso de dados sincronizados. Dois anos depois, Girgs *et al.* (1992) propuseram uma técnica que pode ser usada considerando dados de dois ou três terminais. Uma solução baseada em dados não-sincronizados também foi apresentada no referido trabalho, embora essa formulação não seja popular dentre os métodos dessa categoria. Por outro lado, a formulação de dois terminais baseada em dados sincronizados tem sido recorrentemente reportada em trabalhos da área, sendo aplicada inclusive por algumas concessionárias brasileiras. Porém, ressalta-se que sua formulação leva em consideração o modelo de linha curta, o que incorre em erros em situações nas quais o efeito capacitivo da LT é relevante.

Em uma análise realizada em Lopes *et al.* (2013b), mostrou-se que em simulações onde os parâmetros da LT são conhecidos sem erros, o método apresentado em Johns & Salman (1995) se mostrou mais robusto. Contudo, para análises reais, onde os parâmetros da LT são conhecidos com erros, o método apresentado em Girgs *et al.* (1992) apresentou maior robustez. Em 2011, foi proposto em (HE *et al.*, 2011) um algoritmo cuja metodologia é similar à empregada em Johns & Salman (1995), na qual o efeito capacitivo e o modelo de linhas longas é considerado. No entanto, como funcionalidade adicional, o método faz uso de um processo iterativo para melhorar a precisão das estimativas calculadas, especialmente em casos de faltas durante oscilações de frequência e amplitude nos fasores de tensão e corrente. Desse modo, o algoritmo apresenta alto nível de precisão quando os parâmetros da LT são conhecidos, mas o processo iterativo torna o algoritmo mais complexo e lento, o que limita seu uso em aplicações *on-line*.

O método apresentado por (IDRIS *et al.*, 2012) apresenta um algoritmo para determinar faltas monofásicas sem a necessidade de se conhecer dados dos equivalentes de Thévenin, ou os parâmetros ABCD da LT. Da mesma forma, visando minimizar a influência de imprecisões nos parâmetros da LT, Radojevic *et al.* (2009), Dawidowski *et al.* (2013) e Preston *et al.* (2011) apresentaram algoritmos que não necessitam dos parâmetros da LT, embora ainda sejam dependentes da sincronização de dados. Nesse contexto, sabe-se que a sincronização de dados pode ser viabilizada por meio do sinal de GPS, que fornece uma referência de tempo comum para os dispositivos utilizados. Apesar disso, muito se discute a respeito de erros de sincronização e disponibilidade do GPS, porque em caso de perda de sinal de sincronização, os dados passam

a ser registrados de forma assíncrona, gerando erros nos processos de localização de falta, a depender da formulação empregada.

Para solucionar problemas decorrentes de erros de sincronização de dados, existe uma classe de métodos de localização de faltas que usa dados não sincronizados, bem como métodos que estimam um operador de sincronismo para corrigir os dados antes do cálculo do local da falta, eliminando assim, a necessidade do uso de uma referência de tempo comum. Entre esses métodos, destaca-se a técnica apresentada por Tziouvaras *et al.* (2001), que faz uso de relações de módulo de componentes simétricas de sequência negativa, evitando problemas com fluxo de potência de pré-falta e com acoplamento mútuo de sequência zero entre fases, mas que requer o conhecimento dos parâmetros da LT e das fontes equivalentes conectadas aos terminais da LT. Ademais, por utilizar grandezas de sequência negativa, obviamente, o método não é indicado para curtos simétricos. De testes apresentados na literatura, sabe-se que o método é simples e preciso quando se conhece os parâmetros da LT com boa exatidão (LOPES *et al.*, 2015).

A técnica proposta por Saha & Rosolowski (2013) elimina a necessidade do ângulo de sincronismo  $\theta$ , utilizando medições no período de falta e componentes de sequência, ou incrementais, para curtos simétricos, assim como apresentado por Gama *et al.* (2018). A técnica se mostra menos precisa por desconsiderar o efeito capacitivo da LT. Da mesma forma, o método apresentado por Izykowski *et al.* (2005) elimina a necessidade de sincronização de dados, mas considera apenas a impedância série da LT na sua formulação. Essa técnica estima um ângulo de sincronismo a partir da função arcoseno, o qual é usado para sincronizar os fasores medidos em ambos os terminais da linha antes do processo final de localização da falta. Nesse contexto, sabe-se que a função arcoseno pode gerar erros a depender do quadrante em que se encontra o ângulo de defasagem.

Já o método apresentado por Izykowski *et al.* (2010) considera o modelo de linha longa, contemplando o efeito capacitivo da LT monitorada. Assim, o método apresenta uma maior precisão em relação aos métodos baseados em modelo de linha curta. Todavia, o algoritmo calcula um operador de sincronismo  $e^{j\theta}$ , para sincronizar as medições dos terminais local e remoto antes do cálculo da distância de falta. Tal procedimento requer ajustes prévios do algoritmo em termos dos parâmetros do sistema, e para faltas simétricas, faz uso de grandezas incrementais, o que pode ser considerado como desvantagem, uma vez que medições do período

pré-falta são necessárias e nem sempre estão disponíveis.

O método proposto por D.Mohamed *et al.* (2012), além dos parâmetros da LT, exige um processo iterativo, o que é visto por muitos como um fator complicador do ponto de vista computacional. De fato, embora permita localizar a falta de forma precisa, o método requer maior esforço computacional, possuindo uso limitado em aplicações em tempo real. De forma similar, os métodos apresentados por Wang *et al.* (2016) e Yu (2010) propõem algoritmos que consideram parâmetros distribuídos da LT monitorada, mas também fazem uso de um processo iterativo para aumentar a precisão da estimativa.

Além das técnicas baseadas em dados de um e dois terminais, existem aquelas que se baseiam em dados de multi-terminais, como os propostos por Abe *et al.* (1994), Brahma (2005), Manassero *et al.* (2010) e Nagasawa *et al.* (1992). No geral, estas técnicas são mais complexas e a precisão está atrelada aos modelos de LT, cargas e transformadores adotados. Destaca-se que embora possam ser vantajosos em algumas situações, a complexidade operacional dos métodos multi-terminais tem limitado sua aplicação em sistemas reais, nos quais ainda predominam as técnicas baseadas em dados de um e dois terminais.

Os métodos baseados em fasores têm sido intensamente pesquisados ao longo das últimas décadas, apesar de apresentarem limitações de precisão, as quais são relacionadas especialmente: à homogeneidade do sistema, a incertezas dos parâmetros da LT monitorada, acoplamento mútuo com circuitos paralelos, compensação série, variabilidade da resistência do arco elétrico durante a falta, tempo de operação do disjuntor, precisão limitada dos transformadores para instrumentos, entre outros fatores. Essas técnicas apresentam precisão da ordem de 0,5 a 2% da LT monitorada (SCHWEITZER, 2004). Porém, embora de grande utilidade para as concessionárias, os avanços da tecnologia digital viabilizaram o desenvolvimento de técnicas mais precisas, a exemplo dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes, cuja revisão bibliográfica é apresentada a seguir.

### **3.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES**

Os métodos baseados na teoria de ondas viajantes se baseiam na detecção de ondas eletromagnéticas que surgem em decorrência das variações abruptas do ponto de operação de redes

de transmissão durante distúrbios. Uma vez detectadas as ondas de interesse nos terminais monitorados, consideram-se os tempos de propagação de cada uma até os pontos de medição, viabilizando a criação de formulações para estimativa do ponto de falta.

Alguns dos algoritmos pioneiros de localização de faltas baseados em ondas viajantes remontam a década de 1940, quando foram aplicados pela *Bonneville Power Administration* (BPA). Esses métodos apresentam elevada precisão, da ordem de um vão de torre típico, ou seja, cerca de 300 m (SCHWEITZER, 2004). No entanto, essas técnicas necessitam de altas taxas de amostragem para medição apropriada dos transitórios de falta, o que postergou a popularização destas técnicas por muito tempo. Apenas nos últimos anos, após o advento da tecnologia digital, verificou-se um aumento das taxas de amostragem dos registradores digitais de perturbações e relés digitais, viabilizando a aplicação de métodos baseados em ondas viajantes (SILVEIRA *et al.*, 2001).

Na literatura, os métodos que realizam a análise de ondas viajantes são normalmente classificados em subgrupos, relacionados ao número de terminais monitorados, à utilização de ondas refletidas no ponto de falta, e à utilização de pulsos elétricos para a localização do defeito (GALE *et al.*, 1993). Os principais problemas apontados estão relacionados ao processo de discretização dos sinais, sincronização de dados e problemas em distinguir as ondas de interesse de ondas refletidas e/ou refratadas no ponto de falta ou em outros terminais do sistema (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013). Além disso, os métodos baseados em ondas viajantes podem apresentar problemas em casos de faltas muito próximas aos terminais monitorados, bem como em casos de ângulo de incidência próximos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , ou mesmo de faltas com elevada resistência de falta.

Os métodos baseados em ondas viajantes superam desafios que boa parte dos métodos baseados em fasores fundamentais não conseguem, como por exemplo, quando há compensação série na linha, ou faltas de curta duração (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Entre os métodos baseados na teoria de ondas viajantes mais conhecidos está o proposto em McLaren & Rajendra (1985). Esse algoritmo propõe a correlação cruzada entre amostras capturadas em torno dos transitórios da primeira onda viajante incidente com o registro avaliado para fins de detecção da segunda onda refletida do ponto de falta. Com isso, estima-se o tempo de trânsito dos transitórios entre o terminal monitorado e o ponto de falta, tornando possível o cálculo da

distância de falta. No entanto, essa técnica necessita de uma correta determinação da janela de dados para registro das ondas avaliadas, que por sua vez é dependente da localização de falta. Além disso, o método necessita dos parâmetros da linha para determinação da velocidade de propagação, o que, como já mencionado, pode acarretar imprecisões nas estimativas calculadas.

Numa tentativa de contornar as limitações dos métodos de um terminal baseados em ondas viajantes, métodos de dois terminais foram propostos (GALE *et al.*, 1993). Esses métodos eliminam a necessidade de detecção de ondas refletidas no ponto de falta, muito embora ainda sejam dependentes de parâmetros da linha como comprimento e velocidade de propagação. Por isso, o método proposto por Gilany *et al.* (2007) foi desenvolvido para operar de forma independente do conhecimento da velocidade de propagação das ondas viajantes. Entretanto, esse método necessita da detecção de ondas viajantes refletidas no ponto de falta, o que por vezes é reportado como uma tarefa difícil. Da revisão bibliográfica, nota-se ainda que os métodos clássicos de dois terminais necessitam de dados sincronizados, o que pode resultar em estimativas errôneas, caso os dados sejam obtidos de forma assíncrona. Sabe-se ainda que esforços têm sido envidados por pesquisadores no sentido de desenvolver técnicas que possam ser aplicadas em tempo real ou que eliminem a necessidade de sincronização de dados, aliando simplicidade computacional e eficiência na localização. Nesse contexto destacam-se os trabalhos de Lopes (2016) e Lopes *et al.* (2018), nos quais são apresentadas soluções independentes de ajustes e da sincronização de dados. No entanto, o método apresentado por Lopes (2016) só pode ser aplicado em casos de faltas com terra, enquanto que o método apresentado por Lopes *et al.* (2018) depende da detecção de ondas refletidas, requerendo portanto processos adicionais de pré-localização para garantir uma detecção correta das ondas de interesse.

### **3.3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA NA ANÁLISE DE COMPONENTES DE ALTA FREQUÊNCIA**

Os métodos baseados nas componentes de altas frequências extraem as características do distúrbio através de uma análise espectral dos transitórios no período de falta ou logo após a abertura dos disjuntores da LT monitorada. Uma vez que ondas viajantes se propagam entre o ponto de curto e o terminal de medição, criam-se padrões nos transitórios de falta que carregam informações referentes ao local do distúrbio. Em resumo, quão mais próximo for a

falta do terminal de medição, menor é o tempo de propagação das ondas e, portanto, maior a frequência dos sinais. Assim, esses métodos identificam inicialmente a frequência dominante dos transitórios medidos, com posterior utilização de formulações específicas que permitem o cálculo do local do defeito.

A técnica apresentada por Bo *et al.* (1999) usa os transitórios de alta frequência para evitar erros relacionados à detecção de ondas refratadas e/ou refletidas no ponto de falta, o que é apontado como limitação das técnicas baseadas em ondas viajantes. Além disso, este método não requer a sincronização de dados quando da análise de registros em mais de um terminal, visto que todas as análises são realizadas no domínio da frequência. No entanto, o uso de altas taxas de amostragem ainda é requerido para o correto registro das componentes de alta frequência.

Em (HUANG; WANG, 2009), é apresentado um algoritmo baseado na análise do espectro de componentes de altas frequências de um terminal. Esta técnica não requer identificação da primeira onda incidente e funciona para todos os tipos de curto, sem depender dos parâmetros da LT. Em (FAYBISOVICH *et al.*, 2010), são apresentados algoritmos de um e dois terminais que se baseiam na identificação das frequências dominantes dos transitório em ambos os terminais. A abordagem de um terminal requer o conhecimento da velocidade de propagação na linha, o que pode incorrer em erros em situações de incertezas nos parâmetros da LT. Por outro lado, a técnica de dois terminais não requer parâmetros, exceto o comprimento da LT em casos nos quais se deseja obter a estimativa do ponto de falta em quilômetros.

Apesar das técnicas baseadas na análise de componentes de alta frequência contornarem limitações intrínsecas aos métodos baseados na análise de componentes da frequência fundamental, estes métodos são mais apropriados a aplicações *off-line*, pois necessitam do registros de todo o período de falta, além de alta taxa de amostragem para a correta representação das altas frequências, o que em geral requer maior esforço computacional. Ademais, as frequências dominantes podem ser afetadas por reflexões em sistemas adjacentes, bem como podem ser afetadas por variações na frequência dos parâmetros da linha, fatores estes que colocam esses métodos sob uma classificação de técnicas promissoras, porém ainda em fase de aprimoramento.

### 3.4 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM ALGORITMOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Com o advento da tecnologia, têm surgido nos últimos anos técnicas de localização de faltas que fazem uso de algoritmos de inteligência artificial para superarem fontes de erros intrínsecos aos métodos clássicos apresentados nessa revisão bibliográfica. Estas técnicas se baseiam especialmente no reconhecimento de padrões em registros oscilográficos de faltas, os quais são correlacionados com ajustes obtidos da análise de bancos de registros, permitindo correlacionar a distância de falta do caso em questão com outros previamente avaliados.

Entre estas técnicas, destacam-se as que usam redes neurais para localização de falta, como proposto por Hagh *et al.* (2007) e Teklic *et al.* (2013). No entanto, destaca-se que tais técnicas são mais vantajosas quando aplicadas a redes neurais de menor dimensão, pois têm treinamento mais rápido e melhores resultados. Além disso, a aplicação de redes neurais artificiais na localização de faltas em LT ainda é incipiente do ponto de vista prático. De fato, de forma geral, os trabalhos nessa área restringem as análises a alguns parâmetros de simulação, como impedância de falta e ângulo de incidência de falta, o que pode limitar a aplicação em casos reais (OLIVEIRA, 2005).

Nos últimos anos, nota-se o advento de outras técnicas baseadas na inteligência artificial como o método proposto em Wu *et al.* (2016), que se baseia na lógica *Fuzzy* para aumentar a precisão da estimativa do ponto do defeito. Todavia, esse método também necessita de um treinamento para reconhecimento de padrões. Outras técnicas propostas na literatura mesclam soluções, a exemplo do uso da transformada *wavelet* aplicada em processos de inteligência artificial, a exemplo da técnica apresentada em Reddy & Mohanta (2008). Contudo, tais soluções ainda estão em fase de popularização dentre as concessionárias, não sendo ainda utilizadas em larga escala. Por fim, percebe-se que as pesquisas relacionadas a técnicas de inteligência artificial têm crescido, especialmente no âmbito dos sistemas de distribuição de energia elétrica, nos quais as técnicas tradicionais apresentam limitações relevantes em decorrência da topologia ramificada.

### 3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na Tabela 3.1 estão sintetizadas as principais características dos métodos de localização de faltas analisados nessa revisão bibliográfica. Dos métodos baseados na análise de componentes da frequência fundamental, nota-se que apesar da maioria ser dependente dos parâmetros da LT, são algoritmos mais simples, que não precisam de altas taxas de amostragem e que podem ser aplicados em tempo real sem maiores problemas.

Com relação aos métodos que utilizam ondas viajantes, dentre as maiores limitações, pode-se citar a necessidade de altas taxas de amostragem. Todavia, com as novas tecnologias de conversores A/D de altas velocidade e processadores de sinais digitais de alto desempenho, tais técnicas têm sido viabilizadas na prática. Ainda assim, apontam-se limitações no desempenho destes algoritmos, especialmente quando baseados em dados de apenas um terminal, que requerem a detecção de ondas refletidas no ponto de falta. Por outro lado, embora os métodos de dois terminais dependam apenas da detecção das primeiras ondas incidentes, estes métodos requerem em sua grande maioria a sincronização de dados e parâmetros da LT para determinação da velocidade de propagação. De fato, ainda são poucas as soluções independentes de ajustes e da sincronização de dados.

Do exposto, nota-se que técnicas baseadas na análise de componentes de alta frequência e em inteligência artificial são consideradas promissoras, porém, ainda estão em fase de aprimoramento e consolidação. De fato, embora tenham sido reportados bons resultados na literatura, essas técnicas ainda não são empregadas em larga escala por concessionárias, sendo majoritariamente aplicadas em soluções dedicadas, específicas para determinados sistemas nos quais outras soluções clássicas não apresentam bom desempenho.

Por fim, ressalta-se que os métodos baseados na análise de componentes fundamentais apresentam a vantagem de que, em sua maioria, podem ser aplicados em tempo real, requerem pouco esforço computacional para sua implementação, visto que não necessitam de elevadas taxas de amostragem, nem de formulações matemáticas sofisticadas, apresentando, portanto, menor custo agregado. Desse modo, a presente dissertação segue com foco na avaliação desses métodos, realizando um estudo minucioso do impacto de diversas fontes de erro sobre técnicas recorrentemente reportadas na literatura especializada.

**Tabela 3.1.** Resumo da revisão bibliográfica.

Referência	Classificação do método	NTM		Modelo		RP da LT	RDS	Observações
		1	2	PC	PD			
Ziegler (2010)	CF	✓	–	✓	–	✓	–	–
Çapar & Arsoy (2015)	CF	✓	–	✓	–	✓	–	–
Takagi (1982)	CF	✓	–	✓	–	✓	–	–
Wiszniewski (1983)	CF	✓	–	✓	–	–	–	–
Eriksson <i>et al.</i> (1985)	CF	✓	–	✓	–	✓	–	–
Yibin <i>et al.</i> (1997)	CF	✓	–	✓	–	✓	–	TWD
Johns & Salman (1995)	CF	–	✓	–	✓	✓	✓	–
Girgs <i>et al.</i> (1992)	CF	–	✓	✓	–	✓	–	MT
He <i>et al.</i> (2011)	CF	–	✓	–	✓	✓	✓	PI
Idris <i>et al.</i> (2012)	CF	–	✓	✓	–	✓	✓	–
Radojevic <i>et al.</i> (2009)	CF	–	✓	✓	–	–	✓	–
Dawidowski <i>et al.</i> (2013)	CF	–	✓	✓	–	–	–	–
Preston <i>et al.</i> (2011)	CF	–	✓	✓	–	–	✓	–
Tziouvaras <i>et al.</i> (2001)	CF	–	✓	✓	–	✓	–	–
Izykowski <i>et al.</i> (2005)	CF	–	✓	✓	–	✓	–	–
Izykowski <i>et al.</i> (2010)	CF	–	✓	–	✓	✓	–	PI
Saha & Rosolowski (2013)	CF	–	✓	✓	–	–	–	–
D.Mohamed <i>et al.</i> (2012)	CF	–	✓	–	✓	✓	–	PI
Wang <i>et al.</i> (2016)	CF	–	✓	–	✓	✓	–	PI
Yu (2010)	CF	–	✓	–	✓	✓	–	PI
Abe <i>et al.</i> (1994)	CF	–	–	✓	–	✓	✓	MT
Brahma (2005)	CF	–	–	✓	–	✓	✓	MT
Nagasawa <i>et al.</i> (1992)	CF	–	–	✓	–	✓	✓	MT
Manassero <i>et al.</i> (2010)	CF	–	–	–	✓	✓	–	MT
Huang & Wang (2009)	AF	✓	–	–	–	✓	–	AE
Bo <i>et al.</i> (1999)	AF	✓	–	–	–	✓	–	AE
Faybisovich <i>et al.</i> (2010)	AF	✓	✓	–	–	✓	–	AE
McLaren & Rajendra (1985)	OV	✓	–	–	–	✓	–	DT
Gilany <i>et al.</i> (2007)	OV	–	✓	–	–	–	✓	DT
Wu <i>et al.</i> (2016)	AI	–	✓	–	–	–	✓	RP
Hagh <i>et al.</i> (2007)	AI	✓	–	–	–	✓	–	RP
(TEKLIC <i>et al.</i> , 2013)	AI	–	✓	–	–	✓	–	RP

**Legenda:**

AE = Análise espectral de sinais;  
AF = Métodos baseados em componentes de alta frequência;  
AI = Métodos baseados em inteligência artificial;  
CF = Métodos baseados em componentes de frequência fundamental;  
DT = Detecção de Transitórios;  
MT = Método multiterminais;  
NTM = Número de terminais monitorados;  
OV = Métodos baseados na teoria de ondas viajantes;  
PC = Parâmetros concentrados (Modelo linha curta);  
PD = Parâmetros distribuídos (Modelo linha longa);  
PI = Processos iterativos;  
RDS =Requer dados sincronizados;  
RP = Reconhecimento de padrões;  
RP da LT =Requer parâmetros da LT;  
TWD= Transformada Wavelet Discreta;

**Fonte:** autoria própria.

## CAPÍTULO 4

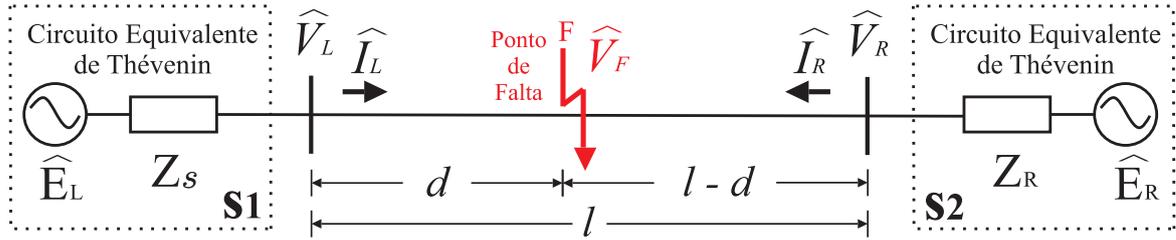
# DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS AVALIADOS E METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Realiza-se neste capítulo, a descrição dos métodos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental avaliados, de um e dois terminais, que utilizem dados sincronizados ou não. O objetivo é executar uma análise da performance dos algoritmos, frente a fontes de erro importantes para o desempenho dos métodos, como a precisão nos parâmetros da linha, carregamento do sistema, SIR, impedância de falta e tipo de falta. Com isso, espera-se realizar uma análise detalhada do desempenho das técnicas e destacar as limitações e potencialidades de cada solução.

### 4.1 NOTAÇÃO ADOTADA

No total, dezesseis métodos foram implementados nessa dissertação, sendo sete baseados em dados de um terminal e nove baseados em dados de dois terminais. Todos os métodos foram avaliados do ponto de vista da localização da falta, SIR (relação entre a impedância série total da linha e a impedância de Thévenin, conectada ao terminal), carregamento, resistências de falta, imprecisões nos parâmetros da LT e tipos de falta, considerando variações dos cenários até então pouco ou não exploradas na literatura.

Para facilitar a compreensão dos algoritmos, todos eles são apresentados sob uma mesma notação, conforme representado na Figura 4.1, o qual consiste no sistema teste analisado neste trabalho. O sistema é formado por uma LT de 500 kV/60 Hz, com comprimento  $l$ , que interliga os terminais L (local) e R (remoto), sendo:  $\hat{V}_F$  é o fasor de tensão no ponto de falta  $F$ ,  $d$  é distância em km entre a falta e o terminal local,  $\hat{V}_L$ ,  $\hat{V}_R$ ,  $\hat{I}_L$  e  $\hat{I}_R$  representam os fasores de tensão e corrente nos terminais L e R. Os sistemas conectados aos terminais L e R foram representados por circuitos equivalentes de Thévenin S1 e S2, descritos por fontes e impedâncias equivalentes

**Figura 4.1.** Diagrama unifilar do sistema teste avaliado.

**Fonte:** (LOPES *et al.*, 2015) com adaptações.

nos terminais local e remoto,  $\hat{E}_L$ ,  $\hat{E}_R$ ,  $\hat{Z}_S$  e  $\hat{Z}_R$ , respectivamente. Ainda, cabe ressaltar que a LT em estudo foi modelada a parâmetros distribuídos e constantes na frequência, assumindo uma perfeita transposição dos condutores.

Na próxima seção, com o intuito de simplificar o entendimento das análises apresentadas no próximo capítulo, as formulações dos algoritmos analisados serão desenvolvidas e explicadas, evidenciando particularidades importantes de cada técnica. Em algumas formulações, será considerado o operador de sincronismo como  $e^{j\theta}$ , o qual é aplicado às grandezas elétricas dos terminais com erro de sincronização, sendo  $\theta$  o ângulo de sincronismo considerado.

## 4.2 MÉTODOS BASEADOS EM DADOS DE UM TERMINAL

Existe uma grande variedade de métodos de localização de faltas de um terminal. Nessa seção, serão apresentados métodos para linhas de circuito simples perfeitamente transpostas. Esses algoritmos possuem implementação econômica quando comparados aos métodos de dois terminais (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013), visto que não dependem da comunicação entre os terminais da LT. Entretanto, estes métodos precisam de uma etapa preliminar para a determinação do *loop* de falta, a partir do qual realiza-se a seleção dos sinais de entrada dos algoritmos. Conforme mencionado em capítulos anteriores, assume-se neste trabalho que o processo de detecção e classificação da falta é realizado de forma satisfatória, dando-se maior importância às formulações de fato, cuja análise é o foco principal desse trabalho. Sendo assim, para métodos de um terminal, assume-se que os sinais de entrada para cada tipo de falta são os mesmos sintetizados na Tabela 2.2.

### 4.2.1 Método IM (ZIEGLER, 2010)

O método reportado por Ziegler (2010), também conhecido como método da impedância, é amplamente discutido na literatura, uma vez que envolve conceitos relacionados à proteção de distância. Esse algoritmo consiste na medição indireta da distância da falta, por meio do cálculo da impedância de sequência positiva do trecho da LT, entre o relé e o local do distúrbio, de forma que:

$$dZ_{L1} = \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} + \frac{Z_F(\hat{I}_L + \hat{I}_F)}{\hat{I}_L}, \quad (4.1)$$

em que  $\hat{I}_F$  é a corrente que flui pelo ramo de falta.

A segunda parcela de (4.1) é nula para curtos francos, pois  $Z_F = 0$ . Assim, desprezando-se  $Z_F$ , obtém-se:

$$dZ_{L1} = Re \left[ \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} \right]. \quad (4.2)$$

Portando a localização estimada em p.u. é dada por:

$$\bar{d} = Re \left[ \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1} \hat{I}_L} \right], \quad (4.3)$$

em que  $\hat{V}_L$  e  $\hat{I}_L$  são grandezas de *loop*, conforme Tabela 2.2, as quais são selecionadas a partir do processo de classificação da falta.

A principal vantagem dessa técnica é a simplicidade. Entretanto, o método é influenciado de forma significativa pela resistência de falta, visto que os *loops* de falta não contemplam um aumento de  $R_F$ . Quando o curto não é franco, a estimativa do defeito é obtida de forma errônea, cujo nível de erro aumenta com o aumento da não-homogeneidade da rede. Ademais, o método também é afetado pelo efeito capacitivo da LT, uma vez que considera o modelo de linha curta.

### 4.2.2 Método RS (ÇAPAR; ARSOY, 2015)

A técnica apresentada por Çapar & Arsoy (2015), analisa o curto circuito visto pelo terminal local, de forma similar ao método IM, obtendo a expressão (4.1). Numa tentativa de melhorar o método anterior, toma-se apenas a parte imaginária de (4.1), de forma que:

$$Im \{dZ_{L1}\} = Im \left\{ \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} \right\} + Im \left\{ \frac{Z_F(\hat{I}_L + \hat{I}_F)}{\hat{I}_L} \right\}. \quad (4.4)$$

Considerando a impedância da linha  $Z_{L1}$  como predominantemente indutiva e assumindo a impedância de falta com natureza predominantemente resistiva, tem-se que:  $Im\{Z_F\} = 0$ . Além disso, para a formulação proposta em Çapar & Arsoy (2015), é necessário considerar um sistema homogêneo. Com estas considerações, assume-se que as contribuições de curto-circuito em ambos os terminais da LT possuem o mesmo ângulo, de modo que o termo de erro passa a ser um número real, sendo cancelado ao se considerar apenas a parte imaginária da expressão. Portanto, a localização estimada em p.u. é dada por:

$$\bar{d} = \frac{Im\left\{\frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L}\right\}}{Im\{Z_{L1}\}}. \quad (4.5)$$

### 4.2.3 Método TK (TAKAGI, 1982)

O método apresentado por Takagi (1982) faz uso de dados de pré-falta. Isso permite que sejam obtidas relações matemáticas que estimam a corrente de falta, viabilizando uma minimização dos efeitos da resistência de falta e do fluxo de potência na linha. Pode-se eliminar o efeito da corrente de carga  $\hat{I}_{pre}$  (corrente de pré-falta no terminal L da LT), através da determinação da variação da corrente  $\Delta\hat{I}_L$ , quando há ocorrência de uma falta, de forma que:

$$\Delta\hat{I}_L = \hat{I}_L - \hat{I}_{pre}, \quad (4.6)$$

na qual  $\hat{I}_{pre}$  é a corrente de pré-falta e  $\hat{I}_L$  é a corrente no terminal local durante a falta, selecionadas a partir da classificação da falta, conforme Tabela 2.2. Assim, a tensão no terminal local  $\hat{V}_L$  é dada por:

$$\hat{V}_L = dZ_{L1}\hat{I}_L + \frac{Z_F}{d_S}\Delta\hat{I}_L, \quad (4.7)$$

em que  $d_S$  é o fator de distribuição de correntes, dado por:

$$d_S = |d_S| e^{j\beta} = \frac{(1-d)Z_L + Z_R}{Z_S + Z_L + Z_R}, \quad (4.8)$$

sendo que  $Z_S$  e  $Z_R$  são impedâncias conectadas as fontes e  $Z_L$  a impedância da LT. Takagi (1982) propõem multiplicar ambos os lados de (4.7) por  $(e^{j\beta}\Delta\hat{I}_L^*)$ , obtendo-se então:

$$Im\left(\hat{V}_L\Delta\hat{I}_L^*e^{j\beta}\right) = Im\left(dZ_{L1}\hat{I}_L\Delta\hat{I}_L^*e^{j\beta}\right) + Im\left(Z_F\frac{|\Delta\hat{I}_L|^2}{d_S}e^{j\beta}\right), \quad (4.9)$$

em que (\*) é um operador que retorna o conjugado de números complexos.

Considerando  $Z_F$  como puramente resistiva, ou seja,  $Z_F \approx R_F$ , a segunda parcela da equação é nula, de modo que reorganizando os termos de (4.9), obtém-se:

$$d = \frac{Im \{ \hat{V}_L \Delta \hat{I}_L^* e^{j\beta} \}}{Im \{ Z_{L1} \hat{I}_L \Delta \hat{I}_L^* e^{j\beta} \}}. \quad (4.10)$$

O método clássico considera um sistema totalmente homogêneo e, portanto, o fator de distribuição de correntes é puramente real, ou seja, assume-se  $\beta = 0$ . Dessa forma, a localização estimada em p.u. é dada por:

$$\bar{d} = \frac{Im \{ \hat{V}_L \Delta \hat{I}_L^* \}}{Im \{ Z_{L1} \hat{I}_L \Delta \hat{I}_L^* \}}. \quad (4.11)$$

Ressalta-se que o método se baseia no modelo de linha curta, desprezando assim o efeito capacitivo da LT monitorada. Além disso, assume a homogeneidade do sistema, condição esta que não sendo satisfeita, pode resultar em erros adicionais na estimativa da localização.

Quando as impedâncias conectadas as fontes ( $Z_S$  e  $Z_R$ ) são conhecidas, o fator de distribuição de correntes pode ser calculado e a localização estimada pode apresentar maior precisão, como apresentado no método a seguir. Apesar disso, o método proposto por Takagi (1982) tem sido largamente utilizado por concessionárias de energia devido à sua simplicidade, e baixo custo por não requerer canais de comunicação entre os terminais da LT monitorada (LOPES, 2014).

#### 4.2.4 Método TK zero e TK modificado (TAKAGI, 1982)

A técnica apresentada em Takagi (1982), requer o conhecimento das grandezas de pré-falta, o que é reportado como uma desvantagem, pois nem sempre podem ser calculadas com precisão de registros oscilográficos, a dependem do período de pré-falta disponível. Por isso, foram criadas outras versões do algoritmo TK, nos quais as grandezas incrementais são substituídas por outras.

Substituindo as grandezas incrementais pela corrente de sequência zero, por exemplo, a localização estimada em p.u. é calculada por:

$$\bar{d} = \frac{Im \{ \hat{V}_L 3 \hat{I}_{L0}^* \}}{Im \{ Z_{L1} \hat{I}_L 3 \hat{I}_{L0}^* \}}. \quad (4.12)$$

Esta estimativa será analisada no próximo capítulo como método TK zero, porém assim como a forma clássica, está susceptível à consideração que o sistema é homogêneo. Para minimizar problemas relacionados à não homogeneidade do sistema, propõe-se em uma outra versão considerar o ângulo  $\beta$  do fator de distribuição, dado por (4.8), utilizando grandezas de sequência zero, obtido por:

$$|d_S| < \beta = \frac{(1 - \bar{d})Z_{L0} + Z_R^0}{Z_S^0 + Z_{L0} + Z_R^0}, \quad (4.13)$$

na qual  $d$  é a localização estimada em p.u., dada por 4.12;  $Z_S^0$  e  $Z_R^0$  são a impedância de sequência zero da fonte local e remota, respectivamente, que assume-se serem iguais; e  $Z_{L0}$  a impedância de sequência zero da linha. Dessa forma, (4.12) se torna:

$$\bar{d} = \frac{Im \{ \hat{V}_L 3 \hat{I}_{L0}^* e^{-j\beta} \}}{Im \{ Z_{L1} \hat{I}_L 3 \hat{I}_{L0}^* e^{-j\beta} \}}, \quad (4.14)$$

sendo as tensões e correntes  $\hat{I}_L$  e  $\hat{V}_L$  calculadas conforme Tabela 2.2.

A desvantagem dessa abordagem é necessitar de uma adequada modelagem das impedâncias das fontes. Embora essas possam ser estimadas durante o período de falta, podem existir incertezas que levariam a erros adicionais nas estimativas calculadas.

#### 4.2.5 Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985)

O algoritmo apresentado em Eriksson *et al.* (1985) consiste em uma técnica de localização baseada em dados de um terminal. O algoritmo utiliza informação das impedâncias das fontes, bem como do fator de distribuição de correntes  $d_S$  de sequência positiva, conferindo mais confiabilidade do que a sequência zero do ponto de vista de incertezas nos parâmetros. Para minimizar o efeito da impedância de falta, o método parte do pressuposto que os argumentos do fator de distribuição de corrente são diferentes para cada lado do curto. Assim, o método utiliza as grandezas das fontes equivalentes para determinar a correta descrição da LT monitorada. Além disso, no algoritmo, utilizam-se grandezas incrementais para minimizar erros relativos ao fluxo de potência e para reduzir desvios devido à não homogeneidade do sistema monitorado. De acordo com Eriksson *et al.* (1985), a localização estimada em p.u. é calculada por:

$$\bar{d} = \frac{\left(x - \frac{e \cdot y}{f}\right) \pm \sqrt{\left(x - \frac{e \cdot y}{f}\right)^2 - 4 \left(q - \frac{e \cdot w}{f}\right)}}{2}, \quad (4.15)$$

sendo  $x$ ,  $y$ ,  $q$ ,  $w$ ,  $e$  e  $f$  são obtidos através das partes reais e imaginárias das seguintes relações:

$$x + jy = \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1}\hat{I}_L} + \left(1 + \frac{Z_R^1}{Z_{L1}}\right), \quad (4.16)$$

$$q + jw = \left(1 + \frac{Z_{R1}}{Z_{L1}}\right) \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1}\hat{I}_L}, \quad (4.17)$$

$$e + jf = \frac{\Delta\hat{I}_L}{Z_{L1}\hat{I}_L} \left(1 + \frac{Z_S^1 + Z_R^1}{Z_{L1}}\right), \quad (4.18)$$

em que  $Z_S^1$  e  $Z_R^1$  são as impedâncias de sequência positiva conectadas as fontes.

Eriksson *et al.* (1985), apresentam como uma vantagem do método o fato de considerar o efeitos de ambos os terminais na LT monitorada, contemplando o caso de *infeed* do terminal remoto. Entretanto, tornaria-se necessário o monitoramento de grandezas no terminal remoto, fazendo do algoritmo uma técnica de dois terminais. Neste trabalho, como este método está sendo analisado como método de um terminal, e para garantir comparações justas com os demais, usa-se então a aproximação:

$$Z_S^1 = Z_R^1 = \frac{\Delta\hat{V}_L}{\Delta\hat{I}_L}, \quad (4.19)$$

na qual as tensões e correntes  $\hat{I}_L$  e  $\hat{V}_L$  são calculadas conforme Tabela 2.2,  $\Delta\hat{V}_L$  e  $\Delta\hat{I}_L$  são a tensão e corrente incrementais, calculadas conforme (4.6).

Por fim, a estimativa correta para (4.15) é tomada como sendo a que satisfaz:  $0 < \bar{d} < 1$ . O método também permite estimar a resistência de falta por:

$$R_F = \frac{w - dy}{f}, \quad (4.20)$$

#### 4.2.6 Método WS (WISZNIEWSKI, 1983)

O algoritmo apresentado em Wiszniewski (1983) parte dos mesmos fundamentos do apresentado por Takagi (1982), no qual se utiliza um fator de distribuição das correntes de curto-circuito. Na técnica, são também consideradas impedâncias de falta puramente resistivas, assumindo que o ângulo do fator de distribuição de corrente é nulo ( $\beta = 0$ ), ou seja, que o sistema é homogêneo, o que pode consistir em uma fonte de erros, conforme mencionado anteriormente.

Este algoritmo requer o conhecimento de grandezas de pré falta, porém não depende do conhecimento das impedâncias dos circuitos equivalentes em torno da linha. A distância de falta em p.u., é dada então por:

$$\bar{d} = \frac{X_M}{X_{LI}} - \frac{\frac{Re(Z_M)}{X_{LI}} \operatorname{tg} \phi_{L1} - \frac{Im(Z_M)}{X_{LI}}}{\left(\frac{a}{b}\right) \operatorname{tg} \phi_{L1} - 1}, \quad (4.21)$$

em que  $X_{LI}$  é a reatância total da linha,  $\phi_{L1}$  é o ângulo da linha e  $Z_M$  é a impedância medida, dada por:

$$Z_M = Z_{L1} = \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L}, \quad (4.22)$$

sendo  $\hat{V}_L$  e  $\hat{I}_L$  calculadas conforme Tabela 2.2.

É importante mencionar que esse algoritmo apresenta os mesmos problemas da técnica apresentada por (TAKAGI, 1982), uma vez que ambos fazem as mesmas suposições em relação a resistência de falta e ao ângulo do fator de distribuição da corrente. Porém, por não utilizar grandezas de pré-falta, o mesmo se torna um pouco mais simples do ponto de vista computacional.

### 4.3 MÉTODOS BASEADOS EM DADOS DE DOIS TERMINAIS

As técnicas baseada em dados de dois terminais utilizam registros oscilográficos obtidos das duas extremidades LT monitorada. Desse modo, eliminam-se fontes de erros como o carregamento e resistência de falta, não requerendo, em sua maioria, o uso de grandezas pré-falta.

Nesta sessão, serão apresentados algoritmos que utilizam medições sincronizadas, bem como técnicas que através de manipulações matemáticas estimam o ângulo de sincronismo ou o eliminam do seu equacionamento, viabilizando o emprego registros não sincronizados.

#### 4.3.1 Método GG (GIRGS *et al.*, 1992)

Em Girgs *et al.* (1992), apresentam-se métodos de localização de faltas para linhas com dois ou três terminais. Porém, nesse trabalho, aborda-se apenas o algoritmo para sistemas com dois terminais, usando dados sincronizados. O algoritmo apresentado em Girgs *et al.* (1992) considera apenas a impedância série da LT e calcula o fasor de tensão no ponto de falta  $\hat{V}_F$ ,

considerando as medições de tensão e corrente de ambos os terminais da LT, de forma que:

$$\hat{V}_F^{abc} = \hat{V}_L^{abc} - d\hat{I}_L^{abc} , \quad (4.23)$$

$$\hat{V}_F^{abc} = \hat{V}_R^{abc} - (l - d)Z_{abc}\hat{I}_R^{abc} , \quad (4.24)$$

na qual o índice ‘abc’ indica que serão utilizadas as grandezas de fase (tensão e corrente) nos terminais locais e remotos da LT,  $Z_{abc}$  é a matriz da impedância série no domínio de fases da LT por unidade de comprimento.

Igualando (4.23) e (4.24), obtém-se:

$$\hat{V}_L^{abc} - \hat{V}_R^{abc} + lZ_{abc}\hat{I}_R^{abc} = dZ_{abc}(\hat{I}_L^{abc} + \hat{I}_R^{abc}). \quad (4.25)$$

Reescrevendo a expressão, obtém-se:

$$Y = M \cdot d \text{ ou } \begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot d , \quad (4.26)$$

onde:

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji}(\hat{I}_L^i + \hat{I}_R^i) , \quad (4.27)$$

$$Y_j = \hat{V}_L^j - \hat{V}_R^j + l \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji}\hat{I}_R^i) , \quad (4.28)$$

para  $j = a, b, c$ .

Assim, ao resolver (4.26), pode-se obter a localização do defeito, a qual é dada por:

$$\bar{d} = (M^+M)^{-1}M^+Y , \quad (4.29)$$

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

Neste trabalho, a matriz impedância série  $Z_{abc}$  é calculada a partir dos parâmetros de sequência positiva e negativa da LT, de forma que:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix} , \quad (4.30)$$

sendo  $Z_P$  a impedância própria da LT e  $Z_M$  a impedância mútua dada por (DOMMEL, 1969):

$$Z_M = \frac{(Z_{L0} - Z_{L1})}{3},$$

$$Z_P = Z_M + Z_{L1},$$

em que  $Z_{L0}$  e  $Z_{L1}$  são as impedâncias de sequência zero e positiva, respectivamente.

### 4.3.2 Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990)

O algoritmo proposto em Johns & Jamali (1990) considera o modelo  $\pi$ -exato, contemplando nos cálculos o efeito capacitivo da LT. Por isso, esse método é considerado um dos mais precisos na literatura, desde de que os parâmetros da LT sejam conhecidos sem erro.

O algoritmo foi originalmente proposto usando componentes modais aéreas de tensão e corrente, mas também pode ser aplicado utilizando componentes simétricas. Em (JOHNS; JAMALI, 1990), é proposto que a partir da teoria de quadripolos é possível estimar o fasor tensão em qualquer ponto da LT a uma distância  $d$  do terminal local:

$$\hat{V}(d) = \hat{V}_L \cosh(\gamma d) - \hat{I}_L Z_c \sinh(\gamma d), \quad (4.31)$$

onde  $\gamma$  é a constante de propagação da linha e  $Z_c$  é a impedância característica da linha.

Analogamente,  $\hat{V}(d)$  pode ser calculada visto do terminal remoto a uma distância  $l - d$ , de forma que:

$$\hat{V}(l - d) = \hat{V}_R \cosh(\gamma(l - d)) - \hat{I}_R Z_c \sinh(\gamma(l - d)). \quad (4.32)$$

Igualando (4.31) e(4.32), e isolando  $d$ , tem-se:

$$\bar{d} = \frac{1}{\gamma l} \tanh^{-1} \left\{ \frac{\hat{V}_S - \cosh(\gamma l) \hat{V}_R + \sinh(\gamma l) \hat{I}_R Z_c}{\hat{I}_S Z_c - \sinh(\gamma l) \hat{V}_R + \cosh(\gamma l) \hat{I}_R Z_c} \right\}. \quad (4.33)$$

Apesar de robusto, o método depende do sincronismo de dados, necessitando de uma referência de tempo comum, que pode ser obtida através do uso do GPS ou canais de comunicação. Posteriormente será apresentada uma versão desse algoritmo, na qual se contempla o uso de um ângulo de sincronização para viabilizar o uso de registros oscilográficos não-sincronizados.

### 4.3.3 Método PR (PRESTON *et al.*, 2011)

No método apresentado em Preston *et al.* (2011), considera-se o modelo de linha curta. No entanto, a técnica não requer os parâmetros de linha na sua formulação matemática, e nem o conhecimento dos equivalentes de Thévenin nos terminais da LT, garantindo uma grande robustez do método na análise de casos reais, onde existem incertezas nos parâmetros das LT (LOPES *et al.*, 2013b).

Em Preston *et al.* (2011), a distância de falta é calculada a partir da análise dos fasores das tensões e correntes de sequência positiva e negativa em ambos os terminais da LT, para curtos assimétricos, de forma que:

$$\hat{V}_{L1} - Z_{L1}d\hat{I}_{L1} = \hat{V}_{R1} - Z_{L1}(l-d)\hat{I}_{R1}, \quad (4.34)$$

$$\hat{V}_{L2} - Z_{L1}d\hat{I}_{L2} = \hat{V}_{R2} - Z_{L1}(l-d)\hat{I}_{R2}, \quad (4.35)$$

onde ‘1’ e ‘2’ são índices relacionados às componentes de sequência positiva e negativa respectivamente. Para eliminar os parâmetros da LT, em Preston *et al.* (2011), é proposto o cálculo dos termos  $Z_{L1}(l-d)$  e  $Z_{L1}d$ , de forma que:

$$Z_{L1}d = \frac{(\hat{V}_{L1} - \hat{V}_{R1})\hat{I}_{R2} - (\hat{V}_{L2} - \hat{V}_{R2})\hat{I}_{R1}}{\hat{I}_{L1}\hat{I}_{R2} - \hat{I}_{L2}\hat{I}_{L1}}, \quad (4.36)$$

$$Z_{L1}(l-d) = \frac{(\hat{V}_{L1} - \hat{V}_{R1})\hat{I}_{L2} - (\hat{V}_{L2} - \hat{V}_{R2})\hat{I}_{L1}}{\hat{I}_{L1}\hat{I}_{R2} - \hat{I}_{L2}\hat{I}_{R1}}, \quad (4.37)$$

de modo que a localização pode ser estimada em p.u. por:

$$\bar{d} = \frac{(\hat{V}_{L1} - \hat{V}_{R1})\hat{I}_{R2} - (\hat{V}_{L2} - \hat{V}_{R2})\hat{I}_{R1}}{(\hat{V}_{L1} - \hat{V}_{R1})(\hat{I}_{L1} + \hat{I}_{R2}) - (\hat{V}_{L2} - \hat{V}_{R2})(\hat{I}_{L1} + \hat{I}_{R1})}. \quad (4.38)$$

Destaca-se que uma formulação alternativa é proposta para curtos simétricos, onde os parâmetros de sequência negativa não existem. No entanto, essa solução alternativa não foi abordada nos estudos desse trabalho. Ressalta-se também que apesar do método ser robusto a imprecisões dos parâmetros da LT, uma vez que eles são eliminados na formulação do método, o algoritmo proposto por Preston *et al.* (2011) é baseado no modelo de linha curta, desprezando assim o efeito capacitivo da LT monitorada.

#### 4.3.4 Método HE (HE *et al.*, 2011)

O método proposto em He *et al.* (2011) é baseado no modelo de linha a parâmetros distribuídos, considerando portanto o efeito capacitivo da LT monitorada. Os autores propõem o uso do método iterativo de Newton para melhorar a precisão da estimativa, resultando em estimativas precisas do ponto de falha. O valor inicial da localização, assim como proposto em Johns & Jamali (1990), é dado por (4.33).

Estimando o fasor de tensão no ponto de falta e considerando as medições de ambos os terminais da linha, obtém-se a seguinte função objetivo:

$$F_{dis}(x) = \hat{V}_F^L - \hat{V}_F^R = \frac{\hat{V}_{L1} - \hat{I}_{L1}Z_c}{2}e^{\gamma(l-x)} + \frac{\hat{V}_{L1} + \hat{I}_{L1}Z_c}{2}e^{-\gamma(l-x)} - \left( \frac{\hat{V}_{R1} - \hat{I}_{R1}Z_c}{2}e^{\gamma x} + \frac{\hat{V}_{R1} + \hat{I}_{R1}Z_c}{2}e^{-\gamma x} \right). \quad (4.39)$$

Para a aplicação da método iterativo de Newton é necessário calcular a derivada de  $F_{dis}(x)$  em relação a  $x$ , tem-se:

$$\frac{\partial F_{dis}(x_k)}{\partial x} = -\gamma \frac{\hat{V}_{L1} - \hat{I}_{L1}Z_c}{2}e^{\gamma(l-x)} + \gamma \frac{\hat{V}_{L1} + \hat{I}_{L1}Z_c}{2}e^{-\gamma(l-x)} - \left( \gamma \frac{\hat{V}_{R1} - \hat{I}_{R1}Z_c}{2}e^{\gamma x} - \gamma \frac{\hat{V}_{R1} + \hat{I}_{R1}Z_c}{2}e^{-\gamma x} \right). \quad (4.40)$$

A primeira estimativa da localização do defeito,  $\bar{d}$ , obtida através de (4.33), é então usada como  $x$ . Assim  $F_{dis}(x)$  e  $\frac{\partial F_{dis}(x_k)}{\partial x}$  podem ser calculados através de (4.39) e (4.40), respectivamente. Para o processo iterativo usa-se:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{F_{dis}(x)}{\frac{\partial F_{dis}(x_k)}{\partial x}}, \quad (4.41)$$

em que  $x_{k+1}$  é a estimativa de falta na  $k$ -ésima iteração.

Quando a diferença entre  $x_{k+1}$  e  $x_k$  é menor que uma tolerância especificada, tem-se  $\bar{d} = x_{k+1}$ , e portanto a distância em p.u. do ponto de falta. Neste trabalho, a tolerância e número máximo de interações aplicados foram  $1e^{-6}$  e 5, respectivamente. Para diminuir a dependência da precisão dos parâmetros de LT, devido às características dinâmicas de um sistema de potência, os autores propõem um método para estimar a constante de propagação da linha,  $\gamma$ , e a impedância característica,  $Z_c$ , em função do tempo. No entanto, nesse trabalho, foram consideradas situações nas quais o usuário do método informa os parâmetros, simulando o ajuste de um sistema localizador de faltas.

### 4.3.5 Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005)

No algoritmo proposto em Izykowski *et al.* (2005), considera-se apenas a impedância série da LT  $Z_{L1}$ , desconsiderando assim o efeito capacitivo em sua formulação. O fasor de tensão no ponto de falta  $\hat{V}_F$  é calculado considerando um divisor de corrente formado pelas parcelas à direita e esquerda do ponto de falta, assumindo o erro de sincronismo nas medições do terminal local. Assim, obtém-se que:

$$\hat{V}_F^L = \hat{V}_L(e^{j\theta}) - dZ_{L1}\hat{I}_L(e^{j\theta}) , \quad (4.42)$$

$$\hat{V}_F^R = \hat{V}_R - Z_{L1}\hat{I}_R + dZ_{L1}\hat{I}_R . \quad (4.43)$$

Como (4.42) e (4.43) são a mesma tensão medidas de terminais diferente, temos:  $\hat{V}_F^L = \hat{V}_F^R$ , de modo que reorganizando os termos, obtém-se a distância de falta estimada,  $\bar{d}$ , em p.u.:

$$\bar{d} = \left| \frac{\hat{V}_L(e^{j\theta}) - (\hat{V}_R - Z_{L1}\hat{I}_R)}{Z_{L1}(\hat{I}_L(e^{j\theta}) + \hat{I}_R)} \right| . \quad (4.44)$$

Note que, para estimar a localização de falta, segundo Izykowski *et al.* (2005), é necessário o cálculo do ângulo de sincronismo  $\theta$ , que é obtido, segundo os autores, por:

$$A_1 \cos \theta + A_2 \sen \theta = A_3 , \quad (4.45)$$

em que:

$$A_1 = Im \left\{ Z_{L1}^* \left[ (\hat{V}_R - Z_{L1}\hat{I}_R)\hat{I}_L^* - \hat{V}_L\hat{I}_R^* \right] \right\} ,$$

$$A_2 = Re \left\{ -Z_{L1}^* \left[ (\hat{V}_R - Z_{L1}\hat{I}_R)\hat{I}_L^* + \hat{V}_L\hat{I}_R^* \right] \right\} ,$$

$$A_3 = Im \left\{ -Z_{L1}^* \left[ (\hat{V}_R - Z_{L1}\hat{I}_R)\hat{I}_R^* - \hat{V}_L\hat{I}_L^* \right] \right\} .$$

Dessa forma, o ângulo de sincronismo  $\theta$ , é calculado usando:

$$\theta = \sen^{-1} \left( \frac{A_3}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right) - \sen^{-1} \left( \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \right) . \quad (4.46)$$

Com isso, aplicando o ângulo de sincronismo estimado por (4.46) em (4.44), podemos estimar a distância de falta em p.u. sem maiores problemas em situações nas quais os registros oscilográficos foram tomados de dispositivos não-sincronizados.

### 4.3.6 Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010)

O algoritmo apresentado em Izykowski *et al.* (2010) pode ser aplicado em casos de faltas assimétricas, usando grandezas de sequência positiva e negativa, e para faltas trifásicas equilibradas, usando a sequência positiva e suas respectivas grandezas incrementais. Em Izykowski *et al.* (2010), considera-se o modelo  $\pi$ -exato, contemplando assim o efeito capacitivo da linha monitorada. Trata-se na verdade de uma versão do algoritmo JJ, na qual se considera a possibilidade de dados não-sincronizados.

Considerando primeiramente o circuito de sequência positiva e tomando o terminal L como referência, a tensão no ponto de falta é dado por:

$$\hat{V}_{F1}^L = \hat{V}_{L1}(e^{j\theta}) \cosh(\gamma ld) - Z_c \hat{I}_{L1}(e^{j\theta}) \sinh(\gamma ld) . \quad (4.47)$$

Analogamente, a tensão no ponto de falta de sequência positiva vista pelo terminal R, pode ser calculada usando:

$$\hat{V}_{F1}^R = \hat{V}_{R1} \cosh[\gamma l(1-d)] - Z_c \hat{I}_{R1} \sinh[\gamma l(1-d)] . \quad (4.48)$$

Sabendo que  $\hat{V}_{F1}^R = \hat{V}_{F1}^L$ , obtém-se:

$$\left[ G_1(e^{j\theta}) + H_1 \right] \cosh(\gamma ld) + \left[ S_1(e^{j\theta}) + T_1 \right] \sinh(\gamma ld) = 0 , \quad (4.49)$$

onde:

$$G_1 = \hat{V}_{L1} ,$$

$$S_1 = -Z_c \hat{I}_{L1} ,$$

$$H_1 = Z_c \sinh(\gamma l) \hat{I}_{R1} - \cosh(\gamma l) \hat{V}_{R1} ,$$

$$T_1 = \sinh(\gamma l) \hat{V}_{R1} - Z_c \cosh(\gamma l) \hat{I}_{R1} .$$

Da mesma forma, o procedimento pode ser feito para a sequência negativa, ou grandezas incrementais, substituindo o subíndice 1 por 2 ou  $\Delta$ , representando grandezas de sequência negativa ou incrementais, respectivamente.

Para o caso de uma falta assimétrica, calcula-se a tensão no ponto de falta  $F$  de ambos os terminais do sistema  $\hat{V}_{F2}^L$  e  $\hat{V}_{F2}^R$ . Em seguida, combinam-se as equações de sequência positiva e

negativa, de forma que:

$$\left[ G_1(e^{j\theta}) + H_1 \right] \left[ S_2(e^{j\theta}) + T_2 \right] - \left[ S_1(e^{j\theta}) + T_1 \right] \left[ G_2(e^{j\theta}) + H_2 \right] = 0 . \quad (4.50)$$

Reorganizando os termos de (4.50), obtém-se uma equação quadrática, na qual a solução é o operador de sincronismo  $e^{j\theta}$ :

$$A(e^{j\theta})^2 + B(e^{j\theta}) + C = 0 , \quad (4.51)$$

em que:

$$A = G_1 S_2 - G_2 S_1 ,$$

$$B = G_1 T_2 + H_1 S_2 - G_2 T_1 - H_2 S_1 ,$$

$$C = H_1 T_2 - H_2 S_1 .$$

O ângulo correto é o que satisfaz:  $1 - \varsigma < |e^{j\theta}| < 1 + \varsigma$ , onde, conforme sugerido por Izykowski *et al.* (2010),  $\varsigma = 0, 1$ . Portanto, a distância de falta é então dada por:

$$\bar{d} = \frac{1}{\gamma l} \tanh \left[ \frac{\hat{V}_{R1} \cosh(\gamma l) - Z_c \hat{I}_{R1} \sinh(\gamma l) - V_{L1}(e^{j\theta})}{\hat{V}_{R1} \sinh(\gamma l) - Z_c \hat{I}_{R1} \cosh(\gamma l) - Z_c I_{L1}(e^{j\theta})} \right] , \quad (4.52)$$

sendo  $\gamma$  a constante de propagação da linha e  $Z_c$  a impedância característica da linha.

O método proposto por Izykowski *et al.* (2010), por ser construído com base no modelo de linha a parâmetros distribuídos, possui robustez equivalente ao método apresentado em Johns & Salman (1995), com a vantagem de não necessitar de sincronismo de dados, conforme mencionado anteriormente. Entretanto, o algoritmo necessita de uma etapa de classificação de faltas para a correta escolha dos sinais de entrada do algoritmo, os quais são diferentes para situações de curtos simétricos e assimétricos.

#### 4.3.7 Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001)

No algoritmo apresentado em Tziouvaras *et al.* (2001), propõe-se localizar faltas assimétricas usando apenas grandezas de sequência negativa de ambos os terminais da linha. O fasor de tensão no ponto de falta  $\hat{V}_F$  é calculado considerando o divisor de corrente formado pelas porções à direita e esquerda do ponto de falta. Para tanto, considera-se apenas as impedâncias

série da linha e dos equivalentes de Thévenin a montante e jusante dos terminais L e R, de tal forma que:

$$\hat{I}_{R2} = \hat{I}_{L2} \frac{Z_S^2 + dZ_{L2}}{Z_R^2 + (1-d)Z_{L2}}, \quad (4.53)$$

em que  $Z_S^2$  e  $Z_R^2$  são as impedâncias de sequência negativa dos equivalentes de Thévenin conectadas aos terminais L e R, respectivamente;  $Z_{L2}$  é a impedância série de sequência negativa da linha.

Para eliminar problemas relacionados à sincronização dos dados, o método usa apenas a magnitude das relações matemáticas obtidas, de forma que (4.53) é reescrita como:

$$|\hat{I}_{R2}| = \frac{|(a + jb) + d(c + jm)|}{|(e + jf) - d(g + jh)|}, \quad (4.54)$$

onde:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{L2} Z_S^2 &= a + jb, \\ \hat{I}_{L2} Z_{L2} &= c + jm, \\ Z_R^2 + Z_{L2} &= e + jf, \\ Z_{L2} &= g + jh. \end{aligned}$$

Com algumas manipulações em (4.54), tem-se:

$$a_2 d^2 + a_1 d + a_0 = 0, \quad (4.55)$$

em que:

$$\begin{aligned} a_2 &= |I_{R2}|^2 (g^2 + h^2) - (c^2 + m^2), \\ a_1 &= -2 |I_{R2}|^2 (eg + fh) - 2(ac + bm), \\ a_0 &= |I_{R2}|^2 (e^2 + f^2) - (a^2 + b^2). \end{aligned}$$

Resolvendo (4.55), calcula-se a distância de falta em p.u.. A distância estimada correta  $\bar{d}$  é a que satisfaz  $0 < d < 1$  p.u.. Nesse trabalho, para a avaliação do SIR, foi considerado que as impedâncias dos equivalentes de Thévenin são conhecidas sem erro, visto que podem ser estimadas durante o curto-circuito a partir da análise das grandezas de sequência. Ainda, destaca-se que por fazer uso de grandezas de sequência negativa, o método não é aplicado a faltas simétricas, podendo ser eventualmente adaptado para tal finalidade. Entretanto, nesse trabalho, não foram abordadas soluções alternativas.

### 4.3.8 Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013)

Saha & Rosolowski (2013) propuseram um método para eliminar o ângulo de sincronismo utilizando medições no período de falta. Usando o modelo de linha curta, ou seja, desconsiderando a capacitância shunt da linha monitorada, e assumindo o erro de sincronismo nas medições locais, o fasor de tensão no ponto de falta  $\hat{V}_F$  é calculado para ambos os terminais. Igualando as equações referentes à tensão  $\hat{V}_F$ , obtém-se então que:

$$V_{Li}(e^{j\theta}) - dI_{Li}Z_{Li}(e^{j\theta}) = V_{Ri} - (1-d)I_{Ri}Z_{Li}. \quad (4.56)$$

Isolando o operador de sincronismo e considerando seu módulo igual a um, ou seja:

$$|(e^{j\theta})| = 1 ,$$

pode-se reorganizar os termos da expressão, de modo que se obtém:

$$A_id^2 + B_id + C_i , \quad (4.57)$$

sendo:

$$A_i = |Z_{Li}\hat{I}_{Li}|^2 - |Z_{Li}\hat{I}_{Ri}|^2 ,$$

$$B_i = -2Re \left[ \hat{V}_{Li}(Z_{Li}\hat{I}_{Li})^* + (\hat{V}_{Ri} - Z_{Li}\hat{I}_{Ri})(Z_{Li}I_{Li})^* \right] ,$$

$$C_i = |\hat{V}_{Li}|^2 - |\hat{V}_{Ri} - Z_{Li}\hat{I}_{Ri}|^2 ,$$

em que  $i = 1, 2$  ou  $\Delta$  para representação das componentes de sequência positiva, negativa e componentes incrementais para curtos simétricos, respectivamente.

O resultado de (4.58) que satisfaça  $0 < d < 1$  p.u. é adotado como sendo o valor que fornece a estimativa correta de  $\bar{d}$ . Em alguns cenários de falta, ambos resultados de (4.58) atendem à condição e, nesses casos, é necessário recalcular (4.58) com grandezas de sequência diferentes:

$$A_jd^2 + B_jd + C_j , \quad (4.58)$$

com  $j \neq i$ , sendo  $j$  o índice adotado para representação de outras componentes de sequência.

### 4.3.9 Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012)

O método descrito em D.Mohamed *et al.* (2012) considera o efeito da capacitância shunt e o modelo de linha a parâmetros distribuídos durante o procedimento de localização, garantindo precisão as estimativas em linhas longas. Assim como o proposto em Izykowski *et al.* (2010), o método utiliza (4.52) para a localização da falta, podendo dessa forma ser aplicado a dados não sincronizados. Para o cálculo do ângulo de sincronismo, o qual é necessário para a aplicação de (4.52), os autores aplicam manipulações matemáticas, sendo o ângulo  $\theta$  estimado por:

$$A_1 \cos(\theta) + A_2 \sin(\theta) + A_3 = 0, \quad (4.59)$$

em que:

$$A_{1i} = -C_3 \operatorname{Re}(\hat{V}_{Li}) - C_4 \operatorname{Im}(\hat{V}_{Li}) - C_{1i} \operatorname{Re}(\hat{V}_{Ri}) - C_{2i} \operatorname{Im}(\hat{V}_{Ri}) + C_{1i} C_{3i} + C_{2i} C_{4i},$$

$$A_{2i} = C_{4i} \operatorname{Re}(\hat{V}_{Li}) - C_{3i} \operatorname{Im}(\hat{V}_{Li}) - C_{2i} \operatorname{Re}(\hat{V}_{Ri}) + C_{1i} \operatorname{Im}(\hat{V}_{Ri}) + C_{2i} C_{3i} - C_{1i} C_{4i},$$

$$A_{3i} = C_{2i} \operatorname{Re}(\hat{V}_{Li}) - C_{1i} \operatorname{Im}(\hat{V}_{Li}) - C_{4i} \operatorname{Re}(\hat{V}_{Ri}) + C_{3i} \operatorname{Im}(\hat{V}_{Ri}),$$

sendo os coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  dados por:

$$C_{1i} = \operatorname{Re}(Z_{Li}) \operatorname{Im}(I_{Li}) - \operatorname{Im}(Z_{Li}) \operatorname{Re}(I_{Li}),$$

$$C_{2i} = \operatorname{Re}(Z_{Li}) \operatorname{Im}(I_{Li}) + \operatorname{Im}(Z_{Li}) \operatorname{Re}(I_{Li}),$$

$$C_{3i} = \operatorname{Re}(Z_{Li}) \operatorname{Re}(I_{Ri}) - \operatorname{Im}(Z_{Li}) \operatorname{Im}(I_{Ri}),$$

$$C_{4i} = \operatorname{Re}(Z_{Li}) \operatorname{Im}(I_{Ri}) + \operatorname{Im}(Z_{Li}) \operatorname{Re}(I_{Ri}),$$

sendo os subscritos  $i = 0, 1, 2$  respectivamente grandezas de sequência zero, positiva e negativa. Neste trabalho as grandezas de sequência positiva  $i = 1$  foram usadas para todos os cenários analisados.

A equação (4.59) é resolvida pelo método iterativo de Newton-Raphson, conforme (4.41), onde foi definido um limiar de 0,001 e um ângulo inicial de zero graus, como sugerido em D.Mohamed *et al.* (2012). Assim, finalizado esse processo iterativo, com o valor de  $\theta$ , pode-se então estimar a distância de falta utilizando (4.52).

## 4.4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO EMPREGADA

Analisando trabalhos correlatos encontrados na literatura, percebe-se que a avaliação de métodos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental se limita, em geral, à análise da resistência de falta e localização de falta, (HE *et al.*, 2011; SAHA; ROSOLOWSKI, 2013; TZIOUVARAS *et al.*, 2001; GIRGS *et al.*, 1992), desprezando fontes de erro importantes para o desempenho dos métodos, como carregamento do sistema e o *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR). Ainda, essas fontes de erro não são correlacionadas, dificultando o entendimento das imprecisões de uma forma mais ampla.

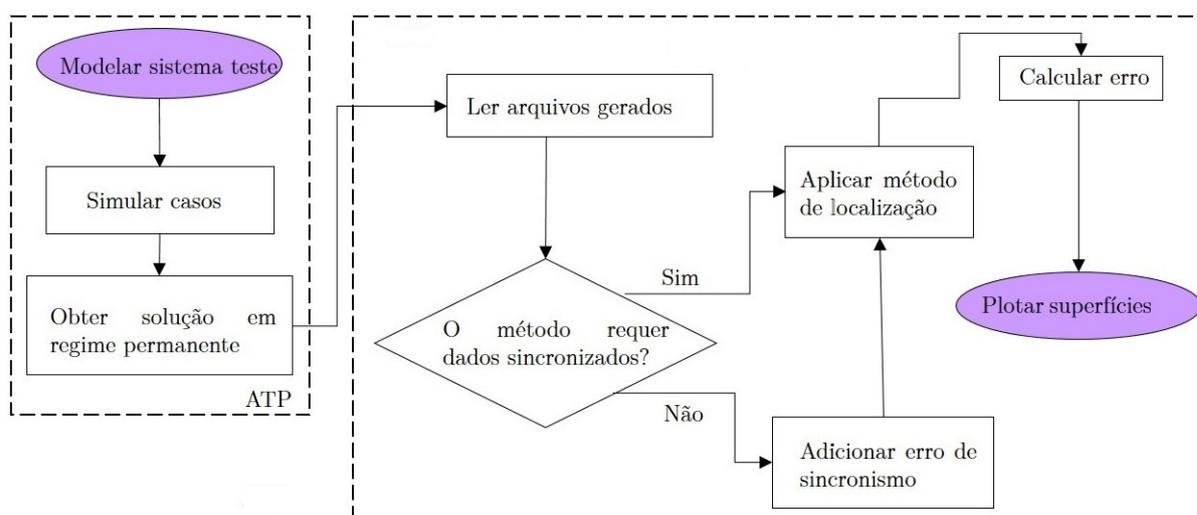
Por isso, neste trabalho, visando uma análise mais detalhada, realiza-se uma avaliação de sensibilidade paramétrica dos algoritmos apresentados neste capítulo. Para tanto, a linha de 500kV/60 Hz apresentada na Figura 4.1 foi modelada utilizando o *Alternative Transients Program* (ATP). Os parâmetros da referida linha e dos equivalentes de Thévenin, são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

**Tabela 4.1.** Parâmetros da linha de transmissão.

Sequência	R ( $\Omega/km$ )	X( $\Omega/km$ )	$\omega C$ ( $\mu S/km$ )
Zero	0,4930	1,3390	2,890
Positiva	0,0186	0,2670	6,124

**Fonte:** autoria própria.

**Figura 4.2.** Fluxograma dos processos aplicados.



**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 4.2.** Dados do circuito equivalente de Thévenin.

Componente	Variável	Valor
Impedância $Z_S$	$R_0(\Omega)$	$98,6 \times \text{SIR}$
	$X_0(\Omega)$	$267,8 \times \text{SIR}$
	$R_1(\Omega)$	$3,72 \times \text{SIR}$
	$X_1(\Omega)$	$53,4 \times \text{SIR}$
Impedância $Z_R$	$R_0(\Omega)$	98,6
	$X_0(\Omega)$	267,8
	$R_1(\Omega)$	3,72
	$X_1(\Omega)$	53,4
Fontes S1 e S2	$\hat{E}_L$ (p.u.)	$1,02 \angle 5,41^\circ \times E_L^* \angle \beta_L$
	$\hat{E}_R$ (p.u.)	$1,02 \angle -9,96^\circ \times E_R^* \angle \beta_R$

**Fonte:** autoria própria.

Percebe-se na Tabela 4.2 que a impedância equivalente de Thévenin do terminal local  $Z_S$  é multiplicada pela variável SIR. Tal procedimento foi realizado para simplificar as simulações onde o valor de SIR foi variado. Para as demais análises, foi considerado  $\text{SIR} = 1$  como valor *default*. Nota-se também que as fontes dos equivalentes local e remoto são multiplicadas pelos operadores complexos  $E_L^* \angle \beta_L$  e  $E_R^* \angle \beta_R$ , respectivamente, o que foi realizado para facilitar as análises de carregamento do sistema. Para tanto, foram realizadas ajustes nos ângulos  $\beta_L$  e  $\beta_R$ , assumindo, para as demais simulações, o valor de ambos os operadores complexos como sendo  $1 \angle 0^\circ$ .

O fluxograma dos processos aplicados para a análise de sensibilidade paramétrica está apresentado na Figura 4.2. Após a modelagem do sistema no ATP, considerando a linha como perfeitamente transposta e usando parâmetros distribuídos e constantes na frequência, foram simulados diferentes cenários, para a análise da influência do SIR, do carregamento, da resistência de falta, da incerteza dos parâmetros de linha, dos tipos de falta e da localização da falta. Os casos analisados são detalhados na Tabela 4.3.

Para cada análise (SIR, carregamento, resistência de falta e incerteza nos parâmetros da linha), uma variável foi testada dentro de um limite e com passos pré-estabelecidos, detalhados na Tabela 4.3. As demais variáveis foram mantidas constantes com valores que não interferem de forma significativa no desempenho dos algoritmos, propiciando a melhor avaliação do desempenho frente à variável em análise.

**Tabela 4.3.** Resumo dos casos analisados.

Variável	Constante	Limites	Passo	Tipos de curtos
$R_F$	SIR=1 $\delta = -5^\circ$	0 a 500 $\Omega$ $d=0,02$ a 0, 98 p.u.	50 $\Omega$ 0,01 p.u.	AT, AB, ABT e ABC
Erro $Z_{L0}$ e $Z_{L1}$	SIR=1, $R_F = 0 \Omega$ $\delta = -5^\circ$	0 a 50 % $d=0,02$ a 0, 98 p.u.	0, 1, 2...10, 15...50% 0,01 p.u.	AT
$\delta$	$R_F = 15 \Omega$ SIR=1	-90° a 90 $d=0,02$ a 0, 98 p.u.	5° 0,01 p.u.	AT
SIR	$R_F = 0 \Omega$ $\delta = -5^\circ$	1 a 10 $d=0,02$ a 0, 98 p.u.	0,1, 0,2 ... 1, 2...10 0,01 p.u.	AT

**Fonte:** autoria própria.

Em cada simulação, os fasores de tensão e corrente foram obtidos a partir da solução de regime permanente do ATP, e então usados como entradas para os algoritmos de localização de faltas em estudo. Procedendo desta forma, evitaram-se erros decorrentes do processo de estimação fasorial, viabilizando análises exclusivamente dos desempenhos dos algoritmos avaliados. Todos os sinais obtidos do ATP são naturalmente sincronizados, uma vez que a base de dados de tempo é a mesma em todos os pontos da rede simulada, de modo que para a avaliação dos métodos que não precisam de dados sincronizados, foi adicionado um erro de sincronismo  $\theta$ , a todos os fasores do terminal local, atrasando-os em  $50^\circ$  em relação aos sinais medidos no terminal remoto. Para cada análise, foram geradas superfícies onde o eixo x está relacionado à distância de falta, o eixo y ao SIR, carregamento, ao erro dos parâmetros ou resistência de falta e o eixo z ao erro absoluto das localizações estimadas, em quilômetros, o qual foi calculado por:

$$\epsilon (km) = |Re(\bar{d}) - d| * l , \quad (4.60)$$

em que  $\bar{d}$  é a localização de falta estimada pelo método avaliado e  $d$  é a distância real simulada no ATP, sendo  $l$  o comprimento da LT, conforme descrito anteriormente. Vale ressaltar que a distância  $\bar{d}$  estimada pelos métodos pode apresentar uma parte imaginária com valores baixos decorrentes de imprecisões que normalmente existem nos parâmetros da linha ou aproximações matemáticas assumidas pelos métodos. Portanto, uma vez que as parcelas imaginárias apresentam em geral valores espúrios, para todos os métodos avaliados, considerou-se a localização estimada como sendo a parte real de  $\bar{d}$  como sugerido em (JOHNS; JAMALI, 1990).

## 4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, os métodos de localização de faltas analisados no Capítulo 5 foram apresentados de forma detalhada, evidenciando as simplificações adotadas por cada autor e possíveis fontes de erros de cada algoritmo. Foram apresentadas dezesseis técnicas, sendo sete baseadas em dados de um terminal e nove em dados de dois terminais, dentre as quais cinco não necessitam da sincronização de dados.

Apenas um dos métodos apresentados não requer uso de parâmetros de linha: o método PR. No entanto, este algoritmo considera o modelo mais simples de LT na sua formulação, assim como os métodos GG, IZ1, TZ, SH e todos os de um terminal, desprezando assim o efeito capacitivo da linha monitorada e, conseqüentemente, gerando erros quando aplicados a linhas longas ou de mais elevada tensão.

Além disso, os métodos de um terminal precisam da correta classificação do tipo de falta para determinação das grandezas usadas pelos algoritmos. Da mesma forma, os métodos PR, IZ2, TZ, SH necessitam classificar o curto como simétrico ou assimétrico. A depender do tipo de curto, algumas destas técnicas necessitam de grandezas de pré-falta para o cálculo de grandezas incrementais.

Apesar dos métodos de um terminal serem mais simples, estes são susceptíveis a uma série de erros, como a influência da resistência de falta e o carregamento, por exemplo. Os métodos de dois terminais contornam esses problemas usando um canal de comunicação, no caso em que os algoritmos necessitam de dados sincronizados, assim como os métodos JJ, GG, PR e HE. Mas há aqueles que propõem alternativas eliminando a necessidade de sincronização de dados, como apresentado nos métodos IZ1, IZ2, TZ, SH e MH.

Cabe ressaltar que na maioria dos casos a formulação ainda é simples e direta. Entretanto, alguns autores fazem uso de processos iterativos como nos métodos HE, IZ2 e MH, que são em geral considerados fatores complicadores do ponto de vista computacional quando se deseja realizar o cálculo em tempo real do local da falta. Desse modo, esses métodos são mais indicados para aplicações off-line (LOPES, 2014).

## AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Neste capítulo, apresenta-se a avaliação dos algoritmos descritos no Capítulo 4. Foram realizadas 102.960 simulações de falta monofásica AT, bifásica AB bifásica-terra ABT e trifásica ABC no ATP, utilizando o sistema teste descrito no capítulo anterior. Em cada simulação, os fasores de tensão e corrente foram obtidos a partir da solução de regime permanente do ATP, e então usados como entradas para os algoritmos de localização. Procedendo desta forma, evitaram-se erros decorrentes do processo de estimação fasorial, viabilizando análises exclusivamente dos desempenhos dos algoritmos avaliados. Todos os sinais obtidos do ATP são naturalmente sincronizados, de modo que, para a avaliação dos métodos, foi adicionado um erro de sincronismo a todos os sinais do terminal local, atrasando-os em  $50^\circ$  em relação aos sinais medidos no terminal remoto. Para facilitar o entendimento das análises realizadas nas próximas sessões, está sintetizado na 5.1 e 5.2 as siglas utilizadas para cada método.

**Tabela 5.1.** Lista de métodos de um terminal avaliados.

Sigla	Método avaliado
Método IM	(ZIEGLER, 2010)
Método RT	(ÇAPAR; ARSOY, 2015)
Método TK	(TAKAGI, 1982)
Método TK zero	(TAKAGI, 1982)
Método TK modificado	(TAKAGI, 1982)
Método ER	(ERIKSSON <i>et al.</i> , 1985)
Método WS	(WISZNIEWSKI, 1983)

**Fonte:** autoria própria.

**Tabela 5.2.** Lista de métodos de dois terminais avaliados.

Sigla	Método avaliado
Método GG	(GIRGS <i>et al.</i> , 1992)
Método JJ	(JOHNS; JAMALI, 1990)
Método PR	(PRESTON <i>et al.</i> , 2011)
Método HE	(HE <i>et al.</i> , 2011)
Método IZ1	(IZYKOWSKI <i>et al.</i> , 2005)
Método IZ2	(IZYKOWSKI <i>et al.</i> , 2010)
Método TZ	(TZIOUVARAS <i>et al.</i> , 2001)
Método SH	(SAHA; ROSOLOWSKI, 2013)
Método MH	(D.MOHAMED <i>et al.</i> , 2012)

**Fonte:** autoria própria.

## 5.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE FALTA

Nesta sessão, avalia-se a influência das características de falta na performance dos métodos apresentados no Capítulo 4. Foram simuladas diferentes tipos de falta, variando a resistência de falta. Como utilizou-se da resposta em regime permanente do ATP, o ângulo de incidência de falta não foi avaliado. Ademais, sabe-se da literatura que a variação do ângulo de incidência da falta não afeta os algoritmos baseados em componentes da frequência fundamental, uma vez que o processo de estimação de fasores tende a eliminar a influência da componente CC de decaimento exponencial (PHADKE; THORP, 2009).

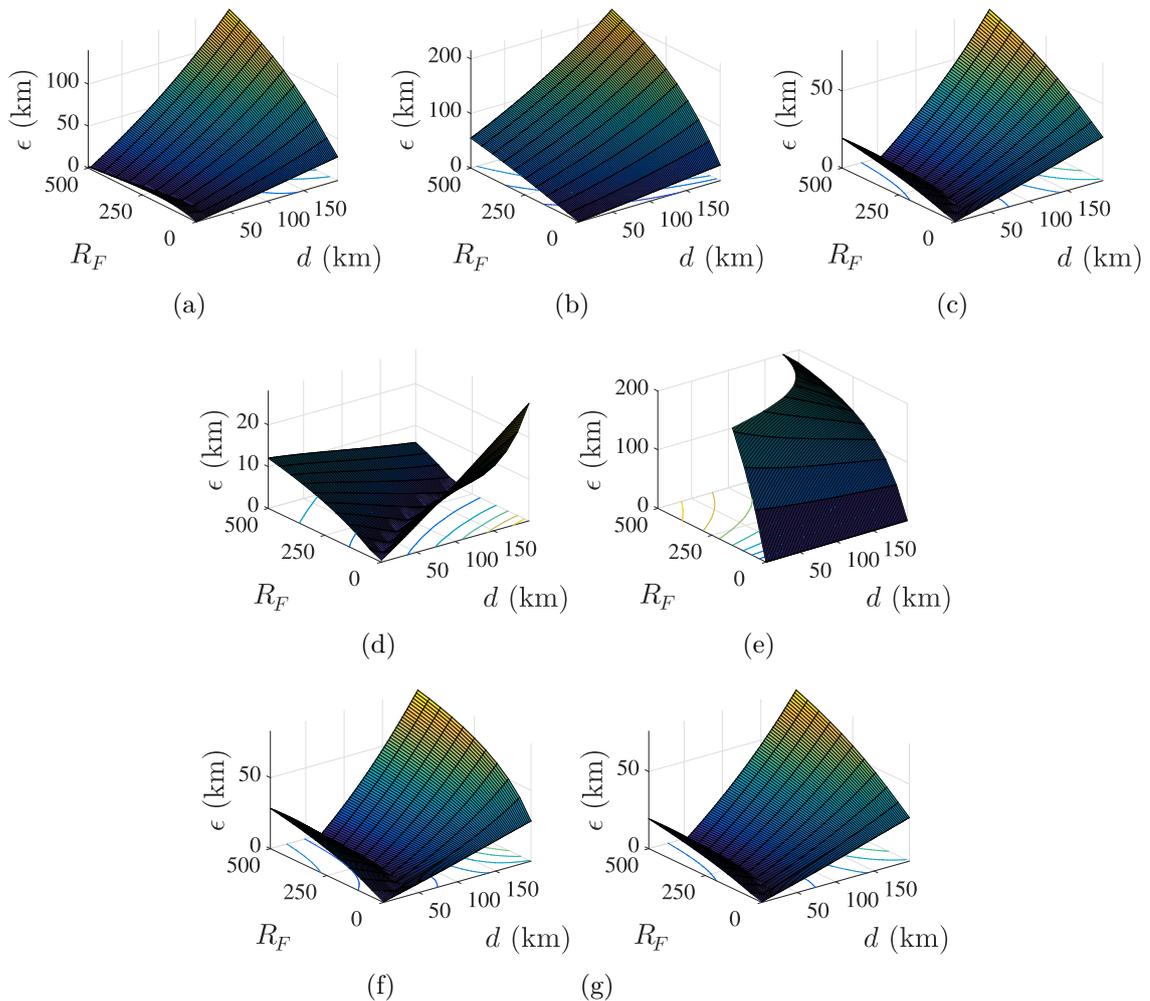
Para a avaliação da influência da resistência de falta sobre o desempenho dos métodos implementados, o valor de  $R_F$  foi extrapolado, sendo variado de 0  $\Omega$  (curto franco) até 500  $\Omega$ , com passos de 50  $\Omega$ . Na prática, espera-se que o valor de  $R_F$  não ultrapasse 100  $\Omega$  (ANDRADE; SORRENTINO, 2010). Os resultados obtidos para faltas monofásicas AT são apresentados na Figuras 5.1 e 5.2, onde o eixo x corresponde a distância de falta ( $d$ ) em km, o eixo y corresponde a resistência de falta ( $R_F$ ) e o eixo z corresponde ao erro absoluto ( $\epsilon$ ) em km, calculado conforme (4.60).

Observa-se da Figura 5.1 que os métodos de um terminal no geral apresentam grandes desvios para defeitos distantes do ponto de medição, que é acentuado para resistências elevadas, como esperado, uma vez que os *loops* de falta desses algoritmos não contemplam  $R_F$ . Assim, quão maior a distância do terminal monitorado e o valor de  $R_F$ , maiores os erros nas localizações

estimadas (SAHA *et al.*, 2010). O algoritmo que apresentou melhor desempenho nesse cenário foi o TK zero, com maiores erros da ordem de 25 km, ou 12,% do comprimento da LT. Mesmo assim, esse valor é inadmissível em termos práticos.

O algoritmo Tk modificado, não convergiu para alguns casos, onde  $R_F > 250 \Omega$ , resultando em erros maiores que o próprio comprimento da LT, cabe ressaltar que apesar desse algoritmo fazer uso do fator de distribuição de correntes para melhorar a estimativa obtida através do TK, nesse trabalho usou-se as grandezas do terminal remoto como sendo iguais as do terminal local. Os métodos ER e WS apresentaram erros da ordem de 65 km e 77 km, respectivamente, quando a falta ocorreu distante do terminal monitorado com alta resistência de falta.

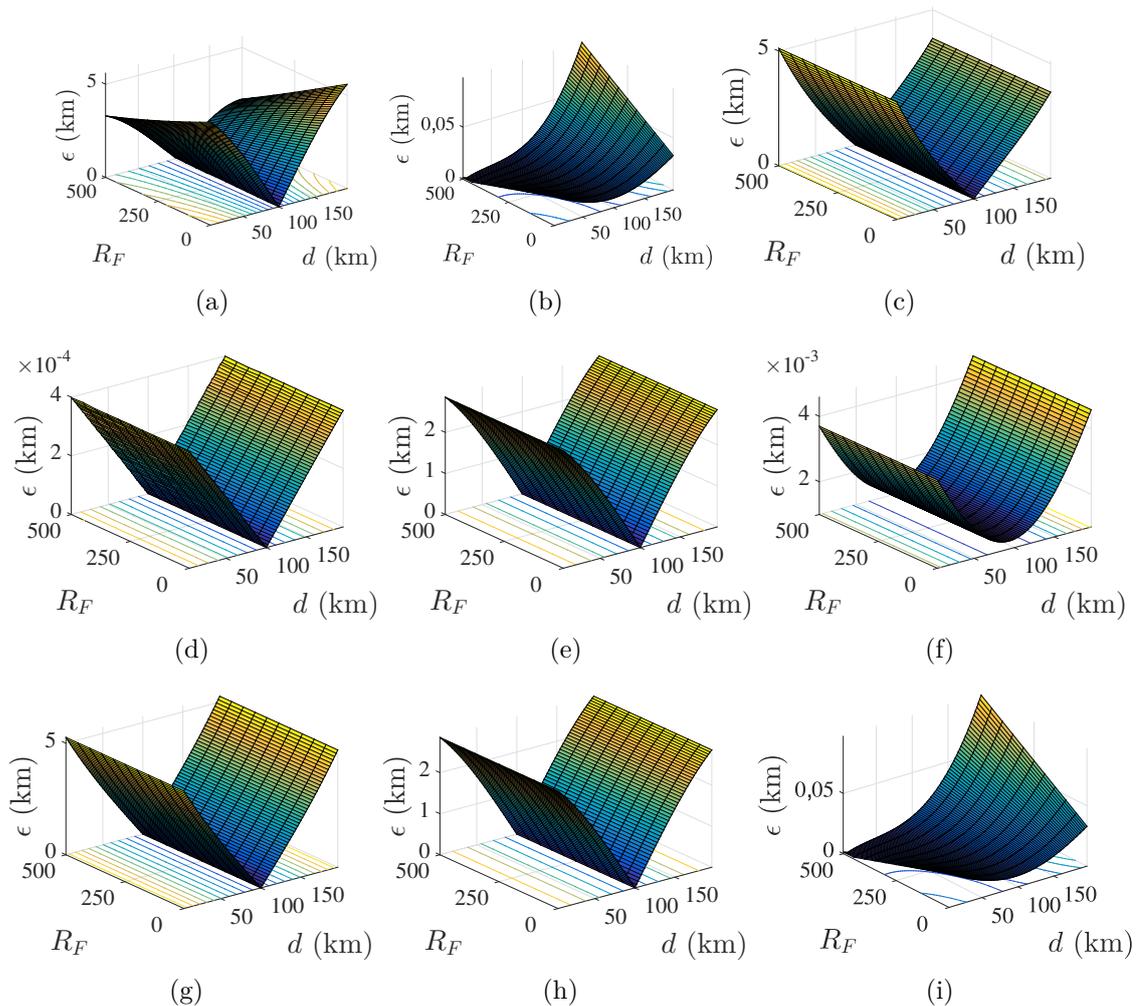
**Figura 5.1.** Influência da resistência de falta em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983).



**Fonte:** autoria própria.

Contudo, como apresentado na Figura 5.2, comprova-se o que é largamente discutido na literatura a respeito do efeito da resistência de falta sobre métodos de dois terminais. De fato,  $R_F$  não afetou de forma significativa os algoritmos de dois terminais implementados. É possível também observar que, para os algoritmos que não consideram o efeito capacitivo da linha monitorada, a saber: GG, PR, IZ1, TZ e SH, os erros absolutos são maiores quando as faltas ocorrem perto dos terminais, e estão relacionados à assimetria do sistema. Mesmo assim, os maiores erros são de 5 km, e próximos de zero quando a falta ocorre no meio da linha. Apesar de serem influenciados pela combinação de distância e resistência de falta, algoritmos

**Figura 5.2.** Influência da resistência de falta em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012).



**Fonte:** autoria própria.

que consideram o modelo  $\pi$ -exato da linha, a saber JJ, IZ2 e MH, resultaram em erros de 100 m, 4 m e 100 m, respectivamente, demonstrando a robustez dos métodos, esses erros representam menos que 0,05% do comprimento da LT analisada. Já o método HE não foi afetado pela resistência de falta e apresentou grande robustez. Este método também considera o modelo a parâmetros distribuídos em sua formulação, contemplando assim o efeito capacitivo da LT monitorada.

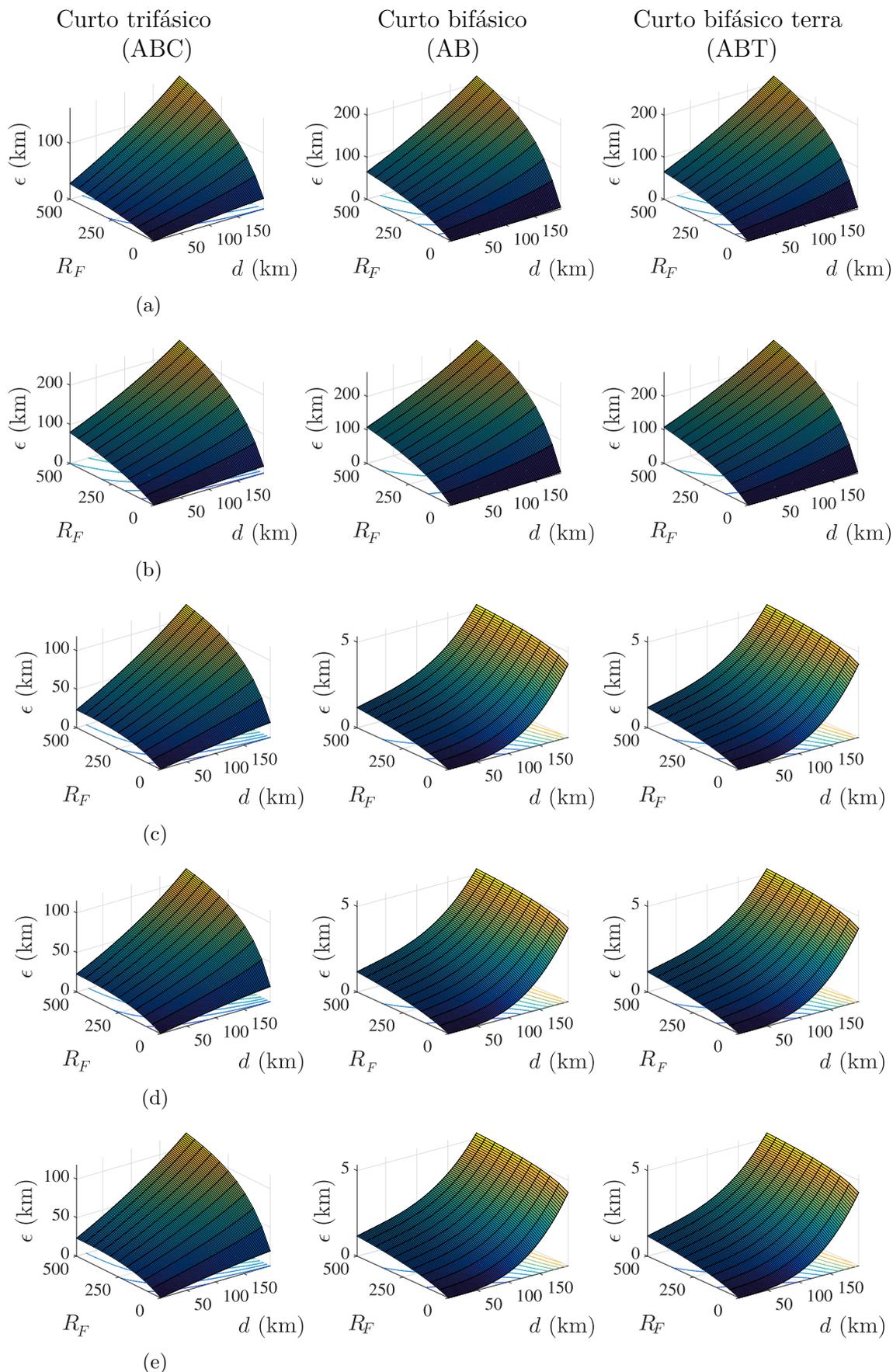
Cabe ressaltar que a variação do limiar  $\varsigma$  proposto em Izykowski *et al.* (2010), para identificação da estimativa correta do ponto de falta, influencia na precisão do método IZ2. Embora ao usar o limiar  $\varsigma = 0,1$ , conforme sugerido pelos autores, erros menores que 220 m tenham sido verificados, ao ajustar  $\varsigma = 0,0009$ , por exemplo, os erros não ultrapassaram a ordem de 4 m. Ademais, dos estudos realizados, nota-se que o método MH tem sua precisão diretamente relacionada ao número de iterações do processo de determinação de  $\theta$ , o qual, nesse trabalho, foi fixado em 10 iterações, o que pode ser visto como um fator complicador. Cabe ainda relatar que o método HE também faz uso de um processo iterativo, onde o limiar foi ajustado para  $1e^{-6}$  e o critério de parada foi definido como 5 iterações.

Diante do exposto, nota-se que o método IZ2 é mais robusto e simples, mesmo apresentando pequenas variações de precisão, a depender do ajuste do limiar  $\varsigma$ . De fato, o método IZ2 não requer um processo iterativo para estimação do operador de sincronismo, facilitando sua aplicação. Além disso, apesar de ter os mesmos resultados quando comparado ao método JJ, este pode ser usado para dados não sincronizados, o que o torna mais generalista do ponto de vista prático.

O desempenho dos métodos para curtos trifásicos ABC, bifásico AB e bifásico terra ABT estão apresentados nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. Observa-se comportamento similar, para todos os tipos de curtos na maioria dos métodos de um terminal avaliados, com exceção dos métodos TK zero e Tk modificado, que funcionam apenas para faltas monofásicas, conforme Figura 5.3. Cabe ressaltar que, para a esta análise, considerou-se que o algoritmo de classificação de faltas funciona sem erro.

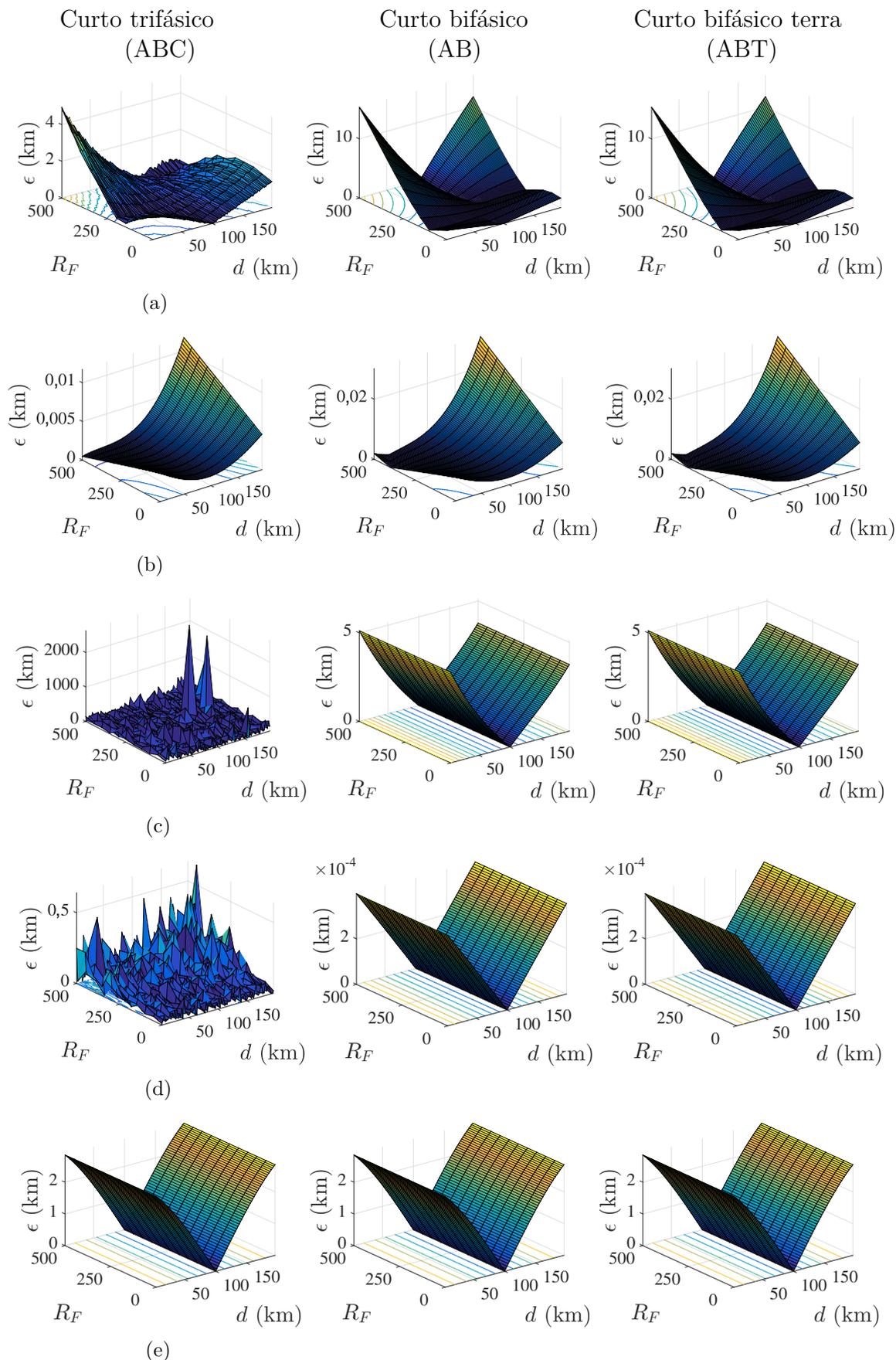
Nota-se ainda, que os métodos TK, ER e WS, apresentaram melhor desempenho para curtos bifásicos e bifásicos-terra. Para os métodos de dois terminais, conforme as Figuras 5.4 e 5.5, percebe-se que os métodos PR, TZ, não funcionam para faltas trifásicas, o que é esperado,

**Figura 5.3.** Influência da resistência de falta em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (e) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983).

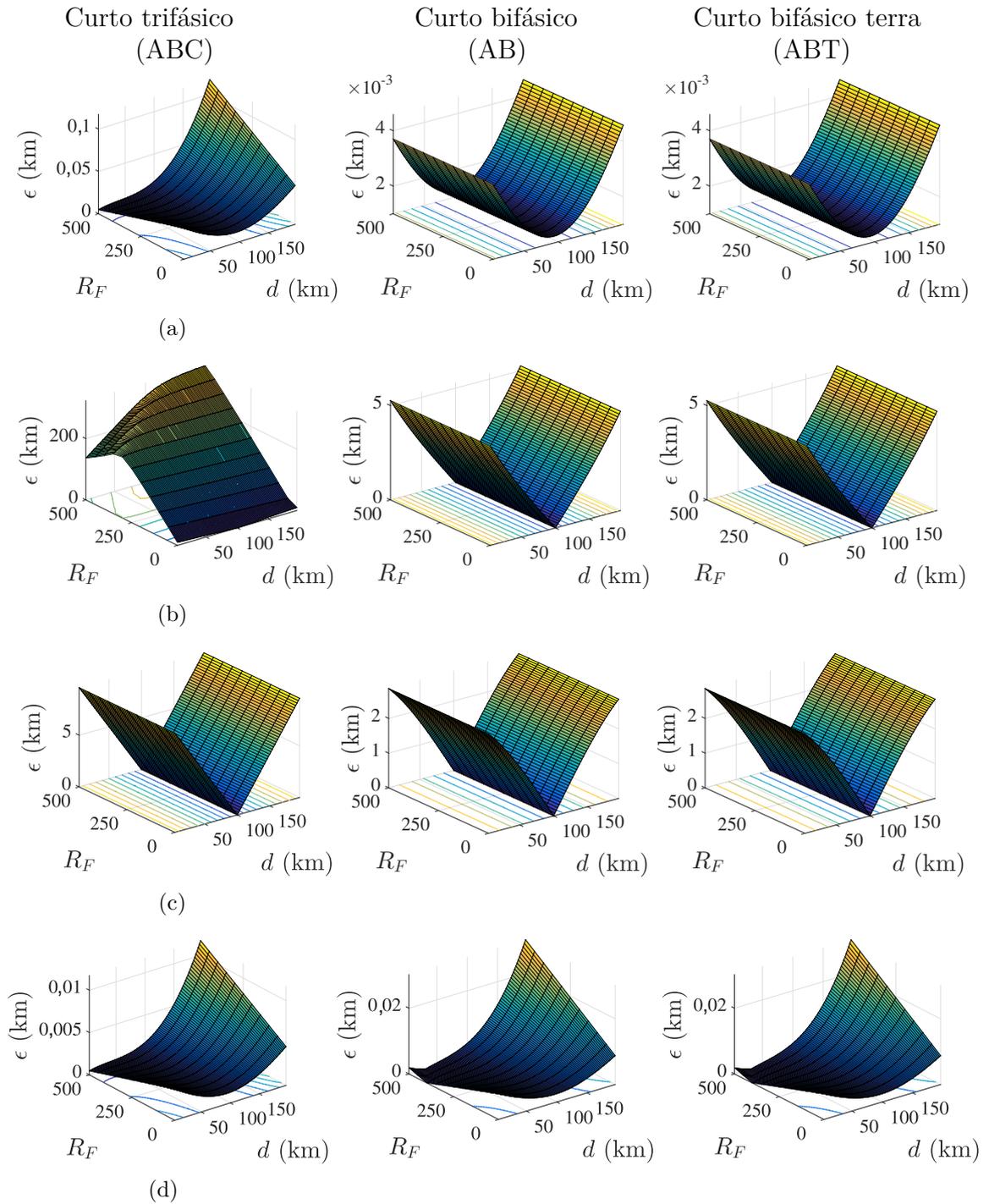


**Fonte:** autoria própria.

**Figura 5.4.** Influência da resistência de falta para curtos trifásicos, bifásicos AB e bifásicos terra ABT em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005).



**Figura 5.5.** Influência da resistência de falta em algoritmos de 2 terminais: (a) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (b) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (c) Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013); (d) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012).



**Fonte:** autoria própria.

pois utilizam componentes de sequência negativa que não existem nesse tipo de curto-circuito. Entretanto, o método proposto por Preston *et al.* (2011), apresenta uma formulação alternativa para faltas simétrica, a qual não foi avaliada nesse trabalho.

O método apresentado por Saha & Rosolowski (2013), propõe o uso de grandezas incrementais para curtos simétricos, em substituição as grandezas de sequência negativa. O método IZ2, também fazem o uso desse recurso, no entanto, torna-se necessário o conhecimento de grandezas pré-faltas, além de um algoritmo de classificação de faltas. O método HE, apesar de apresentar uma superfície disforme para um curto trifásico, observa-se que os maiores erros não passam de 600 m. Assim como o algoritmo GG, ainda que apresente um comportamento distinto para cada tipo de curto analisado, o método demonstrou precisão satisfatória para a maioria dos casos, tendo os maiores erros no curto AB, da ordem de 14 km, 7% do comprimento da LT. Por outro lado, os métodos mais robustos para qualquer tipo de curto são MH e JJ e IZ2.

Novamente, evidencia-se que os métodos PR, HE, IZ1, TZ e SH não são afetados pela resistência de faltas para qualquer tipo de curto, com exceção de curtos ABC para os métodos PR e TZ. Neste contexto, percebe-se a precisão nas estimativas dadas pelos métodos de dois terminais frente à variação da resistência de falta, e que o tipo de falta não influencia o desempenho dos métodos de forma significativa, com exceção dos métodos que fazem uso de grandezas de sequência negativa. Ademais, sabe-se que as faltas monofásicas e bifásicas são o tipos mais comum em sistemas de transmissão, consistindo de aproximadamente 68% e 25% dos curtos-circuitos, respectivamente (LOPES, 2014). Para ambos os casos, todos os métodos de dois terminais analisados apresentaram bons desempenhos e grande robustez frente a variações da resistência de falta.

## 5.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE IMPRECIÇÕES NOS PARÂMETROS DA LT

Os parâmetros de sequência positiva e zero de LT são normalmente conhecidos pelas concessionárias de energia elétrica, porém nem sempre apresentam boa precisão, visto que são provenientes a uma série de aproximações como adoção de uma geometria de torre de transmissão típica, resistividade do solo uniforme para todo comprimento de linha, entre outras. Sabe-se também que as condições climáticas podem variar ao longo do dia, ocasionando variações nos parâmetros da LT. Portanto, os dados usualmente disponíveis possuem algum nível de incerteza, os quais devem ser analisados vislumbrando situações práticas do mundo real (LOPES, 2014).

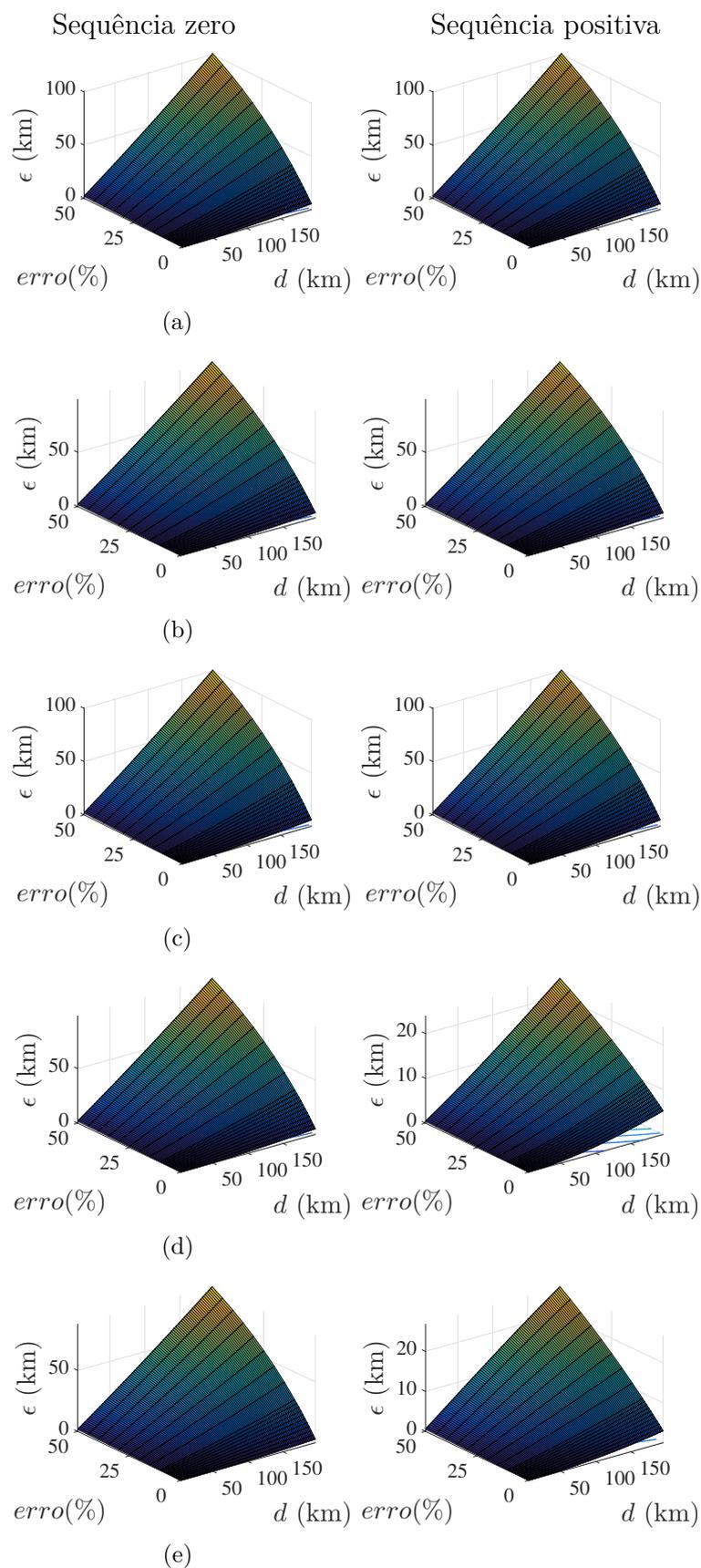
Diante do exposto, nota-se a importância de se avaliar a influência das imprecisões nos parâmetros da LT no desempenho dos algoritmos. Para tanto, foram analisados cenários com parâmetros perfeitamente calculados, ou seja, erro de 0% com relação aos valores reais utilizados na modelagem no ATP, e com variações dos parâmetros de sequência positiva e zero de 1%, 2% ... 10%, 15% ... 50%. Na prática, sabe-se que os parâmetros de sequência zero são mais influenciados e portanto apresentam erros mais significativos, todavia os valores de erro de 50% são extrapolações do que se espera na prática (LAHMAR; LIAO, 2017). Para esta análise, foi considerada uma falta franca com ângulo de carregamento de  $\delta = -5^\circ$  (abertura angular das tensões nas barras terminais da LT) e SIR= 1.

Nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentados os erros obtidos para faltas monofásicas AT na linha modelada, onde o eixo x corresponde à distância de falta ( $d$ ) em km, o eixo y corresponde ao erro percentual no parâmetro da LT avaliado (*erro %*) e o eixo z corresponde ao erro absoluto em km, calculado conforme (4.60).

Em relação aos parâmetros de sequência zero, os métodos de dois terminais, com exceção do método GG, não foram afetados. De fato, estes métodos não utilizam esses dados em seus equacionamentos. Todavia, os métodos de um terminal foram afetados, conforme demonstrado nas Figuras 5.6 e 5.7, pois utilizam a impedância de sequência zero  $Z_{L0}$  para o cálculo do fator de compensação  $K_0$ , resultando em erros, principalmente quando a falta ocorre próximo ao terminal remoto combinado com um erros maiores nos parâmetros de sequência zero. Esses métodos apresentaram o mesmo comportamento para os erros de sequência positiva, porém com erros absolutos menores para os métodos Tk zero, TK modificado, ER e WS.

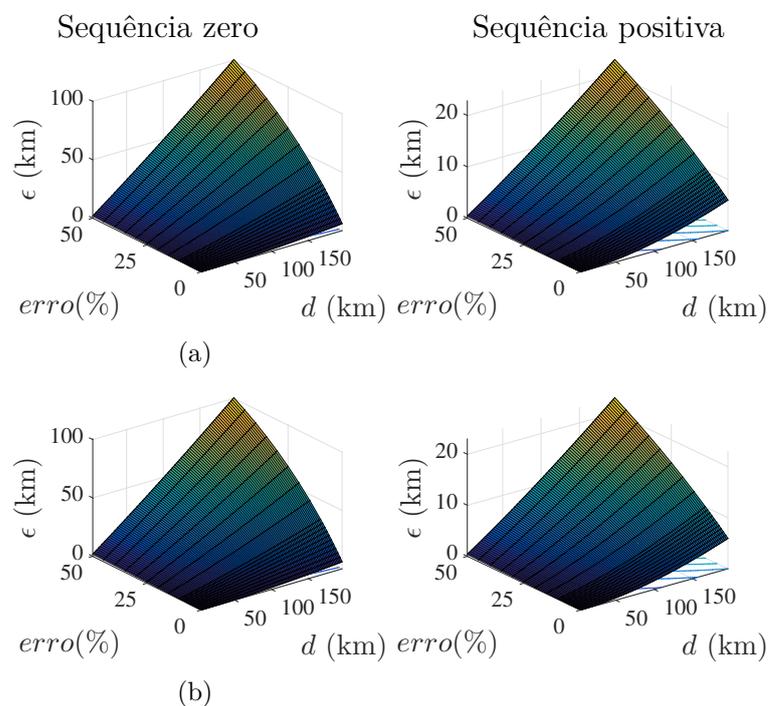
Analisando a influência da imprecisão nos parâmetros de sequência positiva, observa-se que o método PR não foi afetado, pois não usa os parâmetros da linha em sua formulação. O método GG apresentou pouca sensibilidade às imprecisões dos parâmetros da LT, mostrando sua robustez para aplicações reais. Em contrapartida, os demais métodos foram influenciados e tiveram seus desempenhos comprometidos pelas imprecisões dos parâmetros da LT, visto que todos utilizam  $Z_{L1}$  em sua formulação. Nota-se que o método IZ2 é o mais sensível aos erros na sequência positiva, não convergindo para casos onde o erro foi maior que 25% e a falta ocorreu perto dos terminais. Para os demais casos, os maiores erros foram da ordem de 3 km, equivalentes a 1,5% do comprimento da LT.

**Figura 5.6.** Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado.



Fonte: autoria própria.

**Figura 5.7.** Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 1 terminal: (a) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985) (b) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983).

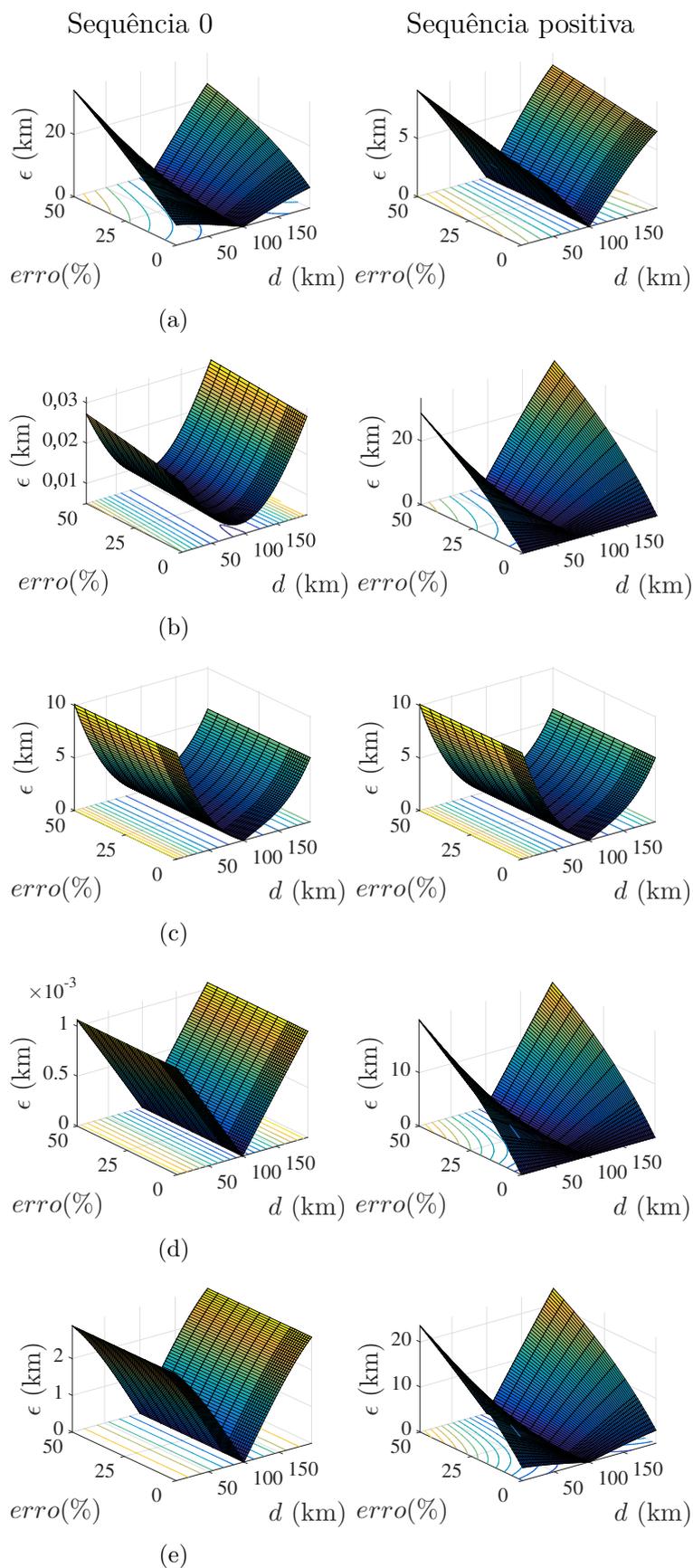


**Fonte:** autoria própria.

Para tentar contornar essa limitação, He *et al.* (2011) apresenta uma formulação para cálculo das impedâncias série e shunt equivalentes, levando em consideração as características dinâmicas durante uma falta em relação ao tempo. Conforme mencionado em capítulos anteriores, como as simulações nesse trabalho foram obtidas através da solução em regime permanente, esse algoritmo de estimação dos parâmetros da LT não foi avaliado, muito embora pudesse resultar em uma melhor precisão do método.

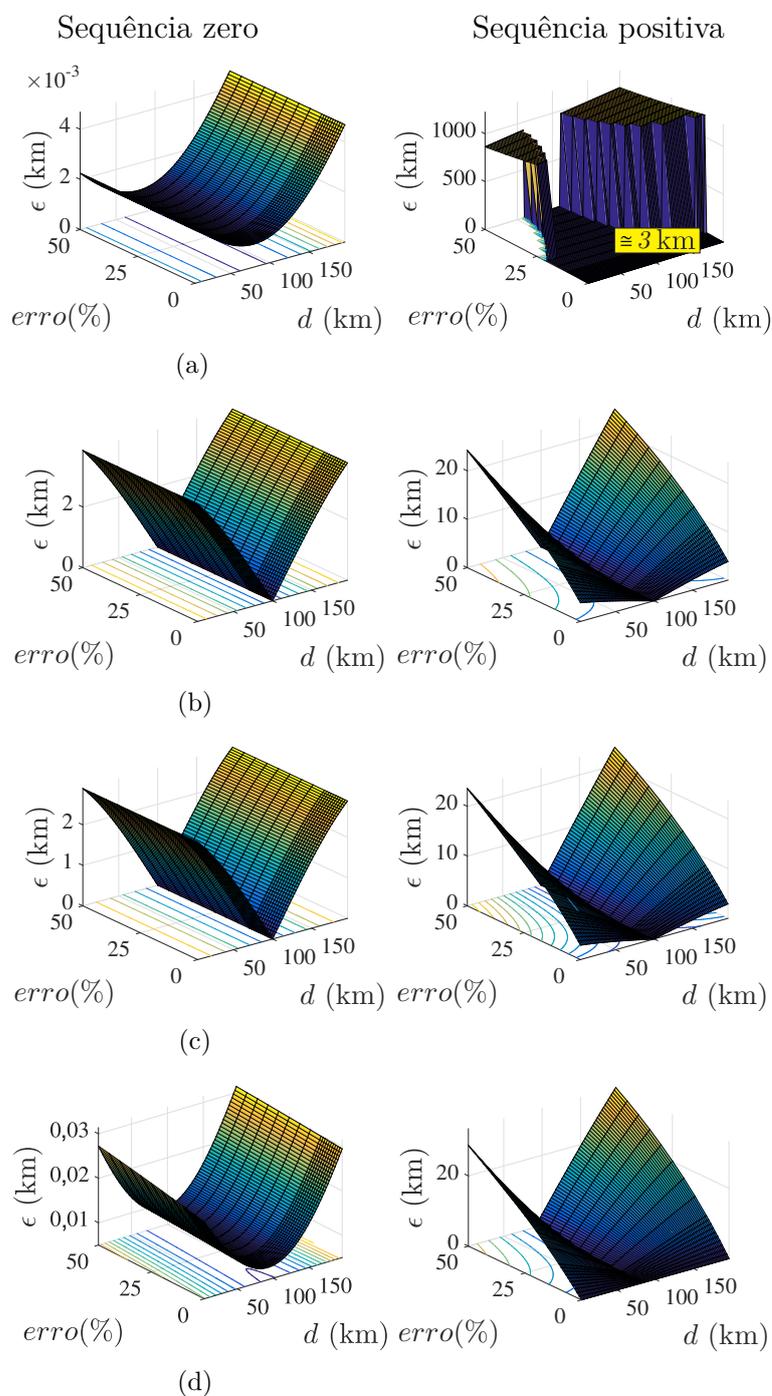
Neste contexto, é importante ressaltar que a dependência dos parâmetros da LT é um desafio a ser contornado pelos métodos de localização de faltas, assim como em algoritmos de proteção, que podem atuar indevidamente em decorrência de incertezas nos parâmetros do sistema. Métodos como o proposto por Preston *et al.* (2011), que não necessitam do conhecimento dos parâmetros de LT monitorada, apresentam uma grande vantagem em termos práticos, pois evitam erros na localização estimada devido a imprecisão dos dados, além de evitarem eventuais erros ajuste em campo. Nota-se na literatura que diversos métodos vêm sendo desenvolvidos para a estimação *on-line* de parâmetros de linha como as técnicas apresentadas em Lahmar & Liao (2017) e em Sivanagaraju *et al.* (2014).

**Figura 5.8.** Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005).



**Fonte:** autoria própria.

**Figura 5.9.** Influência da imprecisão dos parâmetros de linha em algoritmos de 2 terminais: (a) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (b) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (c) Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013); (d) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012).



**Fonte:** autoria própria.

### 5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO DO SISTEMA

Para análise do carregamento do sistema, as fontes de tensão dos equivalentes de Thévenin nos terminais L e R foram multiplicados pelos operadores complexos  $E_L^* \angle \beta_L$  e  $E_R^* \angle \beta_R$ , respectivamente, com o intuito de simular diferentes perfis de carregamento. Para tanto, o ângulo  $\delta = \theta_L - \theta_R$  foi variado, onde  $\theta_L$  e  $\theta_R$  são os ângulos de fase do fasor de tensão dos terminais L e R. Nessa avaliação, o ângulo  $\delta$  foi extrapolado, sendo variado de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , com passos de  $5^\circ$ , considerando tensões com módulo de 1,0 p.u., em ambos os terminais da linha, mantendo  $\theta_L = 0^\circ$ . Na prática, espera-se que essa abertura angular entre as tensões nas barras não ultrapasse a ordem de  $\pm 35^\circ$  em situações de carregamento pesado (GLOVER *et al.*, 2010).

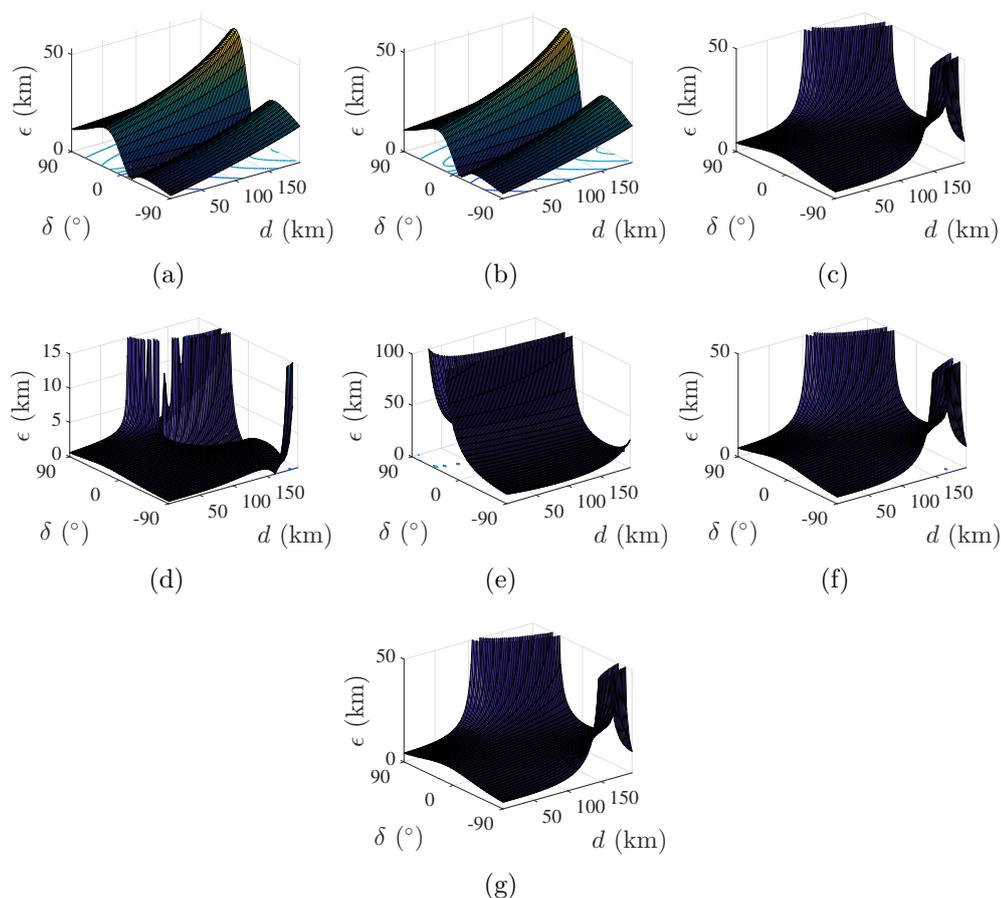
Para essa simulação, primeiramente o sistema foi modelado sem os equivalentes de Thévenin. Para tanto, as tensões nas barras foram assumidas como sendo iguais às das fontes de Thévenin. Na sequência, para gerar os casos, fixaram-se as magnitudes da tensão como 1 p.u., variando-se os ângulos do terminal R, o qual foi fixado com ângulo de carregamento  $\delta$ . Através do ATP, obtiveram-se então os fasores de tensão e corrente nos terminais, que foram usados para o cálculo das fontes de Thévenin. Uma vez realizado esse procedimento, as impedâncias de Thévenin foram reconectadas em ambas as extremidades da linha, de modo que as tensões nas barras foram mantidas com os valores previamente definidos, ou seja,  $\hat{E}_L$  e  $\hat{E}_R$ .

Os resultados obtidos para faltas monofásicas AT são apresentados na Figuras 5.10 e 5.11, onde o eixo x corresponde a distância de falta ( $d$ ) em km, o eixo y corresponde ao ângulo de carregamento ( $\delta$ ) e o eixo z corresponde ao erro absoluto em km, calculado conforme (4.60).

Como amplamente reportado na literatura, para os métodos de um terminal, o carregamento do sistema é uma fonte de erro considerável (SAHA *et al.*, 2010). Dentre os algoritmos analisados os únicos que convergiram para todos os valores de carregamento foram o IM e RT, os quais consistem nos métodos mais simples dentre os avaliados. Para esses métodos os maiores erros foram encontrados para ângulos de carregamento entre  $45^\circ > \delta > 15^\circ$  e faltas próximas ao terminal remoto. Já os métodos Tk, ER e WS apresentaram pontos de descontinuidade quando:  $\delta > 50^\circ$  e  $\delta < -50^\circ$ , combinado com faltas próximas ao terminal remoto. Enquanto que para valores usuais de carregamento, ou seja, valores máximos de  $\delta = 30^\circ$  a  $40^\circ$  (LOPES *et al.*, 2015), os métodos apresentaram bom desempenho.

Cabe ressaltar que é proposto em Eriksson *et al.* (1985) o uso dos dados do equivalente no terminal remoto para minimizar os efeitos do carregamento, mas nesta simulação como o algoritmo foi avaliado como sendo de um terminal, apenas os dados do terminal local foram considerados, garantindo uma comparação justa com os demais. De forma análoga, considerou-se os termos do equivalente de Thévenin do terminal remoto como iguais ao do terminal local para o cálculo do fator de distribuição de correntes, utilizados nos métodos Tk zero e Tk modificado, resultando em erros adicionais nestas estimativas. Percebe-se ainda que o método Tk zero apresentou alguns pontos de descontinuidade, mas, para os demais casos teve erros da ordem de 2 km quando a falta ocorreu próximo ao terminal remoto. O método Tk modificado não convergiu para diversos pontos onde  $50^\circ > \delta > 25^\circ$ , e para os demais pontos apresentou erros da ordem de 25 Km, 12,5% do comprimento da linha avaliada.

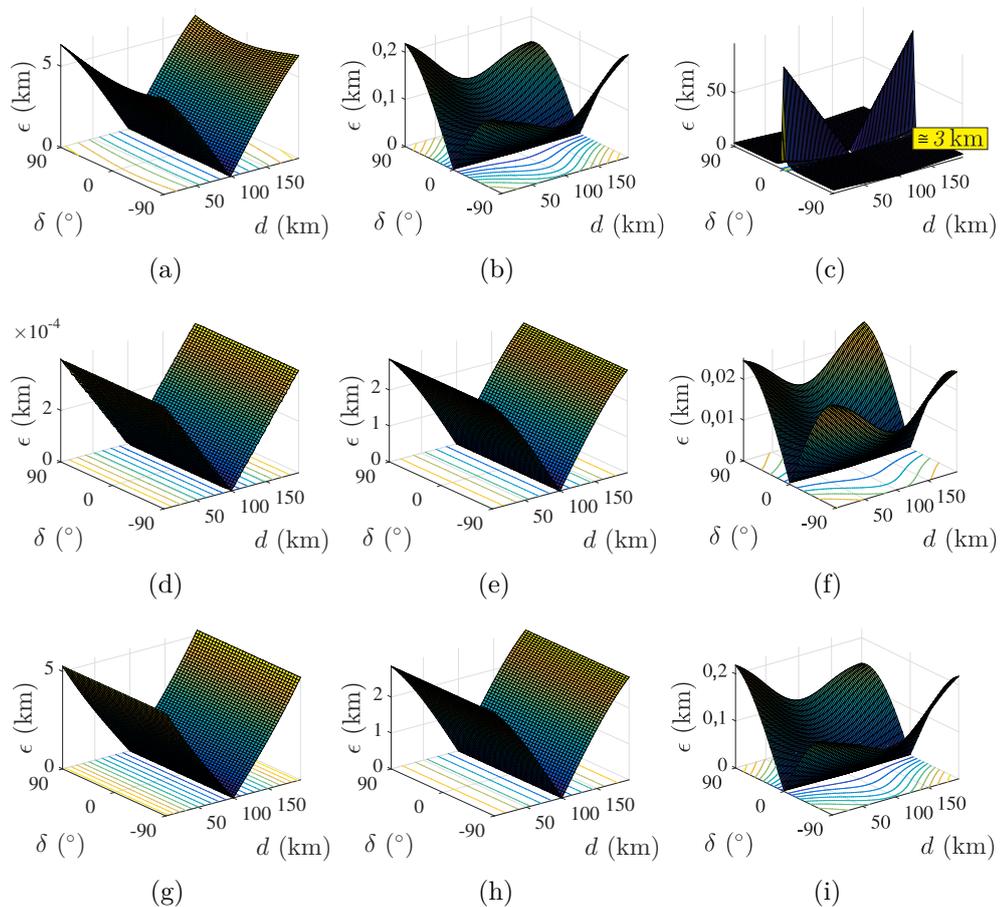
**Figura 5.10.** Influência do carregamento em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983).



**Fonte:** autoria própria.

Pode-se observar na Figura 5.11 que os métodos de dois terminais analisados não são influenciados de forma significativa pelo carregamento, mesmo em linhas longas, o que inclui as técnicas que desprezam o efeito capacitivo da LT monitorada. Apenas o método PR apresentou erros relevantes quando o ângulo do carregamento se aproximou de zero ( $\delta \approx 0^\circ$ ), ocasionados pela formulação proposta em Preston *et al.* (2011), que leva em consideração as tensões de sequência positiva e negativa em ambos terminais da LT monitorada. Assim, quando  $\delta \approx 0^\circ$ , alguns termos da formulação resultam em valores pequenos, que geram erros na localização de faltas (LOPES *et al.*, 2015). Entretanto, para os demais cenários o método mostrou-se preciso, com erros de até 3 km, correspondendo a 1,5% do comprimento da LT.

**Figura 5.11.** Influência do carregamento em algoritmos de 2 terminais: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOLOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012).



**Fonte:** autoria própria.

Percebe-se ainda que os métodos que não consideram o efeito capacitivo, a saber: GG, IZ1, TZ e SH, são robustos ao fluxo de potência da linha, mas são influenciados pela distância da falta, conforme explicado anteriormente, resultando em erros maiores quando a falta ocorre próximos aos terminais da LT. Por outro lado, os algoritmos JJ, PR, IZ2 e MH são mais sensíveis às variações de fluxo de potência. No entanto, o método apresentado por HE, apesar de considerar a capacitância da linha, não foi afetado pelo fluxo de potência, demonstrando mais uma vez a robustez do método.

Nota-se que métodos de JJ, HE, IZ2 e MH apresentaram erros maiores que os obtidos para resistência de falta, sendo de 200 m, 4 m, 30 m e 200 m, respectivamente. Todavia, esses erros são da ordem de um vão de torre típico, o que demonstra a precisão dessas técnicas. Oportuno se faz mencionar que esse nível de precisão é tipicamente obtido por métodos baseados em ondas viajantes (SCHWEITZER, 2004), fato este que demonstra que os métodos fasoriais também podem ser bastante precisos caso os parâmetros da linha monitorada sejam conhecidos sem erros (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013).

Mais uma vez, o método de HE apresentou maior precisão frente aos demais. No entanto, assim como JJ e PR, este algoritmo necessita de dados sincronizados. Com relação aos métodos que estimam o ângulo de sincronismo ( $\theta$ ), IZ1, IZ2 e MH apresentam a mesma precisão para a determinação do ângulo de sincronismo. Porém, em casos reais onde os parâmetros da linha são conhecidos com erros, o método IZ1 apresentaria uma maior precisão nos resultados obtidos, assim como reportado em (LOPES; SILVA, 2016). Destaca-se ainda que o método IZ1 pode apresentar problemas na estimação do ângulo de sincronismo devido ao fato do método usar a função arcoseno, a qual não é capaz de diferenciar ângulos do primeiro ou segundo quadrantes do círculo trigonométrico, ou no terceiro e quarto quadrantes, tornando necessário uma formulação auxiliar para correta determinação do ângulo ( $\theta$ ) (LOPES; SILVA, 2016). Já o método MH, apesar de não considerar a capacitância shunt para a determinação do ângulo, faz uso de um processo iterativo, assim como o método HE, o que pode ser visto pelas concessionárias, como um fator complicador desses métodos, embora confira maior precisão nas estimativas.

## 5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SIR

A relação entre a impedância série total da linha ( $lZ_L$ ) e a impedância de Thévenin, conectada ao terminal ( $Z_S$ ), dada por  $\frac{Z_S}{lZ_L}$ , é conhecida como SIR. As variações de SIR podem influenciar os algoritmos de proteção baseados na impedância e os métodos de localização de faltas baseados na teoria das ondas viajantes, pois influenciam nos valores das contribuições de curto-circuito nas barras, bem como nos padrões de reflexão de ondas eletromagnéticas (SAHA *et al.*, 2010). Todavia entre os trabalhos analisados na literatura, percebe-se que não escarças análises sobre a influência do SIR em métodos baseados em fasores de frequência fundamental, exceto de poucos trabalhos publicados em anos recentes, como o de Lopes *et al.* (2015).

Para a análise do SIR, nesse estudo, a impedância de Thévenin conectada ao terminal local foi variada, resultando em valores de SIR iguais a 0,1, 0,2,..., 0,8, 0,9, 1, 2, 3, ...9 e 10. Os resultados obtidos são ilustrados nas Figuras 5.12 e 5.13, onde o eixo x corresponde a distância de falta ( $d$ ) em km, o eixo y corresponde ao SIR e o eixo z corresponde ao erro absoluto em km, calculado conforme (4.60).

Como apresentado na Figura 5.12, os métodos de um terminal são os mais afetados pela localização da falta, devido ao efeito capacitivo da LT, como já discutido anteriormente, apresentando bons desempenhos quando os erros ocorrem próximos ao terminal local, mesmo em casos de SIR elevados. O método ER não convergiu quando a falta estava localizada a mais de 0,98 p.u. e SIR acima de 7, embora para os demais casos os maiores erros tenham sido da ordem de 7 km, equivalente a 3,5% do comprimento da LT.

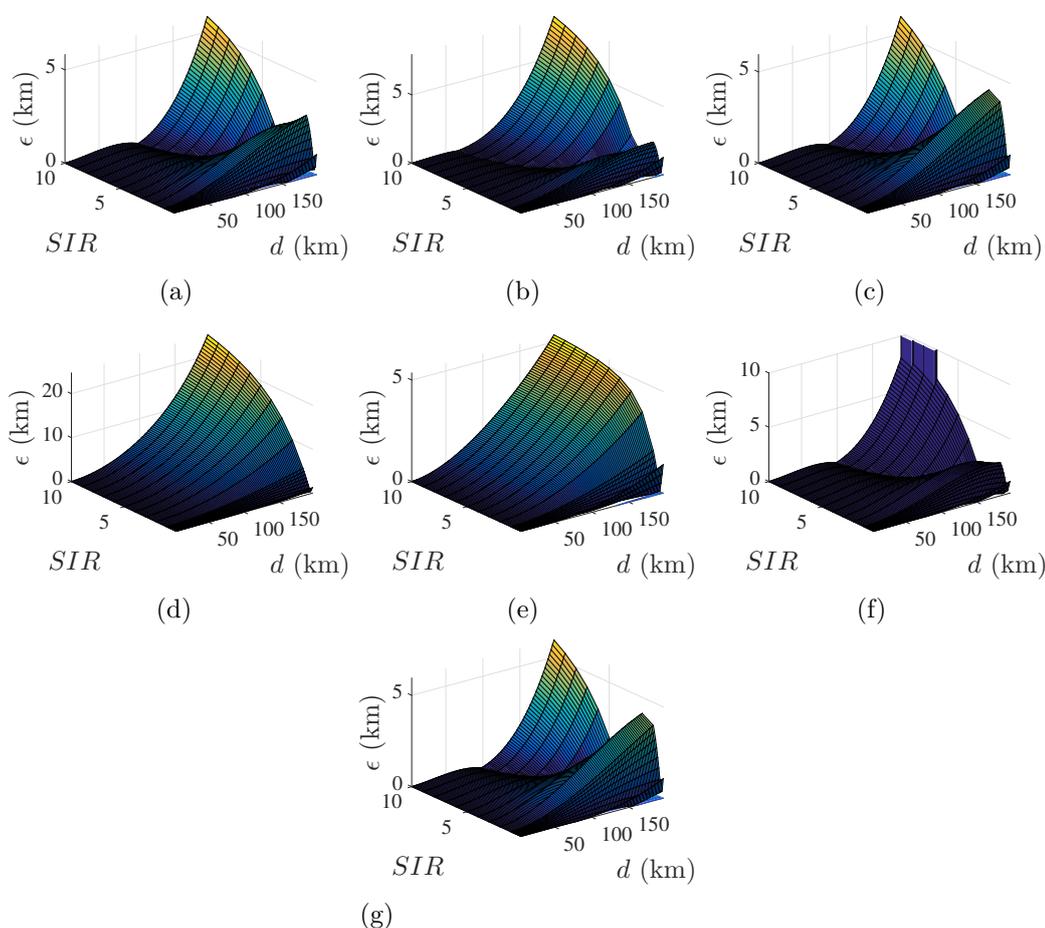
Os métodos IM, RT, TK modificado e WS convergiram para todos os casos, sendo os maiores erros da ordem de 6 km. O mesmo comportamento foi verificado para o método proposto em Takagi (1982). Entretanto, utilizando as grandezas de sequência zero no lugar de grandezas incrementais na formulação, como no método TK zero, foram obtidos erros da ordem de 20 km. De fato, o aumento do SIR para curtos monofásicos reduz o valor da corrente de sequência zero, o que induz erros adicionais nas localizações estimadas.

Todos os métodos de dois terminais apresentaram uma boa precisão para faltas no meio da linha, conforme ilustrado na Figura 5.13. Os piores resultados foram verificados para altos valores de SIR, associados a faltas perto dos terminais. Nesses casos, erros da ordem de 15 km

no método GG, de 10 km para o método TZ, de 7 km para os algoritmos IZ1 e SH, e 5 km para o método PR foram verificados. Dessa forma, nota-se que os piores desempenhos foram verificados para algoritmos que não consideram o efeito capacitivo da LT, cujos desvios não ultrapassaram 15 km equivalente a 7,5% do comprimento da LT.

Cabe ressaltar que o método TZ teve o valor de SIR ajustado em cada simulação. Caso esse ajuste não tivesse sido realizado, os erros encontrados seriam da ordem de 300 km. Portanto, o SIR pode afetar a confiabilidade desse método. Os demais métodos de dois terminais, que consideram o modelo  $\pi$ -exato, os erros foram menores que 100 m, mostrando-se robustos à variação do SIR, mesmo quando seus efeitos são cruzados com situações de diferentes localizações dos defeitos.

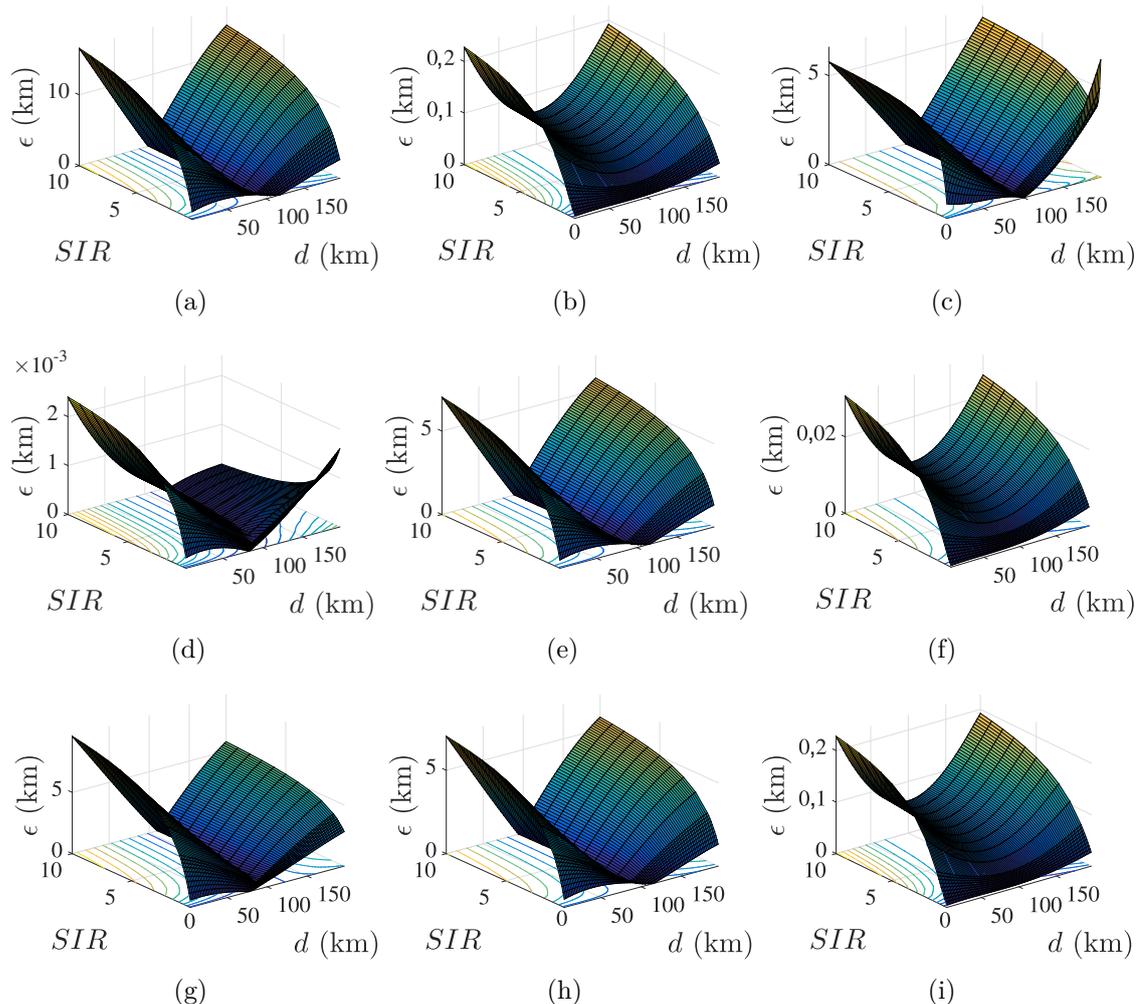
**Figura 5.12.** Influência do SIR em algoritmos de 1 terminal: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983).



**Fonte:** autoria própria.

Como conclusão, tem-se que os métodos de dois terminais se mostraram pouco afetados por variações de SIR, conferindo estimações precisas do ponto de falta independentemente da força das fontes do sistema. Nota-se ainda que alguns algoritmos de um terminal, como os métodos IM, RT, TK, TK modificado e WS, apresentaram erros máximos de magnitude similar aos métodos de dois terminais expondo a precisão dessas técnicas frente as variações do SIR. No entanto, para cenários reais, torna-se necessária a avaliação conjunta de todas as fontes de erros para a escolha da melhor técnica de localização de faltas, de forma que os algoritmos de dois terminais se sobressaem aos de um terminal.

**Figura 5.13.** Influência do SIR em algoritmos de 2 terminais:(a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012).



**Fonte:** autoria própria.

Verificou-se que estas técnicas podem, inclusive, alcançar precisão similar às técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes, desde que os parâmetros da LT monitorada sejam conhecidos sem erros. Devido a imprecisões nos parâmetros da LT decorrentes as aproximações utilizadas no seu cálculo, métodos que não necessitem dos dados da linha apresentam maior robustez frente aos demais.

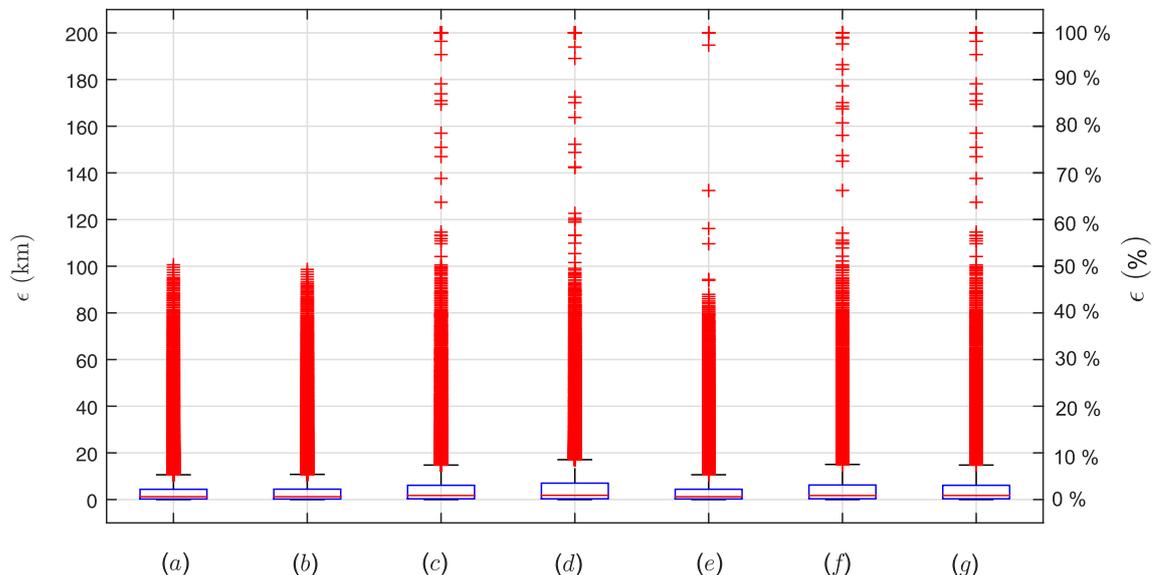
## 5.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi realizada uma análise comparativa do desempenho dos algoritmos de localização de faltas baseados na análise de componentes de frequência fundamental, sob diversas fontes de erros, tornando-se possível identificar os métodos mais precisos, confiáveis e robustos. Para uma avaliação qualitativa dos resultados obtidos, os erros calculados em cada simulação de curtos AT, estão apresentados em forma de gráfico *boxplot* nas Figuras 5.14 e 5.15. Este tipo de gráfico é utilizado para avaliar a distribuição empírica do dados. O *boxplot* é formado por seis índices: o valor máximo representado pela cauda superior; o quartil superior representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha no meio da caixa; o quartil inferior representado pelo limite inferior da caixa; o valor mínimo representado pela cauda inferior; e os *outliers*, que são os valores atípicos que foram desconsiderados nas análises representados pelos traços vermelhos. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam, respectivamente, o erro máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados.

Para melhor representação no gráfico *boxplot*, foi feito um tratamento nos *outliers* de forma que os erros ( $\epsilon$ ), maiores que o comprimento da linha ( $l$ ), tiveram seu valor fixado em  $l$ , que no sistema avaliado corresponde ao comprimento de 200 km.

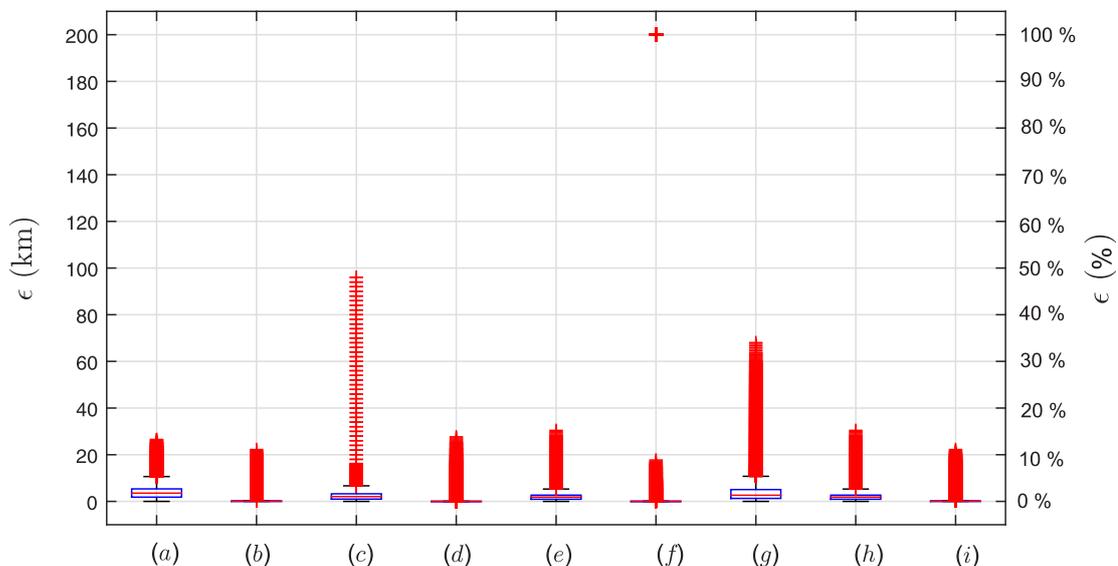
Comparando os gráficos, e pelas análises realizadas ao longo deste capítulo, percebe-se que os algoritmos de dois terminais são irrefutavelmente mais precisos. De fato, estes métodos não são susceptíveis a erros por conta da resistência de falta, carregamento e SIR, e só tiveram erros consideráveis relacionados a incertezas dos parâmetros de linha, o que já era esperado, visto que a imprecisão nos parâmetros da linha foi extrapolado para valores não usuais. Além do mais, é possível combinar essas técnicas com a métodos de estimação de parâmetros *on-line*, mitigando assim estas fonte de imprecisões para as localizações de falta.

**Figura 5.14.** Erros verificados na localização de faltas AT: (a) Método IM (ZIEGLER, 2010); (b) Método RT (ÇAPAR; ARSOY, 2015); (c) Método TK (TAKAGI, 1982); (d) Método TK zero; (e) Método TK modificado; (f) Método ER (ERIKSSON *et al.*, 1985); (g) Método WS (WISZNIEWSKI, 1983).



**Fonte:** autoria própria.

**Figura 5.15.** Erros verificados na localização de faltas AT: (a) Método GG (GIRGS *et al.*, 1992); (b) Método JJ (JOHNS; JAMALI, 1990); (c) Método PR (PRESTON *et al.*, 2011); (d) Método HE (HE *et al.*, 2011); (e) Método IZ1 (IZYKOWSKI *et al.*, 2005); (f) Método IZ2 (IZYKOWSKI *et al.*, 2010); (g) Método TZ (TZIOUVARAS *et al.*, 2001); (h) Método SH (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2013); (i) Método MH (D.MOHAMED *et al.*, 2012).



**Fonte:** autoria própria.

Dentre os métodos de dois terminais analisados os métodos JJ, HE, IZ2 e MH apresentaram os melhores desempenhos, entretanto JJ e HE requerem dados sincronizados, além disso HE e MH precisam de um processo iterativo para localização do defeito, o que consiste em desvantagens dos algoritmos do ponto de vista computacional. O método PR, embora robusto quanto a incertezas nos parâmetros de linha, para alguns cenários de carregamento analisados ( $\delta \approx 0^\circ$ ), apresentou erros consideráveis, enquanto que o método IZ1 apresentou robustez em todos os cenários analisados, embora não se tenha sido avaliado diferentes ângulos de sincronismo, o que tornaria necessário algoritmos adicionais para determinação do quadrante onde o ângulo ( $\theta$ ) se encontra, como já mencionado anteriormente.

Dos resultados obtidos observa-se ainda que os algoritmos mais simples RT e IM, apresentaram melhores desempenho frente às variações de carregamento do sistema, enquanto todos os demais algoritmos de um terminal apresentaram zonas de instabilidade nas quais não convergiram. De forma geral, estes métodos também apresentaram bons desempenhos para as variações do SIR do sistema, equiparando-se aos métodos de dois terminais. Contudo a imprecisão nos parâmetros de linha gerou grandes desvios na localização estimada por esses algoritmos.

Além disso, pelas análises realizadas, observa-se comportamento similar para os demais curtos assimétricos. Para os curtos-circuitos simétricos, alguns algoritmos não convergem e outros necessitam de uma etapa de classificação, assim como os de um terminal. Todavia, esse tipo de curto-circuito tem menor frequência nos sistemas elétricos (SAHA *et al.*, 2010).

Por fim, ressalta-se que os métodos implementados possuem formulações simples, não necessitam de altas taxas de amostragem e requerem em geral pouco esforço computacional. Mesmo os métodos que fazem uso de processos iterativos, foi mantido o número máximo de iterações menor que 10, reduzindo o tempo de processamento dos mesmos. Ademais, alguns dos algoritmos analisados podem ser aplicados a registros não sincronizados, mostrando vantagem na aplicação dessas técnicas.

# CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica de dezesseis algoritmos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental, sob diversas fontes de erros importantes para o desempenho dos algoritmos, como a precisão nos parâmetros de linha, carregamento do sistema, *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR), impedância e tipo de falta.

Inicialmente, realizou-se uma revisão teórica, buscando introduzir os princípios básicos aplicados aos métodos de localização de faltas, de forma a possibilitar o seu entendimento, bem como dos resultados obtidos. O ATP foi utilizado para simular os diferentes cenários de falta. Para as análises foi usada a solução de regime permanente gerada no ATP, evitando-se dessa forma erros provenientes da estimação fasorial, e propiciando uma melhor análise dos desempenho dos métodos.

Observa-se que os algoritmos de dois terminais analisados não foram influenciados significativamente pela resistência de falta ou carregamento, diferentemente do que ocorreu com os algoritmos que utilizam dados de apenas um terminal da LT. Como esperado, uma vez que esta técnicas desprezam o efeito da resistência de falta em sua formulação, e assumem o sistema como sendo homogêneo, foram identificados vários cenários para os quais os métodos não convergiram corretamente.

Percebe-se das análises realizadas que os métodos de um terminal têm comportamento similar para todos os tipos de curtos analisados. No entanto, estes algoritmos necessitam de um método de classificação de faltas para a correta determinação dos dados de entrada. Já entre as técnicas que analisam dados de dois terminais, as que usam dados de sequência negativa ou zero, precisam de ajustes na formulação ou da substituição de grandezas de sequência por grandezas incrementais para viabilizar a localização da falta, necessitando de dados de pré-falta.

Uma limitação das técnicas estudadas, com exceção ao método PR, está relacionada a imprecisões de parâmetros da LT. Por isso, nota-se um foco em pesquisas relacionadas a técnicas que não necessitem de dados da LT, uma vez que podem ocasionar desvios significativos na localização em casos reais.

Em relação ao SIR, apesar deste gerar maiores erros na localização de falta dos algoritmos de dois terminais, a magnitude dos erros obtidos pelos métodos de um terminal foram similares. Ademais, para aqueles algoritmos que não consideram o efeito capacitivo da linha, vale ressaltar que a distância de falta também exerce influência na precisão, fazendo a precisão das estimativas variar a depender do ponto de falta. É esperado que esses algoritmos apresentem um melhor desempenho se o efeito capacitivo da linha for eliminado antes da aplicação dos métodos.

Como era esperado, os algoritmos baseados no modelo  $\pi$ -exato de linhas apresentaram uma maior precisão dentre os métodos avaliados, pois contemplam a capacitância shunt da LT. Porém, dos estudos realizados, conclui-se que alguns métodos exigem limiares para identificação das estimativas corretas de falta, pois recaem na solução de equações de segundo grau. Assim, tanto a escolha desses limiares como as estimativas iniciais usadas em métodos que requerem processos iterativos também necessitam de estudos para viabilizar localizações confiáveis no mundo real.

Dos resultados obtidos, percebe-se que, quando aplicados corretamente, os métodos de localização de faltas baseados na análise de componentes da frequência fundamental, baseados em dados sincronizados ou não, são métodos que garantem precisão satisfatória e que requerem pouco esforço computacional para sua implementação, visto que não necessitam de elevadas taxas de amostragem, nem de formulações matemáticas sofisticadas, apresentando, portanto, menor custo agregado quando comparados outras técnicas em evidência no mercado. Ainda assim, acredita-se que as limitações tecnológicas do passado não mais são consideradas críticas na atualidade, o que dá margem para outras pesquisas futuras no sentido de otimizar ainda mais as soluções existentes.

Diante do contexto supracitado, para trabalhos futuros, propõe-se:

- Estudos envolvendo as demais técnicas de localização de falta, de outras naturezas, como as baseadas em ondas viajantes, inteligência artificial e componentes de alta frequência (análise espectral);

- Estudos da avaliação do desempenho dos algoritmos após a remoção do efeito capacitivo através da compensação em série;
- Análise de casos de falta com registros reais;
- Criação de metodologia para aplicação de soluções híbridas, a partir da combinação de métodos com diferentes potencialidades;
- Avaliação do impacto de transformadores para instrumento, desenvolvendo soluções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, M.; OTSUZUKI, N.; EMURA, T.; TAKEUCHI, M. Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines. In: *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 259–268. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 36.
- ALMEIDA, W. G.; FREITAS, F. D. *Circuitos Polifásicos*. 1. ed. Brasília, Brasil: Finatec, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 10.
- ALVES, W. M. *Adaptação do Método de Wiszniewski para Agregar Maior Exatidão à Localização de Falhas em Linhas de Transmissão com Dados de Um Terminal*. 128 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, dez. 2008. Citado na página 27.
- ANDRADE, V. D.; SORRENTINO, E. Typical expected values of the fault resistance in power systems. In: *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T D-LA)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 602–609. Citado na página 60.
- ÇAPAR, A.; ARSOY, A. B. Evaluating accuracy of fault location algorithms based on terminal current and voltage data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, jun. 2015. Citado 15 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 26, 36, 39, 40, 59, 61, 64, 69, 74, 78, and 81.
- BO, Z. Q.; WELLER, G.; REDFERN, M. A. Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, v. 146, n. 1, p. 73–79, Jan 1999. ISSN 1350-2360. Citado 3 vezes nas páginas 4, 33, and 36.
- BRAHMA, S. M. Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 1325–1331, April 2005. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 36.
- BUNYAGUL, T.; CROSSLEY, P. A.; GALE, P. Design and evaluation of an overcurrent relay suitable for operation with measurement current transformers. In: *2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 201–204. ISSN 0537-9989. Citado na página 18.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Prospecção tecnológica do setor elétrico brasileiro-Evolução tecnológica nacional no segmento de transmissão de energia elétrica*. Brasília, 2017. v. 5-8. Disponível em: <<https://energia.cgee.org.br>>. Citado na página 3.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Real-time classification of transmission line faults based on maximal overlap discrete wavelet transform. In: *PES T D 2012*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–8. ISSN 2160-8563. Citado na página 18.

- DAWIDOWSKI, P.; BALCEREK, P.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. Atp-empt investigation of two-end synchronized fault location on transmission lines not requiring line parameters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS,. Vancouver, Canada, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 and 36.
- D.MOHAMED; HOUARI, S.; TAHAR, B. Accurate fault location algorithm on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements. *Serbia Journal of Electrical Engineering*, jun. 2012. Citado 14 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 30, 36, 54, 60, 62, 66, 72, 75, 79, and 81.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solutions of electromagnetic transients in single and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 388–399, abr. 1969. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 46.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Projeção da Demanda de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 2.
- ERIKSSON, L.; SAHA, M.; G.D.ROCKEFELLER. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, fev. 1985. Citado 15 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 27, 36, 42, 43, 59, 61, 64, 70, 74, 78, and 81.
- FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods. In: *IEEE PES T D 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–9. ISSN 2160-8555. Citado 3 vezes nas páginas 4, 33, and 36.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jun. 1918. Citado na página 7.
- GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. Fault location based on travelling waves. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. [S.l.], 1993. p. 54–59. Citado 2 vezes nas páginas 31 and 32.
- GAMA, J. R.; E.J.LEITE; LOPES, F. V. Parametric analysis of two-terminal fault location methods based on unsynchronized data. *Simpósio Brasileiro de Engenharia Elétrica*, mai. 2018. Citado na página 29.
- GILANY, M.; IBRAHIM, D. k.; ELDIN, E. S. T. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 82–89, Jan 2007. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 32 and 36.
- GIRGS, A.; D.HART; PETERSON, W. A new fault location technique for two- and three terminal lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, jan. 1992. Citado 15 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 28, 36, 44, 55, 60, 62, 65, 71, 75, 79, and 81.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. USA: Cengage Learning, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 11, 12, 13, and 73.
- HAGH, M. T.; RAZI, K.; TAGHIZADEH, H. Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network. In: *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1109–1114. ISSN 1947-1262. Citado 2 vezes nas páginas 34 and 36.

- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. *Modified Cosine Filters*. Raleigh, NC: ABB Power T&D Company Inc., 2000. U.S. Patent 6,154,687. Citado na página 15.
- HE, Z. Y.; MAI, R. K.; HE, W.; QIAN, Q. Q. Phasor-measurement-unit-based transmission line fault location estimator under dynamic conditions. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 11, p. 1183–1191, Nov 2011. ISSN 1751-8687. Citado 16 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 28, 36, 48, 55, 60, 62, 65, 70, 71, 75, 79, and 81.
- HUANG, S. F.; WANG, X. G. A fault location scheme based on spectrum characteristic of fault-generated high-frequency transient signals. In: *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 1932-5517. Citado 2 vezes nas páginas 33 and 36.
- IDRIS, M. H.; MUSTAFA, M. W.; YATIM, Y. Effective two-terminal single line to ground fault location algorithm. In: *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 246–251. Citado 2 vezes nas páginas 28 and 36.
- IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. *Basic Engineering Circuit Analysis*. 11. ed. United States of America: Siemens, 1939. Citado na página 13.
- IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E.; BALCEREK, P.; FULCZYK, M.; SAHA, M. M. Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 1, p. 72–80, Jan 2010. ISSN 0885-8977. Citado 18 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 14, 23, 29, 36, 50, 51, 54, 60, 62, 63, 72, 75, 79, and 81.
- IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E.; SAHA, M. Post-fault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines. In: *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–7. Citado 15 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 29, 36, 49, 60, 62, 65, 66, 71, 75, 79, and 81.
- JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. In: . [S.l.: s.n.], 1990. v. 137, n. 6, p. 395–402. ISSN 0143-7046. Citado 14 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 46, 48, 57, 60, 62, 65, 71, 75, 79, and 81.
- JOHNS, A. T.; SALMAN, S. K. *Digital Protection for Power Systems*. Herts, United Kingdom: Peter Peregrinus Ltd., 1995. (IEE Power Series, 15). Citado 5 vezes nas páginas 15, 27, 28, 36, and 51.
- KASZTENNY, B.; CAMBELL, B.; MAZEREEUW, J. Phase selection for single-pole tripping weak infeed conditions and cross-country faults. In: *27TH ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE*. Spokane, 2000. Citado na página 18.
- LAHMAR, M.; LIAO, Y. Accurate methods for estimating transmission line parameters using synchronized and unsynchronized data. In: *2017 International Energy and Sustainability Conference (IESC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 68 and 70.
- LOPES, F.; SILVA, K. M. Localização de faltas em linhas de transmissão usando dados não-sincronizados de dois terminais. *Simpósio Brasileiro de Engenharia Elétrica*, 2016. Citado na página 76.

- LOPES, F. V. *Localização de faltas em tempo real baseada na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado 8 vezes nas páginas 4, 11, 12, 16, 17, 41, 58, and 67.
- LOPES, F. V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 5, p. 2296–2298, Oct 2016. ISSN 0885-8977. Citado na página 32.
- LOPES, F. V.; DANTAS, K. M.; SILVA, K. M.; COSTA, F. B. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 2, p. 873–880, April 2018. ISSN 0885-8977. Citado na página 32.
- LOPES, F. V.; FERNANDES, D.; NEVES, W. L. A. A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, July 2013. ISSN 0885-8977. Citado na página 18.
- LOPES, F. V.; MELO, P. M. Y.; FERNANDES, J.; NEVES, A. A. real-time evaluation of pmu-based fault locators. international conference on power systems transients. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Vancouver, Canada, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 and 47.
- LOPES, F. V.; SILVAS, K. M.; KUSSEL, B. F. A. Parametric analysis of two-terminal impedance-based fault location methods. Cavtat, Croatia, jun. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 29, 38, 73, 75, and 77.
- MANASSERO, G.; SENGER, E. C.; NAKAGOMI, R. M.; PELLINI, E. L.; RODRIGUES, E. C. N. Fault-location system for multiterminal transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1418–1426, July 2010. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 36.
- MCLAREN, P. G.; RAJENDRA, S. Travelling-wave techniques applied to the protection of teed circuits:- principle of travelling-wave techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 12, p. 3544–3550, Dec 1985. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 31 and 36.
- NAGASAWA, T.; ABE, M.; OTSUZUKI, N.; EMURA, T.; JIKIHARA, Y.; TAKEUCHI, M. Development of a new fault location algorithm for multi-terminal two parallel transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1516–1532, July 1992. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 36.
- OLIVEIRA Ângelo Rocha de. *Redes Neurais Artificiais Aplicadas na Detecção, Classificação e Localização de Defeitos em Linhas de Transmissão*. 132 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, ago. 2005. Citado na página 34.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 2.

- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Plano de Ampliações e Reforços (PAR) 2017-2019*. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao>>. Citado na página 24.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *SINDAT - Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do*. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 24.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007. Citado na página 2.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2. ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Inc., 2009. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 60.
- PRESTON, G.; RADOJEVIC, Z. M.; KIM, C. H.; TERZIJA, V. New settings-free fault location algorithm based on synchronised sampling. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 3, p. 376–383, March 2011. ISSN 1751-8687. Citado 16 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 28, 36, 47, 60, 62, 65, 66, 70, 71, 75, 79, and 81.
- RADOJEVIC, Z. M.; KIM, C. H.; POPOV, M.; G.PRESTON; TERZIJA, V. New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS. Kyoto, Japan., 2009. Citado 2 vezes nas páginas 28 and 36.
- REDDY, M. J. B.; MOHANTA, D. K. Performance evaluation of an adaptive-network-based fuzzy inference system approach for location of faults on transmission lines using monte carlo simulation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v. 16, n. 4, p. 909–919, Aug 2008. ISSN 1063-6706. Citado na página 34.
- REPORT, A. C. Bibliography and summary of fault location methods [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, v. 74, n. 3, p. 1423–1428, Jan 1955. ISSN 0097-2460. Citado na página 25.
- SAHA, M.; ROSOŁOWSKI, E. Atp-emptp study of current differential protection with synchronization and fault location functions. international conference on power systems transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, jul. 2013. Citado 21 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 14, 25, 29, 31, 36, 38, 53, 55, 60, 62, 66, 67, 72, 75, 76, 79, and 81.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London. [S.l.]: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). Citado 16 vezes nas páginas 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 16, 17, 18, 22, 26, 61, 73, 77, and 82.
- SCHWEITZER, E. O. Review of impedance-based fault locating experience. In: 15TH ANNUAL WESTERN PROTECTIVE RELAY CONFERENCE. Spokane, USA, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 25.
- SCHWEITZER, E. O. Introduction to symmetrical components. In: GEORGIA TECH PROTECTIVE RELAYING CONFERENCE. Georgia, USA, 2004. Citado 6 vezes nas páginas 7, 23, 25, 30, 31, and 76.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 95–110. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3, and 31.

- SILVA, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado na página 15.
- SILVA, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, abr. 2009. Citado 3 vezes nas páginas 16, 18, and 20.
- SILVEIRA, P. M.; R. SEARA; ZURN, H. H. Localização de faltas por ondas viajantes - uma nova abordagem em decomposição wavelet. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão Engenharia Elétrica*, out. 2001. Citado na página 31.
- SIVANAGARAJU, G.; CHAKRABARTI, S.; SRIVASTAVA, S. C. Uncertainty in transmission line parameters: Estimation and impact on line current differential protection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 63, n. 6, p. 1496–1504, June 2014. ISSN 0018-9456. Citado na página 70.
- SOUZA, W. M. de; COSTA, C. A. B.; JR, I. H. P.; PEREIRA, C. S. Sistema de localização automática de faltas em linhas de transmissão utilizando dados de dois terminais - experiência cemig. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (XVIII SNPTEE). Curitiba, Brasil, 2005. Citado na página 4.
- TAKAGI. In: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON (IEE) DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION. Amsterdam, Netherlands, 1982. Citado 22 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 13, 14, 23, 26, 27, 36, 40, 41, 43, 44, 59, 61, 64, 69, 74, 77, 78, and 81.
- TEKLIĆ, L.; FILIPOVIĆ-GRUJIĆ, B.; PAVIĆIĆ, I. Artificial neural network approach for locating faults in power transmission system. In: *Eurocon 2013*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1425–1430. Citado 3 vezes nas páginas 4, 34, and 36.
- TESLA, N. *Nikola Tesla on his Work with Alternating Currents*. [S.l.]: Twenty First Century Books, 2002. Citado na página 25.
- TZIOUVARAS, D. A.; ROBERTS, J. B.; BENMOUYAL, G. New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. In: *2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 395–398. ISSN 0537-9989. Citado 15 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 29, 36, 51, 55, 60, 62, 66, 72, 75, 79, and 81.
- WANG, S.-P.; ZHAO, D.-M.; SHANG, L.-Q.; ZHU, D.-D. A new false root identification method based on two terminal fault location algorithm for high voltage transmission line. In: *2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 10–14. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 36.
- WENTWORTH, S. M. *Eletromagnetismo aplicado: Abordagem antecipada das linhas de transmissão*. São Paulo: Bookman Editora., 2009. Citado na página 12.
- WISZNIEWSKI, A. Accurate fault impedance locating algorithm. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, nov. 1983. Citado 14 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 27, 36, 43, 59, 61, 64, 70, 74, 78, and 81.

- WU, R.; JIAO, Z.; LIU, T.; DONG, X.; LEI, X. A new method to improve fault location accuracy in transmission line based on fuzzy inference data fusion technology. In: *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1486–1490. Citado 2 vezes nas páginas 34 and 36.
- YIBIN, X.; WAI, D. C. T.; KEERTHIPALA, W. W. L. A new technique using wavelet analysis for fault location. In: *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434)*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 231–234. ISSN 0537-9989. Citado 2 vezes nas páginas 27 and 36.
- YU, C. An unsynchronized measurements correction method for two-terminal fault-location problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1325–1333, July 2010. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 36.
- ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Application*. 4. ed. Berlin, Germany: Siemens, 2010. Citado 15 vezes nas páginas ii, iv, v, vi, 18, 26, 36, 39, 59, 61, 64, 69, 74, 78, and 81.