

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO HARTSTEIN SALIM

**NOVOS DESENVOLVIMENTOS NA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA
FUNDAMENTADA NA IMPEDÂNCIA**

Porto Alegre
2008

RODRIGO HARTSTEIN SALIM

**NOVOS DESENVOLVIMENTOS NA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA
FUNDAMENTADA NA IMPEDÂNCIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre
2008

RODRIGO HARTSTEIN SALIM

**NOVOS DESENVOLVIMENTOS NA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA
FUNDAMENTADA NA IMPEDÂNCIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS
Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University
– Blacksburg, EUA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Djalma Mosqueira Falcão, UFRJ
Doutor pela University Of Manchester Institute Of Science And Technology –
Manchester, Inglaterra

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS
Doutor pela Chalmers University Of Technology – Göteborg, Suécia

Prof. Dr. Rodrigo Andrade Ramos, USP-EESC
Doutor pela Universidade de São Paulo – São Carlos, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre, Agosto de 2008.

*Jede individuelle Handlung, jede individuelle Denkweise erregt Schauer:
es ist gar nicht auszurechnen, was gerade die selteneren, ausgesuchteren,
ursprünglicheren Geister im ganzen Verlauf der Geschichte dadurch
gelitten haben müssen, dass sie immer als die bösen und gefährlichen
empfunden wurden, ja dass sie sich selber so empfanden. Unter der
Herrschaft der Sittlichkeit der Sitte hat die Originalität jeder Art ein
böses Gewissen bekommen: bis diesen Augenblick ist der Himmel der
Besten noch dadurch verdüsterter, als er sein müsste.*

Friedrich Wilhelm Nietzsche, 1881.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Karen Rezende Caino de Oliveira: à namorada; à mulher; à amiga; à engenheira; e à colega de trabalho.

AGRADECIMENTOS

A todos os cidadãos brasileiros que pagam os seus impostos e contribuem para a manutenção de uma universidade pública, gratuita, e de qualidade.

Aos meus pais, Paulo Salim e Rosana Hartstein, pelo apoio e suporte dados em toda a minha vida, pela confiança depositada em mim, e pela paciência e compreensão que tiveram nos últimos anos.

À Karen Rezende Caino de Oliveira, pelo sincero e incondicional companheirismo nestes últimos três anos: um exemplo de mulher e um exemplo de vida.

Ao Prof. Arturo Suman Bretas pela confiança depositada em mim e pelos quatro ótimos anos de trabalho e convivência que tivemos juntos.

À minha irmã, Patricia Hartstein Salim, e à minha avó, Therezinha Hartstein, pelo carinho e compreensão.

Ao meu avô, Emílio Salim, e ao meu irmão, Rafael Salim, pela amizade e carinho para comigo.

Aos amigos que fiz durante a minha vida e até hoje estão presentes: Thomás e Adriano Alimena Del Grande, Elisandra Pavoni Lazzaretti, Márcio e Marcelo Limberger, Mariana Resener, Mario Orlando Oliveira, Renato Ferraz. Aos amigos Mario Oliveira e Renato Ferraz um agradecimento especial por terem agüentado o meu estresse nos meses que antecederam a defesa desta dissertação.

Aos colegas do LASEP pelas oportunidades de trabalho em conjunto, conversas, mates, ... : Mario Orlando Oliveira, Renato Ferraz, Mariana Resener, Denise Pivatto Marzec, Roberto Chouhy Leborgne, André Darós Filomena, Martin Cruz Paz e Roberto José Cabral. Ao colega Miguel Moreto um agradecimento especial também pela disponibilização de muitas das figuras que aparecem no texto.

Ao PPGEE e todos os seus professores, pela oportunidade de desenvolvimento dos meus trabalhos, em especial aos Profs. Drs. Alexandre Sanfelice Bazanella e Romeu Reginatto.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico, o CNPq, pela provisão da bolsa de mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, por manterem o Departamento funcionando: Manoel Eduardo Hoffmeister, Miriam Adriana de Oliveira Rosek, José Roberto Vieira Farias, Irani Jurema Gomes, Mirana Nunes e Paula Elisandra.

Às funcionárias da Biblioteca Elyseu Paglioli pelo auxílio sempre que solicitado: Silvia Catarina Rossi, Vera Lúcia Fagundes Longaray, June Magda Rosa Scharnberg.

RESUMO

Apesar do crescente desenvolvimento das metodologias de localização de faltas fundamentadas na impedância para sistemas de distribuição de energia elétrica nas últimas décadas, alguns aspectos ainda carecem de progressos, especialmente frente à crescente necessidade de aumento da qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores. Um destes aspectos diz respeito à consideração da capacitância das linhas de distribuição, efeito nunca antes considerado para este fim pelas metodologias baseadas em impedância aparente. Assim sendo, o presente trabalho apresenta novos desenvolvimentos relativos à consideração do efeito capacitivo para as metodologias de localização de faltas fundamentadas na impedância para sistemas de distribuição de energia elétrica. O principal desenvolvimento apresentado é um novo equacionamento para fins de localização de faltas, que torna necessária a apresentação de outro desenvolvimento, o de um algoritmo de localização de faltas que considere a capacitância da linha. As novas equações são apresentadas para todos os tipos de faltas e constituem-se de equações polinomiais de segunda ordem em relação ao local da falta. De forma a entender a resposta destas equações frente a diferentes casos de faltas e determinar qual a solução fisicamente correta destas equações, as mesmas são analisadas sob três pontos de vista, a saber, matemático, físico, e numérico. Inicialmente estas equações são analisadas de forma analítica considerando-se faltas em um mesmo local, mas com resistências diferentes. Posteriormente a mesma análise é realizada numericamente através de simulações computacionais. Os desenvolvimentos propostos são também submetidos a testes de faltas, simuladas computacionalmente em um sistema sem laterais ou cargas intermediárias. Os resultados obtidos são comparados frente a resultados obtidos também para outras metodologias que constituem atualmente o estado da arte em localização de faltas fundamentada na impedância para sistemas de distribuição de energia elétrica. Através destes resultados é possível mostrar a grande influência que o efeito capacitivo possui nestas metodologias, mesmo em sistemas aéreos de distribuição, e elucidar as grandes melhorias obtidas através dos desenvolvimentos propostos.

Palavras-chave: Localização de faltas, impedância aparente, efeito capacitivo, sistemas de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

Despite the increasing development of impedance-based fault location techniques for electric power distribution systems in the last decades, some aspects still require to progress, especially with the increasing necessity of power quality enhancement. One of these aspects regards to the distribution line shunt admittance consideration, effect that has never been considered before by the impedance-based fault location methods for power distribution systems. In this way, this work presents further improvements regarding the capacitive effect consideration for impedance-based fault location methods for power distribution systems. The main improvement presented is the development of new fault location equations, which yield the necessity of another improvement, a modified fault location algorithm that also considers the line shunt admittance. The new equations are presented for all fault types and are constituted by second-order polynomials in relation to the fault location. In order to understand the response from these equations regarding different fault situations and determine which solution is the physically feasible one, these equations are analyzed from three different points of view, i.e., mathematical, physical, and numerical. First, the developed equations are analytically analyzed considering faults in one location with different fault resistances. After, the same analysis is numerically carried out through computational simulations. The performance of the proposed improvements are also evaluated through computational simulations of faults in a power distribution system without laterals or intermediate loads. The obtained results are compared with results from the current state-of-the-art impedance-based fault location methodologies for power distribution systems. Through these results it is possible to show the great effect that the line shunt admittance, even in aerial distribution systems, has on the existing fault location methodologies and also the great improvements brought by the proposed developments.

Keywords: fault location, apparent impedance, capacitive effect, power distribution systems.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS	16
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	19
1.2 Laterais e Cargas Intermediárias	20
1.3 Estrutura do Trabalho	20
2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	22
2.1 Método de Takagi <i>et al.</i> (1982b) para Linhas Curtas	23
2.2 Método de Srinivasan <i>et al.</i> (1989)	25
2.3 Método de Novosel <i>et al.</i> (1998)	28
2.4 Método de Das <i>et al.</i> (1998)	31
2.5 Método de Zhu <i>et al.</i> (1997)	34
2.5.1 Método de Lee <i>et al.</i> (2004)	37
2.5.2 Extensão do Método de Lee <i>et al.</i> (2004)	37
2.6 Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007)	38
3 DESENVOLVIMENTOS PROPOSTOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS FUNDAMENTADA NA IMPEDÂNCIA	42
3.1 Equacionamento Proposto Considerando a Capacitância da Linha	42
3.1.1 Falta Fase-Terra	43
3.1.2 Falta Fase-Fase Terra	45
3.1.3 Falta Trifásica-Terra	47
3.1.4 Faltas à Terra	49
3.1.5 Falta Fase-Fase	50
3.1.6 Desconsideração do Efeito Capacitivo	51
3.2 Algoritmo Proposto de Localização de Faltas	52
3.2.1 Estimativa Inicial da Corrente de Falta	53
3.2.2 Determinação da Solução Fisicamente Correta	54

4	ANÁLISE DA EQUAÇÃO GERAL DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS À TERRA	55
4.1	Análise Matemática das Raízes	55
4.1.1	Raízes Complexas Conjugadas	57
4.1.2	Raízes Reais e Iguais	57
4.1.3	Raízes Reais e Distintas	58
4.2	Análise Física das Raízes	58
4.2.1	Condição I – $R_F \approx 0$	59
4.2.2	Condição II – $R_F \ll Z_{Load} $	60
4.2.3	Condição III – $R_F \gg Z_{Load} $	63
4.2.4	Condição IV – $R_F \approx Z_{Load} $	65
4.2.5	Efeito do Local da Falta	67
4.2.6	Faltas Polifásicas	70
4.3	Análise Numérica das Raízes	77
4.3.1	Caso I – Faltas Monofásicas Próximas ao Terminal Local	77
4.3.2	Caso II – Faltas Monofásicas Próximas ao Terminal Local	80
4.3.3	Caso III – Faltas Monofásicas Longínquas ao Terminal Local	80
4.3.4	Caso IV – Faltas Bifásicas Próximas ao Terminal Local	82
4.3.5	Caso V – Faltas Trifásicas Próximas ao Terminal Local	86
4.4	Determinação da Raiz Referente ao Local da Falta	86
4.5	Conclusões	89
5	ANÁLISE DA EQUAÇÃO GERAL DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS ENTRE FASES	91
5.1	Análise Matemática das Raízes	91
5.1.1	Raízes Complexas Conjugadas	92
5.1.2	Raízes Reais e Iguais	92
5.1.3	Raízes Reais e Distintas	92
5.2	Análise Física das Raízes	93
5.2.1	Condição I – $R_F \approx 0$	93
5.2.2	Condição II – $R_F \ll Z_{Load} $	95
5.2.3	Condição III – $R_F \gg Z_{Load} $	99
5.2.4	Condição IV – $R_F \approx Z_{Load} $	100
5.2.5	Efeito do Local da Falta	102
5.3	Análise Numérica das Raízes	104
5.3.1	Caso I – Faltas entre Fases Próximas ao Terminal Local	105
5.3.2	Caso II – Faltas entre Fases Próximas ao Terminal Local	106
5.3.3	Caso III – Faltas entre Fases Longínquas ao Terminal Local	107
5.4	Determinação da Raiz Referente ao Local da Falta	107
5.5	Conclusões	110
6	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	111
6.1	Estudo de caso	111
6.2	Resultados – Método de Lee <i>et al.</i> (2004)	112
6.2.1	Influência da Resistência da Falta	112
6.2.2	Influência da Distância da Falta	116
6.2.3	Influência do Tipo da Falta	117
6.2.4	Influência da Capacitância da Linha	118

6.2.5	Influência do Desequilíbrio da Carga	119
6.2.6	Análise Geral	120
6.3	Resultados – Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007)	120
6.3.1	Influência da Resistência da Falta	122
6.3.2	Influência da Distância da Falta	122
6.3.3	Influência do Tipo da Falta	123
6.3.4	Influência da Capacitância da Linha	123
6.3.5	Influência do Desequilíbrio da Carga	124
6.3.6	Análise Geral	125
6.4	Resultados – Desenvolvimentos Propostos	125
6.4.1	Influência da Resistência da Falta	126
6.4.2	Influência da Distância da Falta	126
6.4.3	Influência do Tipo da Falta	131
6.4.4	Influência da Estimativa Inicial da Corrente de Falta	131
6.4.5	Influência do Desequilíbrio da Carga	132
6.4.6	Análise Geral	135
6.5	Comparação das Metodologias	136
7	CONCLUSÕES	142
7.1	Trabalhos Futuros	144
	REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE A	ESTIMATIVA DE R_F PARA POSSÍVEIS SOLUÇÕES COMPLEXAS DA EGFT MONOFÁSICA	149
APÊNDICE B	DESCRIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS UTILIZADOS	151
B.1	Sistema I	151
B.2	Sistema II	152
APÊNDICE C	DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DE SUPORTE IMPLEMENTADOS	155
C.1	F-Sim – Ferramenta Automática de Simulação de Faltas para ATP e EMTP-RV	155
C.2	Estimação de fasores	156

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	Circuitos equivalentes de uma falta (TAKAGI et al., 1982b).	23
2.2	Linha de Transmissão em Falta com Carga Equivalente (SRINIVASAN; ST.-JACQUES, 1989).	26
2.3	Circuitos equivalentes de uma falta (NOVOSEL et al., 1998).	28
2.4	Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição em Falta (DAS, 1998).	31
2.5	Falta Fase-Terra em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997).	34
2.6	Atualização das Tensões e Correntes medidas na Subestação (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997).	36
2.7	Falta Fase-Terra em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (CHOI et al., 2004).	39
3.1	Linha de distribuição de energia elétrica	42
3.2	Falta Fase-Terra	44
3.3	Falta Fase-Fase Terra	45
3.4	Falta Trifásica à Terra	47
3.5	Falta Fase-Fase	50
3.6	Algoritmo Modificado de Localização de Falhas	52
4.1	Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.	59
4.2	Queda de tensão em uma linha de distribuição de energia elétrica.	63
4.3	Representação fasorial das tensões terminais de um SDEE durante a ocorrência de faltas em sistemas aterrados (BOLLEN, 2000; BOLLEN; ZHANG, 2003).	72
4.4	Variação das diferenças angulares presentes na EGFT em função da resistência de falta – Caso I.	78
4.5	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso I.	79
4.6	Variação das diferenças angulares presentes na EGFT em função da resistência de falta – Caso II.	81
4.7	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso II.	81
4.8	Variação das diferenças angulares presentes na EGFT em função da resistência de falta – Caso III.	82
4.9	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso III.	83
4.10	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso IV.	84
4.11	Variação de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em função da resistência de falta – Caso IV.	85
4.12	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso V.	87
4.13	Variação de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em função da resistência de falta – Caso V.	88

5.1	Diagrama de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica sujeito à uma Falta Fase-Fase.	93
5.2	Circuito equivalente de uma Falta na Condição de $R_F \ll Z_{Load} $	95
5.3	Circuito equivalente de uma falta na condição de $R_F \ll Z_{Load} $ considerando a carga.	96
5.4	Circuito equivalente de uma Falta na Condição de $R_F \ll Z_{Load} $ considerando o Sistema Equivalente.	98
5.5	Variação das diferenças angulares presentes na EGFF em função da resistência de falta – Caso I.	105
5.6	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso I.	106
5.7	Variação das diferenças angulares presentes na EGFF em função da resistência de falta – Caso II.	108
5.8	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso II.	108
5.9	Variação das diferenças angulares presentes na EGFF em função da resistência de falta – Caso III.	108
5.10	Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso III.	109
6.1	Resultados do Método de Lee <i>et al.</i> (2004) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto I	116
6.2	Resultados do Método de Lee <i>et al.</i> (2004) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto I	117
6.3	Resultados do Método de Lee <i>et al.</i> (2004) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II	118
6.4	Resultados do Método de Lee <i>et al.</i> (2004) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II	119
6.5	Resultados do Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto I	122
6.6	Resultados do Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto I	123
6.7	Resultados do Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II	124
6.8	Resultados do Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II	125
6.9	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II	129
6.10	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas BC-g – Conjunto II	129
6.11	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas BC – Conjunto II	129
6.12	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas ABC-g – Conjunto II	130
6.13	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II	130
6.14	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas BC – Conjunto II	130
6.15	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas ABC-g – Conjunto II	131

6.16	Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Resistência de Falta para Faltas B-g – Conjunto II	134
6.17	Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II	134
6.18	Comparação do Número de Iterações em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II	134
6.19	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto III	135
6.20	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto III	136
6.21	Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas ABC-g – Conjunto III	136
6.22	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas A-g a 40% do Terminal Local – Conjunto II	139
6.23	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas AB-g a 40% do Terminal Local – Conjunto II	139
6.24	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas AB a 40% do Terminal Local – Conjunto II	139
6.25	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas ABC-g a 40% do Terminal Local – Conjunto II	140
6.26	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas A-g a 40% do Terminal Local – Conjunto III	140
6.27	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas AB-g a 40% do Terminal Local – Conjunto III	140
6.28	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas AB a 40% do Terminal Local – Conjunto III	141
6.29	Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas ABC-g a 40% do Terminal Local – Conjunto III	141
B.1	Diagrama unifiliar do Sistema I.	151
B.2	Disposição geométrica dos cabos subterrâneos do Sistema I.	152
B.3	Diagrama unifiliar do Sistema II.	153
B.4	Disposição geométrica das Linhas Aéreas do Sistema II (distâncias em metros).	153

LISTA DE TABELAS

2.1	Tensões e Correntes para cada Tipo de Falta (NOVOSEL et al., 1998).	30
4.1	Casos Analisados Numericamente – EGFT.	77
5.1	Casos Analisados Numericamente – EGFF.	105
6.1	Conjuntos de Simulações para Análise Numérica	111
6.2	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Lee et al. (2004) – Conjunto I.	113
6.3	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Lee et al. (2004) – Conjunto I.	113
6.4	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Lee et al. (2004) – Conjunto II.	114
6.5	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Lee et al. (2004) – Conjunto II.	114
6.6	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Lee et al. (2004) – Conjunto III.	115
6.7	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Lee et al. (2004) – Conjunto III.	115
6.8	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Choi et al. (2004; 2007) – Conjunto I.	120
6.9	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Choi et al. (2004; 2007) – Conjunto I.	120
6.10	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Choi et al. (2004; 2007) – Conjunto II.	121
6.11	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Choi et al. (2004; 2007) – Conjunto II.	121
6.12	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Choi et al. (2004; 2007) – Conjunto III.	121
6.13	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Choi et al. (2004; 2007) – Conjunto III.	121
6.14	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto II.	127
6.15	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto II.	127
6.16	Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto III.	128

6.17	Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto III.	128
6.18	Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II.	133
6.19	Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II.	133
6.20	Resultados Comparativos para as Três Metodologias Avaliadas – Conjunto II	137
6.21	Resultados Comparativos para as Três Metodologias Avaliadas – Conjunto III	137

LISTA DE ABREVIATURAS

ATP	Software alternativo de transitórios – <i>Alternative transients program</i>
AB	Falta entre as fases A e B
ABC-g	Falta entre as fases A, B, C, e terra
AB-g	Falta entre as fases A, B, e terra
AC	Falta entre as fases A e C
AC-g	Falta entre as fases A, C, e terra
A-g	Falta entre a fase A e terra
BC	Falta entre as fases B e C
BC-g	Falta entre as fases B, C, e terra
B-g	Falta entre a fase B e terra
C-g	Falta entre a fase C e terra
DFT	Transformada discreta de Fourier – <i>Discrete Fourier Transform</i>
EGFF	Equação geral de localização de faltas entre fases
EGFT	Equação geral de localização de faltas à terra
EMS	Sistema de gerenciamento de energia – <i>Energy management system</i>
EMTP	Software de transitórios eletromagnéticos – <i>Electromagnetic transients program</i>
GTD	Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica
LDF	Localização de faltas
LI	Linearmente independente
QEE	Qualidade de energia elétrica
SDEE	Sistema(s) de distribuição de energia elétrica
SEP	Sistema(s) elétrico(s) de potência

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Re\{\cdot\}$	Parte real de um número complexo
$\Im\{\cdot\}$	Parte imaginária de um número complexo
*	Complexo conjugado
x	Distância da falta ao terminal local (subestação)
Z_C	Impedância característica da linha
γ	Constante de propagação da linha
I_F	Corrente de falta
V_S	Tensão no terminal local (subestação)
I_S	Corrente no terminal local (subestação)
I_S''	Corrente no terminal local (subestação), considerando o circuito puramente faltoso
Z_{abc}	Matriz impedância séria da linha em componentes de fase
Y_{abc}	Matriz admitância paralela da linha em componentes de fase
V_S	Vetor de tensões medidas no terminal local
V_{S_F}	Vetor de tensões medidas no terminal local durante a falta
I_S	Vetor de correntes medidas no terminal local
I_{S_F}	Vetor de correntes medidas no terminal local durante a falta
ℓ	Comprimento total da linha de distribuição
V_F	Vetor de tensões no ponto da falta
$I_{F_{a,b,c}}$	Correntes de falta nas fases a , b , e c
Ω_k	Conjunto de fases faltosas do sistema
R_F	Resistência de falta
Z_{Load}	Impedância equivalente da carga

1 INTRODUÇÃO

Desde a instalação dos primeiros sistemas elétricos de grande porte, a localização de faltas (LDF) tem sido alvo de estudos por muitos pesquisadores tanto em nível nacional como em nível internacional. Até os dias atuais este é um assunto que permanece em aberto, dada a grande variedade de técnicas disponíveis para tanto e a diversidade de sistemas elétricos com diferentes características, seja do ponto de vista operacional ou do ponto de vista técnico: transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica.

O estudo da localização de faltas teve origem nos sistemas de transmissão, sendo que somente a partir da década de 1980 que a LDF começou a ser estudada especificamente para sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE). Desde então a questão da LDF nestes sistemas foi completamente modificada, sofrendo grandes desenvolvimentos do ponto de vista técnico e operacional. Apesar deste grande desenvolvimento, a LDF em SDEE ainda é freqüentemente realizada nos dias atuais a partir de métodos simples que sequer utilizam qualquer medida elétrica do sistema. A LDF neste caso é realizada através de indicadores físicos de faltas, métodos de campo e também métodos de força bruta, tais como (ZIMMERMAN; NOVOSEL, 2005): restauração através de chaveamentos e operação de religadores, indicação através da atuação de fusíveis e localizadores de faltas, cabos caídos, ligações de consumidores, mapas, e até através do cheiro de cabos queimados.

A utilização de tais técnicas, entretanto, torna-se cada vez mais inadequada, na medida em que a preocupação com a qualidade de energia elétrica (QEE) entregue aos consumidores e a confiabilidade dos sistemas é crescente. A recente desverticalização dos setores de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (GTD) e a abertura dos mercados de energia elétrica, tanto em nível nacional como internacional, exigiu das empresas deste setor uma preocupação maior com estas questões, devido a duas causas distintas. A primeira e mais evidente delas está relacionada às severas multas aplicadas pelos órgãos reguladores às empresas de GTD que possuem baixos índices de continuidade no fornecimento de energia elétrica aos consumidores (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000, 2003, 2004; BOLLEN, 2000). A segunda diz respeito aos custos diretos e indiretos de uma interrupção, bem como da energia não suprida pela empresa de GTD (BOLLEN, 2000).

Neste contexto, a LDF é fundamental para a redução do tempo destas interrupções, especialmente as causadas por falhas permanentes no sistema elétrico. Isto porque a utilização de um método de LDF eficiente e robusto possibilita resultados mais precisos e exatos, levando as equipes de manutenção rapidamente à região faltosa do sistema. Os SDEE, por sua vez, são altamente suscetíveis a falhas (temporárias e permanentes), especialmente devido a sua grande ramificação em centros urbanos e a proximidade com outras estruturas, tais como árvores, edifícios e pessoas. Por este mesmo motivo, a segu-

rança destes sistemas é sempre motivo de preocupação pelas empresas de distribuição e pelos órgãos reguladores. Sendo assim, fica evidente o interesse atual destas empresas no desenvolvimento de técnicas eficientes e robustas para a LDF em SDEE.

Os métodos fundamentados na impedância aparente são especialmente atrativos pelo baixo custo na sua implementação, especialmente os métodos que utilizam medições em somente um terminal do sistema. Isto porque nestes métodos são analisadas medidas de tensão e corrente somente na frequência fundamental e em um ponto do sistema, não exigindo sistemas de comunicação para a agregação de medições remotas, equipamentos de medição em altas frequências ou ainda computadores digitais com alta capacidade de processamento. Nestes métodos, onde está inserida esta dissertação, os desenvolvimentos realizados a partir da década de 1980 passaram por diferentes abordagens até os dias atuais. No início, as técnicas consideravam que o sistema de distribuição possuía transposição das linhas e utilizavam o princípio das componentes simétricas. Além disso, considerava-se que os valores e localidades das cargas eram desconhecidos e que a linha de distribuição era homogênea. Com o decorrer dos anos a análise passou a ser realizada através de componentes de fase, considerando uma geometria assimétrica das linhas, juntamente com a consideração do prévio conhecimento de estimativas das cargas, bem como de suas localidades.

O efeito capacitivo da linha, entretanto, nunca foi considerado nos métodos de LDF fundamentados na impedância para SDEE. Isto porque a capacitância das linhas de distribuição de energia elétrica é muito menor do que a capacitância observada nas linhas de transmissão de energia elétrica, dado o grande potencial destas últimas. Na análise de SDEE só é comum a consideração do efeito capacitivo nos sistemas subterrâneos, onde a proximidade dos condutores é tanta que a capacitância das linhas torna-se dezenas (e até centenas) de vezes mais elevada do que em linhas aéreas de distribuição de energia. Entretanto, como será mostrado nesta dissertação, o efeito capacitivo possui uma influência significativa nos resultados obtidos através das metodologias que constituem o estado da arte na LDF fundamentada na impedância em SDEE, mesmo em linhas aéreas de distribuição.

1.1 Objetivos

Considerando as limitações existentes nas metodologias que atualmente compõem o estado da arte na LDF para SDEE fundamentada na impedância, a presente dissertação de mestrado possui os seguintes objetivos:

- Incluir o efeito capacitivo da linha em um equacionamento fundamentado na impedância e genérico do ponto de vista do tipo da falta, visando a localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica;
- Entender as equações obtidas de forma profunda e abrangente, de forma a solucionar o problema da localização de faltas;
- Desenvolver e apresentar um algoritmo simples para a utilização das equações apresentadas em sistemas de distribuição de energia elétrica sem laterais ou cargas intermediárias;
- Avaliar a influência do efeito capacitivo das linhas aéreas de distribuição tanto nas metodologias de localização de faltas já existentes como nos desenvolvimentos ora apresentados.

1.2 Laterais e Cargas Intermediárias

Uma das principais características dos SDEE é a presença de laterais e cargas intermediárias à linha de distribuição. Como já observado anteriormente, as metodologias de LDF, fundamentadas na impedância e desenvolvidas para SDEE em componentes de fase, não consideram o efeito capacitivo das linhas em seu equacionamento. Como será visto nesta dissertação, estas mesmas metodologias necessitam também da formação de um sistema equivalente para a solução do problema da localização de faltas, seja através de um algoritmo ou de uma equação direta. Devido à desconsideração do efeito capacitivo, nenhuma observação à respeito do mesmo é realizada na obtenção dos equivalentes das laterais ou cargas intermediárias do SDEE analisado, passo trivial para linhas em que o efeito capacitivo é desconsiderado.

Através de um estudo qualitativo sob a forma de revisão, verificou-se na literatura existente que a representação mais correta da capacitância das linhas de transmissão não é realizada da mesma forma como é tradicionalmente realizado nas metodologias de LDF em SDEE (DECKMANN et al., 1980a,b; MONTICELLI et al., 1979; MONTICELLI, 1983; WU; MONTICELLI, 1983). Nestas metodologias todas as matrizes de impedâncias ou admitâncias são tratadas de forma conjunta, e agregadas em um único ponto do sistema. De acordo com os estudos realizados de equivalência de redes, esta representação não é adequada para a capacitância da linha do ponto de vista de resposta a variações incrementais de tensão.

O estudo destas questões (equivalência de redes em sistemas de distribuição considerando o efeito capacitivo) foge do escopo deste trabalho, dada a sua grande abrangência e complexidade do assunto. Tendo em vista esta questão, em diversas partes deste trabalho optou-se pela utilização de um sistema sem a presença de laterais ou cargas intermediárias, tanto para a análise teórica como para a validação das metodologias implementadas. Isto porque a utilização de um sistema equivalente obtido de uma forma inadequada não permitiria a correta verificação da influência de outras questões que foram colocadas como objetivos neste trabalho (a capacitância da linha), podendo inclusive invalidar as conclusões obtidas neste trabalho.

A equivalência de redes, apesar de ser parte fundamental das metodologias de LDF em SDEE, não é tratada neste trabalho e a inclusão da capacitância da linha no cálculo destes equivalentes pode ser interpretada como um passo além do trabalho apresentado nesta dissertação e é colocada como sugestão para trabalhos futuros.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, focando nos métodos baseados na impedância aparente. São abordadas tanto as metodologias atuais, consideradas o estado da arte neste assunto, como metodologias que formaram uma base para a LDF em SDEE.
- No Capítulo 3 são apresentados os desenvolvimentos propostos nesta dissertação de mestrado. O equacionamento geral para cada tipo de falta é descrito em detalhes, bem como as modificações propostas para o algoritmo de localização de faltas existente e os modelos matemáticos utilizados.

- No Capítulo 4 a equação geral de localização de faltas à terra, um polinômio de segunda ordem em x (o local da falta), é analisada do ponto de vista da natureza das suas soluções e uma forma de determinação da solução fisicamente correta é desenvolvida. Para tanto, é utilizada uma análise matemática, física, e numérica da equação em questão.
- O Capítulo 5 apresenta uma análise similar à apresentada no Capítulo 4, focando a equação geral de localização de faltas entre fases, que também é um polinômio de segunda ordem em x .
- O Capítulo 6 apresenta os resultados de localização de faltas obtidos através da utilização dos desenvolvimentos propostos. Neste capítulo também são apresentados resultados de outras metodologias que constituem o estado da arte em LDF para SDEE, de forma a comparar os resultados obtidos quando o efeito capacitivo da linha de distribuição é considerado.
- No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, elucidando os conhecimentos agregados durante o desenvolvimento do mesmo.

2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A localização de faltas é um assunto de grande interesse por partes das empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica e teve um grande desenvolvimento especialmente após o término da Segunda Guerra Mundial nos Estados Unidos, Canadá, França, Bélgica e Japão. Até meados da década de 1950 as principais metodologias de localização de faltas não eram diretamente relacionadas à análise do sistema de transmissão ou distribuição sujeito à falta, mas utilizavam técnicas baseadas na inspeção visual através de carros e helicópteros em conjunto com métodos fundamentados no princípio das ondas viajantes (AIEE COMMITTEE REPORT, 1955; STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957). Apesar disto, os oscilógrafos automáticos existentes naquela época já eram vistos como equipamentos com um futuro promissor para a localização de faltas realizada a partir de medidas elétricas em um e dois terminais.

Naquela época, poucas técnicas de localização de faltas eram específicas para sistemas de transmissão ou distribuição de energia elétrica, especialmente pelo fato destas não utilizarem a análise do sistema elétrico como princípio básico, o que diferenciaria explicitamente ambas abordagens. As primeiras técnicas desenvolvidas especialmente para sistemas de distribuição de energia elétrica (disponíveis publicamente) datam do início da década de 1980 (CASTRO; BUNCH; TOPKA, 1980; ROYTMAN *et al.*, 1982). Estas técnicas representam o início da história da localização de faltas específica para estes sistemas. A técnica proposta por Roytman *et al.* (1982) também já apresentava o estudo do local da falta através de técnicas de análise de circuitos na frequência fundamental, representando as técnicas fundamentadas na impedância através de medições de tensão e corrente em somente um terminal.

Entretanto, este não foi o primeiro método de localização de faltas fundamentado na impedância que se tem notícia, já que na década de 1950 este princípio já era utilizado de maneira mais rudimentar, mas igualmente efetiva (AIEE COMMITTEE REPORT, 1955; STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957). Apesar disto, foi somente na década de 1980 que o desenvolvimento das metodologias de localização de faltas fundamentadas na impedância foi acelerado, tanto para sistemas de transmissão como para sistemas de distribuição de energia elétrica, quer seja utilizando medições em um terminal ou em dois terminais. Este desenvolvimento foi altamente impulsionado pelos trabalhos de Takagi *et al.* (1981; 1982a; 1982b), que apresentaram um equacionamento do local da falta através da utilização do teorema da superposição. Juntamente a este equacionamento, uma série de casos práticos foram estudados através desta metodologia no Japão, mostrando resultados promissores.

A partir destes trabalhos diversas metodologias específicas para sistemas de transmis-

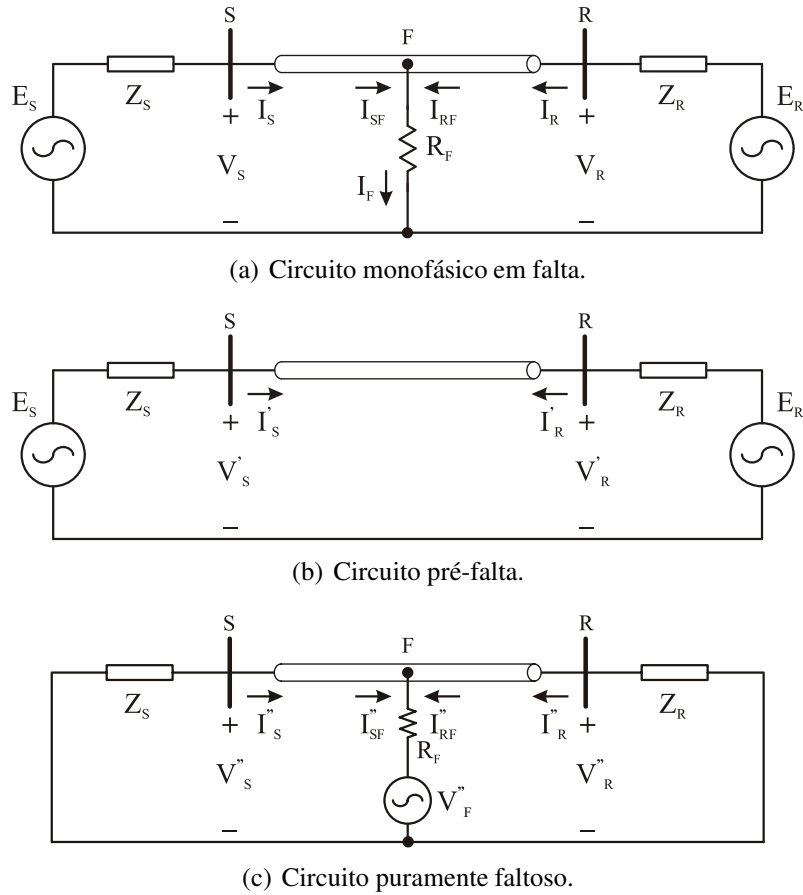


Figura 2.1: Circuitos equivalentes de uma falta (TAKAGI *et al.*, 1982b).

são e distribuição fundamentadas na impedância foram desenvolvidas e são detalhadas em ordem cronológica neste capítulo, a partir do Método de Takagi *et al.* (1982b) para linhas curtas.

2.1 Método de Takagi *et al.* (1982b) para Linhas Curtas

O método proposto por Takagi *et al.* (1982b) foi, na verdade, idealizado para a LDF em linhas de transmissão de energia elétrica. Entretanto, foi um trabalho pioneiro em respeito à consideração realizada para linhas curtas de transmissão de energia elétrica. Este método considera que a linha de transmissão é uma linha curta que possui uma geometria assimétrica. Métodos mais atuais, que são discutidos posteriormente, apresentam grande semelhança com este método, tanto nas simplificações como nas deduções realizadas para a determinação de uma equação para a LDF.

Considere a Figura 2.1(a), que ilustra um circuito monofásico em falta. Utilizando o teorema da superposição, pode-se entender que este circuito corresponde à soma do circuito pré-falta com o circuito puramente faltoso, como ilustrado nas Figuras 2.1(b) e 2.1(c). Neste caso, a tensão no ponto da falta, V_F , é dada por:

$$V_F = R_F \cdot I_F = (I_{S_F} + I_{R_F}) \cdot R_F = (I''_{S_F} + I''_{R_F}) \cdot R_F, \quad (2.1)$$

sendo I_{S_F} e I_{R_F} as contribuições à corrente de falta respectivamente do terminal local e remoto do circuito em falta, ao passo que $''$ denota as variáveis do circuito puramente faltoso. A variável R_F representa a resistência de falta. Além disso, V_F e I''_{S_F} podem ser

determinados a partir de valores mensuráveis no terminal local, relacionados através dos parâmetros da linha:

$$V_F = V_S \cdot \cosh(\gamma x) - Z_C \cdot I_S \cdot \sinh(\gamma x) \quad (2.2)$$

$$I_{S_F}'' = (V_S''/Z_C) \cdot \sinh(\gamma x) - I_S'' \cdot \cosh(\gamma x) , \quad (2.3)$$

sendo Z_C a impedância característica da linha, γ a constante de propagação da linha, x a distância da falta ao terminal local (terminal S), e V_S e I_S respectivamente a tensão e a corrente medidas no terminal local do circuito em falta.

A corrente de falta, I_F , pode ser expressa como uma função de I_{S_F}'' , descrita pela seguinte equação:

$$I_F = I_{S_F}'' \cdot \zeta \quad (2.4)$$

$$\zeta = \zeta \cdot e^{j\theta} \quad (2.5)$$

onde $\theta = \angle I_F / I_{S_F}''$ e ε é um número real qualquer.

Substituindo (2.2), (2.3), e (2.4) em (2.1), e dividindo a expressão resultante por $\cosh(\gamma x)$, resulta em:

$$V_S - Z_C \cdot I_S \cdot \tanh(\gamma x) + [(V_S''/Z_C) \cdot \tanh(\gamma x) - I_S''] \cdot \zeta \cdot e^{j\theta} \cdot R_F = 0 . \quad (2.6)$$

Tomando a parte imaginária de (2.6) é possível retirar tanto a resistência da falta como ζ do equacionamento:

$$\Im \left\{ [V_S - Z_C \cdot I_S \cdot \tanh(\gamma x)] \cdot [(V_S''/Z_C) \cdot \tanh(\gamma x) - I_S'']^* \cdot e^{-j\theta} \right\} = 0 , \quad (2.7)$$

onde $*$ denota o conjugado de um número complexo, e $\Im \{ \cdot \}$ denota a parte imaginária de um número complexo.

Em (2.7) dois valores são desconhecidos, a saber, θ e x . Quando θ é conhecido, a distância da falta pode ser calculada. Entretanto, θ também representa a diferença angular entre as correntes de falta oriundas de cada um dos terminais da linha (local e remoto, S e R). É esperado que seu valor seja nulo, ou próximo de nulo, dado que a corrente não deve sofrer uma defasagem elevada entre os dois terminais, ou seja, o efeito capacitivo da linha é desprezível. Substituindo esta simplificação em (2.7), juntamente com as simplificações

$$\tanh(\gamma x) \approx \gamma x \quad (2.8)$$

$$(V_S''/Z_C) \cdot \tanh(\gamma x) \ll I_S'' , \quad (2.9)$$

é possível obter uma equação para o local da falta, dada por:

$$x = \frac{\Im \{ V_S \cdot I_S'' \}}{\Im \{ Z \cdot I_S \cdot I_S'' \}} , \quad (2.10)$$

onde Z é a impedância da linha em Ω por unidade de comprimento. O cálculo de (2.10) pode ser realizado considerando que $I_S'' = I_S - I_S'$ (teorema da superposição).

Note que no início do equacionamento, o modelo completo da linha foi considerado, inclusive com as correções hiperbólicas. No entanto, as simplificações apresentadas em (TAKAGI *et al.*, 1982b), dadas por (2.8) e (2.9), realizam uma simplificação do efeito capacitivo da linha, fato que pode ser observado ao utilizarmos estas simplificações em (2.2) e (2.3).

O desenvolvimento realizado anteriormente considera ainda um circuito monofásico. A extensão para o caso de um sistema trifásico resulta em duas expressões diferentes, uma para o caso de faltas fase-terra e outra para faltas fase-fase, fase-fase terra e trifásica. As simplificações realizadas nestes caso são as mesmas, e são consideradas linhas paralelas no equacionamento, com configuração assimétrica, como mostrado em (TAKAGI *et al.*, 1982b).

Este método mostrou-se bastante eficiente para o caso de faltas sem resistência. No entanto, à medida que a resistência da falta aumenta, há um aumento bastante elevado do erro na estimação do local da falta (MORETO, 2005). Isto, em parte, por causa do teorema da superposição utilizado no equacionamento, que resulta numa estimativa errônea para a corrente de falta vista do terminal local, I'_S , quando a resistência de falta torna-se elevada. Como será visto posteriormente neste capítulo, parte desta influência pode ser minimizada com a utilização de um algoritmo iterativo de LDF, sendo o resultado do Método de Takagi utilizado, neste caso, como uma estimativa inicial do local da falta.

Dado o pioneirismo tanto da análise como das considerações realizadas visando a LDF em linhas de transmissão curtas, este trabalho possui uma grande importância para a LDF fundamentada na impedância nos dias atuais, seja em sistemas de transmissão ou em sistemas de distribuição. Isto porque o Método de Takagi *et al.* (1982b) abriu um vasto campo de estudos na sua área de trabalho, influenciando o desenvolvimento de outras metodologias, como a de Zhu *et al.* (1997), e servindo como parâmetro de comparação para diversas outras. Na verdade o próprio conceito de obtenção de uma equação de LDF formalmente fundamentada através do princípio da impedância aparente, já é por si só um grande avanço para estes métodos, introduzido através dos trabalhos publicados por Takagi *et al.* (1981; 1982b; 1982a).

2.2 Método de Srinivasan *et al.* (1989)

Após o trabalho realizado por Takagi *et al.* (1982b), diversos trabalhos surgiram focando a LDF em sistemas com características mais próximas de um SDEE. Um destes trabalhos foi proposto por Srinivasan e St-Jacques (1989). Este trabalho apresentou um equacionamento alternativo ao de Takagi *et al.* (1982b), e focou a abordagem nos sistemas de distribuição e subtransmissão com a presença de cargas intermediárias, apresentando duas metodologias para LDF, uma para linhas longas e outra para linhas curtas. Nestas metodologias, entretanto, Srinivasan e St-Jacques (1989) consideraram as linhas como transpostas ao utilizarem a teoria das componentes simétricas para o estudo do sistema em falta. Em contrapartida, o equacionamento realizado não considerou que a corrente de falta está em fase com a corrente na linha, fato que, como previamente discutido, afetou os resultados da metodologia de Takagi *et al.* (1982b). Outro fato importante é que nesta metodologia, o sistema equivalente no terminal remoto foi considerado passivo, modelagem mais adequada à realidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica¹.

Considerando o sistema em falta descrito na Figura 2.2, o algoritmo não-iterativo de LDF apresentado por Srinivasan e St-Jacques (1989) para linhas curtas é descrito em detalhes a seguir:

- I) As tensões e correntes medidas no terminal local (terminal S), antes e durante a falta, são convertidas para componentes de seqüência;

¹Atualmente, a utilização de geração distribuída no nível de distribuição de energia elétrica está mudando este paradigma, já que os sistemas de distribuição deixam de ser parte somente passiva (consumidora) do sistema para serem também parte ativa (geradora) do mesmo.

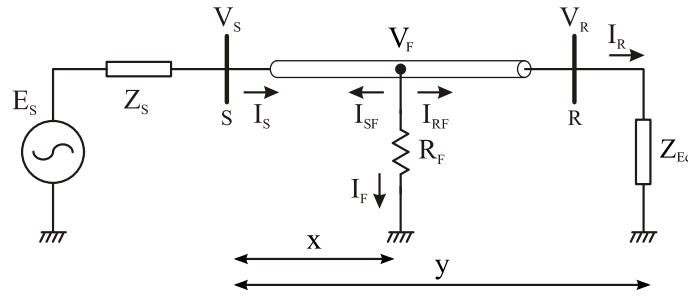


Figura 2.2: Linha de Transmissão em Falta com Carga Equivalente (SRINIVASAN; ST-JACQUES, 1989).

- II) A constante de propagação, γ , e a impedância característica da linha, Z_C , são calculadas para cada circuito de seqüência, através de:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} \quad (2.11)$$

$$Z_C = \sqrt{(R + j\omega L) / (G + j\omega C)}, \quad (2.12)$$

sendo R , L , G , e C , respectivamente a resistência, a indutância, a condutância, e capacitância por unidade de comprimento da linha. Além disso, ω é a frequência angular, dada por $\omega = 2\pi f^2$.

- III) A admitância equivalente no terminal remoto R , $G_R + j \cdot B_R$, é estimada através de:

$$G_R \cdot \left| \frac{V_R}{V_0} \right|^{n_p-2} + j \cdot B_R \cdot \left| \frac{V_R}{V_0} \right|^{n_q-2} = \frac{I_R}{V_R} = \frac{1}{Z_{Eq}} \quad (2.13)$$

onde V_R e I_R representam respectivamente a tensão e a corrente no terminal remoto, estimadas através das medidas de tensão e corrente pré-falta no terminal local, juntamente com as equações hiperbólicas das linhas de transmissão. Além disso, Z_{Eq} é a impedância equivalente no terminal local, V_0 é a tensão nominal do sistema, e n_p e n_q são os coeficientes que definem a natureza das cargas³ (impedância constante, corrente constante, potência constante, bem como casos intermediários).

- IV) Para cada circuito de seqüência, calcule V_k , I_k , e Y_k :

$$V_k = V_S - Z_C \gamma y \cdot I_S \quad (2.14)$$

$$I_k = (\gamma y / Z_C) \cdot V_S - I_S \quad (2.15)$$

$$Y_k = G_R \cdot \left| \frac{V_k}{V_0} \right|^{n_p-2} + j \cdot B_R \cdot \left| \frac{V_k}{V_0} \right|^{n_q-2} = G_k + j \cdot B_k \quad (2.16)$$

- V) A partir dos resultados obtidos no Passo IV, calcule μ , α , e σ para cada circuito de seqüência:

$$\mu = \Re \left\{ \frac{\alpha Z_C \gamma}{V_k^*} \right\} \cdot [G_k (n_p - 2) + j \cdot B_k (n_q - 2)] \quad (2.17)$$

$$\alpha = V_k \cdot Y_k + I_k \quad (2.18)$$

$$\sigma = Z_C \cdot \gamma \cdot I_S \quad (2.19)$$

²Para cada circuito de seqüência do sistema trifásico devem ser utilizados os parâmetros relativos à respectiva seqüência.

³Nesta metodologia, estes coeficientes são considerados como variáveis conhecidas. Caso não se tenha conhecimento destes valores, Srinivasan e St-Jacques (1989) sugerem a utilização de um modelo de impedância constante, ou seja, $n_p = n_q = 2$.

onde $\Re \{ \cdot \}$ denota a parte real de um número imaginário.

VI) A partir dos resultados obtidos nos Passo IV e V, calcule β e λ para cada circuito de seqüência:

$$\beta = V_k \cdot \mu + Y_k \cdot Z_C \cdot \gamma \cdot \alpha \quad (2.20)$$

$$\lambda = V_S - \sigma \cdot y \quad (2.21)$$

VII) A distância da falta, x , pode ser obtida através dos resultados anteriores, utilizando (2.22), (2.23), ou (2.24), respectivamente para faltas fase-terra, fase-fase, ou trifásica:

$$x = y - \frac{\Im \{ (\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2)^* \}}{\Im \{ (\lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\beta_0 + \beta_1 + \beta_2)^* - (\sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2) \cdot (\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2)^* \}} \quad (2.22)$$

$$x = y - \frac{\Im \{ (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)^* \}}{\Im \{ (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\beta_1 - \beta_2)^* - (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)^* \}} \quad (2.23)$$

$$x = y - \frac{\Im \{ \lambda_1 \cdot \alpha_1^* \}}{\Im \{ \lambda_1 \cdot \beta_1^* - \sigma_1 \cdot \alpha_1^* \}} \quad (2.24)$$

onde os subscritos 0, 1, e 2 indicam respectivamente as componentes de seqüência zero, positiva e negativa.

Note que para a obtenção das equações utilizadas na metodologia apresentada foram realizadas simplificações relativas ao tamanho da linha, apesar das equações hiperbólicas de linhas de transmissão terem sido utilizadas no início do desenvolvimento das equações. Como a linha foi considerada curta, as mesmas conclusões relativas ao efeito capacitivo apresentadas pelo Método de Takagi *et al.* (1982b) se aplicam a esta metodologia. O avanço desta metodologia está no fato de que a corrente de falta não foi considerada em fase com a corrente medida nos terminais da subestação, além da consideração de um circuito remoto passivo e da consideração das cargas intermediárias, como será apresentado a seguir. Apesar disso, esta metodologia volta à consideração das componentes simétricas, o que representa um retrocesso em relação ao Método de Takagi *et al.* (1982b).

O método proposto por Srinivasan e St-Jacques (1989) ainda prevê a consideração de cargas intermediárias existentes na linha de transmissão. É esperado que as cargas tenham uma impedância equivalente conhecida, bem como a sua localidade na linha analisada. A consideração destas cargas constitui na obtenção de diversas estimativas para o local da falta, uma para cada ponto de interconexão de cargas. Neste caso, em cada ponto de conexão são estimadas as tensões e correntes, utilizando as equações hiperbólicas para linhas de transmissão, e estas substituem os valores de V_S e I_S anteriormente utilizados. O tratamento de cargas à jusante da falta é realizado através da consolidação de todas as cargas em um só ponto do sistema, como uma carga equivalente, da forma apresentada na Figura 2.2. Segundo os autores, normalmente é possível obter uma estimativa final fundamentada em uma seleção lógica entre as múltiplas estimativas obtidas.

Esta metodologia foi apontada em (MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008) como uma das quatro melhores metodologias fundamentadas na impedância para a estimativa da localização de faltas trifásicas, considerando um sistema geometricamente simétrico e praticamente equilibrado, onde as cargas intermediárias são monofásicas e possuem uma potência bastante pequena.

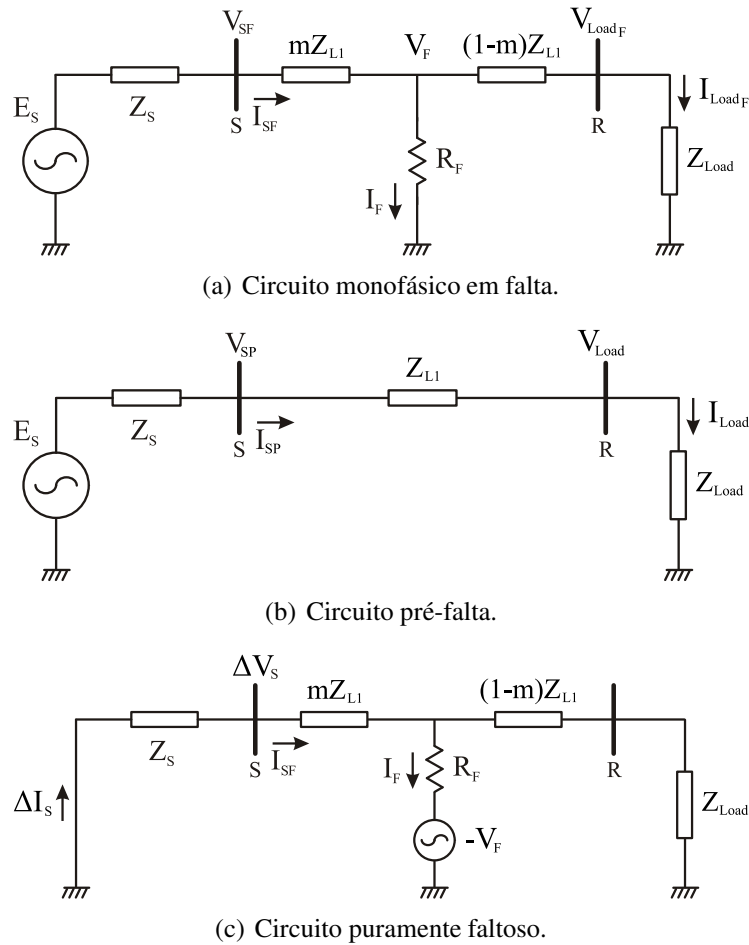


Figura 2.3: Circuitos equivalentes de uma falta (NOVOSEL *et al.*, 1998).

2.3 Método de Novosel *et al.* (1998)

O Método de Novosel *et al.* (1998) baseia-se na idéia de LDF aplicada a linhas de transmissão curtas, contendo cargas e laterais intermediárias, representadas por uma impedância agregada à jusante da falta. Este método ainda baseia-se no cálculo da impedância da fonte e da carga, utilizando tanto as medidas pré-falta como as medidas pós-falta de tensão e corrente na subestação (SAHA *et al.*, 2002).

Assim como no Método de Takagi *et al.* (1982b), o Método de Novosel *et al.* (1998) considera o teorema da superposição através de um sistema em regime permanente, em falta e puramente faltoso, como ilustrado na Figura 2.3. A partir desta figura é possível notar que a impedância da carga e a impedância à montante da falta, Z_{Load} e Z_S , são dadas por:

$$Z_{Load} = \frac{V_{SP}}{I_{SP}} - Z_{L1} \quad (2.25)$$

$$Z_S = -\frac{\Delta V_S}{\Delta I_S}, \quad (2.26)$$

onde V_{SP} e I_{SP} representam respectivamente a tensão e a corrente no terminal local do circuito pré-falta, Z_{L1} é a impedância total da linha, Z_S é a impedância equivalente do circuito à montante do sistema analisado, e ΔV_S e ΔI_S correspondem à tensão e à corrente no terminal local do circuito puramente faltoso. De forma a evitar erros no cálculo da

impedância da fonte devido a pequenas variações entre valores pré e pós falta, um circuito de seqüência negativa é utilizado para a realização deste cálculo em faltas desequilibradas.

A relação básica desta metodologia é obtida através da impedância medida da falta, dada por:

$$Z_{\text{medido}} = \frac{V_{SF}}{I_{SF}} = m \cdot Z_{L1} + R_F \cdot \frac{I_F}{I_{SF}}, \quad (2.27)$$

onde m é a distância percentual da falta ao terminal local em relação ao tamanho total da linha, I_F é a corrente de falta, e I_{SF} é a corrente medida no terminal local do circuito em falta.

A partir de (2.27), Novosel *et al.* (1998) propõem duas formas distintas de calcular o local da falta, sendo igual o resultado obtido através destas. A diferença é que uma das formas resulta em uma equação quadrática que não requer um algoritmo iterativo para sua solução, ao passo que a outra forma resulta em uma equação linear de x (o local da falta), mas que requer um algoritmo iterativo para sua solução.

Utilizando (2.27) e outras relações do circuito é possível mostrar que a seguinte relação quadrática de m é obtida (NOVOSEL *et al.*, 1998):

$$m^2 - m \cdot k_1 + k_2 - k_3 \cdot R_F = 0, \quad (2.28)$$

onde

$$k_1 = \frac{V_{SF}}{I_{SF} \cdot Z_{L1}} + \frac{Z_{\text{Load}}}{Z_{L1}} + 1 \quad (2.29)$$

$$k_2 = \frac{V_{SF}}{I_{SF} \cdot Z_{L1}} \cdot \left(\frac{Z_{\text{Load}}}{Z_{L1}} + 1 \right) \quad (2.30)$$

$$k_3 = \frac{\Delta I_S}{I_{SF} \cdot Z_{L1}} \cdot \left(\frac{Z_S + Z_{\text{Load}}}{Z_{L1}} + 1 \right). \quad (2.31)$$

A equação (2.28) é uma equação com coeficientes complexos que possui duas incógnitas: m e R_F . Separando (2.28) em suas partes reais e imaginárias é possível obter diretamente o valor de m , a distância relativa da falta⁴:

$$m = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (2.32)$$

onde

$$a = 1 \quad (2.33)$$

$$b = \frac{\Im \{k_1\} \cdot \Re \{k_3\}}{\Im \{k_3\}} - \Re \{k_1\} \quad (2.34)$$

$$c = \Re \{k_2\} - \frac{\Im \{k_2\} \cdot \Re \{k_3\}}{\Im \{k_3\}}. \quad (2.35)$$

Embora o desenvolvimento da metodologia tenha sido realizado para sistemas monofásicos, os autores apresentam também a possibilidade de utilização desta metodologia para sistemas trifásicos, através da simples substituição apropriada das medidas V_{SF} , I_{SF} e ΔI_{SF} pelos valores da Tabela 2.1. Nesta tabela os subscritos a , b , c indicam as fases do sistema, ao passo que

$$k = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \quad (2.36)$$

⁴A escolha por tal raiz da equação polinomial não foi efetivamente explicitada pelos autores.

Tabela 2.1: Tensões e Correntes para cada Tipo de Falta (NOVOSEL *et al.*, 1998).

Tipo de Falta	V_{SF}	I_{SF}	ΔI_S
A-g	V_{SF_a}	$I_{SF_a} + k \cdot I$	$3 \cdot \Delta I_{S1_a}$
B-g	V_{SF_b}	$I_{SF_b} + k \cdot I$	$3 \cdot \Delta I_{S1_b}$
C-g	V_{SF_c}	$I_{SF_c} + k \cdot I$	$3 \cdot \Delta I_{S1_c}$
AB-g	$V_{SF_a} - V_{SF_b}$	$I_{SF_a} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_a} - \Delta I_{S_b}$
BC-g	$V_{SF_b} - V_{SF_c}$	$I_{SF_b} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_b} - \Delta I_{S_c}$
AC-g	$V_{SF_c} - V_{SF_a}$	$I_{SF_c} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_c} - \Delta I_{S_a}$
AB	$V_{SF_a} - V_{SF_b}$	$I_{SF_a} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_a} - \Delta I_{S_b}$
BC	$V_{SF_b} - V_{SF_c}$	$I_{SF_b} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_b} - \Delta I_{S_c}$
AC	$V_{SF_c} - V_{SF_a}$	$I_{SF_c} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_c} - \Delta I_{S_a}$
ABC-g	$V_{SF_b} - V_{SF_c}$	$I_{SF_b} - I_{SF}$	$\Delta I_{S_b} - \Delta I_{S_c}$

sendo Z_{L0} e Z_{L1} respectivamente as impedâncias totais de seqüência zero e de seqüência positiva da linha analisada. Ainda, I representa a corrente de seqüência zero medida a partir da subestação do sistema em falta.

Apesar da Tabela 2.1 não deixar explícito, o presente método utiliza a teoria das componentes simétricas para o equacionamento em sistemas trifásicos, o que pode ser uma fonte de erros em sistemas com linhas geometricamente assimétricas. Além disso, é possível verificar que o efeito capacitivo é desconsiderado do equacionamento, resultando em um modelo RL para a linha de distribuição (NOVOSEL *et al.*, 1998). Em relação às laterais, nenhuma consideração a respeito de múltiplas soluções oriundas da existência destas foi realizada pelos autores.

Entretanto, outra contribuição deste método é a questão das cargas e laterais intermediárias, que foi tratada de forma diferenciada neste trabalho. O Método de Novosel *et al.* (1998) prevê a concentração de todas as cargas intermediárias em um único ponto do sistema, ao final da linha distribuição analisada. Isto porque as impedâncias das cargas são muito maiores do que as impedâncias da linha de distribuição. Entretanto, esta simplificação engendra uma influência negativa das cargas intermediárias do sistema, dado que todas as cargas são agregadas ao final da linha. Sendo assim, caso o sistema possua cargas intermediárias elevadas, um grande erro pode surgir devido a esta simplificação. Ao mesmo tempo, para que esta simplificação possa ser realizada é necessário que as linhas de distribuição entre as cargas e laterais intermediárias possuam as mesmas impedâncias, de forma que seja possível considerá-las uma linha única, sem cargas intermediárias ou laterais.

As simplificações realizadas neste método resultaram em um desempenho mediano desta metodologia em comparação com outras metodologias fundamentadas na impedância aparente, mesmo para um sistema onde as linhas são dispostas simetricamente e as cargas intermediárias possuem uma potência excessivamente baixa (MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008). Os resultados apresentaram uma grande influência destas cargas, como também verificado em (SAHA *et al.*, 2002).

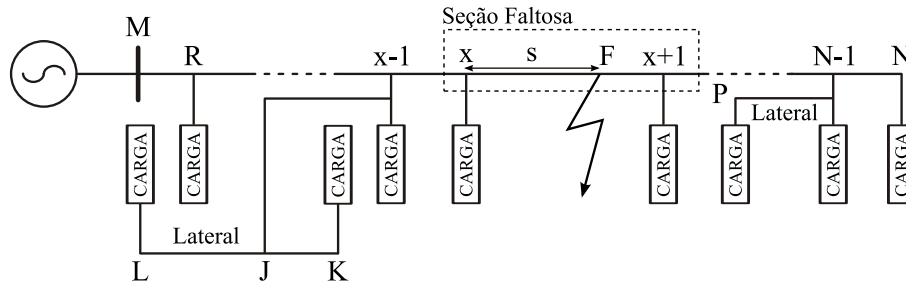


Figura 2.4: Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição em Falta (DAS, 1998).

2.4 Método de Das *et al.* (1998)

O método proposto por Das *et al.* (1998; 2000) estima a localização de faltas utilizando o mesmo princípio apresentado pelas outras metodologias descritas anteriormente, especialmente o Método de Novosel *et al.* (1998). Entretanto, certos pontos de vista diferenciados e considerações o colocam como um dos métodos mais precisos, como será visto nesta seção.

O Método de Das *et al.* (1998) é um método iterativo de LDF que pode ser dividido em sete passos distintos, descritos a seguir, tomando como referência a Figura 2.4:

Aquisição de Dados Quando uma falta é detectada, as componentes de frequência fundamental das tensões e correntes pré e pós-falta medidas a partir da subestação são armazenadas. Os dados necessários da carga e da linha são obtidos diretamente de uma base de dados.

Estimação da Seção Faltosa Para estimar a seção faltosa são utilizadas as tensões e correntes medidas durante a falta. Para uma falta A-g tem-se que a reatância aparente do nó M até a falta é dada por $X_{M1} = \Im \{V_{M_a}/I_{M_a}\}$. Além disso, a reatância modificada entre os nós M e R do sistema, $X_{M,R}^m$, é dada por:

$$X_{M,R}^m = X_{M,R_1} + \frac{X_{M,R_0} - X_{M,R_1}}{3} \quad (2.37)$$

onde X_{M,R_0} e X_{M,R_1} são respectivamente as reatâncias de seqüência zero e positiva da seção entre os nós M e R⁵.

Se a reatância modificada, $X_{M,R}^m$, for menor do que a reatância aparente, X_{M1} , a falta está localizada além do nó R. A reatância modificada da segunda seção é então calculada e adicionada da reatância modificada da primeira seção, obtendo assim uma reatância modificada total. Esta nova impedância é então comparada com X_{M1} e se a reatância aparente total ainda for menor, a falta está localizada além da segunda seção do sistema. Este processo é repetido até que a reatância modificada total seja maior do que a reatância aparente. Neste caso, determina-se o local da falta como entre os nós x e $x+1$, como ilustrado na Figura 2.4.

Desenvolvimento de um Sistema Equivalente Radial Após a seção da falta ser estimada, o SDEE com laterais é convertido para um sistema equivalente radial sem laterais. Este procedimento é realizado agregando-se todas as cargas de uma dada

⁵As equações necessárias para estimar a seção faltosa em outros tipos de falta são distintas. Neste texto será mencionado somente o caso das faltas A-g. Maiores detalhes estão disponíveis em (DAS, 1998).

lateral para um único nó do sistema. No SDEE ilustrado na Figura 2.4, por exemplo, as cargas presentes nos nós L, K, e $x - 1$, seriam agregadas ao nó $x - 1$, resultando em uma carga equivalente para a lateral. Se a falta for estimada em uma seção presente em uma lateral, o procedimento é semelhante.

Modelagem das Cargas As cargas presentes em cada um dos nós são consideradas como dependentes da tensão. As constantes que determinam a relação entre tensão e admitância são estimadas a partir dos dados pré-falta de tensão e corrente. A natureza das cargas (impedância constante, corrente constante, potência constante, e casos intermediários), entretanto, é assumida como conhecida. O procedimento de modelagem das cargas, descrito em detalhes em (DAS, 1998), inclui: a) seleção do modelo das cargas; b) estimativa das cargas presentes no sistema pré-falta em todos os nós até x ; c) estimativa das tensões e correntes pré-falta em todos os nós até x e também no nó N ; e, d) estimativa das constantes da carga.

De forma geral, o efeito das cargas é compensado através das suas correntes e modelos estáticos são utilizados para todas as cargas até o nó x , incluindo também uma carga agregada ao terminal remoto (nó N).

Estimação das Tensões e Correntes no Ponto da Falta e no Terminal Remoto As correntes de seqüência no nó F , juntamente com as tensões em componentes de seqüência nos nós F e N , são estimadas utilizando-se as tensões e correntes de seqüência do nó x . Entretanto, para a obtenção das tensões e correntes de seqüência do nó x é necessário o cálculo sistemático das tensões e correntes de seqüência em cada um dos nós à montante do nó x , a partir das medições de tensão e corrente do sistema em falta, realizadas no nó M . Para tanto, são utilizados os parâmetros da linha e as cargas previamente modeladas, inseridas dentro do sistema radial equivalente obtido anteriormente. As tensões e correntes no nó F podem ser escritas como função das tensões e correntes no nó x , de acordo com

$$\begin{bmatrix} V_F \\ I_{F,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -s \cdot B_{x,x+1} \\ s \cdot C_{x,x+1} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ I_{x,F} \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

onde s é a distância percentual entre os nós x e F , e $B_{x,x+1}$ e $C_{x,x+1}$ são as constantes da linha entre os nós x e $x + 1$. Estas constantes são obtidas considerando-se uma linha de transmissão curta, assim como nas metodologias apresentadas anteriormente. Os subscritos indicam os nós aos quais as variáveis estão associadas.

As tensões e correntes de seqüência no nó N durante a falta são então relacionadas através das tensões e correntes no nó F , de acordo com

$$\begin{bmatrix} V_N \\ -I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & (1-s) \cdot B_{x,x+1} \\ (s-1) \cdot C_{x,x+1} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_F \\ I_{F,N} \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

onde A_e , B_e , C_e , e D_e são constantes equivalentes às seções compreendidas entre os nós $x + 1$ e N . As correntes no nó F são dadas por

$$I_{F,N} = -I_{F,x} - I_F. \quad (2.40)$$

Através de manipulações algébricas envolvendo (2.38), (2.39), e (2.40) é possível obter

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_F \end{bmatrix} = \frac{1}{K_v + s \cdot K_w} \cdot \begin{bmatrix} K_m + s \cdot K_n & s \cdot K_p \\ K_q + s \cdot K_r & K_v + s \cdot K_u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ I_{x,F} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

através da simplificação dos termos em s de ordem igual ou superior a dois. As variáveis K são parâmetros complexos que dependem de $A_e, B_e, C_e, D_e, Z_N, B_{x,x+1}$, e $C_{x,x+1}$.

A estimação da tensão no terminal N e da corrente no ponto da falta depende da distância da falta, s . Sendo assim, este passo é realizado diversas vezes, em conjunto com o passo seguinte, que apresenta uma estimativa para o local da falta.

Estimação da Distância da Falta A distância do nó F ao nó x , dada por s , é estimada através da relação tensão-corrente no ponto da falta e da natureza resistiva da impedância da mesma. Para cada tipo de falta há uma equação diferente, obtida através de um equacionamento em componentes simétricas da impedância no ponto da falta, que no caso de uma falta monofásica resulta em

$$s = \frac{\Im \{K_C \cdot K_A^*\}}{\Im \{K_B \cdot K_C^*\} + \Im \{K_A \cdot K_D^*\}} \quad (2.42)$$

onde

$$\begin{aligned} K_A &= f(V_x, K_v) \\ K_B &= f(V_x, I_{x,F}, K_v, K_w, B_{x,x+1}) \\ K_C &= f(V_x, I_{x,F}, K_q, K_v) \\ K_D &= f(V_x, I_{x,F}, K_q, K_r, K_u, K_v, K_w) \end{aligned}$$

A estimativa dada por (2.42) faz parte de um processo iterativo que também inclui uma nova estimativa das tensões e correntes de seqüência no ponto da falta e no nó N para cada estimativa de s . O algoritmo completo está descrito em (DAS, 1998).

Além da falta ser estimada na seção faltosa previamente estimada, duas outras estimativas são também obtidas, uma para a seção à jusante da seção estimada e outra à montante desta. A solução mais plausível é escolhida como o local da falta.

Conversão das Múltiplas Estimativas em uma Única O Método de Das *et al.* (1998) pode resultar em diversas estimativas para o local da falta se o sistema possuir laterais. O número de estimativas depende da configuração do sistema e das condições da falta. Para que as múltiplas estimativas do local da falta resultem em somente uma estimativa é sugerida a utilização de indicadores de falta⁶ instalados no início de cada uma das laterais. A informação destes indicadores é combinada com os resultados das múltiplas estimativas, retornando somente um local de falta.

Note que o Método de Das *et al.* (1998) é fundamentado nos mesmos princípios dos Métodos de Srinivasan e St-Jacques (1989) e de Novosel *et al.* (1998): linhas curtas transpostas que desprezam o efeito capacitivo. Estas considerações, embora adequadas para sistemas específicos, não abrangem completamente os sistemas de distribuição de energia elétrica. Entretanto, a metodologia apresentada nesta seção foi uma das primeiras que apresentou uma forma eficiente e simples de localizar faltas em sistemas mais genéricos, compostos por laterais e cargas intermediárias sem resultar em múltiplas soluções. Sendo assim, esta metodologia destaca-se pelo avanço e pioneirismo em um certo

⁶Indicadores de faltas são equipamentos que detectam faltas à jusante do ponto em que estão instalados, independentemente do local da lateral onde a falta ocorreu, indicando a existência da mesma.

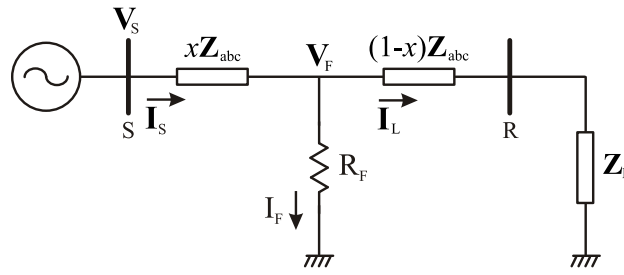


Figura 2.5: Falta Fase-Terra em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997).

aspecto, apesar de apresentar limitações referentes ao uso das componentes de seqüência e desconsideração do efeito capacitivo da linha.

Em comparação com outras metodologias, o Método de Das *et al.* (1998) apresenta um desempenho bastante superior, destacando-se na localização de todos os tipos de falta, independente do local ou da resistência mesma (MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008). Entretanto, deve-se notar as condições do sistema analisado: laterais com carregamento monofásico e relativamente baixo, juntamente com linhas transpostas.

2.5 Método de Zhu *et al.* (1997)

Apesar do Método de Zhu *et al.* (1997) ter sido publicado anteriormente ao Método de Das *et al.* (1998), a realização de ambos os trabalhos foi realizada praticamente ao mesmo tempo, sendo que cada um dos trabalhos foi fundamentado de uma forma diferente. O Método de Zhu *et al.* (1997) foi um dos primeiros a não ser baseado em componentes simétricas, sendo todo o seu desenvolvimento realizado em componentes de fase. Este foi um grande avanço nas metodologias de localização de faltas para sistemas de distribuição de energia, visto que estes sistemas dificilmente apresentam linhas geometricamente simétricas (ou transpostas) na prática. Entretanto, o efeito capacitivo ainda não é considerado neste método e o mesmo foi realizado somente para faltas monofásicas à terra, sendo o seu trabalho estendido posteriormente em alguns aspectos por Lee *et al.* (2004) e por Salim *et al.* (2008).

Inicialmente Zhu *et al.* (1997) propuseram um novo equacionamento do local da falta que possui a corrente de falta como um dos parâmetros de entrada para o seu cálculo. A partir deste equacionamento um algoritmo iterativo para o cálculo desta corrente, fundamentado juntamente com o cálculo do local da falta, é realizado, comparando-se seqüencialmente a impedância estimada no ponto da falta com a impedância equivalente da carga.

Considere o circuito da Figura 2.5, que representa um SDEE em falta (A-g). Todas as cargas posteriores à falta foram agregadas em uma carga equivalente trifásica \mathbf{Z}_R , e a corrente total despachada a elas é \mathbf{I}_L . Sabendo ainda que \mathbf{Z}_{abc} é a matriz impedância série da linha, e que \mathbf{V}_S e \mathbf{I}_S representam respectivamente os vetores de tensão e corrente medidos no terminal local, a tensão medida na fase a do terminal local é dada por

$$\mathbf{V}_{S_a} = x \cdot (\mathbf{Z}_{abc_{aa}} \cdot \mathbf{I}_{S_a} + \mathbf{Z}_{abc_{ab}} \cdot \mathbf{I}_{S_b} + \mathbf{Z}_{abc_{ac}} \cdot \mathbf{I}_{S_c}) + R_F \cdot \mathbf{I}_F, \quad (2.43)$$

onde \mathbf{I}_F é a corrente de falta, os subscritos indicam as fases associadas aos parâmetros, e

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_{S_a} - \mathbf{I}_{L_a}. \quad (2.44)$$

Multiplicando os dois lados de (2.43) por I_F^* , o conjugado da corrente de falta, e sabendo que o termo $I_F \cdot I_F^* \cdot R_F$ é um número real, obtém-se que

$$x = \frac{\Im \{ I_F \cdot \mathbf{V}_{S_a}^* \}}{\Im \{ I_F \cdot M_a^* \}} \quad (2.45)$$

onde

$$M_a = \sum_{m=\{a,b,c\}} \mathbf{Z}_{abc_{am}} \cdot \mathbf{I}_{S_m} \quad (2.46)$$

Através de (2.45), válida para faltas fase-terra, pode-se utilizar o algoritmo descrito a seguir para estimar o local da falta:

- I) Assuma que a corrente de carga do sistema em falta, \mathbf{I}_{L_a} , é igual a corrente de carga pré-falta, \mathbf{I}'_{S_a} ;
- II) Calcule a corrente de falta utilizando (2.44);
- III) Estime o local da falta utilizando (2.45);
- IV) Calcule a tensão no ponto da falta utilizando (2.47):

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{V}_S - x \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{I}_S \quad (2.47)$$

- V) Atualize a corrente de carga, I_{L_a} , utilizando a tensão no ponto da falta calculada no passo anterior e um algoritmo de fluxo de potência para SDEE;
- VI) Utilizando (2.44) para atualizar a corrente de carga, uma nova estimativa do local da falta é realizada. Este processo se repete até que a distância da falta, x , convirja para algum valor.

Observe que o local estimado da falta pode estar em qualquer seção do sistema de distribuição. Quando x converge para um valor maior do que o tamanho da primeira seção da linha, a falta é determinada como além da primeira seção, e então realiza-se uma atualização nos valores de \mathbf{V}_S e \mathbf{I}_S para os valores da próxima barra através da análise direta de circuitos, de acordo com a Figura 2.6 e com as equações (2.48), (2.49), e (2.50):

$$\mathbf{V}_{k+1} = \mathbf{V}_k - \mathbf{Z}_{abc_k} \cdot \mathbf{I}_k \quad (2.48)$$

$$\mathbf{I}_{L_k} = \mathbf{Z}_{L_k}^{-1} \cdot \mathbf{V}_k \quad (2.49)$$

$$\mathbf{I}_{k+1} = \mathbf{I}_k - \mathbf{I}_{L_{k+1}} \quad (2.50)$$

onde os subscritos k e $k + 1$ representam as barras associadas às variáveis. Após a atualização destes valores o algoritmo é novamente executado e um novo local de falta é estimado. Este processo só termina quando uma falta é localizada dentro da mesma seção onde valores de tensão e corrente foram estimados no nó à jusante da falta ou que se chegue ao final do alimentador.

Neste trabalho, o tratamento das laterais é realizado de forma sistemática em conjunto com a atualização das tensões e correntes. Para tanto, é aproveitada a estrutura ramificada dos SDEE. Inicialmente a falta é procurada na seção de linha diretamente conectada à subestação. Se a falta estiver além desta seção e houver uma ramificação no próximo nó do sistema, então são atualizadas as tensões e correntes em todos os nós à jusante

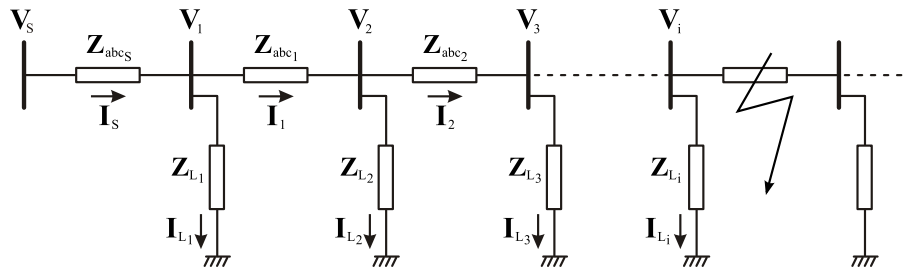


Figura 2.6: Atualização das Tensões e Correntes medidas na Subestação (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997).

do primeiro, resultando em múltiplas estimativas do local da falta, sendo o sistema de distribuição analisado de forma sistemática.

Note que o primeiro passo do algoritmo consiste na obtenção de uma estimativa inicial para a corrente de falta. Na verdade, o cálculo do local da falta através da estimativa apresentada corresponde ao próprio Método de Takagi *et al.* (1982b), visto que tanto as equações de localização de faltas como a estimativa da corrente de falta são as mesmas. De forma geral, pode-se dizer que o Método de Zhu *et al.* (1997) compreende uma extensão do Método de Takagi *et al.* (1982b), onde as impedâncias das cargas são consideradas conhecidas e utilizadas para a localização de faltas. A volta ao uso das componentes de fase pelo presente método compreende também um avanço em termos de generalização para todas as geometrias de linhas. O efeito capacitivo, no entanto, ainda não é considerado por esta metodologia.

Mas o algoritmo apresentado é, na verdade, somente uma parte da metodologia proposta por Zhu *et al.* (1997). Outras propostas apresentadas no mesmo trabalho são a extensão probabilística do algoritmo de localização de faltas e também a redução das múltiplas estimativas do local da falta (quando da presença de laterais) para somente uma.

A extensão probabilística do algoritmo consiste na obtenção de uma região de possíveis locais de falta, tendo como base o próprio local de falta estimado, além das incertezas envolvidas no algoritmo, como parâmetros da linha e medições na subestação. A partir disto um valor médio e um desvio padrão do local da falta são calculados, apresentando uma idéia da região onde a falta pode estar localizada.

Já a redução das múltiplas estimativas do local da falta para somente uma é realizada através do diagnóstico das correntes medidas na subestação, em conjunto com o conhecimento do sistema de proteção e características do sistema. O conhecimento dos locais onde estão instalados os equipamentos de proteção, assim como das suas características de operação, possibilita o diagnóstico e obtenção de somente um local de falta. Isto porque a atuação dos equipamentos de proteção pode ser observada através das tensões e correntes medidas na subestação. De forma geral, duas evidências podem ser utilizadas para a redução das múltiplas estimativas, a saber, a seqüência de eventos extraída das medidas de tensão e corrente, e a variação da carga durante a atuação dos equipamentos de proteção. Enquanto o primeiro possibilita a determinação dos equipamentos de proteção que atuaram (baseado na seqüência temporal de eventos e da corrente de falta), o segundo possibilita a determinação dos consumidores afetados pela atuação do sistema de proteção.

Entretanto, Zhu *et al.* (1997) propõem a determinação da lateral faltosa através de um algoritmo heurístico baseado na simulação do sistema de distribuição. O sistema é modelado em um programa computacional incluindo o seu sistema de proteção, com a maior

precisão possível. Então cada um dos locais de falta encontrados através do algoritmo proposto pelos autores é simulado. As tensões e correntes na subestação obtidas através das simulações são então comparadas com as tensões e correntes obtidas em campo, e o desvio temporal de atuação dos equipamentos nos dois casos é calculado, juntamente com o desvio na variação de carga. A partir destes desvios é possível obter um local de falta mais provável, considerando as incertezas previamente calculadas na extensão probabilística do algoritmo.

2.5.1 Método de Lee *et al.* (2004)

O Método de Lee *et al.* (2004) apresenta algumas diferenças em relação ao Método de Zhu *et al.* (1997), no entanto, aparece como a continuação do último. Um dos principais aspectos relativos a esta continuação é uma apresentação matemática mais concisa, apesar de não utilizar a extensão probabilística previamente existente.

A primeira diferença diz respeito a atualização da corrente de falta, que não é realizada através de um algoritmo de fluxo de potência. No Método de Lee *et al.* (2004) o algoritmo de localização de faltas é o mesmo, entretanto, toda a carga à jusante da seção analisada é agregada como somente uma, através das relações série-paralelo existentes entre as impedâncias das linhas e as impedâncias das cargas. Todo o procedimento de cálculo da carga equivalente é realizado considerando-se matrizes de impedâncias tanto nas linhas como nas cargas quando a impedância das cargas é conhecida, sendo que quando esta não é conhecida é prevista a desconsideração do acoplamento mútuo. Além disso, é também proposta a estimativa da corrente de carga juntamente com o prévio conhecimento da tensão em cada uma das cargas, o que na prática dificilmente está disponível.

Esta metodologia ainda utiliza o mesmo princípio baseado na atuação dos equipamentos de proteção e na variação da carga quando da ocorrência da mesma para redução das múltiplas estimativas à uma. Entretanto, este método diferencia-se por não necessitar de simulações para tanto, utilizando uma forma mais eficiente de avaliação direta das tensões e correntes medidas na subestação.

O Método de Lee *et al.* (2004) foi comparado com as metodologias de LDF baseadas em componentes simétricas. Os resultados, entretanto, não mostraram-se efetivamente superiores, especialmente porque o sistema de distribuição analisado possuía linhas transpostas. Deste modo, o principal avanço desta metodologia em comparação com as metodologias baseadas em componentes simétricas não pôde ser observado (MORA-FLÓREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008).

2.5.2 Extensão do Método de Lee *et al.* (2004)

Como continuação dos prévios desenvolvimentos apresentados por Lee *et al.* (2004), Salim *et al.* (2008) apresentaram uma extensão deste método através de três novidades incorporadas ao método.

A primeira extensão proposta que ainda não havia sido abordada por Zhu *et al.* (1997) ou Lee *et al.* (2004), em relação às metodologias anteriores a estas, diz respeito ao tipo da falta. Tanto Zhu *et al.* (1997) como Lee *et al.* (2004) apresentaram a metodologia somente para faltas monofásicas à terra, sendo que Salim *et al.* (2008) estenderam a análise para qualquer tipo de falta através da obtenção de novas equações para faltas bifásicas à terra, trifásicas à terra, e faltas fase-fase. Esta extensão supriu uma das deficiências do Método de Zhu *et al.* (1997) em relação às metodologias baseadas em componentes simétricas, que já apresentavam equacionamentos para todos os tipos de falta.

A segunda extensão diz respeito à atualização da corrente de carga, bem como da

consideração das laterais. A forma de consideração das mesmas pelo Método de Zhu *et al.* (1997) não é computacionalmente eficiente, na medida em que a cada iteração do algoritmo um fluxo de potência deve ser calculado. Ao mesmo tempo, a proposta de Lee *et al.* (2004) mostra-se inadequada para sistemas de distribuição de grande extensão e altamente ramificados, dado que é necessário cálculo de diversas relações série-paralelo de impedâncias. Sendo assim, Salim *et al.* (2008) propõem a utilização de um cálculo de fluxo de potência no sistema pré-falta previamente ao início do algoritmo, sendo que as tensões e correntes em cada barra do sistema, obtidas através deste fluxo, são utilizadas para a obtenção de uma impedância equivalente em cada nó. Este procedimento, entretanto, resulta em impedâncias equivalentes por fase, ou seja, o acoplamento mútuo é desprezado dos equivalentes. Além disso, diferentes modelos de cargas não podem ser eficientemente representados nesta forma de obtenção dos equivalentes, visto que as variações de tensão devido à falta não são representadas no cálculo do fluxo de potência. Não obstante, a eficiência no cálculo representa um avanço em relação às metodologias em componentes de fase previamente existentes.

A terceira extensão proposta por Salim *et al.* (2008) apresenta o principal avanço dentre as extensões apresentadas pelos autores. Esta versa sobre a questão da variação da carga no sistema de distribuição, antes considerada através da medição de tensões e correntes em cada nó conectando uma carga pelo Método de Lee *et al.* (2004). Salim *et al.* (2008) propuseram o cálculo de duas impedâncias vistas a partir da subestação, a impedância equivalente padrão e a impedância equivalente medida. A impedância equivalente padrão corresponde à impedância por fase vista dos terminais da subestação quando da operação do sistema em um dado ponto de operação padrão (em relação às cargas). Já a impedância equivalente medida é a impedância efetivamente medida nos terminais da subestação alguns ciclos antes da ocorrência da falta, representando o estado do sistema logo antes da falta. De posse destas duas variáveis uma taxa de variação de carga em cada fase m , $\Delta Load_m$, é obtida, de acordo com (2.51):

$$\Delta Load_m = \frac{Z_{Load-2m} - Z_{Load-1m}}{Z_{Load-1m}}, \quad (2.51)$$

onde $Z_{Load-1m}$ e $Z_{Load-2m}$ são respectivamente a impedância equivalente padrão e medida da fase m . As matrizes das cargas são atualizadas através da multiplicação de cada uma por $\Delta Load_m$, considerando um percentual de variação uniforme em todas as cargas.

Apesar das simplificações realizadas nas extensões propostas por Salim *et al.* (2008), estas apresentaram-se bastante eficientes, especialmente em relação à questão da variação de carga. Os resultados obtidos pelos autores apresentaram-se altamente superiores aos obtidos através do Método de Lee *et al.* (2004) quando da variação da carga sem a medição da tensão nas mesmas, mostrando-se uma técnica promissora para a localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Apesar disto, nenhuma consideração do efeito capacitivo foi realizada pelos autores.

2.6 Método de Choi *et al.* (2004; 2007)

Apesar de considerar a natureza assimétrica das linhas de distribuição, o Método de Lee *et al.* (2004) utiliza um algoritmo iterativo para a solução do local da falta, o que pode ocasionar em erros oriundos deste processo iterativo. Sendo assim, Choi *et al.* (2004; 2007) apresentaram um equacionamento alternativo para a localização de faltas fase-terra e fase-fase. Este equacionamento utiliza um modelo RL da linha e resulta em

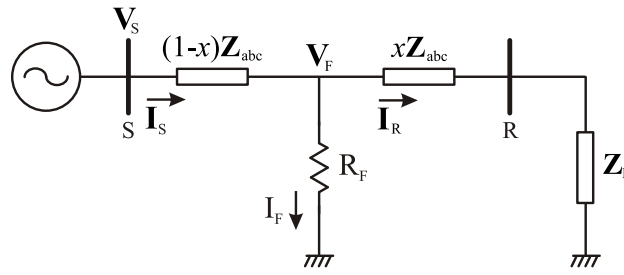


Figura 2.7: Falta Fase-Terra em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (CHOI *et al.*, 2004).

uma equação direta para a localização de faltas em sistemas de distribuição. Todo o restante do Método de Lee *et al.* (2004) continua o mesmo: equivalência das laterais e cargas à jusante da falta, atualização das tensões e correntes medidas na subestação, e a consideração da medição das tensões nas cargas para a análise da sua variação. Este método pode ser considerado oriundo do Método de Lee *et al.* (2004) pois também considera como conhecidas as cargas do sistema, utilizando-as para a obtenção do local da falta.

Considere a Figura 2.7, que apresenta um SDEE sujeito a uma falta monofásica à terra (A-g) e \mathbf{Z}_R representa a impedância equivalente da carga. As tensões trifásicas no terminal S são dadas por

$$\mathbf{V}_S = (1-x) \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{I}_S + \mathbf{V}_F. \quad (2.52)$$

A tensão na fase faltosa, V_{S_a} , ainda pode ser expressa por

$$V_{S_a} = (1-x) \cdot (Z_{abc_{aa}} I_{S_a} + Z_{abc_{ab}} I_{S_b} + Z_{abc_{ac}} I_{S_c}) + R_F \cdot I_F. \quad (2.53)$$

sendo \mathbf{V}_S , \mathbf{I}_S , e \mathbf{V}_F respectivamente os vetores de tensão e corrente medidas no terminal local e de tensão no ponto da falta, e \mathbf{Z}_{abc} a matriz de impedância série da linha.

Sabendo que a matriz admitância da falta, \mathbf{Y}_F , é dada por

$$\mathbf{Y}_F = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_F} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

e que a matriz admitância da carga, \mathbf{Y}_L , pode ser obtida através do inverso da soma da impedância série da linha com a impedância da carga,

$$\mathbf{Y}_L = (x \cdot \mathbf{Z}_{abc} + \mathbf{Z}_R)^{-1}, \quad (2.55)$$

a corrente de falta, \mathbf{I}_F , pode ser obtida através de \mathbf{I}_S e da utilização da lei de distribuição de correntes em circuitos paralelos. A corrente de falta é então dada por (2.56):

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{Y}_F \cdot \left[\mathbf{Y}_F + (x \cdot \mathbf{Z}_{abc} + \mathbf{Z}_R)^{-1} \right]^{-1} \cdot \mathbf{I}_S \quad (2.56)$$

onde $\mathbf{I}_F = [I_F \ 0 \ 0]^T$. Para inverter a matriz $\left[\mathbf{Y}_F + (x \cdot \mathbf{Z}_{abc} + \mathbf{Z}_R)^{-1} \right]^{-1}$, considere o seguinte lema de inversão de matrizes:

$$(\mathbf{A}^{-1} + \mathbf{BCD})^{-1} = \mathbf{A} - \mathbf{AB} \cdot (\mathbf{C}^{-1} + \mathbf{DAB})^{-1} \cdot \mathbf{DA}. \quad (2.57)$$

Definindo

$$\mathbf{A} \equiv (x \cdot \mathbf{Z}_{abc} + \mathbf{Z}_R) = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a4 & a5 & a6 \\ a7 & a8 & a9 \end{bmatrix},$$

$\mathbf{B} \equiv [1 \ 0 \ 0]^T$, $\mathbf{C} \equiv 1/R_F$, e $\mathbf{D} \equiv [1 \ 0 \ 0]$ pode-se aplicar o lema dado por (2.57) e obter (2.58);

$$\left[\mathbf{Y}_F + (x \cdot \mathbf{Z}_{abc} + \mathbf{Z}_R)^{-1} \right]^{-1} = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a4 & a5 & a6 \\ a7 & a8 & a9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a1 \\ a4 \\ a7 \end{bmatrix} \cdot (R_F + a1)^{-1} \cdot [a1 \ a2 \ a3]. \quad (2.58)$$

Note que a primeira linha de (2.58) é dada por

$$[a1 \ a2 \ a3] - \frac{1}{R_F + a1} \cdot [a1a1 \ a1a2 \ a1a3] = \frac{R_F}{R_F + a1} \cdot [a1 \ a1 \ a1]. \quad (2.59)$$

Assim, (2.56) pode ser reescrita para

$$\begin{bmatrix} I_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{R_F}{R_F + a1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{R_F} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ \times & \times & \times \\ \times & \times & \times \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix}, \quad (2.60)$$

onde \times representa um elemento irrelevante para a análise realizada. A corrente de falta pode então ser expressa através de (2.61):

$$I_F = \frac{1}{R_F + x \cdot Z_{abc_{aa}} + Z_{R_{aa}}} \cdot \begin{bmatrix} x \cdot Z_{abc_{aa}} + Z_{R_{aa}} & x \cdot Z_{abc_{ab}} + Z_{R_{ab}} & x \cdot Z_{abc_{ac}} + Z_{R_{ac}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Substituindo (2.61) em (2.53) resulta em

$$[V_{S_a} - (1-x) \cdot C_1] \cdot [R_F + x \cdot Z_{abc_{aa}} + Z_{R_{aa}}] - R_F \cdot [x \cdot C_1 + C_2] = 0, \quad (2.62)$$

onde

$$C_1 = Z_{abc_{aa}} \cdot I_{S_a} + Z_{abc_{ab}} \cdot I_{S_b} + Z_{abc_{ac}} \cdot I_{S_c} \quad (2.63)$$

$$C_2 = Z_{R_{aa}} \cdot I_{S_a} + Z_{R_{ab}} \cdot I_{S_b} + Z_{R_{ac}} \cdot I_{S_c}. \quad (2.64)$$

Rearranjando (2.62) resulta em

$$x^2 \cdot [a_r + j \cdot a_i] + x \cdot [b_r + j \cdot b_i] + [c_r + j \cdot c_i] + R_F \cdot [d_r + j \cdot d_i] = 0, \quad (2.65)$$

onde

$$a = a_r + j \cdot a_i = C_1 \cdot Z_{abc_{aa}} \quad (2.66)$$

$$b = b_r + j \cdot b_i = V_{S_a} \cdot Z_{abc_{aa}} - C_1 \cdot Z_{abc_{aa}} \cdot C_1 \cdot Z_{R_{aa}} \quad (2.67)$$

$$c = c_r + j \cdot c_i = Z_{R_{aa}} \cdot (V_{S_a} - C_1) \quad (2.68)$$

$$d = d_r + j \cdot d_i = V_{S_a} - C_1 - C_2. \quad (2.69)$$

A parte imaginária de (2.65) é dada por

$$R_F = -\frac{x^2 \cdot a_i + x \cdot b_i + c_i}{d_i} \quad (2.70)$$

Substituindo (2.70) na parte real de (2.65) resulta na equação para localização de faltas fase-terra:

$$x^2 \cdot \Im \{d \cdot a^*\} + x \cdot \Im \{d \cdot b^*\} + \Im \{d \cdot c^*\} = 0. \quad (2.71)$$

A expressão (2.71) é uma equação direta de localização de faltas, que não necessita de uma estimativa da corrente de falta. Os coeficientes do polinômio dependem exclusivamente dos parâmetros das linhas, da impedância das cargas e das tensões e correntes medidas na subestação durante a falta. Além disso, todo o equacionamento foi realizado em componentes de fase, o que generaliza o estudo para qualquer geometria de linha. É um resultado de extraordinário avanço em termos de localização de faltas, apesar de ainda assim não considerar o efeito capacitivo da linha. Além disso, (2.71) resulta em dois locais de falta, sendo que os autores sugerem que o local correto é o que está compreendido entre 0 e 1. Entretanto, não há garantias de que somente uma das soluções estará entre 0 e 1 e os autores não apresentam qualquer observação a respeito disto.

Um procedimento similar ao apresentado foi também realizado para faltas fase-fase, como descrito em (CHOI *et al.*, 2007). Equacionamentos similares para outros tipos de faltas não foram desenvolvidos pelos autores, especialmente pela complexidade matemática dos mesmos, dado que as inversões de matrizes não serão tão simples devido ao aumento de termos diferentes e não nulos em \mathbf{Y}_F . Esta mesma complexidade matemática também limita a consideração do efeito capacitivo nesta metodologia de localização de faltas.

Assim como o Método de Lee *et al.* (2004), o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) foi comparado com as metodologias de LDF baseadas em componentes simétricas. Os resultados também não mostraram-se efetivamente superiores, especialmente porque o sistema de distribuição analisado apresentava transposição das linhas. Deste modo, o principal avanço desta metodologia em comparação com as metodologias baseadas em componentes simétricas também não pôde ser observado (MORA-FLÓREZ; MELÉN-DEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008).

3 DESENVOLVIMENTOS PROPOSTOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS FUNDAMENTADA NA IMPEDÂNCIA

A revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 mostrou que as metodologias existentes de localização de faltas para sistemas de distribuição de energia elétrica, independentemente se desenvolvidas em componentes simétricas ou componentes de fase, desconsideram o efeito capacitivo da linha. Neste capítulo é apresentado um novo equacionamento para a LDF em SDEE que considera a capacitância da linha, bem como um novo algoritmo que prevê a utilização deste equacionamento. Tanto o equacionamento desenvolvido como o algoritmo proposto são inspirados no Método de Lee *et al.* (LEE *et al.*, 2004). A diferença está no modelo de linha utilizado, dado por um circuito π calculado na frequência fundamental do sistema. A utilização de tal modelo é adequada para a análise proposta, dado que além da linha ser curta, a análise do sistema é realizada considerando-se somente a frequência fundamental do sistema.

3.1 Equacionamento Proposto Considerando a Capacitância da Linha

A Figura 3.1 apresenta o modelo completo de uma linha de distribuição de energia elétrica para análise na frequência fundamental (KERSTING, 2002). Este modelo representa o efeito capacitivo da linha através de duas matrizes de susceptâncias conectadas no final e no início da linha, sendo a capacitância total da linha dividida entre estas duas matrizes. Além desta característica, este modelo ainda representa corretamente a natureza assimétrica da geometria das linhas de distribuição ao utilizar os parâmetros trifásicos em componentes de fase das mesmas. Apesar disto, a natureza distribuída dos parâmetros da

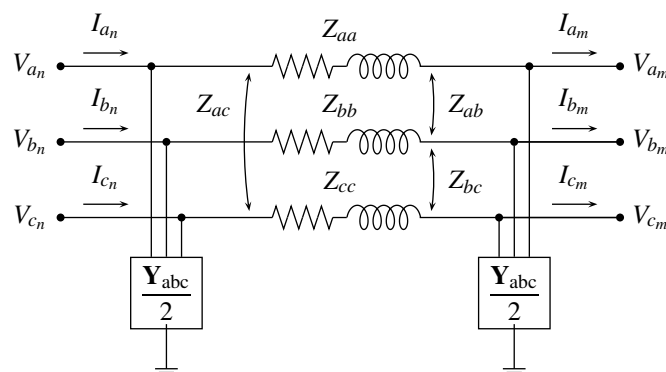


Figura 3.1: Linha de distribuição de energia elétrica

linha não é corretamente representada¹. Entretanto, a utilização de um circuito π -trifásico para a representação das linhas apresenta-se adequada, dado que as linhas de distribuição não deixam de ser consideradas linhas curtas e que a análise deste trabalho é realizada somente com as componentes da frequência fundamental.

Utilizando a notação desta Figura, pode-se escrever que (KERSTING, 2002)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{abc_m} \\ \mathbf{I}_{abc_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_\ell & -\mathbf{b}_\ell \\ -\mathbf{c}_\ell & \mathbf{a}_\ell \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{abc_n} \\ \mathbf{I}_{abc_n} \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

onde

$$\mathbf{a}_\ell = \mathbf{d}_\ell = \mathbf{I} + 0.5 \cdot \ell^2 \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{b}_\ell = \ell \cdot \mathbf{Z}_{abc} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{c}_\ell = \ell \cdot \mathbf{Y}_{abc} + 0.25 \cdot \ell^3 \cdot \mathbf{Y}_{abc} \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc}, \quad (3.4)$$

sendo que \mathbf{I} representa a matriz identidade de ordem três, ℓ representa o comprimento total da linha, \mathbf{V}_{abc_m} e \mathbf{I}_{abc_m} representam respectivamente o vetor de tensões e correntes trifásicas no terminal m , e \mathbf{Z}_{abc} e \mathbf{Y}_{abc} representam a matriz de impedância série e de admitância paralelo em Ω e Ω^{-1} por unidade de comprimento, respectivamente.

A partir de (3.1) obtém-se (3.5):

$$\mathbf{V}_{abc_m} = \mathbf{d}_\ell \cdot \mathbf{V}_{abc_n} - \mathbf{b}_\ell \cdot \mathbf{I}_{abc_n}. \quad (3.5)$$

Para uma falta distante de x metros do início da linha, a equação (3.5) pode ser reescrita conforme (3.6):

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{d}_x \cdot \mathbf{V}_S - \mathbf{b}_x \cdot \mathbf{I}_S, \quad (3.6)$$

onde \mathbf{V}_F é um vetor que representa as tensões trifásicas no ponto da falta.

As equações de localização de faltas originam-se a partir de (3.6). Nas seções subsequentes é apresentado o desenvolvimento da equação para localização de faltas considerando cada um dos seus tipos, incluindo um equacionamento genérico para faltas à terra.

3.1.1 Falta Fase-Terra

Considere uma falta fase-terra na fase a , distante de x metros do terminal local, como ilustra a Figura 3.2. Nestas condições, a tensão no ponto da falta, V_{F_a} , pode ser expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_{F_a} &= V_{S_a} + 0.5 \cdot x^2 \cdot \begin{bmatrix} ZY_{11} & ZY_{12} & ZY_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} \\ &= Z_{F_a} \cdot I_{F_a}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

onde V_S e I_S representam respectivamente as tensões e correntes no terminal local S , V_F e I_F representam respectivamente a tensão no ponto da falta e a corrente de falta, os

¹Tal característica não foi representada dado que a utilização de um modelo de linha com parâmetros distribuídos resultaria em um conjunto de equações não-lineares representando a mesma, dificultando tanto a obtenção de equações para a solução do problema de localização de faltas, como a própria solução destas equações.

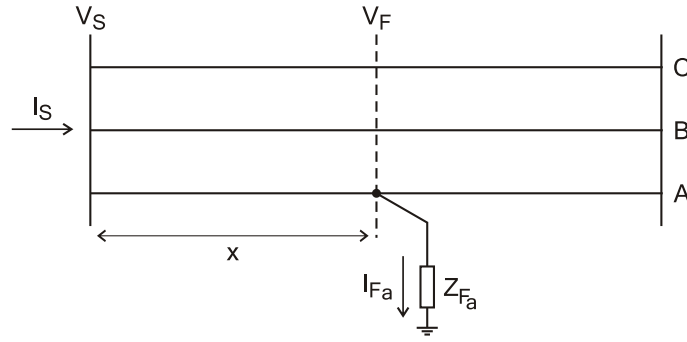


Figura 3.2: Falta Fase-Terra

subscritos a , b , e c indicam a fase do sistema à qual se refere a variável, $Z_{F_a} = R_{F_a} + j \cdot X_{F_a}$ e

$$\begin{bmatrix} ZY_{11} & ZY_{12} & ZY_{13} \\ ZY_{21} & ZY_{22} & ZY_{23} \\ ZY_{31} & ZY_{32} & ZY_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

sendo Z_{kk} e Y_{kk} respectivamente a impedância própria e a admitância à terra da fase k , e Z_{mn} e Y_{mn} respectivamente a impedância mútua e a admitância entre as fases m e n .

Pode-se reescrever (3.7) conforme (3.9):

$$Z_{F_a} \cdot I_{F_a} = V_{S_a} + 0.5 \cdot x^2 \cdot M_a - x \cdot N_a, \quad (3.9)$$

onde

$$\begin{aligned} M_a &= ZY_{11} \cdot V_{S_a} + ZY_{12} \cdot V_{S_b} + ZY_{13} \cdot V_{S_c} \\ N_a &= Z_{aa} \cdot I_{S_a} + Z_{ab} \cdot I_{S_b} + Z_{ac} \cdot I_{S_c}. \end{aligned}$$

Considerando a resistência de falta como um número real e separando a parte real da parte imaginária em (3.9), obtêm-se

$$R_{F_a} \cdot I_{F_{ar}} = V_{S_{ar}} + 0.5 \cdot x^2 \cdot M_{ar} - x \cdot N_{ar} \quad (3.10)$$

$$R_{F_a} \cdot I_{F_{ai}} = V_{S_{ai}} + 0.5 \cdot x^2 \cdot M_{ai} - x \cdot N_{ai}, \quad (3.11)$$

onde os subscritos r e i indicam respectivamente as partes reais e imaginárias das variáveis correspondentes.

Isolando R_{F_a} em (3.10) e substituindo em (3.11), obtêm-se (3.12):

$$\left[\frac{V_{S_{ar}}}{I_{F_{ar}}} + \frac{x^2}{2} \cdot \frac{M_{ar}}{I_{F_{ar}}} - x \cdot \frac{N_{ar}}{I_{F_{ar}}} \right] \cdot I_{F_{ai}} = V_{S_{ai}} + \frac{x^2}{2} \cdot M_{ai} - x \cdot N_{ai}. \quad (3.12)$$

Rearranjando os termos de (3.12), obtêm-se o seguinte polinômio de segunda ordem em x :

$$x^2 \cdot \left[\frac{M_{ai}}{2 \cdot I_{F_{ai}}} - \frac{M_{ar}}{2 \cdot I_{F_{ar}}} \right] - x \cdot \left[\frac{N_{ai}}{I_{F_{ai}}} - \frac{N_{ar}}{I_{F_{ar}}} \right] + \left[\frac{V_{S_{ai}}}{I_{F_{ai}}} - \frac{V_{S_{ar}}}{I_{F_{ar}}} \right] = 0. \quad (3.13)$$

A multiplicação de (3.13) por $I_{F_{ai}} \cdot I_{F_{ar}}$, resulta em (3.14):

$$0.5 \cdot x^2 \cdot \left[M_{ai} I_{F_{ar}} - M_{ar} I_{F_{ai}} \right] - x \cdot \left[N_{ai} I_{F_{ar}} - N_{ar} I_{F_{ai}} \right] + \left[V_{S_{ai}} I_{F_{ar}} - V_{S_{ar}} I_{F_{ai}} \right] = 0, \quad (3.14)$$

ou seja:

$$0.5 \cdot x^2 \cdot \Im \{M_a \cdot I_{F_a}^*\} - x \cdot \Im \{N_a \cdot I_{F_a}^*\} + \Im \{V_{S_a} \cdot I_{F_a}^*\} = 0, \quad (3.15)$$

onde $\Im \{ \cdot \}$ denota a parte imaginária de um número complexo.

A expressão (3.15), que determina a localização de faltas fase terra na fase a , pode ser generalizada para faltas fase-terra na fase k através de (3.16):

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} - x \cdot \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\} + \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\} = 0, \quad (3.16)$$

onde

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ZY_{11} & ZY_{12} & ZY_{13} \\ ZY_{21} & ZY_{22} & ZY_{23} \\ ZY_{31} & ZY_{32} & ZY_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} N_a \\ N_b \\ N_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

As raízes de (3.16) dependem dos seus coeficientes, que por sua vez dependem das medidas de tensão e corrente no terminal local, bem como dos parâmetros série e paralelo da linha (vide (3.17) e (3.18)) e da corrente de falta. Dentre todas estas variáveis, somente a corrente de falta não é conhecida previamente ao cálculo do local da falta, portanto, um algoritmo iterativo é utilizado para a sua determinação, juntamente com a distância x da falta ao terminal local.

O equacionamento desenvolvido nesta seção é válido somente para faltas fase-terra. Para outros tipos de falta, equações específicas devem ser obtidas, e serão desenvolvidas a seguir. Para tanto, utilizam-se as expressões (3.6), (3.17), e (3.18), previamente obtidas.

3.1.2 Falta Fase-Fase Terra

No caso da falta fase-fase terra, cujo modelo adotado está ilustrado na Figura 3.3, a relação $V \times I$ no ponto da falta é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{F_a} + Z_{F_g} & Z_{F_g} \\ Z_{F_g} & Z_{F_b} + Z_{F_g} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{F_a} \\ I_{F_b} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

onde $Z_{F_k} = R_{F_k} + j \cdot X_{F_k}$.

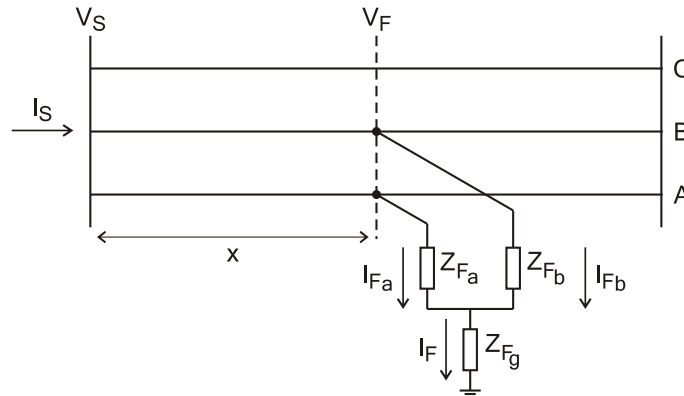


Figura 3.3: Falta Fase-Fase Terra

Substituindo (3.19) em (3.6), e considerando (3.17) e (3.18), as seguintes expressões podem ser obtidas:

$$(Z_{F_a} + Z_{F_g}) \cdot I_{F_a} + (Z_{F_g}) \cdot I_{F_b} = V_{S_a} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_a - x \cdot N_a \quad (3.20)$$

$$(Z_{F_g}) \cdot I_{F_a} + (Z_{F_b} + Z_{F_g}) \cdot I_{F_b} = V_{S_b} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_b - x \cdot N_b. \quad (3.21)$$

Considerando que as impedâncias de falta (Z_{F_a} , Z_{F_b} , e Z_{F_g}) são puramente resistivas e separando a parte real da parte imaginária de (3.20) e (3.21), obtêm-se:

$$(R_{F_a} + R_{F_g}) \cdot I_{F_{ar}} + (R_{F_g}) \cdot I_{F_{br}} = V_{S_{ar}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{ar} - x \cdot N_{ar} = \alpha \quad (3.22)$$

$$(R_{F_a} + R_{F_g}) \cdot I_{F_{ai}} + (R_{F_g}) \cdot I_{F_{bi}} = V_{S_{ai}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{ai} - x \cdot N_{ai} = \beta \quad (3.23)$$

$$(R_{F_g}) \cdot I_{F_{ar}} + (R_{F_b} + R_{F_g}) \cdot I_{F_{br}} = V_{S_{br}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{br} - x \cdot N_{br} = \gamma \quad (3.24)$$

$$(R_{F_g}) \cdot I_{F_{ai}} + (R_{F_b} + R_{F_g}) \cdot I_{F_{bi}} = V_{S_{bi}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{bi} - x \cdot N_{bi} = \delta \quad (3.25)$$

Pode-se reescrever (3.22) e (3.24) respectivamente como funções de R_{F_a} e R_{F_b} , obtendo-se (3.26) e (3.27):

$$R_{F_a} = \frac{\alpha}{I_{F_{ar}}} - R_{F_g} \cdot \left[1 + \frac{I_{F_{br}}}{I_{F_{ar}}} \right] \quad (3.26)$$

$$R_{F_b} = \frac{\gamma}{I_{F_{br}}} - R_{F_g} \cdot \left[1 + \frac{I_{F_{ar}}}{I_{F_{br}}} \right]. \quad (3.27)$$

Substituindo (3.26) e (3.27) respectivamente em (3.23) e (3.25), duas expressões para R_{F_g} podem ser obtidas:

$$R_{F_g} = \frac{\beta \cdot I_{F_{ar}} - \alpha \cdot I_{F_{ai}}}{\Im \left\{ I_{F_a}^* \cdot I_{F_b} \right\}} \quad (3.28)$$

$$R_{F_g} = \frac{\delta \cdot I_{F_{br}} - \gamma \cdot I_{F_{bi}}}{\Im \left\{ I_{F_a} \cdot I_{F_b}^* \right\}}. \quad (3.29)$$

Igualando (3.28) e (3.29), obtém-se:

$$\beta \cdot I_{F_{ar}} - \alpha \cdot I_{F_{ai}} = - \left[\delta \cdot I_{F_{br}} - \gamma \cdot I_{F_{bi}} \right] \quad (3.30)$$

visto que $\Im \left\{ I_{F_a}^* \cdot I_{F_b} \right\} = -\Im \left\{ I_{F_a} \cdot I_{F_b}^* \right\}$.

A substituição dos valores de α , β , γ , e δ em (3.30), resulta em (3.31):

$$\begin{aligned} & x^2 \cdot 0.5 \cdot \left[M_{ai} I_{F_{ar}} - M_{ar} I_{F_{ai}} + M_{bi} I_{F_{br}} - M_{br} I_{F_{bi}} \right] \\ & - x \cdot \left[N_{ai} I_{F_{ar}} - N_{ar} I_{F_{ai}} + N_{bi} I_{F_{br}} - N_{br} I_{F_{bi}} \right] \\ & + \left[V_{S_{ai}} I_{F_{ar}} - V_{S_{ar}} I_{F_{ai}} + V_{S_{bi}} I_{F_{br}} - V_{S_{br}} I_{F_{bi}} \right] = 0 \quad (3.31) \end{aligned}$$

ou seja:

$$\begin{aligned} & x^2 \cdot 0.5 \cdot \left[\Im \left\{ M_a \cdot I_{F_a}^* \right\} + \Im \left\{ M_b \cdot I_{F_b}^* \right\} \right] \\ & - x \cdot \left[\Im \left\{ N_a \cdot I_{F_a}^* \right\} + \Im \left\{ N_b \cdot I_{F_b}^* \right\} \right] \\ & + \left[\Im \left\{ V_{S_a} \cdot I_{F_a}^* \right\} + \Im \left\{ V_{S_b} \cdot I_{F_b}^* \right\} \right] = 0 \quad (3.32) \end{aligned}$$

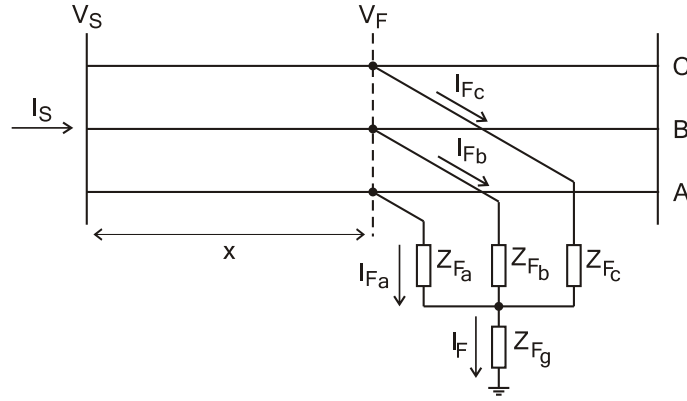


Figura 3.4: Falta Trifásica à Terra

A equação (3.32) pode ser generalizada para faltas fase-fase terra envolvendo duas fases genéricas m e n , resultando em:

$$x^2 \cdot \left[0.5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ M_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] - x \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ N_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] + \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ V_{S_k} \cdot I_{F_k}^* \} \right] = 0 \quad (3.33)$$

onde $\Omega_k = \{m, n\}$ representa o conjunto das fases envolvidas na falta.

3.1.3 Falta Trifásica-Terra

No caso da falta trifásica, cujo modelo adotado está ilustrado na Figura 3.4, a relação $V \times I$ no ponto da falta é representada por:

$$\begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{F_a} + Z_{F_g} & Z_{F_g} & Z_{F_g} \\ Z_{F_g} & Z_{F_b} + Z_{F_g} & Z_{F_g} \\ Z_{F_g} & Z_{F_g} & Z_{F_c} + Z_{F_g} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{F_a} \\ I_{F_b} \\ I_{F_c} \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

Substituindo (3.34) em (3.6), e considerando (3.17) e (3.18), formam-se as seguintes relações:

$$(Z_{F_a} + Z_{F_g}) \cdot I_{F_a} + Z_{F_g} \cdot (I_{F_b} + I_{F_c}) = V_{S_a} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_a - x \cdot N_a \quad (3.35)$$

$$(Z_{F_b} + Z_{F_g}) \cdot I_{F_b} + Z_{F_g} \cdot (I_{F_a} + I_{F_c}) = V_{S_b} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_b - x \cdot N_b \quad (3.36)$$

$$(Z_{F_c} + Z_{F_g}) \cdot I_{F_c} + Z_{F_g} \cdot (I_{F_a} + I_{F_b}) = V_{S_c} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_c - x \cdot N_c. \quad (3.37)$$

As equações (3.35)–(3.37) podem ser expressas em termos de suas componentes reais e imaginárias, considerando Z_{F_a} , Z_{F_b} e Z_{F_c} como puramente resistivas:

$$R_{F_a} I_{F_{ar}} + R_{F_g} I_{F_r} - X_{F_g} I_{F_i} = V_{S_{ar}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{ar} - x \cdot N_{ar} = T_1 \quad (3.38)$$

$$R_{F_a} I_{F_{ai}} + R_{F_g} I_{F_i} + X_{F_g} I_{F_r} = V_{S_{ai}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{ai} - x \cdot N_{ai} = T_2 \quad (3.39)$$

$$R_{F_b} I_{F_{br}} + R_{F_g} I_{F_r} - X_{F_g} I_{F_i} = V_{S_{br}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{br} - x \cdot N_{br} = T_3 \quad (3.40)$$

$$R_{F_b} I_{F_{bi}} + R_{F_g} I_{F_i} + X_{F_g} I_{F_r} = V_{S_{bi}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{bi} - x \cdot N_{bi} = T_4 \quad (3.41)$$

$$R_{F_c} I_{F_{cr}} + R_{F_g} I_{F_r} - X_{F_g} I_{F_i} = V_{S_{cr}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{cr} - x \cdot N_{cr} = T_5 \quad (3.42)$$

$$R_{F_c} I_{F_{ci}} + R_{F_g} I_{F_i} + X_{F_g} I_{F_r} = V_{S_{ci}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{ci} - x \cdot N_{ci} = T_6. \quad (3.43)$$

Agora, utilizando os pares de equações (3.38) e (3.39), (3.40) e (3.41), (3.42) e (3.43), pode-se isolar R_{F_k} aos pares e igualar os mesmos. Desta forma, obtêm-se um conjunto de três equações independentes de R_{F_k} , mas dependentes de x , R_{F_g} , e X_{F_g} :

$$R_{F_a} = \frac{1}{I_{F_{ar}}} \cdot [T_1 - R_{F_g} I_{F_r} + X_{F_g} I_{F_i}] = \frac{1}{I_{F_{ai}}} \cdot [T_2 - R_{F_g} I_{F_i} - X_{F_g} I_{F_r}] \quad (3.44)$$

$$R_{F_b} = \frac{1}{I_{F_{br}}} \cdot [T_3 - R_{F_g} I_{F_r} + X_{F_g} I_{F_i}] = \frac{1}{I_{F_{bi}}} \cdot [T_4 - R_{F_g} I_{F_i} - X_{F_g} I_{F_r}] \quad (3.45)$$

$$R_{F_c} = \frac{1}{I_{F_{cr}}} \cdot [T_5 - R_{F_g} I_{F_r} + X_{F_g} I_{F_i}] = \frac{1}{I_{F_{ci}}} \cdot [T_6 - R_{F_g} I_{F_i} - X_{F_g} I_{F_r}] , \quad (3.46)$$

que podem ser reescritas da seguinte forma:

$$R_{F_g} \cdot \left[-\frac{I_{F_r}}{I_{F_{ar}}} + \frac{I_{F_i}}{I_{F_{ai}}} \right] + X_{F_g} \cdot \left[\frac{I_{F_i}}{I_{F_{ar}}} + \frac{I_{F_r}}{I_{F_{ai}}} \right] + \left[\frac{T_1}{I_{F_{ar}}} - \frac{T_2}{I_{F_{ai}}} \right] = 0 \quad (3.47)$$

$$R_{F_g} \cdot \left[-\frac{I_{F_r}}{I_{F_{br}}} + \frac{I_{F_i}}{I_{F_{bi}}} \right] + X_{F_g} \cdot \left[\frac{I_{F_i}}{I_{F_{br}}} + \frac{I_{F_r}}{I_{F_{bi}}} \right] + \left[\frac{T_3}{I_{F_{br}}} - \frac{T_4}{I_{F_{bi}}} \right] = 0 \quad (3.48)$$

$$R_{F_g} \cdot \left[-\frac{I_{F_r}}{I_{F_{cr}}} + \frac{I_{F_i}}{I_{F_{ci}}} \right] + X_{F_g} \cdot \left[\frac{I_{F_i}}{I_{F_{cr}}} + \frac{I_{F_r}}{I_{F_{ci}}} \right] + \left[\frac{T_5}{I_{F_{cr}}} - \frac{T_6}{I_{F_{ci}}} \right] = 0 . \quad (3.49)$$

Multiplicando (3.47), (3.48), e (3.49) respectivamente por $-I_{F_{ar}} \cdot I_{F_{ai}}$, $-I_{F_{br}} \cdot I_{F_{bi}}$, e $-I_{F_{cr}} \cdot I_{F_{ci}}$, e realizando manipulações algébricas de números complexos, obtêm-se:

$$R_{F_g} \cdot \Im \{ I_{F_a} \cdot I_F^* \} - X_{F_g} \cdot \Re \{ I_{F_a} \cdot I_F \} + [T_1 \cdot I_{F_{ai}} - T_2 \cdot I_{F_{ar}}] = 0 \quad (3.50)$$

$$R_{F_g} \cdot \Im \{ I_{F_b} \cdot I_F^* \} - X_{F_g} \cdot \Re \{ I_{F_b} \cdot I_F \} + [T_3 \cdot I_{F_{bi}} - T_4 \cdot I_{F_{br}}] = 0 \quad (3.51)$$

$$R_{F_g} \cdot \Im \{ I_{F_c} \cdot I_F^* \} - X_{F_g} \cdot \Re \{ I_{F_c} \cdot I_F \} + [T_5 \cdot I_{F_{ci}} - T_6 \cdot I_{F_{cr}}] = 0 , \quad (3.52)$$

onde $\Re \{ \cdot \}$ representa a parte real de um número complexo.

Somando (3.50), (3.51), e (3.52):

$$R_{F_g} \cdot \underbrace{\Im \{ I_F \cdot I_F^* \}}_{\Im \{ |I_F|^2 \} = 0} - X_{F_g} \cdot |I_F|^2 + \dots = 0 . \quad (3.53)$$

Se Z_{F_g} for considerada puramente resistiva, tem-se que $X_{F_g} = 0$, ou seja:

$$\left[T_1 \cdot I_{F_{ai}} - T_2 \cdot I_{F_{ar}} \right] + \left[T_3 \cdot I_{F_{bi}} - T_4 \cdot I_{F_{br}} \right] + \left[T_5 \cdot I_{F_{ci}} - T_6 \cdot I_{F_{cr}} \right] = 0 . \quad (3.54)$$

Substituindo (3.38)–(3.43) em (3.54) e realizando manipulações algébricas envolvendo números complexos, o polinômio referente a localização de faltas trifásicas pode ser escrito de acordo com (3.55):

$$x^2 \cdot \left[0.5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ M_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] - x \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ N_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] + \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ V_{S_k} \cdot I_{F_k}^* \} \right] = 0 \quad (3.55)$$

onde $\Omega_k = \{a, b, c\}$ representa as fases envolvidas na falta.

3.1.4 Faltas à Terra

Analisando (3.16), (3.33) e (3.55) é possível observar uma certa similaridade nas equações de localização para cada um dos tipos de falta à terra: para cada fase faltosa adicionada, um novo termo surge em cada um dos coeficientes da equação de localização de faltas. É possível provar através de um único equacionamento que esta relação é válida.

Para tanto, considere novamente a Figura 3.4, que também pode representar um modelo mais genérico de falta envolvendo a terra (ANDERSON, 1995), visto que pode representar o caso de faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas à terra. A relação $V \times I$ no ponto da falta ainda pode ser representada por (3.34), onde somente as fases faltosas possuirão corrente de falta diferente de zero ($I_{F_k} \neq 0$)².

Substituindo (3.34) em (3.6), pode-se escrever para cada fase faltosa k que:

$$(Z_{F_k} + Z_{F_g}) \cdot I_{F_k} + Z_{F_g} \cdot (I_{F_t} + I_{F_u}) = V_{S_k} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_k - x \cdot N_k \quad (3.56)$$

onde t e u representam as fases do sistema diferentes de k , e M_k e N_k são definidos respectivamente por (3.17) e (3.18). Note que (3.56) resulta em n equações, onde n representa o número de fases faltosas.

Decompondo (3.56) em suas componentes reais e imaginárias e considerando Z_{F_a} , Z_{F_b} e Z_{F_c} como puramente resistivas, têm-se que

$$R_{F_k} I_{F_{k_r}} + R_{F_g} I_{F_r} - X_{F_g} I_{F_i} = V_{S_{k_r}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{k_r} - x \cdot N_{k_r} = T_{k_r} \quad (3.57)$$

$$R_{F_k} I_{F_{k_i}} + R_{F_g} I_{F_i} + X_{F_g} I_{F_r} = V_{S_{k_i}} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_{k_i} - x \cdot N_{k_i} = T_{k_i} \quad (3.58)$$

onde os subscritos r e i representam respectivamente as partes reais e imaginárias das variáveis.

Como resultado, têm-se $2n$ equações e $2n$ incógnitas, considerando que as impedâncias da falta também são incógnitas além da distância da falta, x . Utilizando as equações (3.57) e (3.58), pode-se isolar a resistência de falta, R_{F_k} , nas equações de cada fase faltosa e igualar as mesmas. Desta forma, obtêm-se um conjunto de n equações independentes de R_{F_k} , mas dependentes de x , R_{F_g} , e X_{F_g} :

$$R_{F_k} = \frac{1}{I_{F_{k_r}}} \cdot [T_{k_r} - R_{F_g} I_{F_r} + X_{F_g} I_{F_i}] = \frac{1}{I_{F_{k_i}}} \cdot [T_{k_i} - R_{F_g} I_{F_i} - X_{F_g} I_{F_r}] \quad (3.59)$$

Reescrevendo (3.59) obtêm-se para cada fase faltosa k que

$$R_{F_g} \cdot \left[-\frac{I_{F_r}}{I_{F_{k_r}}} + \frac{I_{F_i}}{I_{F_{k_i}}} \right] + X_{F_g} \cdot \left[\frac{I_{F_i}}{I_{F_{k_r}}} + \frac{I_{F_r}}{I_{F_{k_i}}} \right] + \left[\frac{T_{k_r}}{I_{F_{k_r}}} - \frac{T_{k_i}}{I_{F_{k_i}}} \right] = 0 \quad (3.60)$$

Multiplicando (3.60) por $-I_{F_{k_r}} \cdot I_{F_{k_i}}$ e realizando manipulações algébricas de números complexos, obtêm-se (3.61):

$$R_{F_g} \cdot \Im \{ I_{F_k} \cdot I_F^* \} - X_{F_g} \cdot \Re \{ I_{F_k} \cdot I_F \} + [T_{k_r} \cdot I_{F_{k_i}} - T_{k_i} \cdot I_{F_{k_r}}] = 0 \quad (3.61)$$

A equação (3.61) pode ser escrita para cada fase faltosa k , dependendo do número de fases envolvidas na falta à terra. Somando estas n equações obtidas, pode-se escrever uma única equação, dada por (3.62):

$$R_{F_g} \cdot \Im \{ I_F \cdot I_F^* \} - X_{F_g} \cdot \Re \{ I_F^2 \} + \sum_{k \in \Omega_k} [T_{k_r} \cdot I_{F_{k_i}} - T_{k_i} \cdot I_{F_{k_r}}] = 0 \quad (3.62)$$

²Uma falta monofásica na fase a , por exemplo, possui $I_{F_b} = I_{F_c} = 0$. Neste caso, a impedância total da falta é representada no modelo pela soma de duas impedâncias, a saber, Z_{F_a} e Z_{F_g} , cujo valor individual assumido por cada variável é irrelevante, sendo a soma tratada neste trabalho como somente uma incógnita.

Sabendo que

$$\Im \{I_F \cdot I_F^*\} = \Im \left\{ |I_F|^2 \right\} = 0 \quad (3.63)$$

e considerando a falta puramente resistiva (ou seja, $X_{F_g} = 0$), obtém-se um somatório dado por

$$\sum_{k \in \Omega_k} \left[T_{k_r} \cdot I_{F_{k_i}} - T_{k_i} \cdot I_{F_{k_r}} \right] = 0 \quad (3.64)$$

onde Ω_k representa o conjunto das fases faltosas, dado por uma combinação das fases do sistema (a , b e c).

Substituindo T_{k_r} e T_{k_i} de (3.57) e (3.58) em (3.64) e realizando manipulações algébricas envolvendo números complexos, o polinômio referente a localização de faltas à terra pode ser escrito de acordo com (3.65):

$$x^2 \cdot \left[0.5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} \right] - x \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\} \right] + \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\} \right] = 0, \quad (3.65)$$

que engendra as faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas à terra, de acordo com (3.16), (3.33) e (3.55). Dada a generalidade desta equação, ela é chamada nesta dissertação de *Equação Geral de Localização de Faltas à Terra*, a EGFT. Esta equação é analisada em detalhes no Capítulo 4.

3.1.5 Falta Fase-Fase

No caso da falta fase-fase, cujo modelo adotado está ilustrado na Figura 3.5, tem-se que:

$$I_{F_b} = -I_{F_a} \quad (3.66)$$

e

$$\begin{aligned} V_{F_a} &= V_{S_a} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_a - x \cdot N_a \\ &= \underbrace{V_{S_b} + x^2 \cdot 0.5 \cdot M_b - x \cdot N_b}_{V_{F_b}} + Z_F \cdot I_{F_a}. \end{aligned} \quad (3.67)$$

Considerando a impedância de falta como puramente resistiva e separando (3.67) em suas partes reais e imaginárias, obtém-se:

$$R_F \cdot I_{F_{a_r}} = x^2 \cdot 0.5 (M_{a_r} - M_{b_r}) - x \cdot (N_{a_r} - N_{b_r}) + (V_{S_{a_r}} - V_{S_{b_r}}) \quad (3.68)$$

$$R_F \cdot I_{F_{a_i}} = x^2 \cdot 0.5 (M_{a_i} - M_{b_i}) - x \cdot (N_{a_i} - N_{b_i}) + (V_{S_{a_i}} - V_{S_{b_i}}) \quad (3.69)$$

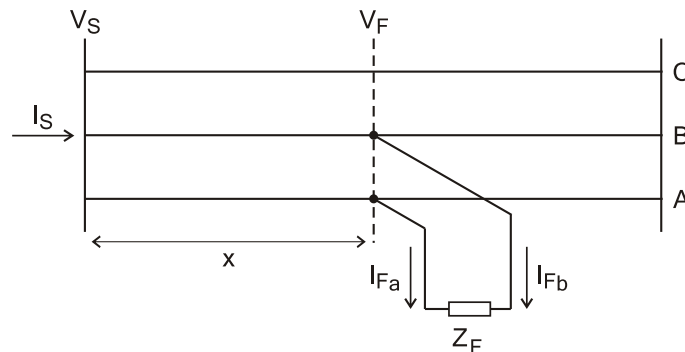


Figura 3.5: Falta Fase-Fase

Isolando R_F em (3.68) e substituindo em (3.69) resulta em:

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot \left[\frac{M_{a_i} - M_{b_i}}{I_{F_{a_i}}} - \frac{M_{a_r} - M_{b_r}}{I_{F_{a_r}}} \right] - x \cdot \left[\frac{N_{a_i} - N_{b_i}}{I_{F_{a_i}}} - \frac{N_{a_r} - N_{b_r}}{I_{F_{a_r}}} \right] + \left[\frac{V_{S_{a_i}} - V_{S_{b_i}}}{I_{F_{a_i}}} - \frac{V_{S_{a_r}} - V_{S_{b_r}}}{I_{F_{a_r}}} \right] = 0. \quad (3.70)$$

Multiplicando (3.70) por $I_{F_{a_i}} \cdot I_{F_{a_r}}$, a forma final do polinômio resulta em (3.71):

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot \Im \{ (M_a - M_b) \cdot I_{F_a}^* \} - x \cdot \Im \{ (N_a - N_b) \cdot I_{F_a}^* \} + \Im \{ (V_{S_a} - V_{S_b}) \cdot I_{F_a}^* \} = 0 \quad (3.71)$$

Generalizando a expressão (3.71) para faltas fase-fase envolvendo as fases m e n , obtém-se:

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot \Im \{ (M_m - M_n) \cdot I_{F_m}^* \} - x \cdot \Im \{ (N_m - N_n) \cdot I_{F_m}^* \} + \Im \{ (V_{S_m} - V_{S_n}) \cdot I_{F_m}^* \} = 0 \quad (3.72)$$

Dada a generalidade de (3.72), esta equação é chamada nesta dissertação de *Equação Geral de Localização de Faltas Entre Fases*, a EGFF. Tal equação é analisada em detalhes no Capítulo 5.

3.1.6 Desconsideração do Efeito Capacitivo

A EGFT e a EGFF, dadas respectivamente por (3.65) e (3.72), podem facilmente ser aplicadas a linhas onde o efeito capacitivo não é representado. Neste caso, a matriz de capacitâncias da linha é desprezada, ou seja, $\mathbf{Y}_{abc} = 0$. Esta simplificação resulta em $M_k = 0$, visto que $M = \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc}$. Neste caso, a EGFT resulta em

$$x = \frac{\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ V_{S_k} \cdot I_{F_k}^* \}}{\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ N_k \cdot I_{F_k}^* \}} \quad (3.73)$$

para faltas envolvendo as fases pertencentes a Ω_k . Ao mesmo tempo, a EGFF resulta em

$$x = \frac{\Im \{ (V_{S_m} - V_{S_n}) \cdot I_{F_m}^* \}}{\Im \{ (N_m - N_n) \cdot I_{F_m}^* \}} \quad (3.74)$$

para faltas envolvendo as fases m e n .

As expressões (3.73) e (3.74) mostram que a desconsideração do efeito capacitivo resulta em equações de primeira ordem em x , o que significa que tanto a EGFT como a EGFF resultam em somente uma solução para o local da falta neste caso. Além disso, a desconsideração deste efeito foi bastante simples para ambas equações, que só apresentavam influência da capacitância nos seus termos quadráticos.

Na verdade, é possível mostrar matematicamente que (3.73) e (3.74) correspondem às equações previamente existentes e utilizadas pelo Método de Lee *et al.* (2004) e sua extensão polifásica (SALIM *et al.*, 2008). Somente o caso trifásico não possui esta relação direta, visto que o equacionamento realizado por Salim *et al.* (2008) considerou a falta como uma impedância dada por uma resistência em série com uma reatância indutiva, sendo que no presente trabalho a falta foi considerada como puramente resistiva.

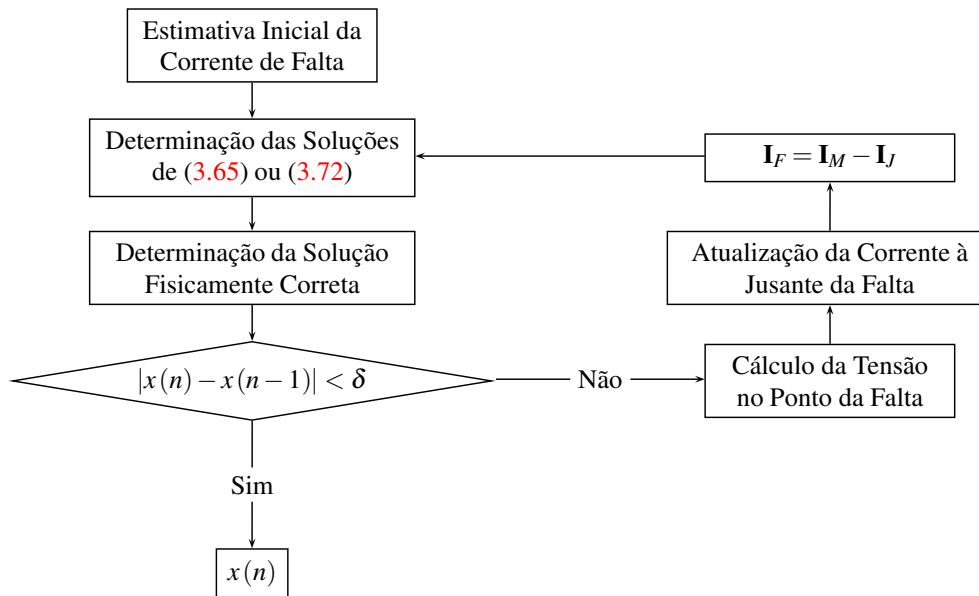


Figura 3.6: Algoritmo Modificado de Localização de Faltas

3.2 Algoritmo Proposto de Localização de Faltas

Os algoritmos existentes de LDF em SDEE normalmente consideram a linha de distribuição como uma linha RL série (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997; LEE et al., 2004; MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008; SALIM et al., 2008). Ao mesmo tempo, os algoritmos de LDF, tanto para SDEE como para sistemas de transmissão de energia elétrica não costumam tratar da definição da raiz correta (CHOI et al., 2004, 2007). Desta forma, o algoritmo proposto em (LEE et al., 2004) foi modificado e é proposto para utilização em conjunto com o equacionamento de LDF realizado. Para a solução do mesmo, as seguintes hipóteses se fazem necessárias:

- I) Estão disponíveis medidas de tensão e corrente trifásicas em um terminal à montante do sistema a ser analisado (terminal local);
- II) As medidas de tensão e corrente são dadas por números complexos, que representam os fasores destas medidas;
- III) As medidas de tensão e corrente são realizadas no primeiro ciclo antes da falta (medidas pré-falta), e no primeiro ciclo do sistema em falta (medidas em falta);
- IV) O tipo de falta a ser analisado é um dado de entrada do algoritmo;
- V) Os parâmetros da linha (impedância séria, admitância paralela e extensão total da linha) e da carga do sistema também são dados de entrada do algoritmo;

O algoritmo está ilustrado na Figura 3.6 e é descrito a seguir:

- I) Determine um valor inicial para a corrente de falta de acordo com a Seção 3.2.1;
- II) Determine as soluções da equação de localização de faltas, utilizando (3.65) ou (3.72);

III) Determine a solução fisicamente correta referente à falta, como descrito na Seção 3.2.2;

IV) Verifique se x convergiu, utilizando (3.75):

$$|x(n) - x(n-1)| < \delta \quad (3.75)$$

onde δ é uma tolerância pré-definida, dada em [km], e n é o número da iteração;

V) Se x convergiu, finalize o algoritmo, senão, continue;

VI) Utilizando a estimativa do local da falta calculada no passo III e as medidas de tensão e corrente durante a falta, calcule as tensões no ponto da falta, \mathbf{V}_F , de acordo com (3.6);

VII) Atualize a corrente à jusante da falta nas fases faltosas, \mathbf{I}_J , utilizando as tensões calculadas no ponto da falta, de acordo com (3.76):

$$\mathbf{I}_J = \left[\mathbf{Z}_{\text{total}}^{-1} + 0.5 \cdot (\ell - x) \cdot \mathbf{Y}_{\text{abc}} \right] \cdot \mathbf{V}_F \quad (3.76)$$

onde

$$\mathbf{Z}_{\text{total}} = (\ell - x) \cdot \mathbf{Z}_{\text{abc}} + \left[0.5 \cdot (\ell - x) \cdot \mathbf{Y}_{\text{abc}} + \mathbf{Z}_{\text{Load}}^{-1} \right]^{-1}; \quad (3.77)$$

VIII) Atualize a corrente de falta, de acordo com (3.78):

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_M - \mathbf{I}_J \quad (3.78)$$

onde $\mathbf{I}_M = -\mathbf{c}_x \cdot \mathbf{V}_S + \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{I}_S$ é a corrente à montante da falta, de acordo com (3.1);

IX) Volte para o passo II.

Note que o algoritmo proposto é basicamente o mesmo de (LEE et al., 2004). Entretanto, a estimativa inicial da corrente de falta proposta é diferente. Além disso, a consideração do efeito capacitivo por parte da EGFT da EGFF tornou necessária a consideração deste também no algoritmo, especificamente na atualização da corrente à jusante da falta, dada pelos passos VI, VII e VIII³.

3.2.1 Estimativa Inicial da Corrente de Falta

A estimativa inicial da corrente de falta atualmente existente (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997; LEE et al., 2004) é baseada nas componentes sobrepostas, utilizando o teorema da superposição. Esta estimativa inicial, entretanto, não é a mais adequada quando a resistência de falta é elevada. Uma das propostas do algoritmo é a modificação desta estimativa inicial, de forma que a corrente de falta possa ser estimada de maneira mais adequada quando do aumento da resistência de falta, visto que estes são os casos de convergência mais críticos.

A estimativa inicial proposta é dada por

$$\mathbf{I}_F = |\mathbf{I}_{S_F} - \mathbf{I}_S| \angle \theta_{I_F} \quad (3.79)$$

³É importante salientar que nenhuma consideração a respeito de cargas intermediárias ou laterais é realizada no algoritmo proposto, visto que este propõe-se a ser somente um desenvolvimento inicial, sendo um algoritmo mais genérico sugerido como trabalho futuro, como mencionado no Capítulo 7 desta dissertação.

onde \mathbf{I}_{S_F} é o vetor de correntes medidas no terminal S durante a falta, \mathbf{I}_S é o vetor de correntes medida no terminal S antes da falta, e $\theta_{I_F} = \angle \mathbf{V}_{\ell/2}$, sendo

$$\mathbf{V}_{\ell/2} = \mathbf{d}_{\ell/2} \cdot \mathbf{V}_{S_F} - \mathbf{b}_{\ell/2} \cdot \mathbf{I}_{S_F} \quad (3.80)$$

de acordo com (3.5), e onde \mathbf{V}_{S_F} é o vetor de tensões medidas no terminal S durante a falta.

Note que a estimativa inicial proposta para a corrente de falta possui o mesmo módulo que a estimativa inicial utilizada em trabalhos anteriores (TAKAGI et al., 1982b; LEE et al., 2004). Entretanto, o ângulo da estimativa proposta diferencia-se por ser obtido considerando que a falta ocorre na metade da linha analisada. Além disso, considera-se que o ângulo da corrente de falta possui o mesmo ângulo da tensão no ponto da falta, o que é uma estimativa razoável, dado que a falta é considerada puramente resistiva. A estimativa proposta passa a utilizar não somente a informação da corrente medida na subestação, mas também a tensão medida na mesma durante a falta.

3.2.2 Determinação da Solução Fisicamente Correta

As equações propostas de localização de faltas, a EGFT e a EGFF, dadas respectivamente por (3.65) e (3.72), são polinômios de segunda ordem em x , o local da falta. Sendo assim, a cada iteração do algoritmo descrito anteriormente não apenas uma solução é obtida para o local da falta, mas sim duas. Entretanto, somente uma destas soluções é a que soluciona fisicamente o problema da LDF, sendo a outra, uma solução puramente matemática, que não possui um significado prático. A determinação de qual das duas soluções é a fisicamente correta é amplamente desenvolvida nos Capítulos 4 e 5, respectivamente para a EGFT e a EGFF. A conclusão para ambas as equações, entretanto, é a mesma, e é bastante simples, sendo apresentada a seguir.

Sabendo que tanto a EGFT como a EGFF podem ser representadas por

$$\alpha_2 \cdot x^2 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_0 = 0, \quad (3.81)$$

o local da falta, x , calculado tanto através da EGFT como através da EGFF, e que representa a solução fisicamente correta, é dado por:

$$x = \begin{cases} \frac{-\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 > 0 \\ \frac{-\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 < 0 \end{cases}. \quad (3.82)$$

Como será visto nos Capítulos 4 e 5, deve-se também prever a possibilidade de soluções complexas, dado que erros de medição, modelagem e estimação da corrente de falta podem ocasionar tais soluções sob certas condições sistêmicas e de falta. Sendo assim, quando raízes complexas conjugadas são as soluções, seja da EGFT ou da EGFF, o local da falta é determinado como o valor absoluto da raiz complexa.

4 ANÁLISE DA EQUAÇÃO GERAL DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS À TERRA

Na Seção 3.1 foram encontradas expressões na tentativa de estimar o local de ocorrência de uma falta a partir de medidas trifásicas de tensão e corrente no terminal local. Sendo estas equações polinômios de segunda ordem, a busca de soluções para o problema resulta sempre em duas raízes, ou seja, dois locais de falta, criando a necessidade de determinar qual destas raízes é a correta. Na presente seção, analisar-se-á o caso das faltas à terra, ao passo que na seção posterior, analisar-se-á o caso das faltas entre fases.

4.1 Análise Matemática das Raízes

A equação geral de localização de faltas à terra, EGFT, é dada por (3.65), e segue reescrita abaixo:

$$x^2 \cdot \left[0.5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ M_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] - x \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ N_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] + \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ V_{S_k} \cdot I_{F_k}^* \} \right] = 0 \quad (4.1)$$

onde Ω_k é o conjunto que representa as fases envolvidas na falta. Nota-se que os coeficientes de (4.1) são obrigatoriamente valores reais, e somatórios do tipo $\Im \{ A \cdot B^* \}$, onde A e B representam números complexos dados por:

$$\alpha = \alpha_r + j \cdot \alpha_i = |\alpha| \cdot \exp^{j \cdot \angle \alpha} = |\alpha| \cdot (\cos(\angle \alpha) + j \cdot \text{sen}(\angle \alpha)) \quad (4.2)$$

Considerando (4.2), o produto $\Im \{ A \cdot B^* \}$ pode ser desenvolvido conforme (4.3):

$$\begin{aligned} \Im \{ A \cdot B^* \} &= \Im \{ (A_r + j \cdot A_i) \cdot (B_r - j \cdot B_i) \} \\ &= A_i \cdot B_r - A_r \cdot B_i \\ &= |A| \text{sen}(\angle A) \cdot |B| \cos(\angle B) - |A| \cos(\angle A) \cdot |B| \text{sen}(\angle B) \\ &= |A| \cdot |B| \cdot [\text{sen}(\angle A) \cos(\angle B) - \cos(\angle A) \text{sen}(\angle B)] \\ &= |A| \cdot |B| \cdot \text{sen}(\angle A - \angle B) . \end{aligned} \quad (4.3)$$

Considerando o caso mais geral, pode-se substituir (4.3) em (4.1), resultando na ex-

pressão (4.4):

$$x^2 \cdot \left[0.5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} |M_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle M_k - \angle I_{F_k}) \right] - x \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} |N_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle N_k - \angle I_{F_k}) \right] + \left[\sum_{k \in \Omega_k} |V_{S_k}| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}) \right] = 0. \quad (4.4)$$

Para o caso específico de uma falta monofásica na fase k , tem-se que:

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot |M_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle M_k - \angle I_{F_k}) - x \cdot |N_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle N_k - \angle I_{F_k}) + |V_{S_k}| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}) = 0. \quad (4.5)$$

Em (4.5), observa-se que o termo correspondente ao módulo do fasor que representa a corrente de falta, I_{F_k} , aparece em todos os coeficientes do polinômio. Dividindo (4.5) por $|I_{F_k}|$ resulta em:

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot |M_k| \text{sen}(\angle M_k - \angle I_{F_k}) - x \cdot |N_k| \text{sen}(\angle N_k - \angle I_{F_k}) + |V_{S_k}| \text{sen}(\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}) = 0. \quad (4.6)$$

Analisando (4.6) verifica-se que no caso de faltas monofásicas somente o ângulo da corrente de falta é relevante para a análise, sendo o seu módulo irrelevante. Esta influência independe do tipo do sistema, seja ele equilibrado (cargas ou geometria das linhas) ou não.

Esta mesma análise ainda pode ser estendida para o caso de faltas à terra envolvendo mais de uma fase. No entanto, neste caso as conclusões deixam de ser tão abrangentes, visto que o módulo da corrente de falta só apresenta-se irrelevante no caso de sistemas equilibrados tanto em relação à carga como em relação à transposição e geometria das linhas^{1,2}. Deve-se salientar também que estas conclusões supõem que as resistências de falta em todas as fases envolvidas também sejam as mesmas ($R_{F_a} = R_{F_b} = R_{F_c}$), porquanto de outra forma o módulo da corrente de falta tornaria-se inevitavelmente diferente nas diferentes fases.

A análise também pode ser estendida às raízes da EGFT. Para tanto, considere um polinômio de segunda ordem com coeficientes reais $p(x) = \alpha_2 \cdot x^2 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_0$. As raízes, ou zeros, de $p(x)$ são dadas por:

$$x_{1,2} = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2} \quad (4.7)$$

¹ Isto acontece pois, no caso de sistemas com cargas equilibradas e linhas transpostas, o valor absoluto das tensões e correntes é o mesmo nas três fases, bem como da corrente de falta, ou seja, $|I_{F_a}| = |I_{F_b}| = |I_{F_c}|$.

² No caso de sistemas com linhas geometricamente assimétricas e cargas equilibradas, a diferença no valor absoluto das tensões e correntes ocorre exclusivamente devido ao acoplamento assimétrico das linhas. Assim, em muitos destes casos, pode-se realizar a mesma simplificação, considerando que as diferenças no módulo das tensões e correntes não será tão elevada.

A natureza das raízes de (4.7) pode ser real ou complexa, dependendo do valor assumido pelo termo $\beta = \alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$:

$$\begin{cases} \beta < 0, & \text{duas raízes complexas conjugadas} \\ \beta = 0, & \text{duas raízes reais e iguais} \\ \beta > 0, & \text{duas raízes reais e diferentes} \end{cases} \quad (4.8)$$

De maneira geral, para cada caso de falta, haverá diferentes respostas do sistema, tanto em parâmetros de tensão, como em parâmetros de corrente, ao passo que os mesmos dependem diretamente das condições da falta, como a resistência e o local da mesma³. Tipicamente, como apresentado na Seção 2, estes parâmetros são os que mais influenciam a localização das faltas. Nota-se também que os coeficientes de $p(x)$, o polinômio de LDF, dependem diretamente destas variáveis. Assim, dependendo das condições da falta, os coeficientes de $p(x)$ serão modificados. Por conseguinte, diferentes faltas podem retornar raízes com diferentes naturezas, de acordo com (4.8). Cada um destes casos é analisado matematicamente a seguir.

4.1.1 Raízes Complexas Conjugadas

Para que as soluções de (4.1) sejam complexas conjugadas, o termo β deve ser menor do que zero, ou seja:

$$\left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\} \right]^2 < 2 \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} \right] \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\} \right]. \quad (4.9)$$

Para o caso de uma falta monofásica na fase k ainda é possível simplificar (4.9), obtendo-se:

$$\Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\}^2 < 2 \cdot \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} \cdot \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\}. \quad (4.10)$$

Manipulando algebricamente (4.10) através de (4.3), obtém-se:

$$|N_k|^2 \cdot \sin^2(\angle N_k - \angle I_{F_k}) < 2 \cdot |M_k| |V_{S_k}| \cdot \sin(\angle M_k - \angle I_{F_k}) \cdot \sin(\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}). \quad (4.11)$$

O termo à esquerda de (4.11) é sempre positivo, visto que representa o quadrado de um número real. Sendo assim, o termo à direita de (4.11) também deverá ser sempre positivo para que as soluções da equação sejam um par de raízes complexas conjugadas (condição necessária, mas não suficiente). Isto só acontece quando $\angle M_k - \angle I_{F_k}$ e $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ representam ângulos que estão ambos entre 0° e 180° ($\sin(\cdot) > 0$) ou ambos entre 180° e 360° ($\sin(\cdot) < 0$).

4.1.2 Raízes Reais e Iguais

Supondo que as soluções de (4.1) sejam um par de raízes reais e iguais ($\beta = 0$), chega-se à conclusão que:

$$\left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\} \right]^2 = 2 \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} \right] \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\} \right] \quad (4.12)$$

³Outro parâmetro que afeta a resposta do sistema durante uma falta é o ângulo de incidência da mesma. No entanto, este é um efeito transitório, não afetando a resposta em regime permanente após a falta, que corresponde ao período de análise desta dissertação.

ou seja:

$$x = -\frac{\alpha_1}{2 \cdot \alpha_2} = \frac{\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\}}{\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\}}. \quad (4.13)$$

Considerando o caso monofásico, as mesmas conclusões obtidas para o caso de raízes complexas conjugadas, relativas ao ângulo de M_k , V_{S_k} , e I_{F_k} , também se aplicam neste caso. A análise é análoga.

4.1.3 Raízes Reais e Distintas

Supondo que as soluções de (4.1) sejam reais e diferentes entre si (positivas ou não), tem-se que o termo β deve ser maior do que zero, ou seja:

$$\left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\} \right]^2 > 2 \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} \right] \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\} \right]. \quad (4.14)$$

Para o caso monofásico:

$$|N_k|^2 \cdot \text{sen}^2(\angle N_k - \angle I_{F_k}) > 2 \cdot |M_k| |V_{S_k}| \cdot \text{sen}(\angle M_k - \angle I_{F_k}) \cdot \text{sen}(\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}). \quad (4.15)$$

Neste caso, uma condição suficiente, mas não necessária, para a existência de raízes reais e distintas, é a de que as diferenças angulares $\angle M_k - \angle I_{F_k}$ e $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ estejam uma entre 0° e 180° ($\text{sen}(\cdot) > 0$) e outra entre 180° e 360° ($\text{sen}(\cdot) < 0$). Sob estas circunstâncias, o lado direito de (4.15) é negativo. Como o lado esquerdo da mesma equação é sempre positivo, a condição de menor é sempre satisfeita.

4.2 Análise Física das Raízes

Até o momento, as expressões (4.9) a (4.15) foram analisadas somente do ponto de vista matemático. No entanto, estas expressões são funções de variáveis físicas do sistema, cujo entendimento deve esclarecer as possíveis respostas do sistema perante a diferentes tipos de faltas. O objetivo deste estudo é entender como as variáveis do termo β se comportam frente à diferentes faltas, visto que este termo é que engendra a natureza das raízes, ou seja, da própria solução da distância da falta.

Inicialmente considere o caso matematicamente analisado das soluções complexas conjugadas da EGFT. Do ponto de vista físico do problema este não é um caso possível de solução para (4.1). Isto porque x representa a distância da falta, que por definição é uma variável real, e, sendo assim, ao menos uma das soluções da EGFT deve ser real. Entretanto, esta conclusão só é plausível se (4.1) for consistente com as condições do sistema, ou seja, todas as variáveis que correspondem aos seus coeficientes obrigatoriamente devem ter sido corretamente determinadas. Note também que o desenvolvimento de (4.1) foi realizado de acordo com um modelo matemático da linha de distribuição e do sistema em falta. Sendo assim, é possível que hajam soluções complexas para a EGFT quando existirem erros na determinação dos parâmetros de (4.1). Assim, erros de medição, de determinação dos parâmetros da linha, e de estimação da corrente de falta podem resultar em soluções complexas para (4.1), como será discutido nas análises subseqüentes.

Para a análise física da EGFT, considere uma falta à terra ocorrendo próxima ao terminal local, V_S , em um sistema como o ilustrado na Figura 4.1. Este sistema é composto

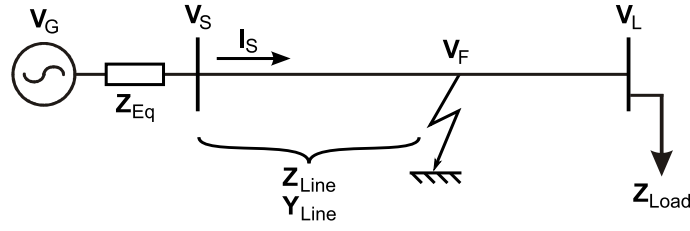


Figura 4.1: Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.

por um sistema equivalente de transmissão, dado por V_G e Z_{Eq} , uma linha de distribuição em falta, e um sistema equivalente passivo à jusante da linha de distribuição, representado pela impedância trifásica Z_{Load} . Pode-se dividir o estudo em quatro casos distintos: faltas com resistência (R_F) aproximadamente zero, faltas com resistência muito menor do que o carregamento do sistema, faltas com resistência aproximadamente igual a do carregamento do sistema, e faltas com resistência muito maior do que o carregamento do sistema⁴. A questão da variação do local da falta e seus efeitos nas raízes da EGFT é tratada ao final desta seção.

Iniciaremos nossa análise em todas as situações com o caso monofásico, pela sua simplicidade. As conclusões para faltas polifásicas serão apresentadas ao final desta seção.

4.2.1 Condição I – $R_F \approx 0$

Quando $R_{F_k} \approx 0$, a tensão no ponto da falta assume um valor também aproximadamente nulo, bem como a tensão no terminal local, ou seja, $|V_{S_k}| \approx 0$. Como M_k também depende da tensão no terminal local e o termo mais relevante do mesmo é relativo à V_{S_k} , temos também que $|M_k| \approx 0$ ⁵. Assim, conclui-se que o produto $|M_k| \cdot |V_{S_k}|$ será aproximadamente nulo quando $R_F \approx 0$. Isto significa que o próprio termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será aproximadamente nulo para faltas na condição analisada.

Por outro lado, temos que quando $R_F \rightarrow 0$, a corrente de falta, I_{F_k} , é limitada somente pela impedância da linha, pela impedância equivalente, Z_{Eq} , e pela tensão do sistema. Desta forma, o termo N_k , que resulta da multiplicação da matriz impedância de linha pelo vetor de correntes medidas no terminal local⁶, será bastante elevado, dada a elevada magnitude da corrente de falta. Neste caso, desconsiderando a contribuição das outras fases devido ao acoplamento, pode-se escrever para a fase faltosa k que:

$$\angle I_{F_k} \approx \angle I_{S_k} \quad (4.16)$$

visto que a corrente de falta é praticamente igual a corrente medida no terminal local. Ao mesmo tempo, tem-se que

$$\angle N_k \approx \angle Z_{Line_{kk}} + \angle I_{S_k} \quad (4.17)$$

quando o efeito do acoplamento entre as fases do sistema é desprezado. Isto significa que a diferença angular

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx \angle Z_{Line_{kk}} \quad (4.18)$$

⁴Seguiremos a ordem natural de crescimento da resistência de falta, exceto no caso de faltas com $R_F \approx |Z_{Load}|$, que foi colocada ao final dos outros casos para um melhor entendimento das conclusões finais.

⁵Deve-se notar que M_k é, na verdade, o somatório das tensões trifásicas do sistema multiplicadas pelos termos outrora resultantes do produto $Z_{abc} \cdot Y_{abc}$. A conclusão no entanto, ainda assim é válida, visto que: a) em sistemas solidamente aterrados, não haverão sobretensões nas fases não faltosas do sistemas, e, b) a impedância mútua entre as fases do sistema é significativamente inferior à impedância própria de cada fase. Isto resulta uma contribuição pequena dos termos referentes às tensões nas fases não faltosas do sistema.

⁶Vide equação (3.18).

resulta em um seno diferente de zero, ao passo que seu valor depende diretamente da relação R/X da linha. Isto significa que o termo α_1^2 será diferente de zero para faltas na condição analisada. Como neste caso $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 \approx 0$, verifica-se que o termo β é maior do que zero, resultando em duas raízes reais e diferentes entre si. Esta conclusão é direta para o caso de faltas monofásicas, no entanto, um pouco mais complexa para o caso de faltas polifásicas, que são tratadas na Seção 4.2.6.

4.2.2 Condição II – $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$

Pode existir ainda um caso de falta onde R_F não é desprezível, mas é, ao mesmo tempo, pequeno o suficiente para ser considerado muito menor do que a impedância equivalente da carga do sistema. Neste caso, a maior parte da corrente injetada pela subestação alimenta a falta, e pode-se desprezar ainda a corrente de carga do sistema. A análise deste caso começa da mesma forma que no caso da resistência de falta aproximadamente nula.

Suponha uma falta com resistência nula em um ponto qualquer de uma linha de distribuição. A análise qualitativa das variáveis remete ao caso em que $R_F \approx 0$. Agora suponha outras faltas sob as mesmas condições, no entanto, com valores de resistência de falta cada vez maiores, de forma que a corrente de carga ainda seja desprezível. Na medida em que a resistência de falta aumenta, o módulo de V_{S_k} também aumenta, devido ao aumento do módulo da tensão no ponto da falta. Logo, $|M_k|$ também aumenta, e conseqüentemente, todo o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ também aumenta. Matematicamente, tem-se que

$$V_{S_k} = V_G \cdot \frac{Z_{\text{Line}_{kk}} + R_F}{Z_{\text{Line}_{kk}} + Z_{E_q} + R_F} \approx V_G \cdot \frac{R_F}{Z_{E_q} + R_F}, \quad (4.19)$$

considerando que a impedância da linha é muito menor do que a impedância dada pela soma entre a resistência de falta e o circuito equivalente do sistema à montante do SDEE. Explicitando $|V_{S_k}|$ e desprezando a reatância indutiva da linha ($Z_{E_q} = R_{E_q}$), obtém-se (4.20):

$$\begin{aligned} |V_{S_k}| &= |V_G| \cdot \frac{|R_F|}{|Z_{E_q} + R_F|} \approx |V_G| \cdot \frac{p \cdot R_{E_q}}{(p+1) \cdot R_{E_q}} \\ &\approx |V_G| \cdot \frac{p}{p+1}, \end{aligned} \quad (4.20)$$

onde $R_F = p \cdot R_{E_q}$. A equação (4.20) aproxima o módulo da tensão V_{S_k} em função da relação existente entre a impedância equivalente, Z_{E_q} , e a resistência de falta, R_F . A aproximação realizada resulta em um aumento mais rápido de $|V_{S_k}|$, visto que, na verdade, $|V_{S_k}|$ ainda é influenciado de forma inversa pela reatância indutiva do circuito equivalente, X_{E_q} , ou seja, a equação (4.20) resulta em um aumento de $|V_{S_k}|$ em função da resistência de falta que é mais acentuado do que o real.

Utilizando as mesmas simplificações, pode-se equacionar a variação da corrente local em função da resistência da mesma, de acordo com (4.21):

$$\begin{aligned} |I_{S_k}| &\approx |V_G| \cdot \frac{1}{|Z_{E_q} + Z_{\text{Line}_{kk}} + R_F|} \approx |V_G| \cdot \frac{1}{|Z_{E_q} + R_F|} \\ &\approx |V_G| \cdot \frac{1}{(p+1) \cdot R_{E_q}}, \end{aligned} \quad (4.21)$$

onde a taxa de crescimento da corrente de falta aproximada por (4.21) é maior que a taxa real de crescimento da mesma, devido ao termo X_{E_q} ter sido desprezado nas simplificações.

Comparando as equações (4.20) e (4.21), verifica-se que $|V_{S_k}|$ cresce aproximadamente na mesma taxa em que $|I_{S_k}|$ decresce. Como o termo α_1^2 é proporcional a $|I_{S_k}|$ e o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ é quadraticamente proporcional a $|V_{S_k}|$, conclui-se que no que tange à relação entre os módulos destas variáveis, a distância entre os valores α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ diminui por uma potência de 4 da função $1/(p+1)$, onde $p = R_F/R_{Eq}$.

No entanto, esta elevada diminuição da distância entre α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ é reduzida através da redução do argumentos do seno relativo à diferença angular entre V_{S_k} e I_{F_k} . Considerando as simplificações ora mencionadas, pode-se escrever que

$$I_{F_k} \approx \frac{V_{S_k}}{Z_{Line_{kk}} + R_F} = \frac{|V_{S_k}|}{|Z_{Line_{kk}} + R_F|} \angle I_{F_k}, \quad (4.22)$$

onde $\angle I_{F_k} = \angle V_{S_k} - \angle (Z_{Line_{kk}} + R_F)$ e

$$\angle (Z_{Line_{kk}} + R_F) = \arctan \left(\frac{X_{Line_{kk}}}{R_{Line_{kk}} + R_F} \right), \quad (4.23)$$

onde $Z_{Line_{kk}} = R_{Line_{kk}} + j \cdot X_{Line_{kk}}$. Com isto, verifica-se que:

$$\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k} \approx \arctan \left(\frac{X_{Line_{kk}}}{R_{Line_{kk}} + R_F} \right). \quad (4.24)$$

A expressão (4.24) mostra que o aumento da resistência de falta diminui o ângulo dado por $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$, resultando na tendência do mesmo à zero, quando $R_{Line_{kk}} + R_F \gg X_{Line_{kk}}$. Note também que, de qualquer forma, $\angle I_{F_k}$ é sempre menor que $\angle V_{S_k}$, ou seja, a diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ é sempre maior do que zero mas próxima a ele, logo, o resultado da operação seno para este ângulo é positivo e cada vez mais próximo de zero.

Comparando as variações dadas pelas equações (4.20) e (4.24) é possível inferir qualitativamente sobre o grau real em que os termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ se aproximam na faixa de R_F analisada. A diminuição descrita em (4.24) está relacionada à impedância da linha do sistema, ao passo que o aumento descrito em (4.20) está relacionado à impedância equivalente do sistema à montante do SDEE analisado. Quando $R_F \gg |Z_{Line_{kk}}|$, a equação (4.24) tende a zero, ao passo que quando $R_F \gg |R_{Eq}|$, a equação (4.19) tende a $|V_G|$. Considerando que a falta ocorre no início da linha de distribuição e que a impedância do sistema equivalente é significativamente maior do que a impedância da linha, pode-se concluir que o decréscimo do termo $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ é muito mais rápido do que o acréscimo do termo $|V_{S_k}|$. Isto implica que mesmo que haja um aumento no valor do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ (em função do aumento de $|V_{S_k}|$), este aumento será pequeno em relação ao valor de α_1^2 , e que tão logo R_F aumente, o mesmo irá decair, dado que a diminuição de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ sobrepuja o aumento de $|V_{S_k}|$. A dominância da diminuição de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ sobre $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ é observada devido ao fato de que $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ tende à zero com o aumento da resistência de falta, resultando na nulidade do seno deste argumento, correspondente à α_0 . Assim, o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ irá decair bruscamente à zero, e ainda, pelo lado positivo, já que o mesmo assume um valor positivo quando R_F é nulo (nas condições de falta estudadas), como observado em (4.24).

Por outro lado, o termo em α_1^2 é dado pelo módulo de N_k e o ângulo existente entre o mesmo e a corrente de falta. Na medida em que a resistência de falta aumenta (a partir de um valor desprezível), a corrente de falta tende a diminuir, como descrito através de (4.21). Conseqüentemente, $|N_k|$ também diminui. Ao mesmo tempo, o aumento

da resistência de falta também engendra a diminuição da diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$. Matematicamente, tem-se que:

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} = \underbrace{\angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \angle I_{S_k}}_{\angle N_k} - \underbrace{\left(\angle V_{S_k} - \arctan \left(\frac{X_{\text{Line}_{kk}}}{R_{\text{Line}_{kk}} + R_F} \right) \right)}_{\angle I_{F_k}} \quad (4.25)$$

Como já foi verificado, o termo relativo à função tangente em (4.25) decai rapidamente à zero. Com isto, pode-se simplificar (4.25) para (4.26):

$$\begin{aligned} \angle N_k - \angle I_{F_k} &\approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \angle I_{S_k} - \angle V_{S_k} \\ &\approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \gamma \end{aligned} \quad (4.26)$$

onde $\gamma = \angle V_{S_k} - \angle I_{S_k}$. Em condições normais de operação, γ corresponderia ao ângulo do fator de potência do sistema como um todo. Neste caso, porém, γ é predominantemente função da relação entre a resistência de falta e a carga equivalente do sistema. Matematicamente, descreve-se a impedância total do sistema como o paralelo da impedância de carga e da resistência de falta⁷, através de (4.27):

$$\begin{aligned} Z_2 = R_F // Z_{\text{Load}} &= \frac{R_F \cdot Z_{\text{Load}}}{R_F + Z_{\text{Load}}} \\ &= \frac{R_F \cdot |Z_{\text{Load}}|}{|R_F + Z_{\text{Load}}|} \angle \gamma, \end{aligned} \quad (4.27)$$

ou seja:

$$\gamma = \angle Z_{\text{Load}} - \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F} \right), \quad (4.28)$$

onde $Z_{\text{load}} = R_{\text{load}} + j \cdot X_{\text{load}}$. Nota-se que, quando $R_F = 0$, γ também é nulo, e quando $R_F + R_{\text{Load}} \gg X_{\text{load}}$, γ tende ao valor do ângulo da carga, $\angle Z_{\text{Load}}$. Logo, o termo tangente representa a variação da diferença angular γ em função da resistência de falta. Substituindo (4.28) em (4.26), tem-se que:

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \angle Z_{\text{Load}} + \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F} \right). \quad (4.29)$$

Analisando (4.29), verifica-se que quando $R_F \ll |Z_{\text{load}}|$, a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ irá variar pouco significativamente, especialmente em relação à variação das outras variáveis já mencionadas anteriormente. Isto significa que a variação do termo α_1^2 é dominada pela variação de $|N_k|$ na faixa de resistências analisada.

Sumarizando as conclusões, têm-se que quando R_F é muito menor do que $|Z_{\text{Load}}|$:

- O termo α_1^2 diminui a uma taxa predominantemente dada pelo quadrado de (4.21).
- O termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ pode aumentar inicialmente a uma taxa quadrática de (4.20), no entanto, o seu valor logo decai a zero, visto que é sobrepujado pelo rápido decaimento descrito por (4.24).

De acordo com estas conclusões, estima-se que nesta faixa de resistências analisada as raízes da EGFT para o caso monofásico serão sempre reais e distintas, visto que a diminuição de α_1^2 não é suficiente para que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ seja maior do que o mesmo.

⁷Neste caso, considera-se que a impedância da linha é desprezível, dado que seu valor é normalmente muito menor do que a impedância da carga, mesmo em situações altamente adversas.

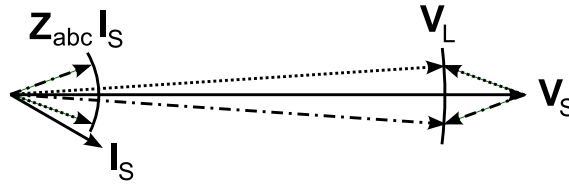


Figura 4.2: Queda de tensão em uma linha de distribuição de energia elétrica.

4.2.3 Condição III – $R_F \gg |Z_{Load}|$

Quando a resistência de falta é muito elevada, pode-se considerar que a corrente medida no terminal local, I_{S_k} é composta predominantemente pela corrente de carga. Isto implica que a corrente de falta deve ser muito menor do que a corrente de carga. Neste caso, não há uma queda de tensão substancial devido à falta nos terminais do alimentador, bem como na linha conectando a subestação à carga, visto que o sistema opera praticamente em regime permanente. Desprezando a corrente de falta e a admitância da linha, tem-se, de acordo com a equação (3.1), que a tensão em um dado ponto L da linha, é dada por:

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{V}_S - \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{I}_S \quad (4.30)$$

De acordo com (4.30) verifica-se que a tensão em qualquer ponto da linha é função: a) da tensão no terminal local, b) da corrente no terminal local, e c) dos parâmetros da linha. Além disso, quando desprezamos a capacitância do sistema (para fins de aproximação), a tensão em qualquer ponto da linha, \mathbf{V}_L , passa a ser dada pela soma vetorial da tensão \mathbf{V}_S com o produto $-\mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{I}_S$. Logo, a relação entre $\angle V_{S_k}$ e $\angle V_{L_k}$ também depende diretamente destas variáveis. Pode-se ainda desprezar a queda de tensão devido ao acoplamento entre as fases, resultado em:

$$\mathbf{V}_L \approx \mathbf{V}_S - \text{diag}(\mathbf{Z}_{abc}) \cdot \mathbf{I}_S \quad (4.31)$$

onde $\text{diag}(\mathbf{A})$ representa a matriz diagonal de \mathbf{A} . A fase do termo $\text{diag}(\mathbf{Z}_{abc}) \cdot \mathbf{I}_S$ é dada por $\angle ZI$:

$$\angle ZI \approx \angle Z_{Line_{kk}} + \angle I_{S_k} \quad (4.32)$$

onde $\angle Z_{Line_{kk}}$ é o ângulo resultante da relação R/X da linha⁸.

Para entender a relação entre estas variáveis, considere que a tensão V_{S_k} possui ângulo nulo⁹. Se desprezarmos a impedância da linha, o ângulo da corrente I_{S_k} , $\angle I_{S_k}$, será função exclusiva do próprio ângulo da carga, dado pelo fator de potência da mesma, já que a corrente de falta é desprezível¹⁰. Matematicamente, tem-se que:

$$\angle V_{S_k} - \angle I_{S_k} \approx \phi \quad (4.33)$$

onde $\cos(\phi)$ é o fator de potência da carga equivalente do sistema.

A fase de \mathbf{V}_L , no entanto, é uma soma fasorial, como ilustrado na Figura 4.2 para dois casos distintos de relação R/X da linha. Nesta ilustração os valores foram extrapolados para que a visualização fosse facilitada. Note que dependendo do valor que $\angle Z_{Line_{kk}}$

⁸Como exemplo, se a relação R/X da linha estiver entre 1 e 3, o ângulo $\angle Z_{Line_{kk}}$ estará entre 45° e $18,5^\circ$. Quanto mais resistiva for a linha, menor será $\angle Z_{Line_{kk}}$.

⁹A consideração de nulidade do ângulo não implica em perda de generalidade, pois o importante nesta análise é a relação existente entre os ângulos, e não os valores específicos assumidos por cada um deles.

¹⁰Como exemplo, se o fator de potência da carga estiver entre 0,85 e 0,95, então esta defasagem angular estará entre 32° e 18° . Quanto menor for o fator de potência, maior será o atraso da corrente em relação à tensão do sistema.

assume, pode haver tanto um aumento como uma diminuição da fase de \mathbf{V}_L em relação a \mathbf{V}_S . Se $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$ assumir um valor superior a ϕ (a diferença angular entre a tensão e a corrente no terminal local, dada pelo ângulo da carga), então o fasor \mathbf{V}_L estará atrasado em relação a \mathbf{V}_S , devido à contribuição negativa do produto $\mathbf{Z}_{\text{abc}} \cdot \mathbf{I}_S$. Sendo assim, a soma fasorial $\mathbf{V}_S - \mathbf{Z}_{\text{abc}} \cdot \mathbf{I}_S$ pode resultar em três casos distintos:

$$\begin{cases} \angle V_{L_k} > \angle V_{S_k}, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi \\ \angle V_{L_k} = \angle V_{S_k}, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} = \phi \\ \angle V_{L_k} < \angle V_{S_k}, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi \end{cases} \quad (4.34)$$

As condições impostas por (4.34) indicam que sempre que $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$, a diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle V_{L_k}$ será menor do que zero. Do ponto de vista desta análise, como a corrente de falta foi desprezada, pode-se escrever que

$$\angle V_{F_k} = \angle V_{L_k}. \quad (4.35)$$

Desta forma, as conclusões de (4.34) podem ser diretamente estendidas para o ângulo da tensão no ponto da falta, $\angle V_{F_k}$. Por outro lado, ao considerarmos que a falta é puramente resistiva, a corrente de falta deverá estar em fase com a tensão no ponto da falta, ou seja:

$$\angle V_{F_k} = \angle I_{F_k}. \quad (4.36)$$

Como α_0 depende do seno de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$, quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$, α_0 também será menor do que zero. Logo, se for possível provar que o termo α_2 é sempre positivo nestas condições, encontramos uma forma de determinar a natureza das raízes da EGFT.

O sinal do termo α_2 depende exclusivamente do argumento do seno, dado pela diferença angular $\angle M_k - \angle I_{F_k}$. O ângulo $\angle M_k$ pode ser aproximado para¹¹

$$\angle M_k \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \angle Y_{\text{Line}_{kk}} + \angle V_{S_k} = \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + 90^\circ + \angle V_{S_k} \quad (4.37)$$

que, de acordo com (4.36), resulta em uma diferença angular

$$\begin{aligned} \angle M_k - \angle I_{F_k} &\approx (\angle Z_{\text{Line}_{kk}} + 90^\circ + \angle V_{S_k}) - (\angle V_{F_k}) \\ &= \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + 90^\circ + \theta_\varepsilon, \end{aligned} \quad (4.38)$$

onde $\theta_\varepsilon = \angle V_{S_k} - \angle V_{F_k}$ ¹², exatamente o argumento do seno de α_0 . Como a soma $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \theta_\varepsilon$ não assume valores superiores a 90° nas condições estudadas ($R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$), concluímos que $\angle M_k - \angle I_{F_k}$ estará sempre entre 90° e 180° , resultando sempre em um seno maior do que zero. Isto significa que, sempre que $R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$, α_2 é maior do que zero.

Sabendo que $\alpha_2 > 0$, conclui-se que o sinal do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ depende exclusivamente da diferença entre $\angle V_{S_k}$ e $\angle I_{F_k}$. Retomando a equação (4.34) pode-se verificar que:

$$\begin{cases} 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 < 0, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi \\ 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 = 0, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} = \phi \\ 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 > 0, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi \end{cases} \quad (4.39)$$

¹¹Desconsiderando o acoplamento entre as fases do sistema. Vide equação (3.17).

¹²O termo $\theta_\varepsilon = \angle V_{S_k} - \angle V_{F_k} = \angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ refere-se à diferença angular da queda de tensão na linha de distribuição, que, em muitos casos pode ser desprezada para fins de análise. Isto porque o fluxo de potência em SDEE é dado predominante através de diferenças nos módulos das tensões, e não através de diferenças angulares das tensões (que é o caso dos sistemas de transmissão), devido a sua natureza radial.

Desta forma, conclui-se que quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$, sempre haverão duas soluções reais e distintas para a EGFT, considerando faltas monofásicas. Em contrapartida, em sistemas que $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi$, o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será positivo e a conclusão sobre a natureza das raízes não é direta. Neste caso, verifica-se que mesmo este termo sendo positivo, a diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ será muito próxima de zero, devida a própria natureza desta diferença angular, dada pela queda de tensão na linha de distribuição. Como esta queda de tensão é muito pequena em relação à tensão nominal do sistema (mesmo em falta, pois estamos analisando o caso com resistência elevada), este ângulo será obrigatoriamente pequeno. Logo, o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será aproximadamente nulo.

Sob estas condições de falta, tem-se ainda que as correntes das três fases do sistema possuirão magnitudes semelhantes. Logo, o ângulo de N_k irá sofrer uma pequena modificação, dada pela relação entre as correntes do sistema, bem como do acoplamento do mesmo. Considerando para as condições de falta analisadas que:

$$\angle N_k \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \angle I_{S_k} + \varepsilon, \quad (4.40)$$

onde ε representa esta modificação em $\angle N_k$ devido ao acoplamento, o argumento do seno referente à α_1^2 é dado por:

$$\begin{aligned} \angle N_k - \angle I_{F_k} &\approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \angle I_{S_k} + \varepsilon - \angle I_{F_k} \\ &= \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \varepsilon + \angle V_{S_k} - \phi - \angle I_{F_k} \\ &= \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \varepsilon - \phi + \theta_\varepsilon \\ &\approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \varepsilon - \phi. \end{aligned} \quad (4.41)$$

Note que o valor assumido por ε é pequeno, podendo ser desprezado para fins de análise. No caso da necessidade de uma precisão maior dos valores e também das conclusões sobre a natureza das raízes, deve-se também considerar a influência do mesmo. Além disto, ε pode assumir tanto valores positivos como negativos, dada a configuração trifásica dos sistemas de energia.

Desconsiderando ε e analisando (4.41) é possível verificar que somente no caso em que a relação R/X da linha possui um ângulo bastante parecido com o do fator de potência do sistema é que o termo α_1^2 será próximo de zero. De outra forma, este valor será diferente – e não necessariamente próximo – de zero¹³. Além disto, esta própria diferença angular poderá assumir valores negativos, dependendo da topologia e do estado de operação do sistema em estudo, sendo estes valores negativos não necessariamente próximos de zero. Como esta função seno é elevada ao quadrado, o resultado é sempre um valor positivo para α_1^2 (exceto quando $\angle N_k - \angle I_{F_k} = 0$).

Em comparação com a diferença angular entre $\angle V_{S_k}$ e $\angle I_{F_k}$, pode-se concluir que o termo α_1^2 será maior do que o termo $4 \cdot \alpha_2^2 \cdot \alpha_0^2$, resultando, nesta condição de falta, em soluções reais e distintas da EGFT para faltas monofásicas¹⁴.

4.2.4 Condição IV – $R_F \approx |Z_{\text{Load}}|$

Seguindo a mesma linha de raciocínio para o caso em que $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$, tem-se um local de falta fixo e diversos casos de falta com valores de resistência de falta cada vez

¹³Se considerarmos que a resistência de falta afeta o ângulo entre a tensão e a corrente medidas na subestação, verificamos que à medida que a mesma aumenta, este ângulo diminui, diminuindo também a diferença $\angle N_k - \angle I_{F_k}$. O limite mínimo deste ângulo é verificado no caso do estado de operação nominal do sistema, em regime permanente, dado pela equação (4.41).

¹⁴O termo dado por $|N_k|$ será obrigatoriamente diferente de zero, pois é dado pelo produto da corrente total do sistema com a impedância da linha.

maiores. Na medida em que o valor desta resistência cresce, ele se aproxima do valor referente à impedância equivalente da carga do sistema. Quando isto acontece, verifica-se que as suposições ora assumidas não são mais válidas¹⁵.

Considere inicialmente o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Este termo, como constatado nas análises precedentes, possuirá um módulo muito pequeno em relação ao valor assumido pelo termo α_1^2 , desde faltas com $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$ até faltas com $R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$, dado que é função do seno da diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$. Esta diferença angular será sempre muito próxima de zero, podendo ser até negativa, desde o caso em que a resistência de falta é próxima de zero até o caso em que a resistência de falta é muito elevada, como provado através de (4.24) no caso em que a corrente de carga é desprezível. Quando a R_F se aproxima de $|Z_{\text{Load}}|$ esta aproximação passa a não ser mais válida. No entanto, se desprezarmos a impedância da linha para esta faixa de valores de R_F , verifica-se então que V_{S_k} se aproxima de V_{F_k} . Como a impedância da falta é considerada como puramente resistiva, então $V_{S_k} \approx I_{F_k}$ e a diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ também apresenta-se próxima de zero nesta faixa de valores de resistência de falta¹⁶.

Considere agora o termo α_1^2 , dado no caso monofásico por $N_k^2 \cdot \sin^2(\angle N_k - \angle I_{F_k})$. O argumento $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ mostra-se sempre positivo no caso em que $R_F \approx 0$, dado por $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$. Matematicamente, pode-se referir à equação (4.29), válida para qualquer valor de resistência de falta:

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \phi + \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F} \right).$$

Na medida em que R_F cresce, o argumento da função arco-tangente passa a diminuir a uma taxa relacionada a Z_{Load} , bem como o resultado desta função arco-tangente. Como consequência, $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ passa também a diminuir. O limite mínimo deste valor ocorre exatamente no caso em que $R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$, e tende a $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \phi$. Isto significa que este limite mínimo depende exclusivamente de parâmetros do sistema que são independentes da falta: o ângulo dado pela impedância da linha, $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$, e o ângulo da carga, ϕ .

Através desta análise, pode-se concluir que:

- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi$, a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ é sempre positiva¹⁷;
- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$, a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ inicia positiva, quando $R_F = 0$, e tende a um valor negativo, quando $R_F \rightarrow \infty$;
- A taxa em que $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ decai é dada por uma função arco-tangente, como descrito na equação (4.29);
- O valor de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ para $R_F = 0$ é sempre positivo e dado por $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$;

¹⁵A escolha por apresentar este caso após todos os outros é justificada pelo fato deste caso necessitar do embasamento obtido em todos os outros, bem como estabelecer um elo entre a análise realizada e as conclusões finais obtidas.

¹⁶Deve-se lembrar que a presente análise é realizada para faltas próximas ao terminal local, o que contribui para a conclusão apresentada.

¹⁷É interessante analisar (4.29) considerando-se uma linha alimentando uma carga equivalente cujo fator de potência é capacitivo. Neste caso, ϕ assume um valor negativo, que se soma a $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$ em (4.29). A diferença em relação ao caso em que o fator de potência da carga é indutivo está no fato de que $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ aumenta juntamente com o aumento de R_F , ao invés de diminuir. Esta conclusão, portanto, ainda se aplica a este caso, pois a soma $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \phi$ dificilmente resultará em um ângulo cujo seno é nulo (neste caso, 180°), ou seja, $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ nunca se torna zero ou negativo.

- O valor de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ para $R_F \rightarrow \infty$ é sempre dado por $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \phi$.

Como $|N_k|$ é sempre maior do que zero, e não é próximo de zero, verifica-se que o único caso em que o termo α_1^2 pode chegar a ser próximo de zero é quando

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx 0 \implies \angle Z_{\text{Line}_{kk}} \approx \phi - \arctan\left(\frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F}\right), \quad (4.42)$$

e isto só acontecerá quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$ e o valor da resistência de falta for da mesma ordem de grandeza que o valor da impedância equivalente da carga, ou seja, em algum valor intermediário de resistência. No caso em que $R_F \gg |Z_{\text{load}}|$, o valor de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ só assumirá valores próximos à zero se $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} \approx \phi$. Se, por outro lado $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi$, então α_1^2 nunca chegará a zero. Até o presente momento, constatou-se que na prática, as raízes serão sempre reais e distintas. No entanto, através desta última análise, verifica-se que quando R_F for próximo à impedância da carga, poderão haver raízes complexas conjugadas, dependendo do sistema analisado. Uma estimativa dos valores de R_F para os quais a EGFT pode assumir soluções complexas é apresentada no Apêndice A.

Além disso, a nulidade do termo α_1^2 está restrita somente ao conjunto de valores de R_F para os quais $\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx 0$. Assim, na medida em que a resistência de falta continua a crescer, o termo $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ ultrapassa o valor zero, chegando a valores negativos. Como este argumento aparece em um seno elevado ao quadrado, α_1^2 , este termo torna a crescer após atingir valores próximos de zero, assumindo valores maiores do que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ novamente¹⁸.

Retomando o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, pode-se concluir então que se $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ não assumir valores próximos à zero, então α_1^2 será sempre maior do que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, ou seja, as raízes serão sempre reais e distintas. Pode-se estabelecer então uma conclusão sobre a natureza das raízes quando $R_F \approx |Z_{\text{Load}}|$, tomando como base variáveis mensuráveis do sistema, como $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$ e ϕ :

- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi$, as raízes serão reais e distintas;
- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$, as raízes poderão ser complexas conjugadas para alguns valores de resistência de falta da mesma ordem de grandeza da impedância de carga do sistema.

4.2.5 Efeito do Local da Falta

A análise realizada nas Seções 4.2.1 a 4.2.4 consideravam um local fixo de falta próximo ao terminal local, com a resistência da mesma modificando de valor. Quando a falta acontece à distâncias maiores do que as previamente consideradas, a única diferença do ponto de vista matemático está no módulo de $Z_{\text{Line}_{kk}}$, que será maior do que considerado anteriormente, sendo que o ângulo do mesmo permanecerá o mesmo, considerando que a linha é homogênea¹⁹. A ordem de grandeza máxima da impedância da linha depende, na verdade, do tamanho total da linha de distribuição estudada. Para analisar os efeitos que esta modificação trás às raízes da EGFT, ainda considerando o caso monofásico, pode-se retomar a análise já realizada anteriormente considerando agora a variação no módulo de $Z_{\text{Line}_{kk}}$ e explorando as diferenças existentes em cada caso.

¹⁸Pode existir um caso em que todas as soluções a partir de $R_F \approx |Z_{\text{load}}|$ assumam uma natureza complexa e conjugada. Este caso pode ocorrer quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$ é muito próximo de ϕ , mas ligeiramente maior do que ele, resultando em um termo $\alpha_1^2 \approx 0$ e $\angle V_{S_k} > \angle I_{F_k}$. Estas condições, no entanto, apresentam-se tão restritivas que, na prática, dificilmente são encontradas.

¹⁹Linhas não homogêneas podem ser consideradas em separado, como se fossem diversas seções diferentes, para fins de análise.

4.2.5.1 Condição I – $R_F \approx 0$

Retomando a análise realizada na Seção 4.2.1, verifica-se que a principal diferença propiciada pelo aumento da distância da falta está no aumento de $|V_{S_k}|$ e na diminuição de $|I_{S_k}|$ na medida em que a falta se afasta do terminal local. Isto ocorre devido ao aumento no módulo impedância $Z_{Line_{kk}}$, que limita a corrente de falta e aumenta a impedância existente entre o ponto da falta e o terminal local (aumentando assim o divisor de tensão composta pela impedância da linha e pelo sistema equivalente). A diminuição da corrente de falta implica na diminuição de $|I_{S_k}|$, ao passo que este aumento de impedância aumenta a tensão no terminal no local, já que a tensão no ponto da falta mantém-se a mesma ($R_F \approx 0$). Estas alterações implicam na redução do termo α_1^2 e no aumento do valor $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Matematicamente, tem-se que:

$$|V_{S_k}| = |V_G| \cdot \frac{|Z_{Line_{kk}}|}{|Z_{Line_{kk}} + Z_{Eq}|}. \quad (4.43)$$

A equação (4.43) mostra que há também a influência do sistema equivalente à montante do SDEE analisado. O caso mais crítico de variação (quando a mesma é muito elevada) ocorre quando este sistema equivalente possui um valor muito pequeno²⁰. Considerando o aspecto físico, tem-se que a ordem de grandeza de Z_{Eq} é normalmente superior à ordem de grandeza de Z_{Line} , de forma que a natureza das raízes não deve ser alterada em SDEE típicos.

4.2.5.2 Condição II – $R_F \ll |Z_{Load}|$

Na análise realizada na Seção 4.2.2 havia-se concluído que quando $R_F \ll |Z_{Load}|$ as raízes da EGFT seriam reais e distintas, mas que nesta faixa de R_F haveria uma diminuição no valor α_1^2 e um aumento momentâneo (um pico) no valor de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Retomando (4.24):

$$\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k} \approx \arctan \left(\frac{X_{Line_{kk}}}{R_{Line_{kk}} + R_F} \right).$$

Analisando (4.24), verifica-se que a taxa de variação do termo $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ é atenuada, ou seja, $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ chegará a valores próximos de zero à medida que R_F aumentar, mas quanto maior for o valor de $Z_{Line_{kk}}$, maior será o valor de R_F em que isto acontece. E isto afetará o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, onde a diferença angular está presente. Como este termo já possui também uma taxa de crescimento correspondente ao aumento de $|V_{S_k}|$ nesta faixa de R_F , verifica-se que a redução da taxa de variação de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ resultará em uma faixa maior em que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ cresce, logo decaindo próximo a zero novamente. Quanto maior for a impedância da linha entre o terminal local e o ponto da falta, maior será esta faixa, resultando em um pico mais elevado nos valores de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$. No entanto, após este pico, os valores tornam a decair à zero.

O termo α_1^2 também será alterado, mas devido à diminuição da corrente de falta, como averiguado anteriormente para o caso em que $R_F \approx 0$. A atenuação neste caso será também mais elevada, visto que a corrente de falta será limitada também pela impedância da linha. Esta alteração, no entanto, não é tão significativa quanto à alteração ocorrida no termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$.

²⁰Isto ocorre quando o sistema de transmissão à montante do SDEE é altamente interligado. Deve-se notar que o transformador de distribuição também contribui para este sistema equivalente, sendo a impedância do mesmo a mínima teórica possível para o sistema equivalente.

Devido aos fatos apresentados, a questão da natureza das raízes para faltas longínquas ao terminal local na faixa de R_F em questão, torna-se mais complexa do que nos outros casos. Em SDEE urbanos, os alimentadores de distribuição não costumam possuir grandes extensões, devido à própria extensão limitada e o alto carregamento dos grande centros urbanos. Sendo assim, dificilmente os valores assumidos por Z_{Line} serão elevados o suficiente para que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ supere o valor de α_1^2 . Neste caso, as raízes serão predominantemente reais e distintas. Agora, considerando SDEE rurais, onde o tamanho das linhas é normalmente elevado e o carregamento é normalmente baixo, é possível que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ supere o valor de α_1^2 para alguns valores de R_F nesta faixa, resultando em raízes complexas conjugadas.

4.2.5.3 Condição III – $R_F \gg |Z_{Load}|$

Retomando a análise realizada na Seção 4.2.3, verifica-se que os valores assumidos pelos termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ quando $R_F \gg |Z_{Load}|$ dependem muito mais das diferenças angulares do que dos módulos assumidos pelas variáveis presentes em cada um dos termos. Isto ocorre exatamente porque faltas com resistência muito elevada afetam de forma pouco significativa as variáveis de tensão e corrente do sistema, que praticamente opera em regime permanente, como no caso de faltas de alta impedância. Estima-se portanto, que o local da falta tenha pouca influência nos valores assumidos por α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ quando $R_F \gg |Z_{Load}|$, visto que estes são afetados de forma pouco significativa pela impedância da linha do terminal local até o ponto da falta, $Z_{Line_{kk}}$.

Para entender estas conclusões matematicamente, considere (4.38), válida independente do valor assumido pela impedância da linha, visto que nenhuma simplificação neste sentido foi realizada na sua obtenção. Na medida em que a impedância da linha aumenta (a falta se afasta do terminal local em direção ao terminal da carga), a única variação presente nesta equação é a do valor de θ_ε , que representa $\angle V_{S_k} - \angle V_{F_k}$, a diferença angular entre a tensão no terminal local e a tensão no ponto da falta. O valor que esta variável assume será tão maior em valor absoluto quanto for a distância da falta ao terminal local. No caso em que a falta é exatamente no terminal local, esta variável assume valor nulo. Logo, verifica-se que o valor assumido por $\angle M_k - \angle I_{F_k}$ quando $R_F \gg |Z_{Load}|$ tende a se modificar com o aumento da distância da falta. Mesmo assim, esta variação não é significativa o suficiente para alterar a natureza das raízes ou as conclusões obtidas anteriormente para faltas próximas ao terminal local.

Ao mesmo tempo, θ_ε também representa diretamente a diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$, considerando-se as faltas como puramente resistivas. As mesmas conclusões se aplicam neste caso. No entanto, deve-se ter em mente que as modificações apresentadas nestes casos são pouco significativas, dados os valores das outras impedâncias existentes no sistema²¹.

Em relação à diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$, pode-se desconsiderar o efeito capacitivo da linha e equacionar a corrente de falta:

$$I_{F_k} \approx I_{S_k} \cdot \frac{Z_{Load}}{Z_{Load} + R_F}, \quad (4.44)$$

²¹Em SDEE rurais é esperado que as quedas de tensão afetem de forma mais significativa estas relações angulares, visto que o tamanho da linha é muito superior, resultando em uma influência superior nas variáveis envolvidas.

de onde se conclui que

$$\angle I_{F_k} \approx \angle I_{S_k} + \angle Z_{\text{Load}} - \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F} \right). \quad (4.45)$$

Isto significa que $\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \angle Z_{\text{Load}} + \arctan (X_{\text{Load}} / (R_{\text{Load}} + R_F))$, que é o mesmo resultado previamente observado em (4.29). Logo, o valor desta diferença angular quando a impedância da linha aumenta é pouco afetada. Entretanto, a capacitância do sistema pode exercer uma certa influência sobre esta diferença angular, já que insere um termo em (4.44), fazendo com que a corrente de saída do terminal local seja diferente da corrente no ponto da falta. No entanto, esta diferença é normalmente pouco significativa para esta análise, sendo somente significativa nos casos de distribuição subterrânea (onde a capacitância das linha é elevada) ou ainda na distribuição rural (dado o tamanho das linhas).

Conforme apresentado, os valores assumidos pelas variáveis do sistema quando R_F é bastante elevada²² são pouco afetados pela distância da falta. Assim, as conclusões previamente obtidas podem ser estendidas para faltas ao longo de todo o alimentador, tendo-se em mente as considerações realizadas, bem como as possíveis exceções citadas no decorrer do desenvolvimento.

4.2.5.4 Condição IV – $R_F \approx |Z_{\text{Load}}|$

Na análise realizada na Seção 4.2.5.2 para o caso em que $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$, verificou-se que o aumento da distância da falta ao terminal local ocasiona em uma elevação do pico existente (em módulo) para esta faixa de resistência, com o posterior decaimento do mesmo a zero. O caso em que $R_F \approx |Z_{\text{Load}}|$ é, na verdade, uma consequência do que também acontece quando $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$. Isto porque se a taxa de decaimento de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ é menor quando $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$ e o pico o qual ele atinge é maior do que em comparação ao caso de faltas próximas ao terminal local, então este termo deve chegar a $R_F \approx |Z_{\text{Load}}|$ com um valor mais elevado, em comparação ao caso de faltas próximas ao terminal local.

Esta conclusão afeta, em alguns casos, a natureza das raízes nestas condições de falta, quando comparamos o caso de faltas próximas ao terminal local com faltas longínquas ao mesmo. Considerando o caso em que as soluções da EGFT assumem valores reais e distintos para faltas próximas ao terminal local, como discutido na Seção 4.2.4, a natureza das raízes dificilmente será afetada nesta faixa de R_F , exceto em casos mais extremos, como SDEE rurais e faltas ao final destes alimentadores, pelos mesmos motivos discutidos na Seção 4.2.5.2. Quando as raízes já assumem naturezas complexas conjugadas quando a distância ao local da falta é pequena, elas também continuarão a possuir esta mesma natureza quando a falta se afastar do terminal local. A diferença é que a faixa de valores de R_F para os quais as raízes assumem uma natureza complexa se modifica, devido a modificação nas taxas de decaimento dos termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$.

4.2.6 Faltas Polifásicas

A análise das raízes da EGFT foi até este momento tratada para o caso especial das faltas monofásicas. Quando o número de fases envolvidas na falta aumenta, necessita-se de uma análise um pouco mais detalhada de como as variáveis do sistema são afetadas, de forma a entender a natureza das raízes da EGFT.

²²Elevada o suficiente para que a corrente de falta possa ser desprezada.

Retomando a equação geral de localização de faltas à terra, dada por (4.1), pode-se expandir os termos α_0 , α_1 e α_2 para o caso polifásico. Considerando-se o caso mais geral, referente às faltas trifásicas, têm-se que:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0,5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{M_k \cdot I_{F_k}^*\} \\ &= 0,5 \cdot [\Im \{M_a \cdot I_{F_a}^*\} + \Im \{M_b \cdot I_{F_b}^*\} + \Im \{M_c \cdot I_{F_c}^*\}] \\ &= 0,5 \cdot |M_a| |I_{F_a}| \text{sen}(\angle M_a - \angle I_{F_a}) \\ &\quad + 0,5 \cdot |M_b| |I_{F_b}| \text{sen}(\angle M_b - \angle I_{F_b}) + 0,5 \cdot |M_c| |I_{F_c}| \text{sen}(\angle M_c - \angle I_{F_c})\end{aligned}\quad (4.46)$$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{N_k \cdot I_{F_k}^*\} \\ &= [\Im \{N_a \cdot I_{F_a}^*\} + \Im \{N_b \cdot I_{F_b}^*\} + \Im \{N_c \cdot I_{F_c}^*\}] \\ &= |N_a| |I_{F_a}| \text{sen}(\angle N_a - \angle I_{F_a}) \\ &\quad + |N_b| |I_{F_b}| \text{sen}(\angle N_b - \angle I_{F_b}) + |N_c| |I_{F_c}| \text{sen}(\angle N_c - \angle I_{F_c})\end{aligned}\quad (4.47)$$

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\} \\ &= [\Im \{V_{S_a} \cdot I_{F_a}^*\} + \Im \{V_{S_b} \cdot I_{F_b}^*\} + \Im \{V_{S_c} \cdot I_{F_c}^*\}] \\ &= |V_{S_a}| |I_{F_a}| \text{sen}(\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}) \\ &\quad + |V_{S_b}| |I_{F_b}| \text{sen}(\angle V_{S_b} - \angle I_{F_b}) + |V_{S_c}| |I_{F_c}| \text{sen}(\angle V_{S_c} - \angle I_{F_c})\end{aligned}\quad (4.48)$$

Verifica-se através das equações (4.46) a (4.48) que os termos α_2 , α_1 , e α_0 aparecem como somatórios de alguns elementos. Na verdade, cada um destes elementos já foi analisado anteriormente em separado, através da análise do caso monofásico nas Seções (4.2.1) a (4.2.4). Matematicamente, a única diferença entre os elementos presentes em (4.46) a (4.48) e os da EGFT monofásica é o módulo da corrente de falta, que neste caso não pode ser suprimida do equacionamento. Nas seções seguintes serão abordadas as principais diferenças existentes entre os valores assumidos por cada variável nas faltas polifásicas em relação às faltas monofásicas.

4.2.6.1 Corrente de Falta

Considere a influência do módulo da corrente de falta em cada um dos elementos do somatório nas equações (4.46) a (4.48). Se um sistema é desequilibrado tanto em termos de carregamento como em assimetria das linhas, a corrente de falta será diferente em cada uma das fases, mesmo para faltas com a mesma resistência de falta, R_{F_k} , em todas as fases. No entanto, mesmo que estes valores sejam diferentes, eles serão próximos (da mesma ordem de grandeza), devido às próprias restrições nas condições de operação do sistema. Ao mesmo tempo, a taxa de decaimento desta corrente de falta em função de R_{F_k} também será bastante parecida, com diferenças devido ao carregamento desequilibrado do sistema e à assimetria das linhas. Sendo assim, a influência de $|I_{F_k}|$ em comparação com o caso monofásico se restringe na modificação do módulo dos coeficientes $\alpha_{0,1,2}$. Portanto, os valores associados a α_0 , α_1 e α_2 deverão ser significativamente maiores do que no caso monofásico.

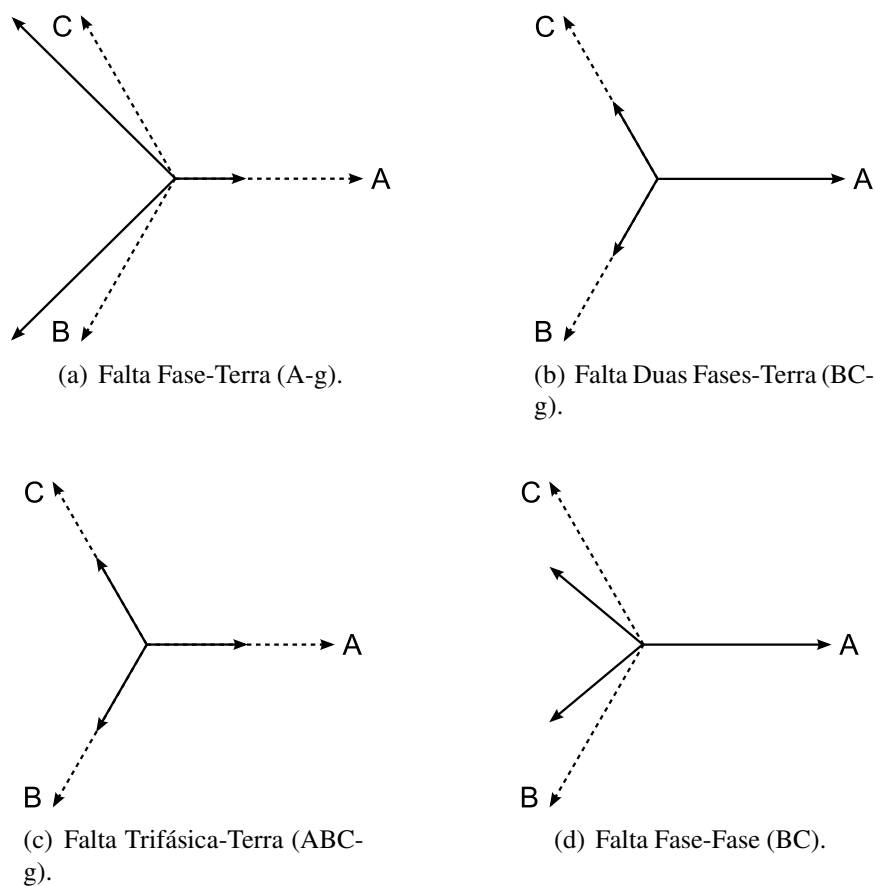


Figura 4.3: Representação fasorial das tensões terminais de um SDEE durante a ocorrência de faltas em sistemas aterrados (BOLLEN, 2000; BOLLEN; ZHANG, 2003).

4.2.6.2 Aterramento e Fasores

No que tange às faltas polifásicas, deve-se considerar também o tipo de aterramento existente no terminal secundário do transformador de distribuição do sistema analisado. Isto porque toda a distribuição de correntes e tensões trifásicas, seja em módulo como também em fase, dependerá diretamente do tipo de aterramento utilizado quando da ocorrência de uma falta (RAPPAPORT; MOHLA, 2007). De forma geral, no entanto, pode-se inferir sobre o comportamento dos fasores de tensão no terminal local de um sistema quando da ocorrência de faltas polifásicas, como apresentado na Figura 4.3, retirada de (BOLLEN, 2000; BOLLEN; ZHANG, 2003). Pela simplicidade no equacionamento e também por ser prática comum em circuitos primários de distribuição de energia elétrica (RAPPAPORT; MOHLA, 2007; MELIPOULOS et al., 1998), nesta dissertação analisar-se-á o caso de sistemas solidamente aterrados.

Quando o SDEE é solidamente aterrado, a referência de tensão do sistema permanece inalterada mesmo quando acontece uma falta, seja ela monofásica, bifásica ou trifásica à terra. Quando há a ocorrência de faltas polifásicas à terra, as fases faltosas sempre apresentam uma diminuição no módulo das tensões, sem modificarem o seu ângulo, sendo que quanto menor a resistência de falta, menor é este módulo. Já as fases não faltosas permanecem inalteradas.

Deve-se também atentar para a questão do modelo das faltas utilizadas para a análise. Os modelos empregados para as faltas polifásicas, apresentados nas Figuras 3.3 a 3.5, possuem uma impedância comum a todas as fases faltosas, dada por Z_{Fg} . Esta impedância,

que conecta a falta efetivamente à terra, pode assumir os mais variados valores, dada a natureza estocástica das faltas. Quando esta impedância é muito elevada, a falta apresenta características de faltas entre fases, e não de faltas à terra, já que a conexão com a terra seria praticamente inexistente. Isto pode ser verificado através da substituição de Z_{F_g} por um circuito aberto, o que isolaria o circuito da falta. Desta forma, o comportamento mais geral das faltas polifásicas compreende, na verdade, um estágio intermediário entre o diagrama fasorial apresentado em 4.3(b) e 4.3(d), no caso de faltas ocorrendo em duas fases do sistema. Isto significa que haverá uma defasagem angular na tensão das fases faltosas. Apesar disto, na análise subsequente se considera que as faltas possuem uma impedância Z_{F_g} pequena, de forma que nem o ângulo nem a independência das fases durante uma falta polifásica sejam afetados, tendo em vista a simplificação da análise e a obtenção de conclusões gerais.

Manter esta independência entre fases significa que as tensões e correntes serão alteradas de forma isolada em cada uma das mesmas (salvo as alterações devido ao acoplamento entre as fases), e cada uma das fases faltosas pode ser tratada como um sistema monofásico sem que isto afete as conclusões obtidas a respeito da natureza das raízes. Sendo assim, a análise das raízes para o caso polifásico pode ser realizada como uma extensão do caso monofásico. O resultado, no entanto, corresponde à soma dos termos de cada uma das fases e deve-se considerar também outros efeitos, antes desconsiderados no caso monofásico, como a corrente nas outras fases, especialmente quando a resistência de falta é próxima de zero, pois a mesma será bastante elevada em mais de uma fase do sistema.

4.2.6.3 Condição $I - R_{F_k} \approx 0$

Como ilustrado na Figura 4.3, as fases faltosas possuirão um módulo de tensão menor do que as fases não faltosas, no caso das faltas polifásicas. Quanto menor a resistência de falta, menor também é a tensão nas fases faltosas, ao passo que a tensão nas fases não faltosas permanece inalterada. Desta forma, as mesmas considerações realizadas para o caso monofásico em relação à tensão no terminal local se aplicam no caso polifásico, ou seja, quando $R_{F_k} \approx 0$, $|V_{S_k}| \approx 0$ para faltas próximas ao terminal local.

Retomando (3.17), que define M_k , verifica-se que o mesmo é uma função linear de V_{S_k} , dada pelas impedâncias próprias e mútuas do sistema (série e paralelo). Sendo assim, quando $R_{F_k} \approx 0$, M_k assume módulo também próximo de zero. Já N_k , definido de acordo com (3.18), é uma função linear de I_{S_k} , que assume valores elevados (em módulo), na condição de falta analisada.

Considerando estas constatações e desprezando inicialmente o efeito das diferenças angulares, pode-se concluir que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ possuirá um valor desprezível em relação a α_1^2 , quando $R_{F_k} \approx 0$ em faltas polifásicas. Isto porque mesmo que o módulo da corrente de falta seja elevada em cada uma das fases faltosas, podendo aumentar os valores assumidos por α_2 e α_0 , o termo α_1 aumenta quadraticamente, o que resulta em um valor muito maior do que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, que é consequência da multiplicação e somatório de termos muito menores (em relação à $|I_{F_k}|$). Em outras palavras, $|N_k| \cdot |I_{F_k}| \gg (|M_k| \cdot |I_{F_k}| + |V_{S_k}| \cdot |I_{F_k}|)$. Isto significa que a EGFT possui soluções reais e distintas sob estas condições.

Em respeito à estas conclusões, as diferenças angulares presentes em α_0 e α_2 podem ser desprezadas pois estando inseridas dentro de uma função seno, não poderiam aumentar estes termos significativamente de forma que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ fosse maior do que α_1^2 . Já $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ resultará em um valor um pouco diferente do que no caso monofásico. Matematicamente, pode-se desprezar o acoplamento entre as fases e dizer que $\angle I_{F_k} \approx \angle I_{S_k}$,

mas o efeito da corrente de falta nas outras fases faltosas irá alterar a fase de N_k , já que

$$N_k = Z_{ka} \cdot I_{S_a} + Z_{kb} \cdot I_{S_b} + Z_{kc} \cdot I_{S_c} . \quad (4.49)$$

No caso das faltas polifásicas, haverão no mínimo duas correntes no terminal local com magnitudes próximas, sob as condições de falta analisadas. Sendo assim, mesmo que os termos mútuos sejam bem menores do que os termos próprios ($Z_{mm} \gg Z_{mn}$), haverá uma influência destes termos mútuos no ângulo de N_k . Como as fases faltosas não possuem alteração na sua fase (nas faltas à terra, monofásicas ou polifásicas), pode-se realizar uma analogia direta com o caso monofásico. Nas faltas polifásicas, o valor de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ sofre uma pequena modificação em relação à mesma diferença angular no caso monofásico, quando $R_F \approx 0$. Matematicamente, tem-se que

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \delta_k \quad (4.50)$$

onde δ_k representa o desvio angular na fase k devido ao acoplamento mútuo e a corrente nas fases faltosas. O valor de δ_k depende de diversos fatores, podendo ser tanto negativo como positivo, dependendo das fases envolvidas na falta e também do grau de acoplamento existente entre cada par de fases.

Desta forma, verifica-se que o comportamento dos termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ para o caso polifásico é bastante parecido com o comportamento dos mesmos no caso monofásico, resultando na mesma natureza de soluções da EGFT para faltas na condição analisada, diferenciando-se somente na magnitude dos valores relacionados.

4.2.6.4 Condição II – $R_{F_k} \ll |Z_{\text{Load}_k}|$

Para analisar a natureza das raízes sob esta condição de falta, considere as expressões (4.19) e (4.20), obtidas a partir de um equacionamento que desconsiderava o acoplamento entre as fases. No caso das faltas polifásicas, pode-se também desprezar este acoplamento e realizar um equacionamento semelhante, que resulta nas mesmas expressões. Neste caso, é desprezada a queda de tensão existente devido ao acoplamento entre as fases faltosas, que é uma aproximação plausível, dados as magnitudes das outras variáveis envolvidas na análise. Da mesma forma, (4.24) se mantém inalterada. No entanto, deve-se atentar para algumas conclusões obtidas a partir da mesma.

Primeiramente, considere (4.24), abaixo reescrita:

$$\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k} \approx \arctan \left(\frac{X_{\text{Line}_{kk}}}{R_{\text{Line}_{kk}} + R_{F_k}} \right) .$$

No caso das faltas monofásicas, não havia um somatório, mas somente um termo que era multiplicado pelo seno de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$. Desta forma, a conclusão de que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ decaía à zero com o aumento de R_{F_k} era direta. No caso das faltas polifásicas, há um somatório de termos (em α_0) que são multiplicados, cada um, pelo seno de $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$, representando cada fase faltosa k . Sendo assim, somente quando todos estes senos forem próximos de zero é que o termo α_0 será também próximo de zero. Isto pode fazer com que o termo inteiro $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ decaia a zero mais vagarosamente, em relação ao caso monofásico, com o aumento de R_{F_k} . Portanto, o pico momentâneo existente no termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ deve assumir valores maiores do que no caso monofásico, mas não deve afetar a natureza das raízes neste caso, dada a magnitude elevada prevista para o termo α_1^2 .

Agora considere (4.29). O processo de obtenção desta equação ainda é válido para o caso polifásico sob as condições e simplificações analisadas. A diferença está no termo

δ_k , previamente apresentado. Para o caso polifásico, a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ pode ser aproximada para

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} - \angle Z_{\text{Load}_k} + \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}_k}}{R_{\text{Load}_k} + R_{F_k}} \right) + \delta_k, \quad (4.51)$$

ou seja, a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ para o caso polifásico é uma versão transladada de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ para o caso monofásico, e esta translação é dada pelo termo δ_k . A taxa de variação em função da resistência de falta é a mesma, dada por uma função arco-tangente. Entretanto, assim como $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$, $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ também está inserido dentro de um somatório, resultando em α_1 .

De acordo com as análises realizadas nesta seção, pode-se concluir, assim como se pôde no caso de faltas com $R_{F_k} \approx 0$, que nas faltas polifásicas em que $R_{F_k} \ll |Z_{\text{Load}_k}|$, as variáveis possuem um comportamento parecido com o caso monofásico. Portanto, as raízes da EGFT nesta faixa de R_{F_k} devem possuir natureza real e distinta, assim como no caso monofásico.

4.2.6.5 Condição III – $R_{F_k} \gg |Z_{\text{Load}_k}|$

Quando a resistência da falta atinge um valor elevado em relação à carga equivalente do sistema, a própria corrente de falta pode ser desprezada, como também foi considerado no caso monofásico. Sendo assim, o principal efeito que antes era verificado no caso das faltas polifásicas agora não é mais verificado, a saber, a elevada corrente em todas as fases faltosas. Em contrapartida, nas condições de falta analisadas, as correntes em todas as fases (faltosas ou não) possuirão magnitudes semelhantes, assim como no caso monofásico.

Considerando esta analogia, verifica-se que as equações e conclusões previamente obtidas para o caso monofásico aplicam-se agora isoladamente para fase do sistema, ou seja, para cada termo de α_2 , α_1 , e α_0 . Das equações apresentadas na Seção 4.2.3, somente (4.39), (4.40) e (4.41) necessitam ser revistas. A equação (4.39) pode ser reescrita como (4.52):

$$\begin{cases} 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 < 0, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi_k \\ 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 = 0, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} = \phi_k \\ 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 > 0, & \text{se } \angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi_k \end{cases} \quad (4.52)$$

para toda fase faltosa k . Deve-se lembrar que (4.52) é, na verdade, uma aproximação, tendo em vista a influência das outras fases no ângulo de N_k , como também acontecia no caso monofásico. No caso polifásico, (4.40) pode ser reescrita para (4.53):

$$\angle N_k \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + \angle I_{S_k} + \varepsilon_k, \quad (4.53)$$

onde ε_k representa um desvio angular na fase k . No caso mais geral de linhas geometricamente assimétricas e não-transpostas, cada fase possuirá um ε_k diferente, pois o acoplamento é diferente em cada par de fases.

Os casos não contemplados por (4.52)²³, resultam em conclusões que dependem das características específicas de cada sistema. Neste caso, não é possível estabelecer uma conclusão genérica o suficiente como (4.52), devendo a relação entre as variáveis ser analisada como um todo através de (4.46) a (4.48).

²³Estes casos compreendem os casos em que uma fase faltosa possui uma relação entre $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$ e ϕ_k diferente de outra fase faltosa (contemplando dois casos diferentes de (4.52))

Fundamentando-se na análise realizada nesta seção, pode-se concluir que a EGFT irá resultar em soluções reais e distintas na maioria dos casos práticos²⁴, dado que a diferença angular $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$ é normalmente muito próxima de zero, como já observado para o caso monofásico e também para o caso polifásico na Seção 4.2.6.4.

4.2.6.6 Condição IV – $R_{F_k} \approx |Z_{Load_k}|$

O estudo de faltas sob estas condições também pode ser realizado seguindo os mesmos princípios previamente utilizados. Como foi verificado na Seção 4.2.6.4, a taxa com que $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ varia em função de R_{F_k} é a mesma tanto para o caso monofásico como para o caso polifásico. O mesmo também acontece com as outras diferenças angulares, como observado anteriormente. Sendo assim, as relações obtidas no caso monofásicos podem ser estendidas ao caso polifásico.

Primeiramente, deve-se considerar que a EGFT polifásica possui coeficientes que são somatórios. Sendo assim, para que o termo α_1^2 seja anulado é necessário que os termos no somatório se anulem. No caso monofásico só havia um termo, o qual era referente à única fase faltosa. Vale também lembrar que somente na região em que α_1^2 se anulava é que havia a possibilidade de haverem soluções complexas conjugadas para a EGFT monofásica. O mesmo se aplica no caso polifásico, onde a região em que α_1^2 se anula ainda implica em uma região de possibilidade de soluções complexas, dada a analogia existente com o caso monofásico. Entretanto, no caso polifásico a região em que o termo α_1^2 se anula (no caso em que ele se anula) é diferente, pois os argumentos dos senos, $\angle N_k - \angle I_{F_k}$, se anulam para valores diferentes de resistências de falta em cada fase faltosa k .

Se considerarmos que todas as fases possuem a mesma resistência de falta, então o termo que se anular para o menor valor de R_{F_k} passará a ser negativo, diminuindo o(s) outro(s) termo(s) através do somatório dado por (4.47), pois este(s) será(ão) negativo(s). E assim estas diferenças angulares vão se anulando para valores cada vez maiores de R_{F_k} . Quando o último termo se tornar negativo, todos os outros já o serão, ou seja, o coeficiente α_1^2 se anula em um valor intermediário de R_{F_k} , sendo os limites máximos e mínimos dados pela análise do caso monofásico nas três fases do sistema, considerando o valor de R_{F_k} em que α_1^2 é nulo em cada uma das fases.

Através desta análise, pode-se concluir que:

- Quando $\angle Z_{Line_{kk}} > \phi_k$ para todas as fases faltosas k , a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ é sempre positiva²⁵.
- Quando $\angle Z_{Line_{kk}} < \phi_k$ para todas as fases faltosas k , a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ inicia positiva, quando $R_F = 0$, e tende a um valor negativo, quando $R_F \rightarrow \infty$.
- A taxa em que $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ decai é dada por uma função arco-tangente, como descrito em (4.51).
- O valor de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ para $R_F = 0$ é sempre positivo e dado por $\angle Z_{Line_{kk}} + \delta_k$.
- O valor de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ para $R_F \rightarrow \infty$ é sempre dado por $\angle Z_{Line_{kk}} - \phi$.

²⁴Excetua-se somente o caso em que $\angle N_k - \angle I_{F_k} = 0$ para todas as fases faltosas nestas condições de falta analisadas.

²⁵As mesmas considerações à respeito de uma carga capacitiva realizadas no caso monofásico possuem uma analogia direta com o caso polifásico.

Sendo assim, as seguintes conclusões sobre a EGFT polifásica pode ser determinadas:

- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi_k$ em todas as fases faltosas k , as raízes da EGFT para o caso polifásico serão reais e distintas, independente do valor de R_{F_k} .
- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi_k$ em alguma das fases faltosas, as raízes poderão ser complexas conjugadas para alguns valores e combinações de resistências de falta.
- A faixa de valores de R_{F_k} para as quais a EGFT polifásica possui soluções complexas (se ela possuir) estará entre os valores máximos e mínimos em que isto acontece para faltas monofásicas.

4.3 Análise Numérica das Raízes

Visando elucidar a análise realizada na Seção 4.2, pode-se analisar alguns casos numericamente, mostrando a teoria aplicada na prática. Para tanto, considere o Sistema I, descrito no Apêndice B.1. Este sistema, apesar de simples e não possuir laterais e sublaterais, deve auxiliar no entendimento da natureza das raízes da EGFT. Para analisar numericamente as raízes obtidas para a LDF neste sistema, foram realizadas diversas simulações de faltas utilizando o software EMTP-RV (DEVELOPMENT COORDINATION GROUP, 2006) juntamente com uma ferramenta desenvolvida pelo autor para automação destas simulações, descrita no Apêndice C.1. As faltas simuladas foram divididas em diferentes casos, de acordo com a Tabela 4.1, que são analisados nas seções subseqüentes. Cada caso possui uma combinação diferente de carregamento do sistema, e de local e tipo de falta, compreendendo cinco casos capazes de elucidar as conclusões obtidas na análise matemática e física das raízes.

A partir das simulações realizadas, todos os fasores foram estimados através de um filtro modificado de Fourier, descrito no Apêndice C.2. Após a estimação fasorial, os coeficientes dos polinômios foram determinados, considerando que a corrente de falta foi um dos parâmetros medidos durante as simulações.

Tabela 4.1: Casos Analisados Numericamente – EGFT.

	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Caso V
Sistema	I	I	I	I	I
Carregamento	I	II	I	I	I
Local da falta	200m	200m	1800m	200m	200m
Tipo de falta	A-g	A-g	A-g	AB-g	ABC-g
Resistência de falta	0 a 200 Ω	0 a 200 Ω	0 a 200 Ω	0 a 200 Ω	0 a 200 Ω

4.3.1 Caso I – Faltas Monofásicas Próximas ao Terminal Local

Tomando-se o elemento $Z_{\text{Line}_{aa}}$ dos cabos subterrâneos presentes no Sistema I, verifica-se que o mesmo possui um ângulo de aproximadamente $18,7^\circ$. Considerando o carregamento I do sistema, chega-se à conclusão que: a) $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} \approx 18,7^\circ$, e, b) $\phi \approx 30,1^\circ$. De acordo com a análise realizada previamente neste capítulo, conclui-se que a diferença angular $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ será próxima de $18,7^\circ$ quando a resistência de falta for próxima de zero, e que a mesma irá diminuir na medida em que esta resistência de falta aumenta, até chegar no valor mínimo teórico de $-11,4^\circ$.

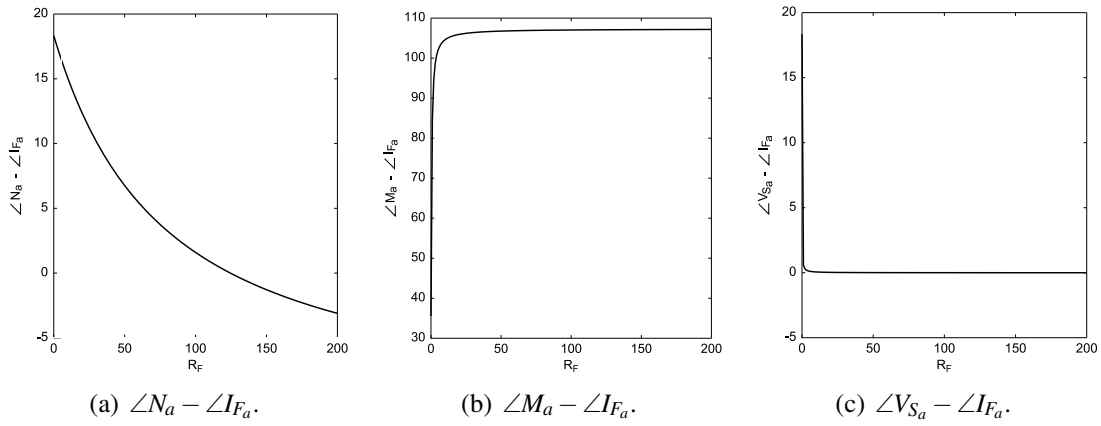


Figura 4.4: Variação das diferenças angulares presentes na EGFT em função da resistência de falta – Caso I.

A Figura 4.4(a) apresenta a diferença angular $\angle N_a - \angle I_{F_a}$ em função da resistência de falta, R_F , em cada uma das faltas analisadas no Caso I. Verifica-se que as aproximações realizadas na Seção 4.2 aplicam-se a este caso com uma alta precisão, visto que a diferença angular calculada com os resultados das simulações foi de aproximadamente $18,3^\circ$ para $R_F \approx 0$. No caso de $R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$, a curva mostra também uma tendência para o limite teórico de $-11,4^\circ$. Para $R_F = 3200 \Omega$ (omitido do gráfico para melhor visualização do mesmo), a diferença angular resulta em aproximadamente $-10,5^\circ$. O ponto em que a curva corta o eixo das abscissas está entre $R_F = 120 \Omega$ e $R_F = 125 \Omega$.

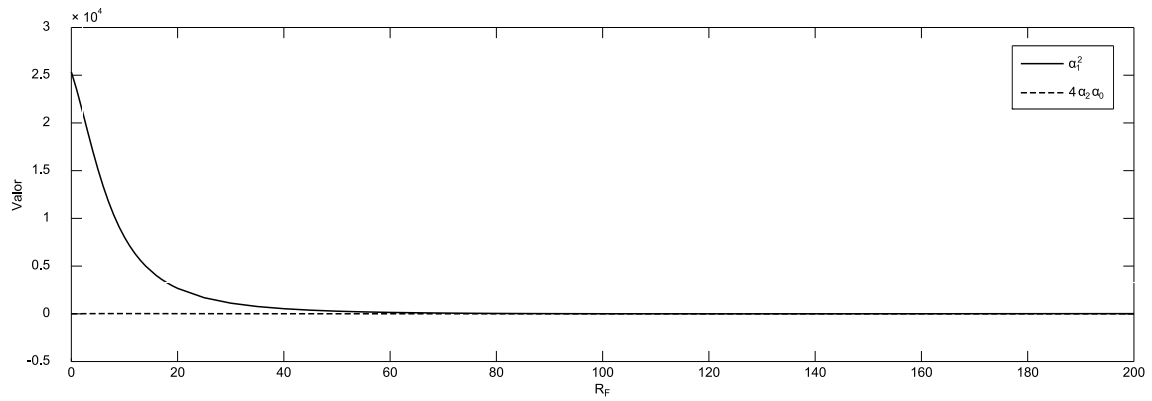
A mesma precisão também pode ser verificada para as outras diferenças angulares, $\angle M_a - \angle I_{F_a}$ e $\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}$, ilustradas respectivamente nas Figuras 4.4(b) e 4.4(c). Segundo (4.38), quando $R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$,

$$\angle M_a - \angle I_{F_a} \approx \angle Z_{\text{Line}_{kk}} + 90^\circ = 18,7^\circ + 90^\circ = 108,7^\circ,$$

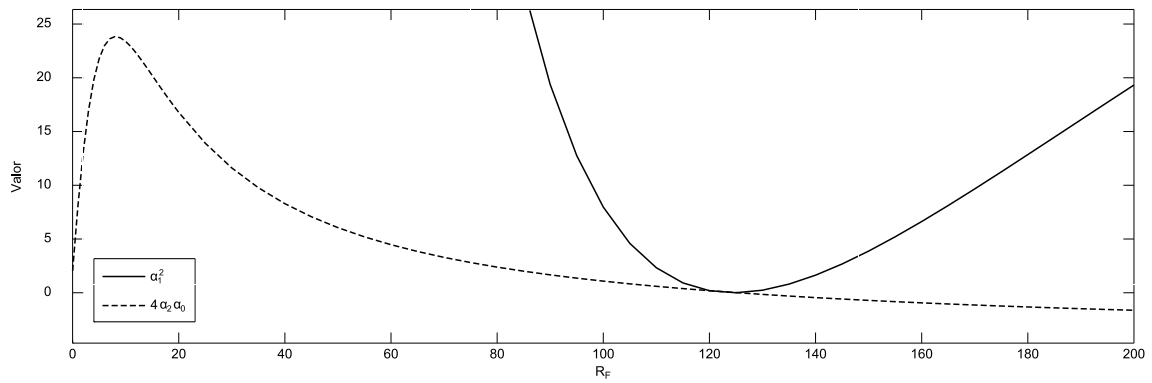
enquanto a Figura 4.4(b) mostra que, na prática, este valor foi de aproximadamente $107,2^\circ$. Ao mesmo tempo, segundo a análise realizada na Seção 4.2.3, $\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}$ deve assumir um valor muito próximo de zero quando $R_F \gg |Z_{\text{Load}}|$, o que realmente acontece. Além disto, verifica-se que esta diferença angular decai rapidamente para zero, reforçando as conclusões obtidas através da análise física das raízes.

O agrupamento destas variáveis, juntamente com o módulo de cada uma delas, resulta na relação entre α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, que está ilustrada da Figura 4.5 como função da resistência de falta. Nesta Figura estão ilustradas estas relações em três níveis de ampliação, a saber: a) Visão geral, apresentando todos os valores no gráfico; b) Vista ampliada I, restringindo o eixo das ordenadas aos limites de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$; e c) Vista ampliada II, que restringe tanto o eixo das ordenadas como o eixo das abscissas ao ponto de intersecção entre α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$.

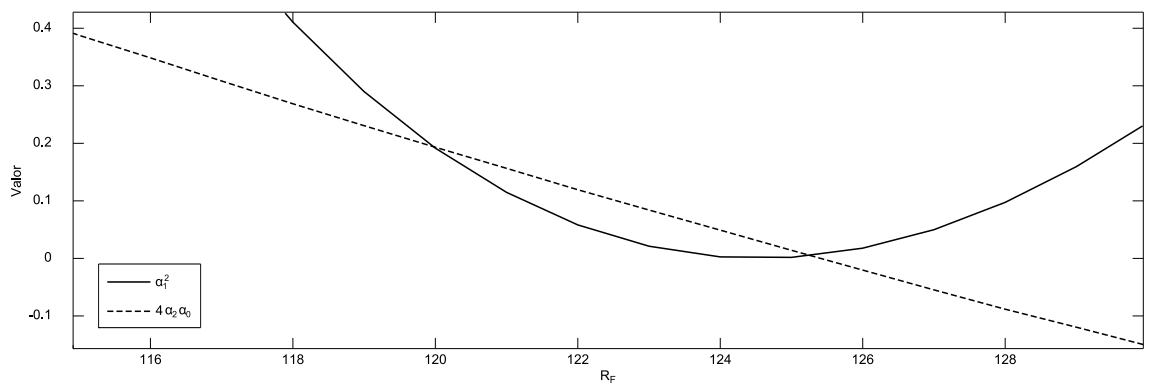
Analisando a Figura 4.5(a), verifica-se na prática as conclusões obtidas na Seção 4.2. Quando $R_F \approx 0$, o termo α_1^2 é muito maior que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, que assume um valor próximo de zero. Na medida em que R_F aumenta de valor, o termo α_1^2 diminui significativamente, até aproximar-se de zero, como ilustrado nas Figuras 4.5(b) e 4.5(c), e então torna a aumentar novamente. Em contrapartida, o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ não aumenta significativamente com o aumento de R_F , mantendo-se aproximadamente nulo em comparação a α_1^2 . É interessante notar também através das Figuras 4.5(b) e 4.5(c) que os únicos valores de R_F para os quais haverá raízes complexas conjugadas, neste sistema e local de falta, estarão entre 120Ω e 126Ω aproximadamente. Quando este mesmo valor é calculado



(a) Visão geral.



(b) Vista ampliada I.



(c) Vista ampliada II.

Figura 4.5: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso I.

através da estimativa apresentada em (A.8), desenvolvida teoricamente no Apêndice A, o resultado é de aproximadamente $R_F \approx 116 \Omega$, que é uma ótima estimativa, considerando todas as simplificações realizadas para a obtenção de (A.8).

Na verdade, a razão pela qual foram encontradas soluções complexas para a EGFT neste caso estudado tem origem exatamente em um erro intrínseco de modelagem. O modelo utilizado para a simulação das faltas é o modelo FDQ (MARTI, 1988), como apresentado no Apêndice B.1, ao passo que as matrizes impedância série e admitância paralelo utilizadas para o cálculo dos outros coeficientes da EGFT foram obtidas através das Equações de Carson e da Redução de Kron (KERSTING, 2002). O modelo FDQ, na verdade, aproxima os parâmetros da linha através de uma técnica de síntese de redes, considerando todo o espectro de frequências que se deseja analisar na simulação de transitórios eletromagnéticos. Sendo assim, existe uma diferença entre os parâmetros simulados através do modelo FDQ e os parâmetros obtidos através das Equações de Carson e da Redução de Kron, mesmo que pequena. Apesar de não terem sido apresentados nesta dissertação, resultados similares foram obtidos utilizando um modelo π de linha nas simulações. Neste caso, as curvas de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ se aproximam, se tocam, mas nunca se cruzam, não resultando em soluções complexas para a EGFT.

4.3.2 Caso II – Faltas Monofásicas Próximas ao Terminal Local

De forma a elucidar as conclusões referentes à relação entre $\angle Z_{\text{Line}_{kk}}$ e ϕ , considere as simulações realizadas para o Caso II, onde o mesmo SDEE e as mesmas condições de faltas foram utilizado em relação ao Caso I, exceto que com o Carregamento II. O Carregamento II corresponde a uma carga $Z_{\text{Load}} = 69 + j \cdot 20 \Omega$, que possui $\angle Z_{\text{Load}} \approx 16,2^\circ$. Foram simuladas faltas sob as mesmas condições de local, tipo e resistência, com o intuito de verificar numericamente a conclusão de que neste caso todas as soluções para o caso monofásico da EGFT serão reais e distintas.

A Figura 4.6 ilustra as diferenças angulares $\angle N_a - \angle I_{F_a}$, $\angle M_a - \angle I_{F_a}$ e $\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}$. Comparando esta com a Figura 4.4 nota-se que a única relação que se diferencia entre os dois casos é a relação $\angle N_a - \angle I_{F_a}$. Esta conclusão está de acordo com a análise realizada na Seção 4.2, visto que as diferenças $\angle M_a - \angle I_{F_a}$ e $\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}$ independem de ϕ , o ângulo da carga, único parâmetro modificado entre os dois casos analisados. Em contrapartida $\angle N_a - \angle I_{F_a}$ depende diretamente de ϕ , que no segundo caso diminuiu, aumentando o limite mínimo teórico da diferença $\angle N_a - \angle I_{F_a}$, mas mantendo o valor inicial ($R_F = 0$) constante. Neste caso, como $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi$, tem-se que $\angle N_a - \angle I_{F_a}$ será sempre maior do que zero, como ilustrado na Figura 4.6(a)²⁶.

A relação entre α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ com a resistência de falta para este segundo caso está ilustrada da Figura 4.7. Verifica-se que a teoria desenvolvida anteriormente mostrou-se válida, porquanto α_1^2 manteve-se sempre numericamente maior do que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, não havendo uma aproximação significativa entre estes dois termos.

4.3.3 Caso III – Faltas Monofásicas Longínquas ao Terminal Local

O terceiro caso analisado refere-se a faltas realizadas ao final do alimentador descrito no Apêndice B.1. Este caso foi analisado tendo em vista a complementação das conclusões obtidas na Seção 4.2.5, e pode ser comparado com os resultados numéricos do Caso I, onde faltas similares foram aplicadas no início do alimentador.

Segundo a análise realizada na Seção 4.2.5, faltas mais longínquas ao terminal local

²⁶Quando $R_F = 3200 \Omega$, $\angle N_a - \angle I_{F_a} = 3,3^\circ$.

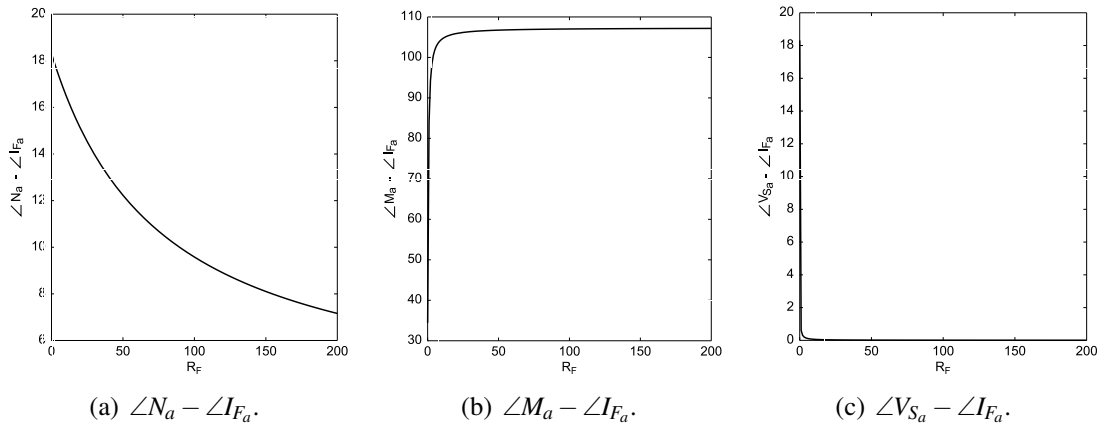


Figura 4.6: Variação das diferenças angulares presentes na EGFT em função da resistência de falta – Caso II.

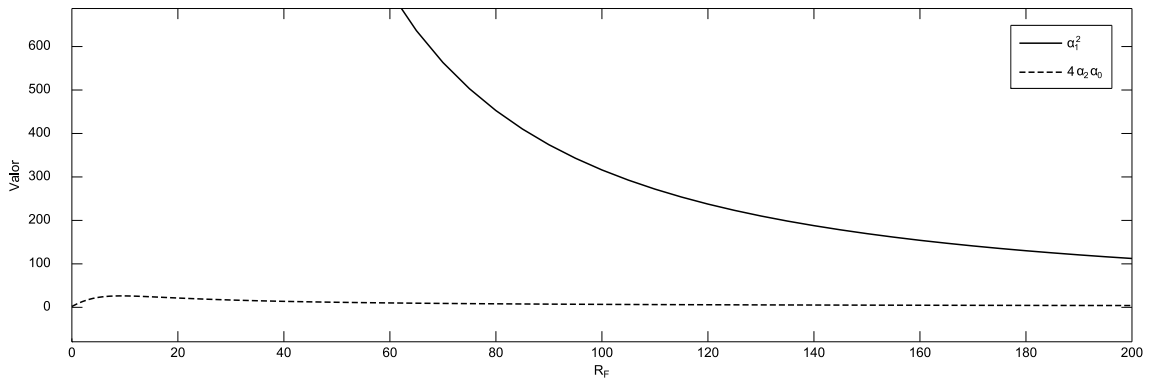
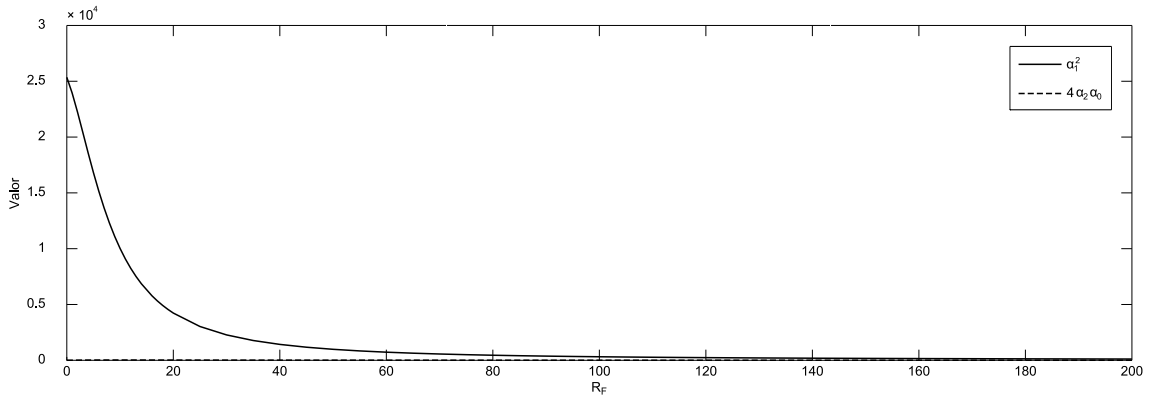


Figura 4.7: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso II.

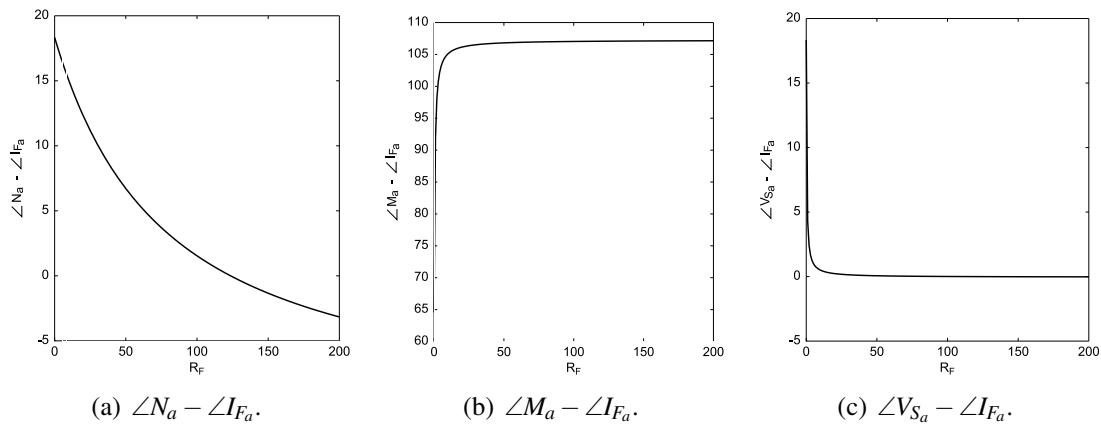


Figura 4.8: Variação das diferenças angulares presentes na EGFT em função da resistência de falta – Caso III.

tendem a modificar a faixa de R_F para as quais a EGFT resulta em raízes complexas conjugadas, afetando especialmente a diferença angular dada por $\angle V_{S_k} - \angle I_{F_k}$. A Figura 4.8 ilustra as diferenças angulares resultantes das faltas realizadas. Comparando-se as mesmas com as diferenças angulares do Caso I, ilustradas na Figura 4.4, verifica-se que a maior diferença realmente ocorreu entre as Figuras 4.4(c) e 4.8(c), que apresentam $\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}$. Note que esta diferença é engendrada pelo aumento na impedância total do trecho de linha conectando o terminal local à falta, como descrito em (4.24).

Esta alteração em $\angle V_{S_a} - \angle I_{F_a}$, que contribuiu para que o mesmo decaísse mais suavemente, ocasionou um aumento no pico inicial do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Como o decaimento deste pico foi transladado, ele atingiu a curva de α_1^2 para valores menores de R_F , como ilustrado na Figura 4.9.

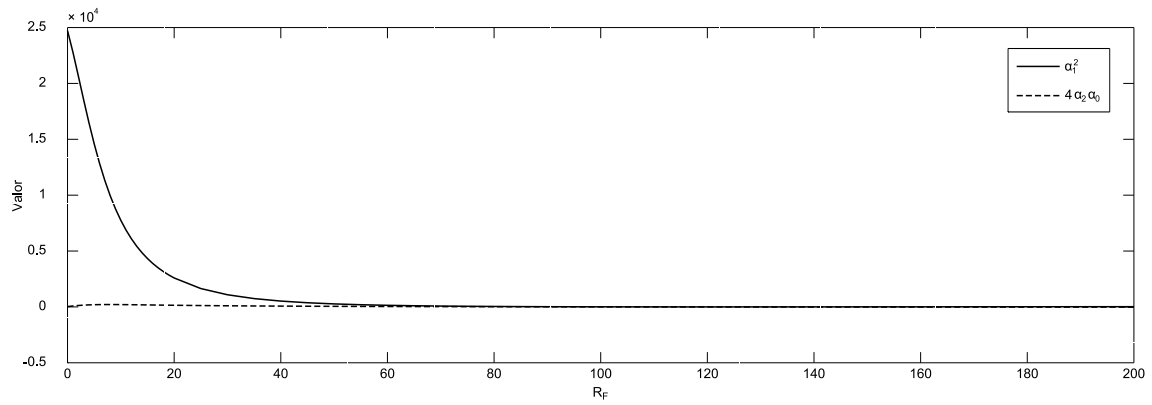
Comparando os valores máximos de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ para os dois gráficos, verifica-se que no Caso I o pico está aproximadamente em $R_F = 10 \Omega$ e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 = 25$, enquanto no Caso III, o pico está aproximadamente em $R_F = 10 \Omega$ e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 = 210$, mostrando o aumento substancial deste termo. Apesar disto, $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ ainda manteve-se bem abaixo do valor assumido por α_1^2 , que manteve-se praticamente o mesmo nos dois casos.

Na Figura 4.9(c) fica ainda evidente que α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ se igualam em um valor de R_F entre 100 e 105 Ω , ao passo que quando as faltas foram aplicadas no início do alimentador, estes termos se igualaram para $R_F \approx 120 \Omega$, como ilustrado na Figura 4.5(c).

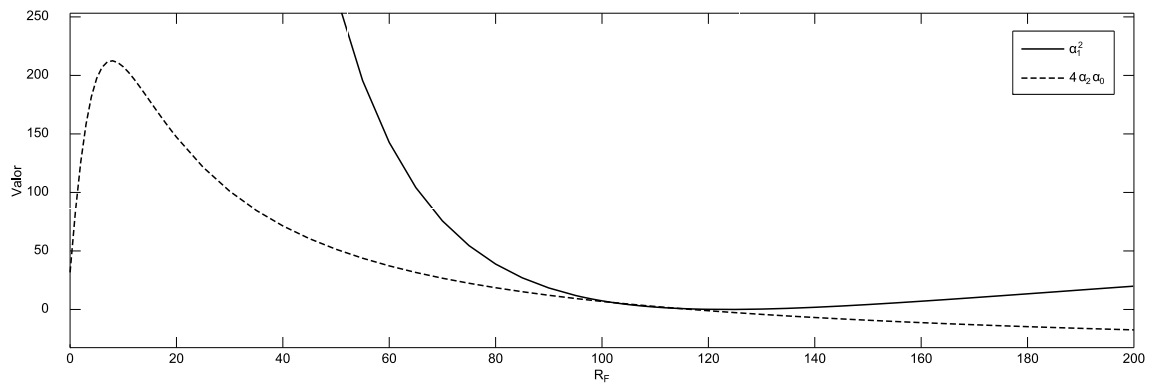
4.3.4 Caso IV – Faltas Bifásicas Próximas ao Terminal Local

O quarto caso analisado corresponde a faltas bifásicas à terra envolvendo as fases *A* e *B* (AB-g), simuladas no início do alimentador descrito no Apêndice B.1, de forma a elucidar as conclusões do caso polifásico e comparar com o equivalente monofásico, analisado no Caso I. Para tanto, considere a Figura 4.10, que ilustra os termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ para este caso. A conclusão obtida na Seção 4.2.6, de que os valores destes coeficientes seriam muito maiores do que no caso monofásico da EGFT, foi verificada. Ao compararmos as Figuras 4.10(a) e 4.5(a), verifica-se que o termo α_1^2 aumentou quase 10^7 vezes, ao passo que as Figuras 4.10(b) e 4.5(b) revelam um aumento de quase 10^7 também para o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$.

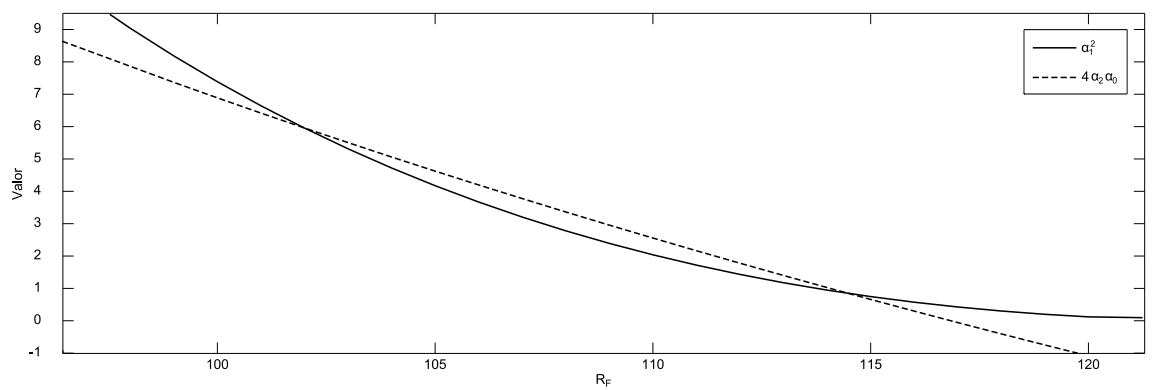
Observa-se também que o pico referente ao termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ ocorreu para um valor menor de R_F em comparação com o caso monofásico. Esta modificação pode ser explicada pela dupla diminuição dos termos senóides presentes no somatório de α_0 . Como



(a) Visão geral.

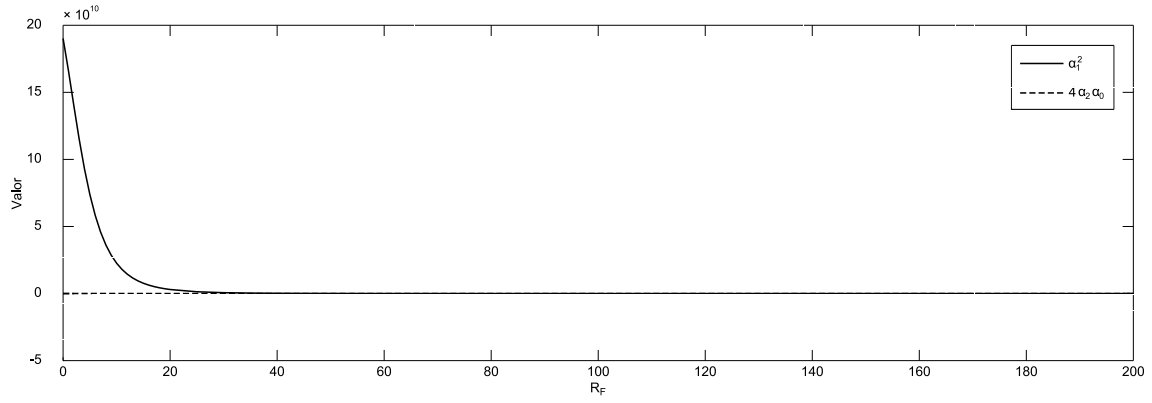


(b) Vista ampliada I.

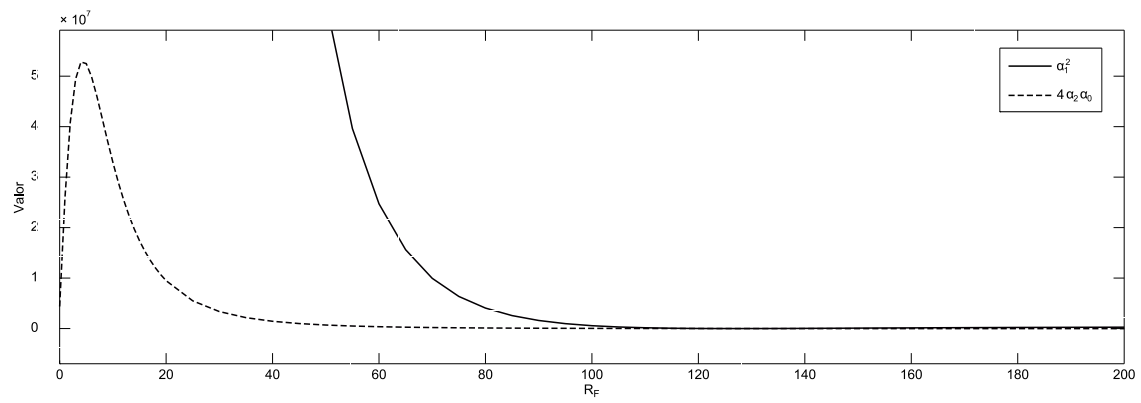


(c) Vista ampliada II.

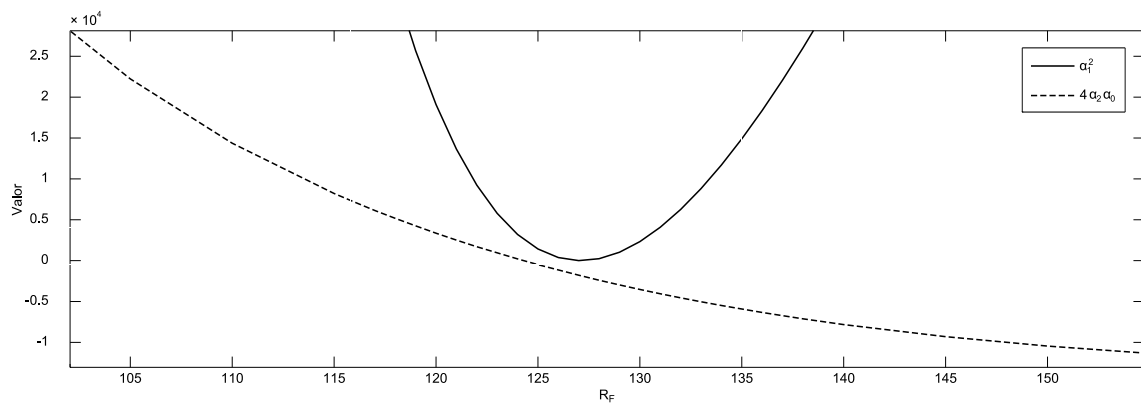
Figura 4.9: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso III.



(a) Visão geral.



(b) Vista ampliada I.



(c) Vista ampliada II.

Figura 4.10: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso IV.

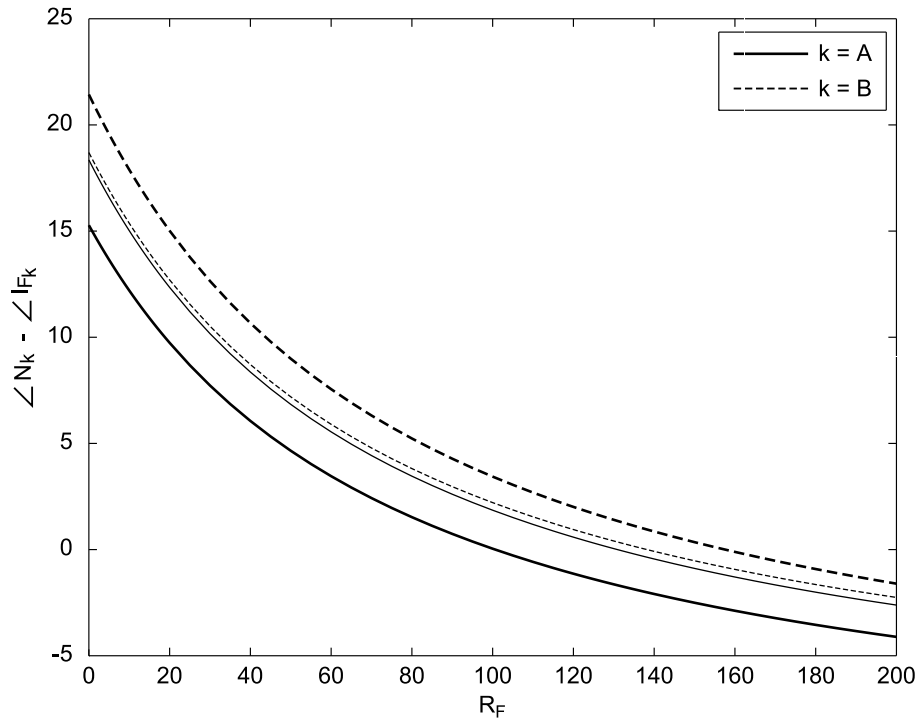


Figura 4.11: Variação de $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em função da resistência de falta – Caso IV.

esta diminuição domina o termo α_0 , a tendência é que o mesmo decaia mais rapidamente com a diminuição de dois destes termos, ou seja, o pico máximo irá ocorrer para valores menores de R_F . Este declínio mais acentuado de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, contribui para que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ e α_1^2 passem a não se cruzar mais, ou seja, para que as raízes passem a possuir uma natureza real para todos os valores de resistência de falta, naquele local, como ilustrado na Figura 4.10(c).

Outra questão importante refere-se às diferenças angulares $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em cada uma das fases faltosas. Como discutido na Seção 4.2.6, no caso polifásico estas diferenças angulares serão afetadas por um termo que se soma (ou subtrai, se o mesmo for negativo) na fase de N_k , contribuindo também para que os termos $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ e α_1^2 se encontrem em valores diferentes de R_F , ou passem a não se encontrar mais, como no caso analisado. As diferenças angulares $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ das fases faltosas A e B (representadas por k) estão ilustradas na Figura 4.11. Nesta figura, as linhas mais finas representam $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ quando N_k é aproximado pelos termos próprios da matriz \mathbf{Z}_{Line} .

Note que a aproximação dos termos está coerente com o resultado obtido para o Caso I, onde inicialmente tem-se um ângulo aproximado de 18° para as duas fases. Com a corrente de falta da mesma ordem de grandeza nas duas fases, o termo mútuo entre as fases A e B passa a ser significativo para o cálculo dos parâmetros. Como resultado, a fase A apresentou um decréscimo na diferença $\angle N_a - \angle I_{F_a}$, ao passo que a fase B apresentou um acréscimo na diferença $\angle N_b - \angle I_{F_b}$. A taxa de decaimento, no entanto, manteve-se praticamente constante.

O fato de $\angle N_a - \angle I_{F_a}$ ter sofrido uma redução enquanto $\angle N_b - \angle I_{F_b}$ sofreu um aumento no seu valor pode ser entendida através da análise fasorial dos termos N_a e N_b . Os fasores resultantes N_a e N_b tendem a se aproximar com o efeito do acoplamento. Isto significa que um deles aumenta ao passo que o outro diminui seu ângulo, como verificado na Figura 4.11.

4.3.5 Caso V – Faltas Trifásicas Próximas ao Terminal Local

O quinto e último caso analisado é o caso de faltas trifásicas à terra simuladas no início do mesmo alimentador analisado nos outros casos. Assim, pode-se comparar as análises realizadas anteriormente também com o caso mais geral onde todas as fases do sistema estão submetidas a faltas. Para tanto, considere a Figura 4.12, que ilustra o termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ para este caso. Verifica-se novamente neste caso um aumento substancial dos valores destes coeficientes, em comparação com o caso monofásico. Ao compararmos as Figuras 4.12(a) e 4.5(a), verifica-se que o termo α_1^2 aumentou quase 10^7 vezes, ao passo que as Figuras 4.12(b) e 4.5(b) revelam um aumento de quase 10^7 também para o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Em comparação com o caso de faltas bifásicas, não foi verificado um aumento significativo, porquanto os valores máximos de ambas variáveis possuem a mesma grandeza.

Observa-se também que o pico referente ao termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ ocorreu para um valor menor de R_F , em comparação com o caso monofásico, ao passo que com um valor próximo de R_F em comparação com o caso bifásico. A origem desta modificação é a mesma que do Caso IV, analisado anteriormente. Novamente esta modificação contribuiu para que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ e α_1^2 passassem a não se cruzar mais, ou seja, para que as raízes passassem a possuir uma natureza real para todos os valores de resistência de falta, naquele local, como ilustrado na Figura 4.12(c).

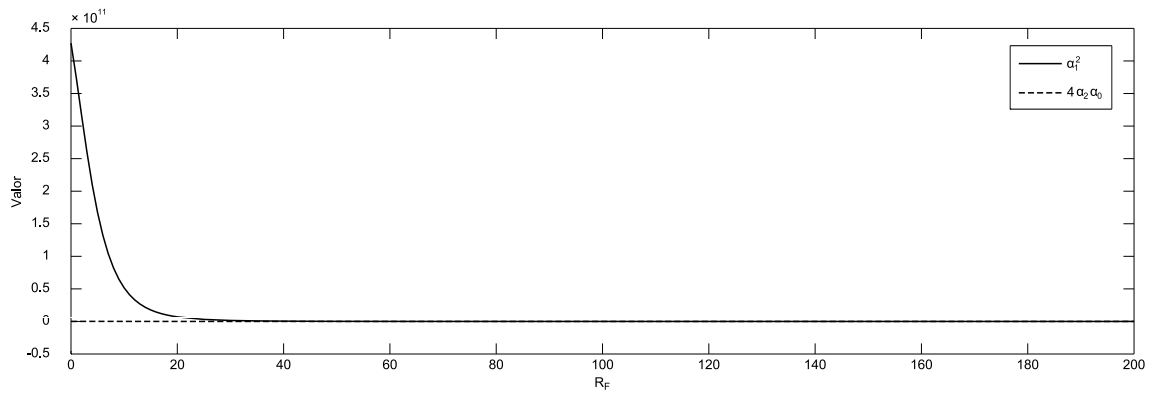
Ainda referente à Figura 4.12(c), verifica-se que tanto em comparação com o Caso IV (faltas bifásicas) como em comparação com o Caso I (faltas monofásicas) o valor mínimo de α_1^2 passa a ocorrer em um valor diferente de R_F . Isto ocorre em função dos decaimentos diferentes dos termos $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em cada uma das fases. No caso monofásico, a Figura 4.5(c) mostra que este mínimo ocorreu aproximadamente com $R_F = 124 \Omega$, enquanto a Figura 4.10(c) mostra que este mínimo ocorreu aproximadamente com $R_F = 127 \Omega$ no caso bifásico. No caso trifásico este mínimo ocorreu com $R_F \approx 138 \Omega$.

Esta modificação no valor de R_F para o qual o mínimo de α_1^2 ocorre é explicada pela alteração nos termos $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em cada uma das fases faltosas, correspondente ao acoplamento entre as fases juntamente com a corrente elevada em todas as fases do sistema. A variação destes valores para as diferentes fases está ilustrada na Figura 4.13. Em comparação com o resultado obtido para as faltas bifásicas, ilustrado na Figura 4.11, verifica-se uma variação mais moderada da diferença $\angle N_k - \angle I_{F_k}$ em cada uma das fases. Novamente, isto ocorre em função da álgebra fasorial envolvida neste termos. No caso trifásico, os termos mútuos tendem a se somar resultando em um vetor de mesma direção mas sentido oposto ao vetor que representa o fasor da fase em questão. E esta análise independe da fase analisada, pois o sistema normalmente opera com as fases defasadas de aproximadamente 120° . Como o sistema possui o neutro solidamente aterrado, esta diferença angular não é significativamente modificada quando da ocorrência de faltas à terra.

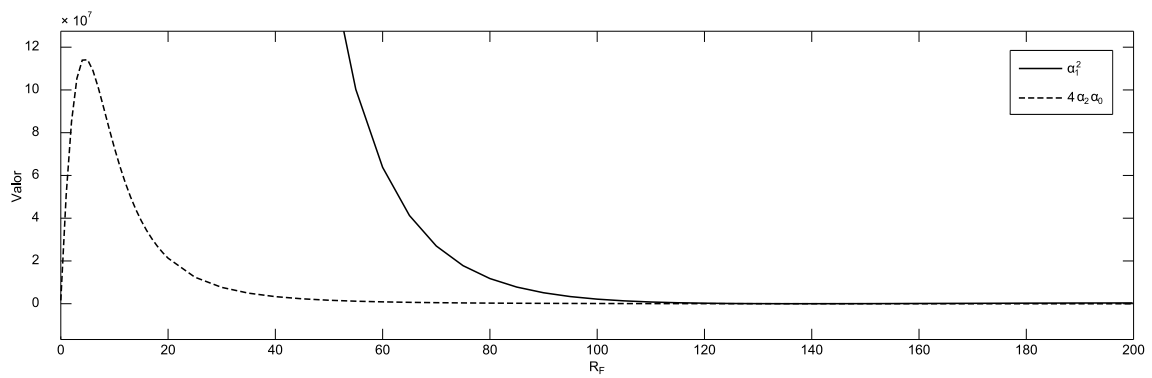
4.4 Determinação da Raiz Referente ao Local da Falta

A análise das raízes da EGFT foi realizada buscando-se um entendimento mais profundo desta equação, de forma que fosse possível determinar qual das duas soluções da EGFT é a solução correspondente ao caso real da falta. Nesta seção, uma forma de determinar qual é a raiz correta é proposta, fundamentando-se nas conclusões estabelecidas nas seções anteriores do presente capítulo.

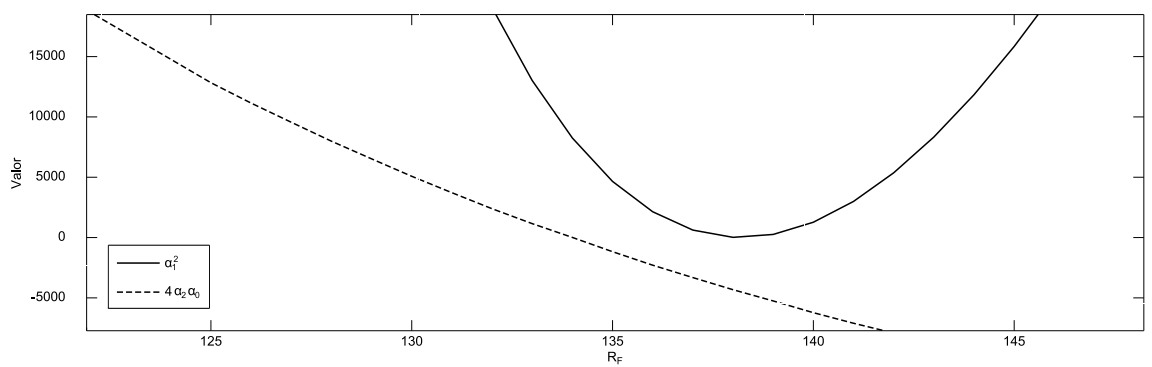
Inicialmente, verifica-se que tanto na análise física como na análise numérica das raí-



(a) Visão geral.



(b) Vista ampliada I.



(c) Vista ampliada II.

Figura 4.12: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso V.

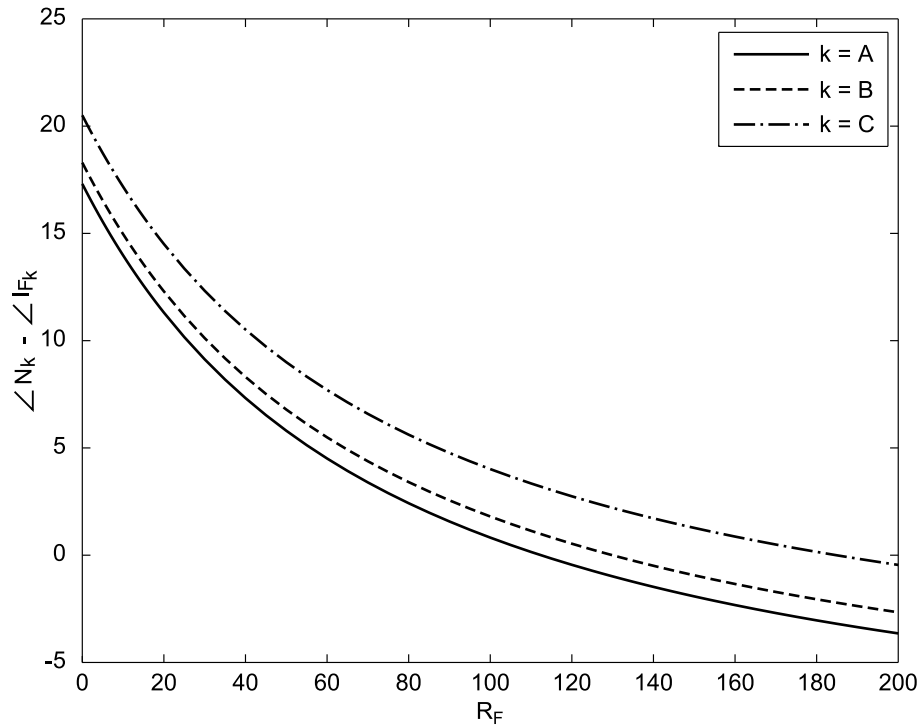


Figura 4.13: Variação de $\angle N_k - \angle I_{Fk}$ em função da resistência de falta – Caso V.

zes foi constatado que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ mantém-se praticamente constante para variações da resistência de falta, ao passo que o termo α_1^2 varia de forma significativa com a variação da resistência de falta, seja para o caso monofásico ou para o caso polifásico²⁷. Para a determinação da raiz correta, considere que as raízes de um polinômio de segunda ordem em x são dadas por

$$x = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2} . \quad (4.54)$$

Quando a resistência de falta é modificada, mas o local da falta mantém-se constante, pelo menos uma das raízes dadas por (4.54) deve se manter constante, visto que a solução da EGFT deve ser mantida constante. Entretanto, no decorrer deste capítulo verificou-se que a variação da resistência de falta modifica significativamente tanto a natureza das raízes como os coeficientes do polinômio que corresponde à EGFT, logo, as raízes da EGFT serão diferentes para diferentes valores de R_F , exceto a raiz que corresponde ao local da falta, pois neste caso o local da falta não foi alterado, somente a sua resistência.

Então se, como constatado, o termo que mais variar com a variação de R_F for o termo α_1^2 (ou seja, se o termo α_1^2 for o mais sensível à variações da resistência de falta), pode-se considerar a raiz correta como sendo a raiz que menos varia com a variação do termo α_1^2 , que é dada pela variação de α_1 . Se, para fins de análise, também considerarmos que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ é muito menor do que α_1^2 (que é o que realmente ocorre em faltas com baixa resistência), pode-se reescrever (4.54) para

$$x \approx \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2}}{2 \cdot \alpha_2} = \frac{-\alpha_1 \pm |\alpha_1|}{2 \cdot \alpha_2} . \quad (4.55)$$

²⁷Na verdade o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ varia substancialmente, mas não em relação à variação de α_1^2 .

Para anular a variação de α_1 , basta anular o numerador de (4.55):

$$-\alpha_1 \pm |\alpha_1| = 0. \quad (4.56)$$

Para que haja uma compensação de α_1 , deve-se considerar qual o valor que o mesmo assume, se positivo ou negativo. Segundo (4.56), no caso de o mesmo ser positivo a raiz que representa o local correto da falta é a que corresponde à $-|\alpha_1| + |\alpha_1| = 0$, ao passo que se α_1 é negativo, a raiz correta é a em que $+|\alpha_1| - |\alpha_1| = 0$. Retomando (4.54), o local da falta, x , é dado por:

$$x = \begin{cases} \frac{-\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 > 0 \\ \frac{-\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 < 0 \end{cases} \quad (4.57)$$

já que desta forma há uma compensação dos termos α_1 e α_1^2 .

Deve-se também prever a possibilidade de soluções complexas, dado que erros de medição, modelagem e estimação da corrente de falta podem ocorrer. Em relação a estes erros, espera-se que os mesmos sejam limitados, de forma que as raízes complexas sejam soluções somente para alguns valores de resistência de falta, e que a parte imaginária das soluções sejam pequena em relação à parte real. Sendo assim, quando raízes complexas conjugadas são as soluções da EGFT o local da falta é determinado como o valor absoluto da raiz complexa, de forma a considerar uma certa parte da variável complexa da solução.

4.5 Conclusões

A análise da Equação Geral de Localização de Faltas à Terra, a EGFT, possibilitou um profundo conhecimento da resposta da mesma perante a diferentes condições de faltas, tanto monofásicas como polifásicas. Esta análise, realizada tanto no contexto matemático como físico e também numérico, resultou em uma forma simples de determinar qual das soluções da EGFT representa corretamente o local da falta. Verificou-se claramente a alta influência da resistência de falta na natureza das soluções da EGFT, bem como aparece em um contexto determinante para a determinação da raiz correta desta. Além disso, pode-se verificar que as simplificações realizadas para fins de análise apresentaram uma boa fotografia da resposta do sistema em um caso real, mostrando a validade das considerações utilizadas.

A análise realizada neste capítulo apresentou conclusões que podem ser sumarizadas em:

- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} > \phi_k$ em todas as fases faltosas k , as raízes da EGFT serão reais e distintas, independente do valor de R_{F_k} ;
- Quando $\angle Z_{\text{Line}_{kk}} < \phi_k$ para ao menos uma das fases faltosas k , as raízes poderão ser complexas conjugadas para alguns valores e combinações de resistências de falta;
- No caso monofásico, a faixa de valores de R_F para os quais a EGFT assume soluções complexas (se ela possuir) pode ser estimada por (A.8);
- No caso polifásico, a faixa de valores de R_{F_k} para as quais a EGFT possui soluções complexas (se ela possuir) estará entre os valores máximos e mínimos em que isto acontece para faltas monofásicas;

- A raiz que fisicamente representa a solução fisicamente correta da EGFT é dada por (4.57);

5 ANÁLISE DA EQUAÇÃO GERAL DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS ENTRE FASES

Na Seção 3.1 foram encontradas expressões na tentativa de estimar o local de ocorrência de uma falta a partir de medidas trifásicas de tensão e corrente no terminal local. As equações relativas ao caso de faltas à terra foram analisada no Capítulo 4. No presente capítulo, será analisado o caso das faltas entre fases, visando o mesmo objetivo: a determinação da solução fisicamente correta.

5.1 Análise Matemática das Raízes

A equação (3.72) é a equação de localização de faltas entre fases (EGFF), e está reescrita a seguir:

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot \Im \{ (M_m - M_n) \cdot I_{F_m}^* \} - x \cdot \Im \{ (N_m - N_n) \cdot I_{F_m}^* \} + \Im \{ (V_{S_m} - V_{S_n}) \cdot I_{F_m}^* \} = 0 \quad (5.1)$$

onde m e n representam as fases envolvidas na falta.

A substituição de (4.3) em (5.1) resulta em (5.2):

$$\begin{aligned} x^2 \cdot 0.5 \cdot | (M_m - M_n) | | I_{F_m} | \operatorname{sen} (\angle (M_m - M_n) - \angle I_{F_m}) \\ - x \cdot | (N_m - N_n) | | I_{F_m} | \operatorname{sen} (\angle (N_m - N_n) - \angle I_{F_m}) \\ + | (V_{S_m} - V_{S_n}) | | I_{F_m} | \operatorname{sen} (\angle (V_{S_m} - V_{S_n}) - \angle I_{F_m}) = 0. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Observa-se que em (5.2) o termo correspondente ao módulo do fasor que representa a corrente de falta, I_{F_m} , aparece em todos os coeficientes do polinômio. Dividindo (5.2) por $| I_{F_m} |$ resulta em

$$\begin{aligned} x^2 \cdot 0.5 \cdot | M_{mn} | \cdot \operatorname{sen} (\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}) \\ - x \cdot | N_{mn} | \cdot \operatorname{sen} (\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}) \\ + | V_{S_{mn}} | \cdot \operatorname{sen} (\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}) = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

onde $M_{mn} = M_m - M_n$, $N_{mn} = N_m - N_n$ e $V_{S_{mn}} = V_{S_m} - V_{S_n}$.

Analisando (5.3) é possível verificar que assim como no caso das faltas monofásicas à terra, somente o ângulo da corrente de falta é relevante para a análise das faltas entre fases, sendo o seu módulo, irrelevante. Esta influência também independe do tipo do sistema, seja ele equilibrado (cargas e geometria das linhas) ou não.

Assim como no caso da EGFT, as soluções da EGFF, dada na sua forma mais simplificada por (5.3), podem assumir naturezas reais ou complexas, de acordo com as condições

da falta e da resposta do sistema perante a mesma. Neste caso, porém, os termos α_2 , α_1 e α_0 são dados respectivamente por:

$$\alpha_2 = 0.5 \cdot |M_{mn}| \cdot \text{sen}(\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}) \quad (5.4)$$

$$\alpha_1 = -|N_{mn}| \cdot \text{sen}(\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}) \quad (5.5)$$

$$\alpha_0 = |V_{S_{mn}}| \cdot \text{sen}(\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}) . \quad (5.6)$$

Além disso, o discriminante de uma equação polinomial de segunda ordem, dado por

$$\beta = \alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 , \quad (5.7)$$

é que define a natureza das soluções da mesma. As possíveis naturezas das soluções são descritas a seguir, utilizando conceitos referentes a polinômios de segunda ordem similares aos definidos no Capítulo 4.

5.1.1 Raízes Complexas Conjugadas

Para o caso de raízes complexas conjugadas, tem-se que o discriminante da EGFF de deve ser menor do que zero, ou seja:

$$|N_{mn}|^2 \cdot \text{sen}^2(\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}) < 2 \cdot |M_{mn}| |V_{S_{mn}}| \cdot \text{sen}(\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}) \cdot \text{sen}(\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}) \quad (5.8)$$

Assim como no caso da EGFT, o termo à esquerda de (5.8) é sempre positivo, visto que representa o quadrado de um número real. Sendo assim, o termo à direita de (5.8) também deverá ser sempre positivo para que as soluções da equação sejam um par de raízes complexas conjugadas (condição necessária, mas não suficiente). Isto só acontece quando $\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}$ e $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$ representam ângulos que estão ambos entre 0° e 180° ($\text{sen}(\cdot) > 0$) ou ambos entre 180° e 360° ($\text{sen}(\cdot) < 0$).

5.1.2 Raízes Reais e Iguais

Supondo que as soluções da EGFF sejam um par de raízes reais e iguais ($\beta = 0$), chega-se à conclusão que

$$|N_{mn}|^2 \cdot \text{sen}^2(\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}) = 2 \cdot |M_{mn}| |V_{S_{mn}}| \cdot \text{sen}(\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}) \cdot \text{sen}(\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}) \quad (5.9)$$

ou seja:

$$x = -\frac{\alpha_1}{2 \cdot \alpha_2} = \frac{|N_{mn}|}{|M_{mn}|} \cdot \frac{\text{sen}(\angle N_{mn} - \angle I_{F_m})}{\text{sen}(\angle M_{mn} - \angle I_{F_m})} . \quad (5.10)$$

No caso de soluções reais e iguais, as mesmas conclusões relativas ao ângulo de M_{mn} , N_{mn} e I_{F_m} , obtidas para o caso de raízes complexas conjugadas, também se aplicam neste caso. Isto porque o termo a esquerda em (5.9) sempre será positivo. Sendo assim, para que a condição dada por (5.9) possa ser satisfeita, então o termo a direita em (5.9) também deve ser positivo. Isto só acontece quando $\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}$ e $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$ representam ângulos que estão ambos entre 0° e 180° ($\text{sen}(\cdot) > 0$) ou ambos entre 180° e 360° ($\text{sen}(\cdot) < 0$).

5.1.3 Raízes Reais e Distintas

Supondo que as soluções de x para (5.3) sejam reais e diferentes entre si (positivas ou não), tem-se que o termo β deve ser maior do que zero, ou seja:

$$|N_{mn}|^2 \cdot \text{sen}^2(\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}) > 2 \cdot |M_{mn}| |V_{S_{mn}}| \cdot \text{sen}(\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}) \cdot \text{sen}(\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}) . \quad (5.11)$$

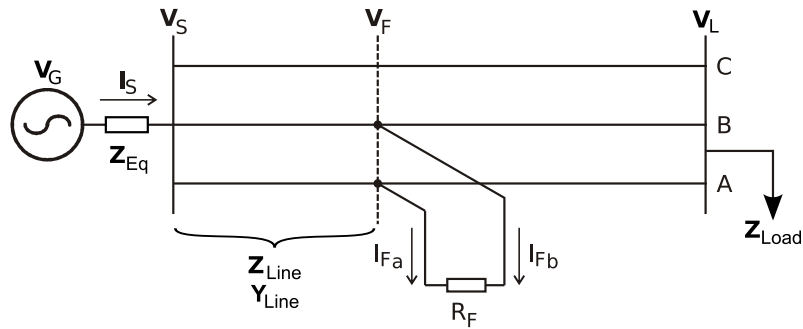


Figura 5.1: Diagrama de um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica sujeito à uma Falta Fase-Fase.

Neste caso, uma condição suficiente, mas não necessária, para a existência de raízes reais e distintas, é a de que as diferenças angulares $\angle M_{mn} - \angle I_{F_m}$ e $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$ estejam uma entre 0° e 180° ($\text{sen}(\cdot) > 0$) e outra entre 180° e 360° ($\text{sen}(\cdot) < 0$). Sob estas circunstâncias, o lado direito de (5.11) é negativo. Como o lado esquerdo da mesma equação é sempre positivo, a condição imposta em (5.11) é sempre satisfeita neste caso.

5.2 Análise Física das Raízes

Até o momento, a EGFF, apresentada em (5.3), foi analisada somente do ponto de vista matemático. No entanto, esta expressão, assim como no caso da EGFT, é função das variáveis físicas do sistema, cujo entendimento esclarece as possíveis respostas do sistema perante a diferentes casos de faltas entre fases. O objetivo deste estudo é entender como as variáveis do termo β se comportam frente a diferentes faltas, visto que este termo é que engendra a natureza das raízes, ou seja, da própria solução da distância da falta.

Inicialmente considere o caso matematicamente analisado das soluções complexas conjugadas da EGFF. Assim como observado no caso da EGFT, do ponto de vista físico do problema este não é um caso possível de solução para a EGFF, já que o procedimento de obtenção de ambas equações são similares. Assim, os erros de medição, de determinação dos parâmetros da linha, e de estimação da corrente de falta também podem resultar em soluções complexas para a EGFF, como será discutido nas análises subseqüentes.

A análise física das soluções da EGFF em relação à resposta do sistema em falta segue as mesmas considerações realizadas para a análise física EGFT: faltas ocorrendo próximas ao terminal local, S , em um sistema como o ilustrado na Figura 5.1. A análise também será realizada de forma análoga, dividindo o estudo em quatro casos distintos: faltas com resistência (R_F) aproximadamente zero, faltas com resistência muito menor do que o carregamento do sistema, faltas com resistência aproximadamente igual a do carregamento do sistema, e faltas com resistência muito maior do que o carregamento do sistema. A questão da variação do local da falta e seus efeitos nas raízes da EGFF são tratados ao final desta seção.

5.2.1 Condição I – $R_F \approx 0$

Quando a resistência de falta, R_F , é aproximadamente nula, as tensões das fases faltosas são aproximadamente iguais, tanto em módulo como em fase, ou seja, $|V_{S_m} - V_{S_n}| \approx 0$. Ao mesmo tempo, a corrente de falta apresenta-se preponderante nas correntes destas fases, o que significa que a corrente da carga pode ser desprezada. Assim, as correntes das

fases faltosas medidas a partir da subestação serão aproximadamente iguais em módulo, mas estarão defasadas de 180° , ou seja, estarão em “contra-fase”.

O termo α_2 , descrito em (5.4), depende de $|M_{mn}|$, que para o caso de uma falta entre as fases a e b nestas condições pode ser expandido em

$$\begin{aligned} M_a - M_b &= (ZY_{11} \cdot V_{S_a} + ZY_{12} \cdot V_{S_b} + ZY_{13} \cdot V_{S_c}) - (ZY_{21} \cdot V_{S_a} + ZY_{22} \cdot V_{S_b} + ZY_{23} \cdot V_{S_c}) \\ &= V_{S_a} \cdot (ZY_{11} - ZY_{21}) + V_{S_b} \cdot (ZY_{12} - ZY_{22}) + V_{S_c} \cdot (ZY_{13} - ZY_{23}) . \end{aligned} \quad (5.12)$$

Considerando que a geometria da linha resulta em $Z_{aa} \approx Z_{bb} \approx Z_{cc}$ e $Z_{ab} \approx Z_{bc} \approx Z_{ac}$, têm-se de acordo com (3.17) que:

$$ZY_{11} - ZY_{21} = Y_{aa} \cdot (Z_{aa} - Z_{ab}) + Y_{ab} \cdot (Z_{ab} - Z_{bb}) + \underbrace{Y_{ac} \cdot (Z_{ac} - Z_{bc})}_{\approx 0} \quad (5.13)$$

$$ZY_{12} - ZY_{22} = Y_{ab} \cdot (Z_{aa} - Z_{ab}) + Y_{bb} \cdot (Z_{ab} - Z_{bb}) + \underbrace{Y_{bc} \cdot (Z_{ac} - Z_{bc})}_{\approx 0} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} ZY_{13} - ZY_{23} &= Y_{ac} \cdot (Z_{aa} - Z_{ab}) + Y_{bc} \cdot (Z_{ab} - Z_{bb}) + \underbrace{Y_{cc} \cdot (Z_{ac} - Z_{bc})}_{\approx 0} \\ &= (Y_{ac} \cdot Z_{aa} - Y_{bc} \cdot Z_{bb}) + (Y_{bc} \cdot Z_{ab} - Y_{ac} \cdot Z_{ab}) \\ &\approx 0 . \end{aligned} \quad (5.15)$$

A substituição de (5.13) a (5.15) em (5.12) resulta em

$$M_a - M_b \approx V_{S_a} \cdot (ZY_{11} - ZY_{21} + ZY_{12} - ZY_{22}) \quad (5.16)$$

já que $V_{S_a} \approx V_{S_b}$. Expandindo a impedância de (5.16) e considerando que $Z_{aa} \approx Z_{bb}$ e $Y_{aa} \approx Y_{bb}$ obtém-se (5.17):

$$\begin{aligned} ZY_{11} - ZY_{21} + ZY_{12} - ZY_{22} &= Y_{aa} \cdot (Z_{aa} - Z_{ab}) + Y_{ab} \cdot (Z_{ab} - Z_{bb}) \\ &\quad + Y_{ab} \cdot (Z_{aa} - Z_{ab}) + Y_{bb} \cdot (Z_{ab} - Z_{bb}) \\ &= Y_{aa} \cdot (Z_{aa} - Z_{ab}) + Y_{ab} \cdot (Z_{aa} - Z_{bb}) + Y_{bb} \cdot (Z_{ab} - Z_{bb}) \\ &\approx Y_{aa} \cdot (Z_{aa} - Z_{bb}) + Y_{ab} \cdot (Z_{aa} - Z_{bb}) \\ &\approx 0 . \end{aligned} \quad (5.17)$$

De acordo com (5.17) a diferença $M_a - M_b$, e conseqüentemente também α_2 , será aproximadamente nula para as condições de faltas estudadas¹, independentemente do valor assumido pelas tensões e correntes de falta, desde que as tensões das fases faltosas medidas na subestação sejam próximas entre si. Conseqüentemente, todo o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ também será próximo de zero. Isto acontece não somente para faltas entre as fases a e b , mas para faltas entre quaisquer pares de fases. A análise é análoga e será suprimida do texto.

Em contrapartida, o termo α_1^2 depende de relações de módulo e fase da diferença $N_m - N_n$. A diferença entre estas variáveis para o caso de uma falta envolvendo as fases m e n é dada por:

$$N_m - N_n = I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn}) + I_{S_n} \cdot (Z_{mn} - Z_{nn}) + \underbrace{I_{S_h} \cdot (Z_{mh} - Z_{nh})}_{\approx 0} \quad (5.18)$$

¹Note que no caso de linhas transpostas este resultado não representa uma aproximação, mas sim uma igualdade, dado que $Z_{aa} = Z_{bb}$ e $Y_{aa} = Y_{bb}$. Neste caso, $M_a - M_b$ resulta em um valor efetivamente nulo.

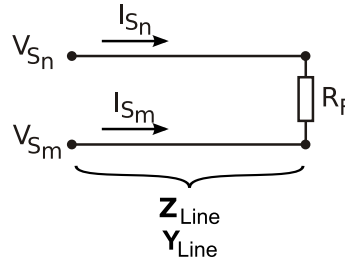


Figura 5.2: Circuito equivalente de uma Falta na Condição de $R_F \ll |Z_{Load}|$.

considerando $Z_{mh} \approx Z_{nh}$ e sendo h a fase não faltosa do sistema. Lembrando que as correntes nas fases faltosas estarão praticamente em contra-fase e com o mesmo módulo, tem-se que:

$$\begin{aligned} N_m - N_n &\approx I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn} - Z_{mn} + Z_{nn}) \\ &\approx 2 \cdot I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn}), \end{aligned} \quad (5.19)$$

onde foi considerado que $Z_{mm} \approx Z_{nn}$.

Nas condições de falta analisadas a corrente I_{S_m} será elevada, pois a falta possui resistência próxima de zero. Sendo assim, o módulo de $N_m - N_n$ pode ser matematicamente descrito por

$$|N_m - N_n| \approx 2 \cdot |I_{S_m}| \cdot |Z_{mm} - Z_{mn}|, \quad (5.20)$$

ou seja, $|N_m - N_n| \neq 0$. Já a diferença angular $\angle(N_m - N_n)$ é dada por:

$$\angle(N_m - N_n) \approx \angle I_{S_m} + \angle(Z_{mm} - Z_{mn}). \quad (5.21)$$

A diferença angular que aparece em α_1 pode então ser aproximada para:

$$\begin{aligned} \angle(N_m - N_n) - \angle I_{F_m} &\approx \angle I_{S_m} + \angle(Z_{mm} - Z_{mn}) - \angle I_{F_m} \\ &\approx \angle(Z_{mm} - Z_{mn}), \end{aligned} \quad (5.22)$$

onde foi considerado que a fase da corrente medida no terminal local é aproximadamente igual à fase da corrente de falta.

Analisando (5.20) e (5.22) verifica-se que o termo α_1 será diferente de zero. Isto porque a diferença $Z_{mm} - Z_{mn}$ só resultará em uma diferença angular nula se a parte imaginária das impedâncias Z_{mm} e Z_{mn} se anular. Como a impedância própria é significativamente maior do que a impedância mútua da linha, esta condição dificilmente será observada.

Considerando a análise realizada nesta seção, verifica-se que nas condições de falta analisadas não haverá raízes complexas conjugadas mas sim reais e distintas, dado que o termo α_1^2 assumirá valores muito superiores aos do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, visto que o último será sempre próximo de zero.

5.2.2 Condição II – $R_F \ll |Z_{Load}|$

A segunda condição analisada consiste em uma resistência de falta muito menor do que a impedância equivalente da carga. Isto significa que a corrente da carga pode ainda ser desprezada, visto que a corrente de falta será bastante elevada. Assim, as fases faltosas juntamente com a resistência da falta formarão um circuito como o ilustrado na Figura 5.2. A partir deste circuito pode-se analisar a variação dos termos presentes em α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$.

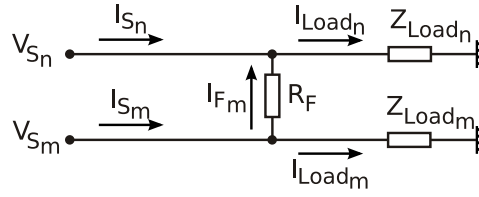


Figura 5.3: Circuito equivalente de uma falta na condição de $R_F \ll |Z_{Load}|$ considerando a carga.

Considere inicialmente a diferença $V_{S_m} - V_{S_n}$. A partir da Figura 5.2, onde é desprezada a corrente de carga, pode-se aproximar $V_{S_m} - V_{S_n}$ para

$$V_{S_m} - V_{S_n} \approx I_{S_m} \cdot (Z_{mm} + R_F + Z_{nn} + 2 \cdot Z_{mn}), \quad (5.23)$$

ou seja,

$$\angle(V_{S_m} - V_{S_n}) \approx \angle I_{S_m} + \arctan \left(\frac{2 \cdot (X_{mm} + X_{mn})}{2 \cdot (R_{mm} + R_{mn}) + R_F} \right) \quad (5.24)$$

quando considera-se que as impedâncias próprias da linha são aproximadamente iguais e despreza-se o efeito capacitivo da mesma. Em (5.24), R_{mm} e X_{mm} representam respectivamente a parte real e a parte imaginária da impedância própria da fase m , ao passo que R_{mn} e X_{mn} representam respectivamente a parte real e a parte imaginária da impedância mútua entre as fases faltosas m e n . Esta diferença angular não aparece sozinha na EGFF, mas acompanhada de $-\angle I_{F_m}$. Nestas condições de falta esta diferença angular resulta aproximadamente em

$$\angle(V_{S_m} - V_{S_n}) - \angle I_{F_m} \approx \arctan \left(\frac{2 \cdot (X_{mm} + X_{mn})}{2 \cdot (R_{mm} + R_{mn}) + R_F} \right), \quad (5.25)$$

lembrando que nesta condição de falta é considerado que a fase da corrente medida na subestação corresponde à fase da corrente de falta.

Analisando (5.25) verifica-se que para pequenos valores de R_F a diferença angular $\angle(V_{S_m} - V_{S_n}) - \angle I_{F_m}$ já retorna valores nulos, já que as impedâncias da linha são normalmente da ordem de Ω ou menores, dependendo da extensão total da mesma. Isto significa que o próprio termo α_0 será próximo de zero, já que esta diferença angular entra como o argumento de um seno, anulando este coeficiente. Desta forma, todo o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será também próximo de zero, fato reforçado pelo valor pequeno assumido por $|M_{mn}|$ (e conseqüentemente α_2) nestas condições de falta (vide (5.16) e (5.16), válidas sob as mesmas condições). Nestas condições de falta, o mesmo acontecia para o caso de faltas à terra, como verificado no Capítulo 4. Entretanto, note que no caso das faltas entre fases a taxa de decaimento será menor, pois as impedâncias que servem de argumento à função arco-tangente correspondem às impedâncias de dois trechos de linha (das duas fases faltosas), ao passo que nas faltas à terra este argumento possui somente a impedância de um trecho, como apresentado em (4.24).

Agora considere a variação do termo α_1^2 . Desconsiderando a corrente de carga, a diferença angular $\angle(N_m - N_n) - \angle I_{F_m}$ resulta também em (5.22). Buscando obter a taxa de variação real deste termo, pode-se equacionar este termo de acordo com a Figura 5.3, que desconsidera as impedâncias série da linha, mas considera o efeito das cargas. Dadas estas condições, o equacionamento a seguir apresenta uma boa aproximação não só para o caso de $R_F \ll |Z_{Load}|$, mas para qualquer R_F maior do que zero.

Segundo ilustra a Figura 5.3, a corrente de falta I_{F_m} é dada por

$$I_{F_m} \approx \frac{V_{S_m} - V_{S_n}}{R_F}. \quad (5.26)$$

Considerando que o módulo das tensões nas fases m e n medidas na subestação serão aproximadamente iguais², pode-se escrever de acordo com (5.26) que

$$\angle I_{F_m} \approx \frac{\angle V_{S_m} + \angle V_{S_n} + 180^\circ}{2}, \quad (5.27)$$

visto que $\angle I_{F_m}$ possuirá o ângulo médio entre V_{S_m} e $-V_{S_n}$. Note que neste caso V_{S_m} e V_{S_n} não possuem o mesmo ângulo.

Equacionando a corrente medida na subestação, obtém-se

$$I_{S_m} \approx I_{\text{Load}_m} + I_{F_m} = \frac{V_{S_m}}{Z_{\text{Load}_m}} + \frac{V_{S_m} - V_{S_n}}{R_F} = V_{S_m} \cdot \left(\frac{R_F + Z_{\text{Load}_m}}{Z_{\text{Load}_m} \cdot R_F} \right) - \frac{V_{S_n}}{R_F}, \quad (5.28)$$

onde I_{Load_m} é a corrente da carga equivalente na fase m . Sabendo que $\angle I_{S_m} = \angle(R_F \cdot I_{S_m})$ e também que

$$R_F \cdot I_{S_m} \approx V_{S_m} \cdot \left(\frac{R_F + Z_{\text{Load}_m}}{Z_{\text{Load}_m}} \right) - V_{S_n}, \quad (5.29)$$

pode-se considerar que para esta faixa de R_F analisada $|(R_F + Z_{\text{Load}_m})/Z_{\text{Load}_m}| \approx 1$. Além disso, tem-se que

$$\angle \left(\frac{R_F + Z_{\text{Load}_m}}{Z_{\text{Load}_m}} \right) = \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}_m}}{R_{\text{Load}_m} + R_F} \right) - \phi_m, \quad (5.30)$$

onde ϕ_m representa o fator de potência da carga na fase m (o próprio ângulo da impedância da carga) e $Z_{\text{Load}_m} = R_{\text{Load}_m} + j \cdot X_{\text{Load}_m}$. Através destas aproximações e sabendo que o ângulo $\angle I_{S_m}$ é dado pelo ângulo médio dos termos da soma dada por (5.29), pode-se escrever que

$$\angle I_{S_m} \approx \frac{\angle V_{S_m} + \arctan \left(\frac{X_{\text{Load}_m}}{R_{\text{Load}_m} + R_F} \right) - \phi_m + \angle V_{S_n} + 180^\circ}{2}. \quad (5.31)$$

Utilizando (5.21), (5.27) e (5.31) é possível escrever a relação entre $\angle N_{mn}$ e $\angle I_{F_m}$, dada por

$$\angle(N_m - N_n) - \angle I_{F_m} \approx \angle(Z_{mm} - Z_{mn}) + \frac{\arctan \left(\frac{X_{\text{Load}_m}}{R_{\text{Load}_m} + R_F} \right) - \phi_m}{2}. \quad (5.32)$$

Analisando (5.32) verifica-se que quando $R_F \ll |Z_{\text{Load}}|$, a diferença angular $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$ irá variar pouco significativamente, especialmente em relação à variação de α_0 , cuja função arco-tangente decresce rapidamente a zero. Ao mesmo tempo, quando $R_F \approx 0$, (5.32) resulta em (5.22), obtida especificamente para esta condição de falta. Note também que (5.32) é válida somente para valores pequenos de R_F , dada a simplificação realizada de que $|(R_F + Z_{\text{Load}_m})/Z_{\text{Load}_m}| \approx 1$.

²Esta consideração é deveras plausível, visto que ambas as fases estão em falta e a tensão medida encontra-se no início do alimentador, onde normalmente as tensões apresentam-se equilibradas. Entretanto, deve-se notar que as faltas fase-fase podem apresentar o módulo da tensão nas fases faltosas diferentes, como amplamente discutido em (BOLLEN, 2000).

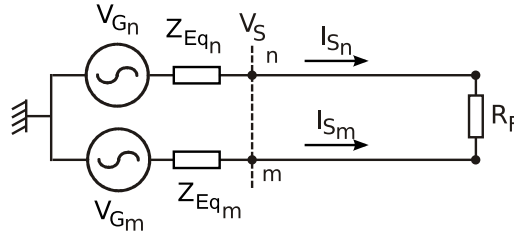


Figura 5.4: Circuito equivalente de uma Falta na Condição de $R_F \ll |Z_{Load}|$ considerando o Sistema Equivalente.

De acordo com a análise realizada, verifica-se que todo o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será próximo de zero, especialmente em relação à grandeza do termo α_1^2 . O valor assumido por $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, entretanto, não será efetivamente nulo, e deve-se notar que haverá uma aproximação maior destes dois termos, α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, em relação ao caso em que $R_F \approx 0$, devido à modificação dos módulos destas variáveis. Esta aproximação pode ser compreendida através da análise da Figura 5.4. De acordo com esta figura, onde $V_{G_{m,n}}$ e $Z_{E_{q_{m,n}}}$ representam respectivamente a tensão e a impedância equivalentes de Thévenin das fases m e n do circuito à montante do SDEE analisado, a corrente medida na subestação pode ser matematicamente expressa por

$$I_{S_m} \approx \frac{V_{G_m} - V_{G_n}}{Z_{E_{q_m}} + Z_{E_{q_n}} + R_F} \implies |I_{S_m}| \approx \frac{|V_G| \cdot \sqrt{3}}{R_{Eq} \cdot (p + 2)} \quad (5.33)$$

quando a reatância do sistema equivalente, X_{Eq} , pode ser desprezada e as tensões equivalentes das duas fases faltosas podem ser consideradas equilibradas. Ao mesmo tempo, $R_{Eq_m} \approx R_{Eq_n}$ e p é definido como $p = R_F / R_{Eq}$.

A partir de $|I_{S_m}|$ é possível determinar duas variáveis, $|N_{mn}|$ e $V_{S_{mn}}$, que aparecem respectivamente em α_1 e α_0 . Considerando a Figura 5.4 e também (5.20) (que também é válida para esta condição de falta), os valores assumidos por estas variáveis são dados respectivamente por

$$|V_{S_{mn}}| \approx |I_{S_m}| \cdot R_F \approx |V_G| \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{p}{p + 2} \quad (5.34)$$

$$|N_{mn}| \approx 2 \cdot |I_{S_m}| \cdot |Z_{mm} - Z_{mn}| \approx 2 \cdot |V_G| \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{|Z_{mm} - Z_{mn}|}{(p + 2) \cdot R_{Eq}} \quad (5.35)$$

Dividindo (5.34) por (5.35) obtém-se a taxa com que as duas variáveis se aproximam:

$$\frac{|V_{S_{mn}}|}{|N_{mn}|^2} \approx q \cdot p \cdot (p + 2) \quad (5.36)$$

onde $|N_{mn}|$ foi elevado ao quadrado pois está presente em α_1^2 , e q é uma variável aproximadamente constante, dada por

$$q = \frac{R_{Eq}^2}{4 \cdot |V_G| \cdot \sqrt{3} \cdot |Z_{mm} - Z_{mn}|^2} \quad (5.37)$$

Analisando (5.36) é possível verificar que a taxa de aproximação dos termos é quadrática em relação à variação de R_F , pois $p = R_F / R_{Eq}$. Para uma pequena faixa de valores, que compreende àqueles valores intermediários de resistências entre a nulidade de

$4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, dada por (5.25), e a nulidade dada por $|V_{S_{mn}}| \approx 0$ ($R_F \approx 0$), haverá um crescimento no valor de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Este crescimento, no entanto, dificilmente chegará ao valor de α_1^2 , como verificado em (5.25) e (5.36).

Através da análise realizada nesta seção verifica-se que para esta faixa de resistências a EGFF possuirá sempre soluções reais e distintas. Além disso, verifica-se um indício de que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ sofrerá, na verdade, uma variação pequena, já que apresenta valores parecidos com os obtidos no caso em que $R_F \approx 0$. Os valores assumidos por α_1^2 , entretanto, apresentam uma grande variação em função da resistência de falta, dada por uma função arco-tangente, descrita em (5.32).

5.2.3 Condição III – $R_F \gg |Z_{Load}|$

Quando a resistência de falta é muito elevada, nem todas as aproximações realizadas anteriormente ainda permanecem válidas. Em relação ao termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, verifica-se que o argumento do seno de α_0 , dado por $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$ continua a ser próximo de zero, assim como quando $R_F \ll Z_{Load}$. Isto porque matematicamente a corrente de falta ainda é dada por (5.26). Isto significa que

$$\angle I_{F_m} \approx \angle (V_{S_m} - V_{S_n}), \quad (5.38)$$

o que significa que $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m} \approx 0$, porquanto a falta analisada encontra-se próxima ao terminal local. Logo, fica evidente que o produto $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será próximo de zero independentemente dos valores assumidos pelas outras variáveis presentes nos coeficientes α_2 e α_0 .

Em relação ao termo α_1 , é possível estimar qual será o seu comportamento através da análise de (5.32). Esta equação, entretanto, não é válida para a condição de falta analisada, devido às aproximações realizadas em (5.29). Na condição de falta analisada a resistência de falta é muito maior do que a impedância da carga, o que significa que (5.29) pode ser reescrita para

$$R_F \cdot I_{S_m} \approx V_{S_m} \cdot \frac{R_F}{Z_{Load_m}} - V_{S_n}. \quad (5.39)$$

Como R_F é muito maior do que a unidade e possui argumento nulo, o ângulo de I_{S_m} pode ser aproximado pelo próprio ângulo do termo dado por V_{S_m} , ou seja

$$\angle I_{S_m} \approx \angle V_{S_m} - \phi_m \quad (5.40)$$

que é uma aproximação válida, sabendo que existe um erro associado à influência de $\angle V_{S_n}$. Entretanto, quanto maior for o valor assumido por R_F , menor é este erro associado. Utilizando (5.18), é possível escrever que

$$\angle N_{mn} \approx \frac{\angle I_{S_m} + \angle I_{S_n} + \angle (Z_{mm} - Z_{mn}) + \angle (Z_{nn} - Z_{mn}) + 180^\circ}{2} \quad (5.41)$$

quando se considera que os produtos $I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn})$ e $I_{S_n} \cdot (Z_{nn} - Z_{mn})$ possuem um módulo praticamente igual, ou seja, $|I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn})| \approx |I_{S_n} \cdot (Z_{nn} - Z_{mn})|$. Sendo assim, é possível utilizar (5.27), (5.40) e (5.41) para escrever que

$$\angle N_{mn} - \angle I_{F_m} \approx \frac{\angle (Z_{mm} - Z_{mn}) + \angle (Z_{nn} - Z_{mn}) - \phi_m - \phi_n}{2}. \quad (5.42)$$

Além disso, $|N_{mn}|$ será obrigatoriamente diferente de zero, pois, de acordo com 5.18, é o produto dado por

$$N_m - N_n = I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn}) + I_{S_n} \cdot (Z_{nn} - Z_{mn}) \quad (5.43)$$

que é obrigatoriamente diferente de zero na condição de falta estudada. Isto significa que o termo α_1^2 só será próximo de zero quando a diferença angular dada por (5.42) for próxima de zero.

De acordo com a análise realizada para esta condição de falta, a EGFF sempre possuirá soluções reais e distintas quando $R_F \gg |Z_{Load}|$. Isto porque o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será próximo de zero, ao passo que o termo α_1^2 não. Entretanto, quando (5.42) resultar em um ângulo próximo de zero, poderão haver soluções complexas conjugadas, mas sendo esta condição tão restritiva, dificilmente ela será observada na prática.

5.2.4 Condição IV – $R_F \approx |Z_{Load}|$

A condição de falta que corresponde a $R_F \approx |Z_{Load}|$ compreende um caso intermediário dos previamente apresentados nas Seções 5.2.2 e 5.2.3. Verifica-se, no entanto, que algumas das aproximações realizadas para o caso em que $R_F \ll |Z_{Load}|$ ainda permanecem válidas para esta faixa de valores de R_F , bem como outras aproximações realizadas para o caso em que $R_F \gg |Z_{Load}|$. Sendo assim, nestas condições de faltas estudaremos as diferenças existentes entre estes dois casos, bem como as suas semelhanças.

Considere inicialmente a diferença angular entre as tensões medidas na subestação e a corrente de falta, $\angle V_{S_{mm}} - \angle I_{S_m}$. Em ambas as condições citadas esta diferença assumia valores nulos. A origem da conclusão, entretanto, partiu de diferentes considerações, como apresentado respectivamente nas Seções 5.2.2 e 5.2.3. Para a condição analisada nesta seção, fica evidente que a aproximação mais adequada para que se chegue à alguma conclusão sobre esta diferença angular é dada por (5.38), dados os valores e relações de impedâncias envolvidas no circuito equivalente. Sendo assim, esta diferença angular também pode ser considerada aproximadamente zero nestas condições de faltas, mostrando então que todo o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ será também próximo de zero.

Agora considere a diferença angular $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$, presente no termo α_1^2 . Desprezando a impedância do trecho de linha entre o terminal local e a falta (bem como a admitância paralela), verifica-se que $\angle I_{F_m}$ ainda pode ser aproximada por (5.27), pois esta é uma equação que foi obtida sob as mesmas condições consideradas nesta análise. Sendo assim, (5.28) também ainda é válida para a condição de falta analisada. Retomando (5.18), é possível escrever que

$$N_m - N_n \approx I_{S_m} \cdot (Z_{mm} - Z_{mn}) + I_{S_n} \cdot (Z_{nn} - Z_{mn}). \quad (5.44)$$

Considerando (5.28), é possível desenvolver (5.44), escrevendo que

$$\begin{aligned} N_{mn} &\approx (Z_{mm} - Z_{mn}) \cdot \underbrace{\left(\frac{V_{S_m}}{Z_{Load_m}} + \frac{V_{S_m}}{R_F} - \frac{V_{S_n}}{R_F} \right)}_{I_{S_m}} - (Z_{nn} - Z_{mn}) \cdot \underbrace{\left(\frac{V_{S_n}}{Z_{Load_n}} + \frac{V_{S_n}}{R_F} - \frac{V_{S_m}}{R_F} \right)}_{I_{S_n}} \\ &\approx (Z_{mm} - Z_{mn}) \cdot \left[V_{S_m} \cdot \left(\frac{R_F + 2 \cdot Z_{Load_m}}{R_F \cdot Z_{Load_m}} \right) - V_{S_n} \cdot \left(\frac{R_F + 2 \cdot Z_{Load_n}}{R_F \cdot Z_{Load_n}} \right) \right], \end{aligned} \quad (5.45)$$

quando se considera que a linha possui impedâncias próprias e mútuas iguais para cada fase. Considerando ainda que os dois termos da soma dada por (5.45) possuem módulos

da mesma ordem de grandeza³, é possível aproximar o ângulo de N_{mn} para

$$\begin{aligned} \angle I_{S_{mn}} \approx \angle (Z_{mm} - Z_{mn}) + & \frac{\angle V_{S_m} + \arctan \left(\frac{2 \cdot X_{Load_m}}{2 \cdot R_{Load_m} + R_F} \right) - \phi_m}{2} \\ & + \frac{\angle V_{S_n} + \arctan \left(\frac{2 \cdot X_{Load_n}}{2 \cdot R_{Load_n} + R_F} \right) - \phi_n}{2} + 90^\circ. \end{aligned} \quad (5.46)$$

Assim, considerando (5.27) a diferença angular $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$ é dada por

$$\begin{aligned} \angle N_{mn} - \angle I_{F_m} \approx \angle (Z_{mm} - Z_{mn}) + \\ \frac{\arctan \left(\frac{2 \cdot X_{Load_m}}{2 \cdot R_{Load_m} + R_F} \right) + \arctan \left(\frac{2 \cdot X_{Load_n}}{2 \cdot R_{Load_n} + R_F} \right) - \phi_m - \phi_n}{2}, \end{aligned} \quad (5.47)$$

na condição de falta analisada.

Como pode ser observado, a diferença angular $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$, e conseqüentemente α_1^2 , varia de acordo com com duas funções arco-tangentes, que dependem da resistência da falta. De acordo com (5.47), esta função arco-tangente ainda é função do carregamento do sistema. Esta equação compreende o caso intermediário entre (5.32) e (5.42). Comparando estas duas equações, entretanto, nota-se que não possível chegar a (5.42) a partir de (5.32), considerando uma resistência de falta muito elevada, apesar de esta ser fisicamente a única diferença existente entre os dois casos.

Na verdade, esta discrepância existente entre os dois casos é engendrada pelas aproximações realizadas em cada um dos casos, referentes a $|(R_F + Z_{Load_m})/Z_{Load_m}|$, a partir de (5.29). Quando $R_F \ll |Z_{Load}|$, considerou-se que este valor seria próximo de 1, ao passo que quando $R_F \gg |Z_{Load}|$ considerou-se que este valor seria próximo de R_F/Z_{Load} , que foram considerações razoáveis para ambos os casos. Ao mesmo tempo, as aproximações possibilitaram a simplificação do equacionamento, resultando em equações simples para $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$. O equacionamento para o caso intermediário, no entanto, foi realizado através de outras considerações, resultando em (5.47).

Verifica-se ainda que os valores de impedância da carga aparecem multiplicados por dois nas funções arco-tangente de (5.47). Comparando (5.47) com (4.29), equação análoga para o caso da EGFT, é possível observar a semelhança das equações, sendo que em (4.29), a impedância das cargas não aparece multiplicada dentro da função arco-tangente. Isto significa que para sistemas iguais e R_F iguais, os valores assumidos pelas funções arco-tangente decaem muito mais rapidamente no caso da EGFT do que no caso da EGFF. A partir desta análise conclui-se que a diferença angular $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$ possui uma variação determinada a partir de uma função trigonométrica, que possui duas funções arco-tangentes. Além disso, os valores inicial e final assumidos por esta função são dados respectivamente por (5.22) e (5.42). Considerando esta variação, verifica-se que se (5.42) representar um ângulo menor do que zero, então a EGFF pode apresentar um coeficiente α_1^2 nulo na faixa de valores de R_F analisada. Isto significa que não há garantias de que as soluções serão reais e distintas, mas sim de que elas podem assumir valores complexos conjugados, dado que os valores de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ poderão ser bastante próximos.

³Esta é uma simplificação razoável quando o sistema opera em condições de simetria da linha e equilíbrio das cargas.

5.2.5 Efeito do Local da Falta

A análise realizada nas Seções 5.2.1 a 5.2.4 considerava um local fixo de falta próximo ao terminal local, com a resistência da mesma modificando de valor. Quando a falta acontece a distâncias maiores do que as previamente consideradas, a única diferença do ponto de vista matemático das variáveis está no módulo das impedâncias próprias e mútuas nas fases m e n , que será maior do que considerado anteriormente, sendo que o ângulo destas permanecerá o mesmo, considerando que a linha é homogênea⁴. A ordem de grandeza máxima da impedância da linha depende, na verdade, do tamanho total da linha de distribuição estudada. Para analisar os efeitos que esta modificação trás às raízes da EGFF, pode-se retomar a análise já realizada anteriormente considerando agora as variações citadas e explorando as diferenças existentes em cada um dos casos.

5.2.5.1 Condição I – $R_F \approx 0$

Na condição em que $R_F \approx 0$ a aproximação de que a tensão no ponto da falta (em cada uma das fases) é a mesma tensão medida no terminal já não se aplica diretamente. Entretanto através de algumas considerações é possível entender qual será a influência do aumento da impedância da linha.

Inicialmente considere (5.16) e (5.17). No caso em que a impedância da linha aumenta, a diferença existente entre Z_{aa} e Z_{bb} , e Y_{aa} e Y_{bb} aumenta, visto que é fruto de uma soma de termos. O aumento deste desvio é linear com o aumento da distância, o que significa que ao dobrarmos a distância da falta, também dobramos este desvio. Assim, os valores assumidos por $|M_{mn}|$ tendem a aumentar com o aumento da distância da falta ao terminal local, aumentando também o valor assumido pelo produto $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Este aumento, no entanto, é pouco significativo perante os valores assumidos por α_1^2 . Isto porque os termos presentes em α_1^2 serão pouco modificados, como pode ser observado na análise de (5.20) e (5.22).

O módulo de N_{mn} , apresentado em (5.20) é pouco modificado tendo em vista a ação conjunta de dois fatos conseqüentes do aumento da resistência de falta, a saber: a) a diminuição de $|I_{S_m}|$; e, b) o aumento da diferença $|Z_{mm} - Z_{nn}|$. Sendo assim, o produto destes dois fatores é pouco afetado com o aumento da distância da falta. Ao mesmo tempo, a diferença angular $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$ também será pouco alterada, visto que mesmo com o aumento da distância da falta $\angle I_{S_m} \approx \angle I_{F_m}$. Ainda, o ângulo dado por $\angle (Z_{mm} - Z_{nn})$ também será pouco alterado, dado que as impedâncias totais da linha aumentam proporcionalmente com a distância, mantendo constante esta diferença angular.

Esta análise mostra que o termo α_1^2 mantém-se praticamente inalterado na condição de falta analisada. Sendo assim, as mesmas conclusões obtidas na Seção 5.2.1 para o caso de faltas no início do alimentador ainda permanecem para o caso de faltas longínquas ao terminal local, apesar do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ apresentar valores mais elevados em relação ao caso de faltas próximas ao terminal local.

5.2.5.2 Condição II – $R_F \ll |Z_{Load}|$

Na análise realizada na Seção 5.2.2 concluiu-se que a variação predominante de valores acontecia em relação ao termo α_1^2 . Com o aumento da distância da falta esta conclusão permanece a mesma, bem como a natureza destas raízes na condição de falta analisada (reais e distintas). Entretanto, a taxa com que α_1^2 varia é modificada, bem como a taxa

⁴Da mesma forma como nas faltas à terra, linhas não homogêneas podem ser consideradas em separado, como se fossem diversas seções diferentes, para fins de análise.

com que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ decai a zero.

Em relação a $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, cuja taxa de variação é dada por (5.25) para qualquer distância de falta, verifica-se que o decaimento a zero será menos pronunciado. Isto porque as impedâncias da linha que aparecem em (5.25) são as impedâncias totais da linha até o local da falta. Com o aumento da distância da falta, estes valores também aumentam, resultando em uma diminuição mais suave da diferença angular $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$. Esta diferença angular, entretanto, continua a decair a zero, levando $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ também a zero. Isto significa que, assim como havia-se observado no caso das faltas à terra, haverá um aumento mais pronunciado dos valores assumidos por $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, já que $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$ chega a zero para um valor mais elevado de R_F . Ao mesmo tempo verifica-se que, assim como no quando $R_F \approx 0$, há um aumento nos valores assumidos por $|M_{mn}|$ com o aumento da distância da falta.

Já o termo α_1^2 possui sua variação regida por (5.32) quando a falta acontece próxima ao terminal local. Entretanto, a obtenção de (5.32) desconsiderou a impedância da linha, aproximação que no caso de faltas longínquas ao terminal local não pode necessariamente ser realizada. A diferença no entanto, está na obtenção de $\angle I_{F_m}$, dado naquele caso por (5.27). Quando a distância da falta aumenta, as tensões no ponto da falta não podem mais ser aproximadas para as tensões no terminal local e haverá um desvio nesta medição. Quanto maior for a distância da falta, maior será este desvio. Sendo assim, não será possível cancelar os ângulos $\angle V_{S_m}$ e $\angle V_{S_n}$ de (5.27) em (5.32). A variação de $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$ ainda será arco-tangencial, mas haverá um desvio em relação à variação dada por (5.32). Matematicamente, a expressão para o caso de faltas longínquas ao terminal local é dada por

$$\angle(N_m - N_n) - \angle I_{F_m} \approx \angle(Z_{mm} - Z_{nn}) + \frac{\arctan\left(\frac{X_{Load_m}}{R_{Load_m} + R_F}\right) - \phi_m}{2} + \Delta V_{S_{mn}} \quad (5.48)$$

sendo $\Delta V_{S_{mn}}$ o desvio das tensões no ponto da falta em relação às tensões medidas no terminal local. Note que este desvio não possui influência significativa na natureza das raízes para esta condição de falta porque seu valor é pequeno em relação à grandeza de $\angle(N_m - N_n) - \angle I_{F_m}$ nesta condição de falta.

Deve-se notar também que mesmo a aproximação das variáveis $|V_{S_{mn}}|$ e $|N_{mn}|$, matematicamente dada por (5.36), também não é significativamente alterada, pois ambas as variáveis se cancelam em função de $|I_{S_m}|$, cancelando assim o efeito das aproximações realizadas na obtenção de (5.36). Desta forma, fica evidente que as conclusões obtidas para o caso das faltas próximas ao terminal local são mantidas para o caso de faltas longínquas ao mesmo.

5.2.5.3 Condição III – $R_F \gg |Z_{Load}|$

Seguindo a linha de raciocínio apresentada na Seção 5.2.3, nota-se que as conclusões obtidas ainda são válidas para faltas longínquas ao terminal local. Isto porque o valor assumido por $|M_{mn}|$ continua sendo bastante pequeno, apesar de ser maior do que no caso de faltas próximas ao terminal local. Em contrapartida, a mesma questão das tensões no ponto da falta reaparecem na condição de falta analisada, pois a aproximação de (5.38) não é exatamente válida neste caso. Isto significa que apesar da diferença angular $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$ ser também próxima de zero, ela será tão maior quanto for a distância da falta ao terminal local. Logo, em relação ao caso analisado na Seção 5.2.3 este caso possuirá um valor mais elevado do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Entretanto, este valor ainda assim será

significativamente menor do que o termo α_1^2 , como será mostrado a seguir, não modificando as conclusões obtidas para o caso de faltas próximas ao terminal local nas mesmas condições de R_F .

Em relação ao termo α_1^2 nota-se que o mesmo desvio apresentado em (5.48) também aparece nas condições estudadas de falta. Isto porque a aproximação realizada para a obtenção de (5.42) é a mesma para a obtenção de (5.32). Reescrevendo (5.42) considerando este desvio obtém-se

$$\angle N_{mn} - \angle I_{F_m} \approx \frac{\angle(Z_{mm} - Z_{mn}) + \angle(Z_{nn} - Z_{mn}) - \phi_m - \phi_n}{2} + \Delta V_{S_{mn}}. \quad (5.49)$$

Este desvio $\Delta V_{S_{mn}}$ representa um erro que dificilmente pode ser previsto com precisão adequada antes da ocorrência de uma falta, já que depende do local em que falta ocorre, bem como da resistência da mesma. O seu valor, no entanto, não é elevado, resultando em um valor de (5.49) aproximado de (5.42). Além disso, note que este desvio pode ser tanto positivo como negativo.

5.2.5.4 Condição IV – $R_F \approx |Z_{Load}|$

Nas análises realizadas anteriormente nesta mesma seção para a Condição II e a Condição III verificou-se a influência da tensão no ponto da falta em um desvio no valor de $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m}$, a saber, $\Delta V_{S_{mn}}$. Esta, na verdade, é a principal diferença existente entre as faltas próximas ao terminal local e as faltas longínquas ao mesmo. Dado que a condição de $R_F \approx |Z_{Load}|$ é intermediária às condições II e III, o mesmo desvio também aparece nestas condições de falta, pois este desvio é oriundo da distância da falta ao terminal local, e não da resistência da falta. Deve-se no entanto entender a relação deste desvio em relação às outras modificações para este caso.

Primeiramente considere as variáveis $|M_{mn}|$ e $\angle V_{S_{mn}}$. Os mesmos efeitos destas variáveis verificados na análise da Condição III nesta mesma seção também são verificados na condição analisada, ou seja, há um aumento no valor de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, considerando faltas mais distantes com a mesma resistência de falta. Ao mesmo tempo, o desvio $\Delta V_{S_{mn}}$ modifica exatamente o valor da resistência de falta no qual $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m} = 0$, caso ocorra este fato. Como o valor deste desvio pode ser tanto positivo como negativo, a condição $\angle N_{mn} - \angle I_{F_m} = 0$ pode ser verificada tanto para um valor maior de R_F como para um valor menor do mesmo, em comparação com o caso de faltas muito próximas ao terminal local. Isto significa que em relação às faltas muito próximas ao terminal local haverá uma modificação dos valores de R_F nas quais as raízes podem ser complexas conjugadas (no caso em que elas possam ocorrer).

Deve-se notar, no entanto, que as conclusões anteriormente obtidas na Seção 5.2.4 ainda permanecem válidas para faltas longínquas ao terminal local, sendo que a única ressalva refere-se à faixa de valores de R_F para os quais podem haver soluções complexas conjugadas, no caso em que elas possam existir.

5.3 Análise Numérica das Raízes

Visando elucidar a análise realizada na Seção 5.2, pode-se analisar alguns casos numericamente, mostrando a teoria aplicada na prática. A metodologia utilizada no estudo das faltas entre fases é a mesma previamente utilizada no estudo das faltas à terra, sendo que o sistema utilizado é o mesmo, descrito no Apêndice B.1. Foram realizadas diversas simulações de faltas, divididas em diferentes casos, de acordo com a Tabela 5.1, que são

analisados nas seções subseqüentes. Cada caso compreende uma combinação diferente de local da falta e carregamento do sistema, elucidando as conclusões obtidas através da análise matemática e física das raízes.

Tabela 5.1: Casos Analisados Numericamente – EGFF.

	Caso I	Caso II	Caso III
Sistema	I	I	I
Carregamento	I	II	I
Local da falta	200m	200m	1800m
Tipo de falta	AB	AB	AB
Resistência de falta	0 a 200 Ω	0 a 200 Ω	0 a 200 Ω

5.3.1 Caso I – Falhas entre Fases Próximas ao Terminal Local

O primeiro caso analisado compreende o caso de faltas entre fases próximas ao terminal local. De acordo com o Apêndice B.1 e a Tabela 5.1 verifica-se que o sistema analisado possui as seguintes características: $\angle(Z_{aa} - Z_{ab}) \approx 18,7^\circ$, $\angle(Z_{bb} - Z_{ab}) \approx 18,3^\circ$ e $\phi_a = \phi_b \approx 30,1^\circ$. De acordo com a análise realizada previamente neste capítulo, conclui-se que a diferença angular $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$ será próxima de $18,7^\circ$ quando a resistência de falta for próxima de zero, e que a mesma irá diminuir na medida em que esta resistência de falta aumenta, até chegar no valor mínimo teórico de $-11,5^\circ$.

A Figura 5.5(a) apresenta a diferença angular $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$ em função da resistência de falta, R_F , em cada uma das faltas analisadas no Caso I. Verifica-se que as aproximações realizadas aplicam-se a este caso com precisão, visto que o a diferença angular calculada com os resultados das simulações foi de aproximadamente $18,3^\circ$ para $R_F \approx 0$. No caso de $R_F \gg |Z_{Load}|$, a curva mostra também uma tendência para o limite teórico de $-11,5^\circ$. Para $R_F = 3200 \Omega$ (omitido do gráfico para melhor visualização do mesmo), a diferença angular resulta em aproximadamente $-10,3^\circ$. O ponto em que a curva corta o eixo das abscissas está em aproximadamente $R_F = 250 \Omega$, o dobro do que no caso de uma falta monofásica à terra no mesmo local de falta.

A mesma precisão também pode ser verificada para a diferença angular $\angle V_{S_{ab}} - \angle I_{F_a}$, ilustrada na Figura 5.5(c). Segundo a análise realizada neste capítulo, $\angle V_{S_{ab}} - \angle I_{F_a}$ deve assumir um valor muito próximo de zero para $R_F \neq 0$, o que realmente acontece. Além disto, verifica-se que esta diferença angular decai rapidamente para zero à medida que R_F aumenta, reforçando as conclusões obtidas através da análise física das raízes.

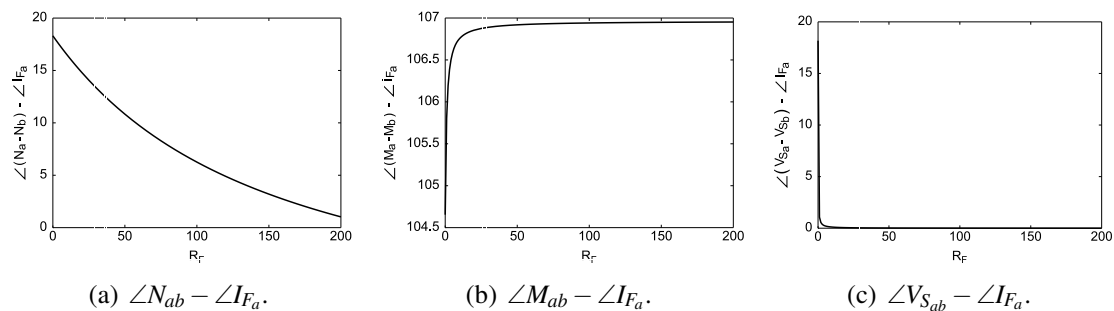


Figura 5.5: Variação das diferenças angulares presentes na EGFF em função da resistência de falta – Caso I.

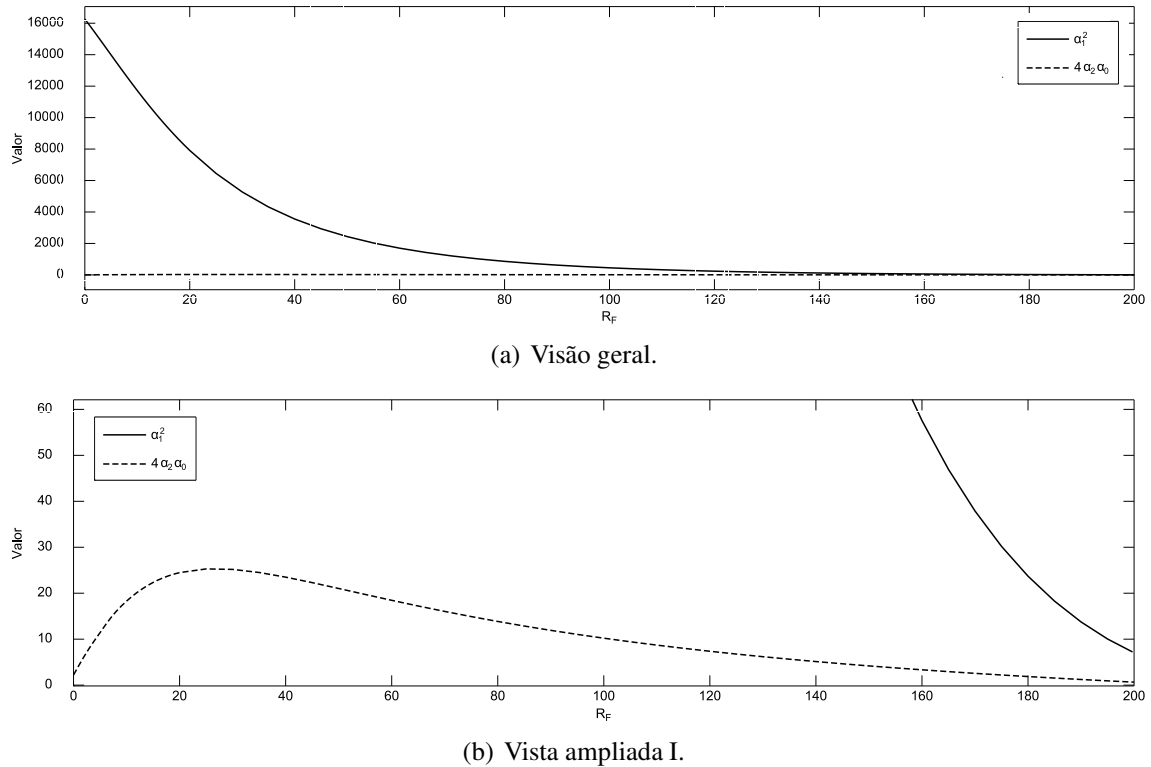


Figura 5.6: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso I.

O agrupamento destas variáveis, juntamente com o módulo de cada uma delas, resulta na relação entre α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, que está ilustrada da Figura 5.6 como função da resistência de falta. Nesta Figura, dividida em duas partes, estão ilustradas estas relações em dois níveis de ampliação, a saber: a) Visão geral, apresentando todos os valores no gráfico; e, b) Vista ampliada I, restringindo o eixo das ordenadas aos limites de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$.

A Figura 5.6(a) mostra que as conclusões obtidas neste capítulo são válidas. Quando $R_F \approx 0$, o termo α_1^2 é muito maior que o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, que assume um valor próximo de zero em relação à grandeza de α_1^2 . Na medida em que R_F aumenta de valor, o termo α_1^2 diminui significativamente, até aproximar-se de zero, como ilustrado na Figura 5.6(b). Em contrapartida, o termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ não aumenta significativamente com o aumento de R_F , mantendo-se aproximadamente nulo em comparação a α_1^2 . Na verdade, a escala apresentada na Figura 5.6 omite os valores de R_F para os quais o termo α_1^2 se torna nulo. Isto acontece aproximadamente em $R_F \approx 250 \Omega$, e para valores mais elevados o termo α_1^2 torna a aumentar novamente, ao passo que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ se mantém próximo de zero.

5.3.2 Caso II – Falta entre Fases Próximas ao Terminal Local

Agora considere as simulações realizadas para o Caso II, onde o mesmo SDEE e as mesmas condições de faltas foram utilizado em relação ao Caso I, exceto que com o Carregamento II. O Carregamento II corresponde a uma carga $Z_{Load} = 69 + j \cdot 20 \Omega$, que possui $\angle Z_{Load} \approx 16,2^\circ$. Foram simuladas faltas sob as mesmas condições de local, tipo e resistência, com o intuito de verificar numericamente as diferenças que o carregamento do sistema ocasiona nas soluções da EGFF.

A Figura 5.7 ilustra as diferenças angulares $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$, $\angle M_{ab} - \angle I_{F_a}$ e $\angle V_{S_{ab}} - \angle I_{F_a}$. Comparando esta com a Figura 5.5 é possível notar que a única relação que é modificada significativamente entre os dois casos é a relação $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$. Esta conclusão está de

acordo com a análise realizada neste capítulo, visto que as diferenças $\angle M_{ab} - \angle I_{F_a}$ e $\angle V_{S_{ab}} - \angle I_{F_a}$ independem de ϕ , o ângulo da carga, único parâmetro modificado entre os dois casos analisados. Em contrapartida $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$ depende diretamente de ϕ , que no segundo caso diminuiu, aumentando o limite mínimo teórico da diferença $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$, mas mantendo o valor inicial ($R_F = 0$) constante. Neste caso, verifica-se que $\angle N_{ab} - \angle I_{F_a}$ será sempre maior do que zero, como ilustrado na Figura 5.7(a).

A relação entre α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ com a resistência de falta para este segundo caso está ilustrada da Figura 5.8. Verifica-se que a teoria desenvolvida anteriormente mostrou-se válida, dado que α_1^2 manteve-se sempre numericamente maior do que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$, não resultando em raízes complexas conjugadas ou puramente imaginárias.

5.3.3 Caso III – Faltas entre Fases Longínquas ao Terminal Local

O terceiro caso analisado refere-se a faltas realizadas ao final do alimentador descrito no Apêndice B.1. Este caso foi analisado tendo em vista a complementação das conclusões obtidas na Seção 5.2.5, e pode ser comparado com os resultados numéricos do Caso I, onde faltas similares foram aplicadas no início do mesmo alimentador.

Segundo a análise realizada na Seção 5.2.5, faltas mais longínquas ao terminal local tendem a modificar a faixa de R_F para as quais a EGFF pode resultar em raízes complexas conjugadas, afetando especialmente a diferença angular dada por $\angle V_{S_{mn}} - \angle I_{F_m}$. A Figura 5.9 ilustra as diferenças angulares resultantes das faltas realizadas. Se compararmos as mesmas com as diferenças angulares do Caso I, ilustradas na Figura 5.5, verifica-se que a maior diferença realmente ocorreu entre as Figuras 5.5(c) e 5.9(c), que apresentam $\angle V_{S_{ab}} - \angle I_{F_a}$. Note que esta diferença é engendrada pelo aumento na impedância total do trecho de linha conectando o terminal local à falta.

Esta alteração em $\angle V_{S_{ab}} - \angle I_{F_a}$, que contribuiu para que o mesmo decaísse mais suavemente, ocasionou um aumento no pico inicial do termo $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Como o decaimento deste pico foi transladado, ele atingiu a curva de α_1^2 para valores menores de R_F , como ilustrado na Figura 5.10. Na Figura 5.10(b), fica evidente que α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ se igualam em um valor de R_F de aproximadamente 200 Ω , ao passo que quando as faltas foram aplicadas no início do alimentador, estes termos se igualaram para $R_F \approx 250 \Omega$.

Comparando os valores máximos de $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ para os dois gráficos, verifica-se que no Caso I o pico está aproximadamente em $R_F = 25 \Omega$ e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 = 25$, enquanto no Caso III, o pico está aproximadamente em $R_F = 25 \Omega$ e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0 = 250$, mostrando o aumento substancial deste termo. Apesar disto, $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ ainda manteve-se bem abaixo do valor assumido por α_1^2 , que manteve-se praticamente o mesmo nos dois casos.

Em relação à diferença angular $\angle M_{ab} - \angle I_{F_a}$, verifica-se que não houve uma diferença significativa entre os diferentes casos estudados, como pode ser observado através das Figuras 5.5(b), 5.7(b) e 5.9(b). O valor desta diferença angular para valores elevados de resistência de falta manteve-se praticamente inalterado nos três casos, ao passo que o valor para $R_F \approx 0$ sofreu uma alteração pouco significativa quando a distância da falta ao terminal local aumentou.

5.4 Determinação da Raiz Referente ao Local da Falta

A análise das raízes da EGFF foi realizada buscando-se um entendimento mais profundo desta equação, de forma que fosse possível determinar qual das duas soluções da EGFF é a solução correspondente ao caso real da falta. Nesta seção, uma forma de determinar qual é a raiz correta é proposta, fundamentando-se nas conclusões estabelecidas

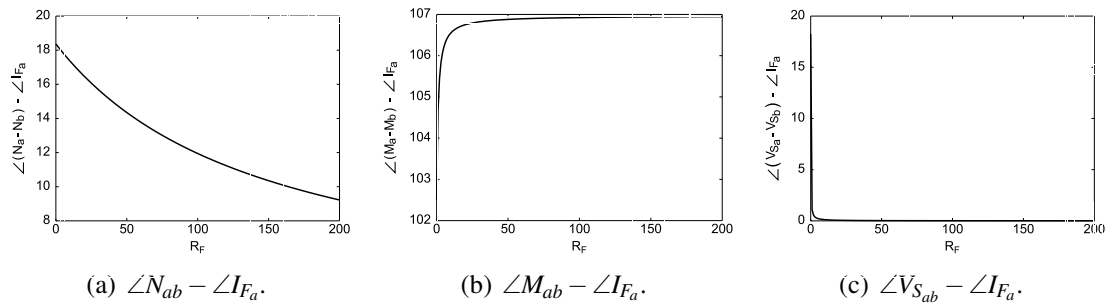


Figura 5.7: Variação das diferenças angulares presentes na EGFF em função da resistência de falta – Caso II.

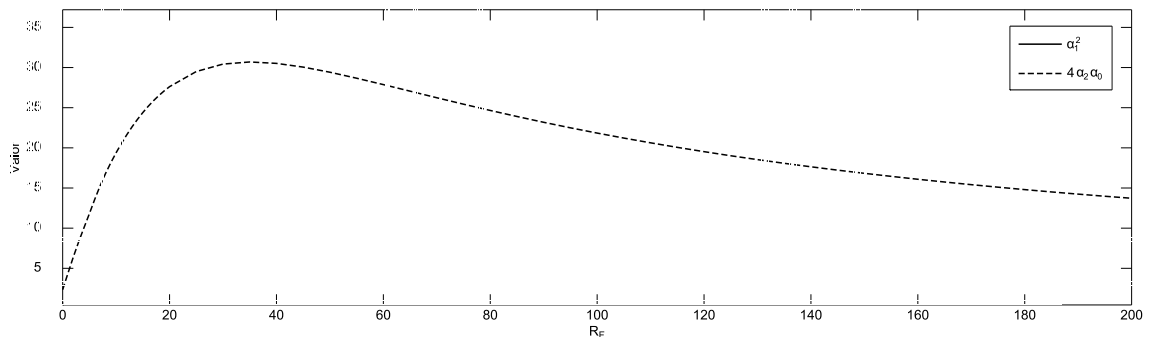
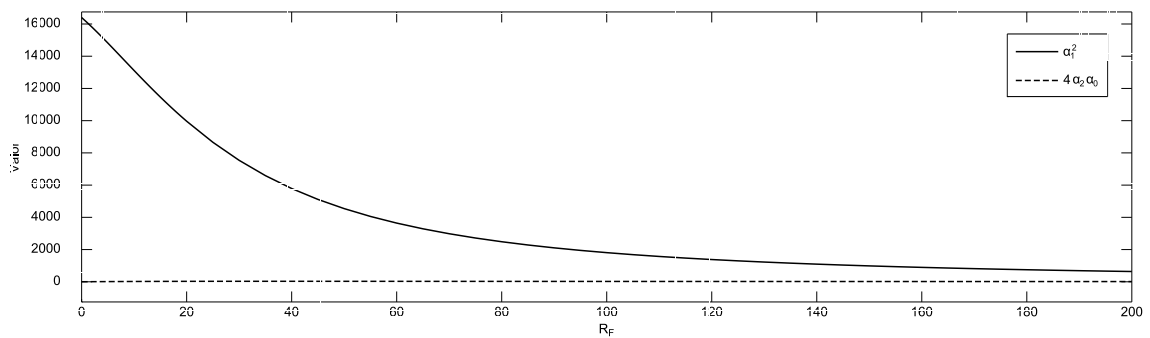


Figura 5.8: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso II.

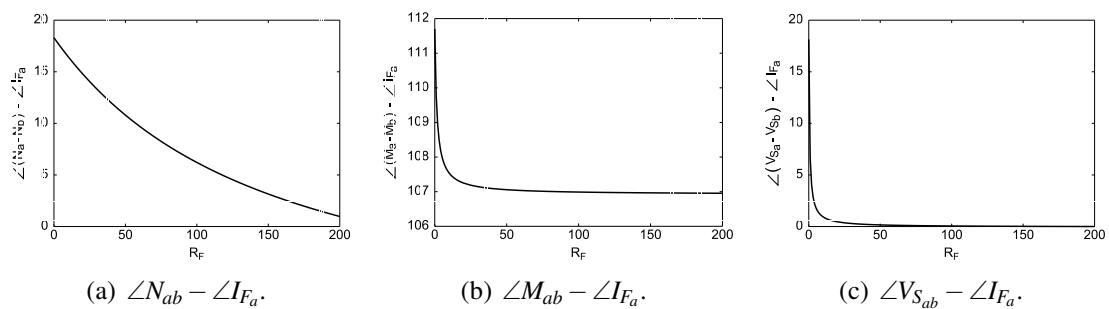


Figura 5.9: Variação das diferenças angulares presentes na EGFF em função da resistência de falta – Caso III.

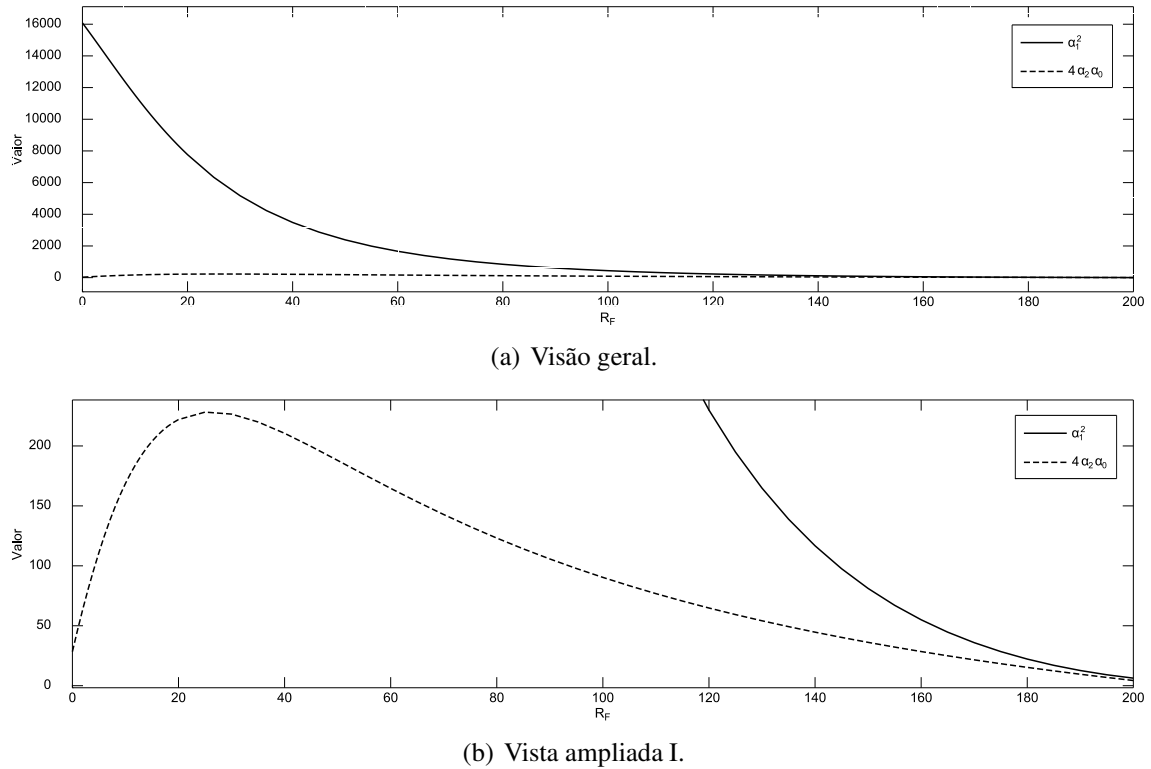


Figura 5.10: Variação de α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ em função da resistência de falta – Caso III.

nas seções anteriores do presente capítulo.

De acordo com a análise realizada no presente capítulo e também do capítulo anterior é possível verificar a grande similaridade existente na influência de cada um dos coeficientes da EGFF e da EGFT com a natureza das suas raízes. No caso da EGFF, assim como no caso da EGFT, o aspecto determinante da raiz fisicamente correta está relacionado com a taxa de variação dos termos α_1^2 e $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ com a variação da resistência de falta. Em ambos os casos, α_1^2 é que varia mais significativamente com a variação da resistência de falta, ao passo que $4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$ mantém-se praticamente constante, em relação à grandeza assumida por α_1^2 . Sendo assim, a obtenção da solução fisicamente correta para a EGFF procede da mesma forma que descrito na Seção 4.4, resultando em

$$x = \begin{cases} \frac{-\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 > 0 \\ \frac{-\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 < 0 \end{cases} \quad (5.50)$$

já que desta forma há uma compensação dos termos α_1 e α_1^2 .

Deve-se também prever a possibilidade de soluções complexas, assim como no caso da EGFT, dado que erros de medição, modelagem e estimação da corrente de falta podem ocorrer. Em relação a estes erros, espera-se que os mesmos sejam limitados, de forma que as raízes complexas sejam soluções somente para alguns valores de resistência de falta, e que a parte imaginária das soluções sejam pequena em relação à parte real. Sendo assim, quando raízes complexas conjugadas são as soluções da EGFF o local da falta é determinado como o valor absoluto da raiz complexa, de forma a considerar uma certa parte da variável complexa da solução.

5.5 Conclusões

A análise da Equação Geral de Localização de Falhas entre Fases, a EGFF, possibilitou um profundo conhecimento da resposta da mesma perante diferentes condições de faltas. Esta análise, realizada tanto no contexto matemático como físico e também numérico, mostrou que a determinação da solução fisicamente correta da EGFF pode ser realizada da mesma forma como no caso da EGFT. Verificou-se também para este tipo de falta a alta influência da resistência de falta na natureza das soluções da EGFF. Além disso, pode-se verificar que as simplificações realizadas para fins de análise apresentaram uma boa fotografia da resposta do sistema em um caso real, mostrando a validade das considerações utilizadas.

A análise realizada neste capítulo apresentou conclusões que podem ser sumarizadas em:

- Quando $\angle(Z_{mm} - Z_{mn}) + \angle(Z_{nn} - Z_{mn}) - \phi_m - \phi_n > 0$ as raízes da EGFF serão reais e distintas, independente do valor de R_{F_k} ;
- Quando $\angle(Z_{mm} - Z_{mn}) + \angle(Z_{nn} - Z_{mn}) - \phi_m - \phi_n < 0$ as raízes poderão ser complexas conjugadas para alguns valores e combinações de resistências de falta;
- A raiz que fisicamente representa a raiz correta da EGFF é dada por (5.50);

6 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos na estimativa do local da falta utilizando diversas metodologias previamente apresentadas na Seção 2.

6.1 Estudo de caso

Os desenvolvimentos propostos foram avaliados frente a diferentes casos de falta, simulados através do ATP-EMTP utilizando o Sistema II, apresentado no Apêndice B.2. O objetivo deste estudo é analisar a influência dos desenvolvimentos propostos frente a parâmetros como o efeito capacitivo da linha, o desequilíbrio da carga, e a resistência e distância da falta. A escolha pela utilização de um sistema sem laterais origina-se da questão dos equivalentes de rede, passo necessário nas metodologias de localização de faltas para sistemas de distribuição, como discutido na Seção 1.2.

Para a obtenção de conclusões genéricas sobre o desempenho dos algoritmos implementados, é necessária a avaliação destes algoritmos perante diversos casos de faltas, em diferentes condições do sistema. Para tanto, é necessária a obtenção de dados referentes a estes casos de faltas. No âmbito desta dissertação, a obtenção destes dados foi realizada a partir de simulações no programa computacional ATP-EMTP (BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007), juntamente com o auxílio de uma ferramenta para a automação destas simulações desenvolvida pelo autor, a saber, o *F-Sim*, descrito no Apêndice C.1. Dada a grande quantidade de simulações, os casos de falta foram divididos em diferentes conjuntos, como apresentado na Tabela 6.1, sendo que cada um destes possui uma combinação diferente de carregamento do sistema e modelagem da linha para fins de simulação (considerando e desprezando o efeito capacitivo). Os locais, tipos e resistências da falta simulados foram mantidos os mesmos para todos os três conjuntos estudados. Estes conjuntos foram escolhidos de forma que fosse possível a observação de alguns efeitos

Tabela 6.1: Conjuntos de Simulações para Análise Numérica

	Conjunto I	Conjunto II	Conjunto III
Sistema	II	II	II
Efeito Capacitivo	Desprezado	Considerado	Considerado
Carregamento	I	I	II
Locais da falta	10%, 20%, 30%, ..., 90% da linha		
Tipos de falta	Todos (A-g, B-g, C-g, AB-g, BC-g, AC-g, AC, BC, AC, ABC-g)		
R_F	0 Ω , 5 Ω , 10 Ω , 15 Ω , ..., 100 Ω		

específicos, comparando os resultados obtidos em cada um dos mesmos.

A partir das simulações realizadas, todos os fasores que representam as tensões e as correntes trifásicas no terminal local foram estimados através do filtro modificado de Fourier descrito no Apêndice C.2. Após a estimação fasorial, tanto os desenvolvimentos propostos como algumas das metodologias de LDF descritas na Seção 2 foram avaliadas, a saber, o Método de Lee *et al.* (2004) e o Método de Choi *et al.* (2004; 2007). A escolha pela implementação de tais metodologias foi realizada tendo em vista a consideração da assimetria das linhas por estas metodologias, e também pelo fato destas terem sido desenvolvidas recentemente, representando as metodologias de LDF em SDEE mais promissoras atualmente. Todas as metodologias e os desenvolvimentos propostos foram implementados através do programa computacional Matlab (MATLAB, 2002), em virtude da simplicidade de programação no mesmo, sendo possível a posterior implementação utilizando linguagens de programação universais como Fortran, Pascal, C, C++ e Java.

O desempenho obtido pelas metodologias e desenvolvimentos implementados foi avaliado através do erro percentual na estimativa do local da falta, dado por

$$\text{Erro [\%]} = 100 \cdot \left| \frac{x_{\text{simulado}} [\text{km}] - x_{\text{obtido}} [\text{km}]}{\ell_{\text{linha}} [\text{km}]} \right| \quad (6.1)$$

onde ℓ_{linha} representa o comprimento total da linha e x a distância entre a falta e o terminal local (subestação), sendo o subscrito $_{\text{simulado}}$ referindo-se à distância simulada e o subscrito $_{\text{obtido}}$ referindo-se à distância retornada pelo algoritmo analisado.

As seções subseqüentes apresentam os resultados obtidos com as metodologias analisadas, incluindo uma análise crítica sobre os resultados obtidos com cada uma delas.

6.2 Resultados – Método de Lee *et al.* (2004)

Para a avaliação do Método de Lee *et al.* (2004), o seu desempenho foi analisado para as faltas correspondentes aos Conjuntos I, II e III. Os resultados foram obtidos para todos os tipos de faltas, e os valores médios e máximos dos erros encontrados para as faltas pertencentes ao Conjunto I estão apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3, respectivamente em função da resistência e da distância da falta. Analogamente, as Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam os resultados do Método de Lee *et al.* (2004) para as faltas do Conjunto II em função da resistência e da distância da falta, ao passo que as Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam os resultados deste método para as faltas do Conjunto III em função da resistência e da distância da falta. Note que o Conjunto I representa as condições nas quais este método foi proposto: em um sistema sem o efeito capacitivo. Sendo assim, a adição da capacitância, inserida nas simulações realizadas nos Conjuntos II e III, representa uma situação diferente da projetada para este método. Desta forma, inicialmente serão analisados os resultados obtidos para o Conjunto I para a posterior avaliação da influência do efeito capacitivo no método em questão. A análise dos resultados obtidos em todos os conjuntos perante diferentes aspectos é apresentada em detalhes nas subseções a seguir.

6.2.1 Influência da Resistência da Falta

Para analisar a influência da resistência de falta, R_F , considere inicialmente os resultados obtidos para as simulações do Conjunto I, apresentados na Tabela 6.2 em função da resistência de falta. Cada linha desta tabela apresenta os erros médios (ou máximos) para três valores de resistência de falta, considerando as faltas realizadas em toda a extensão da linha do sistema. Analisando o erro médio para cada grupo de resistências é possível

Tabela 6.2: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Lee *et al.* (2004) – Conjunto I.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01
15–25	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.01
30–40	0.04	0.03	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.05	0.06	0.02
45–55	0.06	0.05	0.03	0.06	0.01	0.02	0.02	0.06	0.07	0.04
60–70	0.09	0.07	0.05	0.09	0.01	0.02	0.03	0.07	0.08	0.05
75–85	0.12	0.09	0.06	0.12	0.02	0.03	0.04	0.08	0.08	0.07
90–100	0.15	0.11	0.08	0.16	0.02	0.04	0.05	0.08	0.08	0.08
R_F [Ω]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.01
15–25	0.03	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.02
30–40	0.05	0.04	0.02	0.05	0.01	0.02	0.02	0.06	0.06	0.03
45–55	0.08	0.06	0.04	0.08	0.01	0.02	0.03	0.07	0.08	0.05
60–70	0.11	0.08	0.05	0.11	0.02	0.03	0.04	0.08	0.08	0.06
75–85	0.13	0.10	0.07	0.14	0.02	0.04	0.05	0.09	0.08	0.08
90–100	0.16	0.12	0.09	0.17	0.02	0.04	0.06	0.09	0.08	0.09

Tabela 6.3: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Lee *et al.* (2004) – Conjunto I.

d [%]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	0.06	0.05	0.03	0.07	0.01	0.01	0.02	0.06	0.06	0.04
30–40	0.06	0.05	0.04	0.07	0.01	0.02	0.02	0.06	0.06	0.04
50	0.07	0.05	0.04	0.07	0.01	0.02	0.02	0.06	0.06	0.04
60–70	0.07	0.05	0.04	0.07	0.01	0.02	0.03	0.06	0.06	0.04
80–90	0.07	0.05	0.04	0.08	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.04
d [%]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	0.15	0.12	0.09	0.16	0.02	0.04	0.05	0.09	0.08	0.09
30–40	0.16	0.12	0.09	0.17	0.02	0.04	0.05	0.09	0.08	0.09
50	0.16	0.12	0.09	0.17	0.02	0.04	0.05	0.08	0.08	0.09
60–70	0.16	0.12	0.09	0.17	0.02	0.04	0.05	0.08	0.08	0.09
80–90	0.16	0.12	0.09	0.17	0.02	0.04	0.06	0.08	0.08	0.09

Tabela 6.4: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Lee *et al.* (2004) – Conjunto II.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.07
15–25	0.29	0.23	0.21	0.30	0.24	0.28	0.22	0.13	0.13	0.35
30–40	0.70	0.56	0.57	0.76	0.63	0.74	0.49	0.30	0.34	0.88
45–55	1.21	0.98	1.02	1.33	1.12	1.31	0.83	0.50	0.59	1.55
60–70	1.78	1.44	1.53	1.97	1.67	1.94	1.21	0.73	0.90	2.29
75–85	2.40	1.94	2.10	2.66	2.28	2.63	1.63	0.98	1.24	3.08
90–100	3.05	2.47	2.68	3.37	2.90	3.36	2.09	1.25	1.59	3.90
R_F [Ω]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.17	0.10	0.22	0.15	0.59
15–25	0.55	0.32	0.34	0.49	0.40	0.49	0.39	0.19	0.28	0.57
30–40	1.07	0.70	0.75	1.00	0.86	1.00	0.77	0.38	0.57	1.15
45–55	1.69	1.13	1.30	1.66	1.39	1.63	1.16	0.61	0.89	1.88
60–70	2.37	1.61	1.82	2.38	1.97	2.29	1.54	0.87	1.26	2.68
75–85	3.09	2.12	2.59	3.14	2.59	2.99	1.95	1.14	1.67	3.51
90–100	3.83	2.65	3.09	3.93	3.23	3.75	2.41	1.43	2.07	4.50

Tabela 6.5: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Lee *et al.* (2004) – Conjunto II.

d [%]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	1.32	1.09	1.16	1.54	1.21	1.48	1.00	0.55	0.60	1.77
30–40	1.36	1.09	1.18	1.50	1.33	1.50	1.00	0.54	0.59	1.74
50	1.44	1.09	1.15	1.42	1.20	1.51	0.86	0.54	0.85	1.63
60–70	1.27	1.10	1.18	1.46	1.34	1.41	0.88	0.59	0.73	1.73
80–90	1.44	1.10	1.15	1.49	1.25	1.47	0.87	0.59	0.75	1.74
d [%]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	3.27	2.64	2.87	3.93	3.10	3.65	2.41	1.32	1.54	4.31
30–40	3.50	2.64	2.91	3.63	3.23	3.72	2.36	1.42	1.55	4.19
50	3.27	2.64	2.85	3.49	2.91	3.63	2.15	1.30	1.99	4.00
60–70	3.20	2.64	3.09	3.56	3.22	3.59	2.19	1.41	2.07	4.18
80–90	3.83	2.65	2.90	3.74	3.16	3.75	2.23	1.43	1.97	4.50

Tabela 6.6: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Lee *et al.* (2004) – Conjunto III.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06
15–25	0.28	0.23	0.21	0.30	0.25	0.28	0.23	0.13	0.19	0.35
30–40	0.69	0.58	0.57	0.77	0.64	0.73	0.50	0.31	0.47	0.88
45–55	1.18	1.00	1.02	1.34	1.12	1.29	0.86	0.52	0.79	1.55
60–70	1.73	1.48	1.52	1.98	1.67	1.91	1.27	0.77	1.15	2.28
75–85	2.31	2.00	2.07	2.69	2.27	2.58	1.72	1.03	1.51	3.06
90–100	2.93	2.54	2.65	3.41	2.88	3.29	2.21	1.31	1.90	3.87

R_F [Ω]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.13	0.14	0.13	0.14	0.14	0.16	0.12	0.22	0.15	0.31
15–25	0.53	0.33	0.35	0.49	0.40	0.48	0.42	0.19	0.29	0.58
30–40	1.05	0.71	0.75	1.01	0.85	0.99	0.74	0.38	0.58	1.15
45–55	1.63	1.16	1.35	1.67	1.38	1.61	1.17	0.61	0.93	1.88
60–70	2.27	1.66	1.80	2.40	1.95	2.26	1.64	0.90	1.31	2.67
75–85	2.95	2.18	2.56	3.16	2.56	2.93	2.13	1.13	1.69	3.49
90–100	3.65	2.73	3.04	3.96	3.18	3.67	2.66	1.43	2.13	4.40

Tabela 6.7: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Lee *et al.* (2004) – Conjunto III.

d [%]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	1.27	1.12	1.15	1.56	1.21	1.45	1.03	0.59	0.87	1.76
30–40	1.31	1.13	1.17	1.51	1.31	1.48	1.03	0.59	0.87	1.73
50	1.42	1.12	1.13	1.45	1.23	1.47	0.92	0.58	0.84	1.61
60–70	1.22	1.13	1.17	1.47	1.32	1.39	0.95	0.60	0.86	1.73
80–90	1.38	1.13	1.14	1.51	1.24	1.45	0.92	0.60	0.87	1.73

d [%]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	3.12	2.73	2.84	3.96	3.07	3.57	2.57	1.43	2.13	4.27
30–40	3.35	2.73	2.87	3.67	3.18	3.64	2.66	1.41	2.07	4.16
50	3.19	2.73	2.81	3.54	2.96	3.55	2.37	1.41	1.99	3.98
60–70	3.07	2.73	3.04	3.60	3.18	3.53	2.55	1.42	2.10	4.15
80–90	3.65	2.73	2.86	3.78	3.13	3.67	2.43	1.41	2.03	4.40

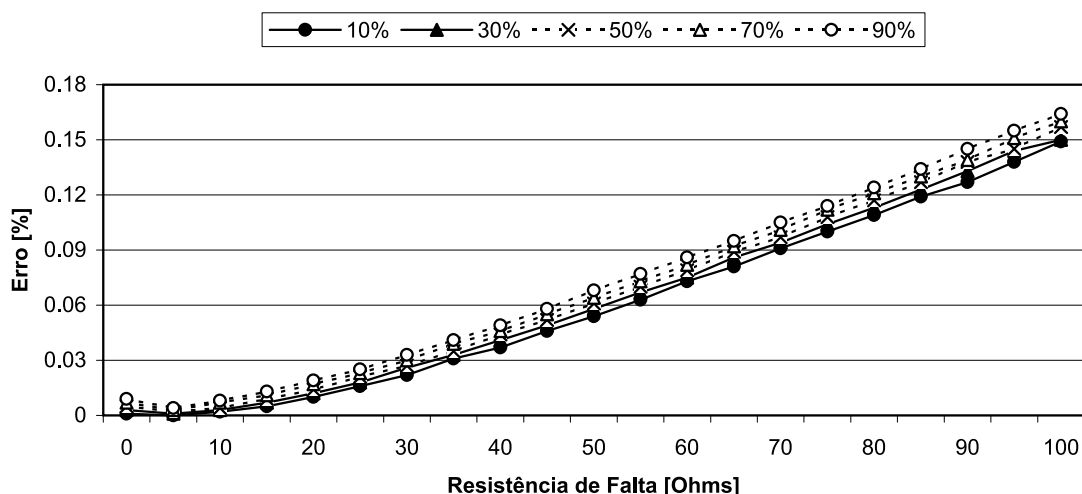


Figura 6.1: Resultados do Método de Lee *et al.* (2004) em função da Resistência de Falta para Falta A-g – Conjunto I

verificar que na medida em que a resistência de falta aumenta, o erro também aumenta, independentemente do tipo de falta associado. Esta influência pode ainda ser melhor visualizada através da Figura 6.1, que ilustra os resultados obtidos para faltas A-g em função da resistência de falta, considerando cinco locais diferentes de falta¹. Nesta figura fica evidente o crescimento do erro com o aumento da resistência de falta.

É importante notar que mesmo com valores elevados de R_F , da ordem de 100 Ω , os erros obtidos foram sempre muito pequenos. Estas observações estão de acordo com resultados obtidos anteriormente (LEE *et al.*, 2004; SALIM *et al.*, 2008; MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008), e são ainda reforçados pela simplicidade da linha de distribuição simulada, que não possui laterais, cargas intermediárias, ou efeito capacitivo.

6.2.2 Influência da Distância da Falta

A influência da distância da falta no método em questão pode ser analisada através dos resultados apresentados na Tabela 6.3, que apresenta os resultados obtidos para o Conjunto I em função da distância da falta, considerando todos os valores de resistência de falta simulados. Através destes resultados verifica-se uma tendência de aumento do erro com o aumento da distância, fato melhor visualizado através da Figura 6.2, que apresenta os resultados para faltas A-g em função da distância da falta, considerando cinco resistências de falta diferentes². Além disso, nota-se que a influência da distância da falta é muito menor do que a influência da resistência da falta, ao compararmos as Figuras 6.1 e 6.2. Esta comparação mostra que o aumento da resistência de falta engendra um aumento superior do erro, em relação ao aumento do erro engendrado pelo aumento da distância da falta.

¹Todas as figuras apresentadas nesta dissertação que ilustram os resultados em função da resistência de falta possuem os valores de distância da falta dados em percentuais da linha.

²Todas as figuras apresentadas nesta dissertação que ilustram os resultados em função da distância da falta possuem os valores de resistência de falta dados em Ω .

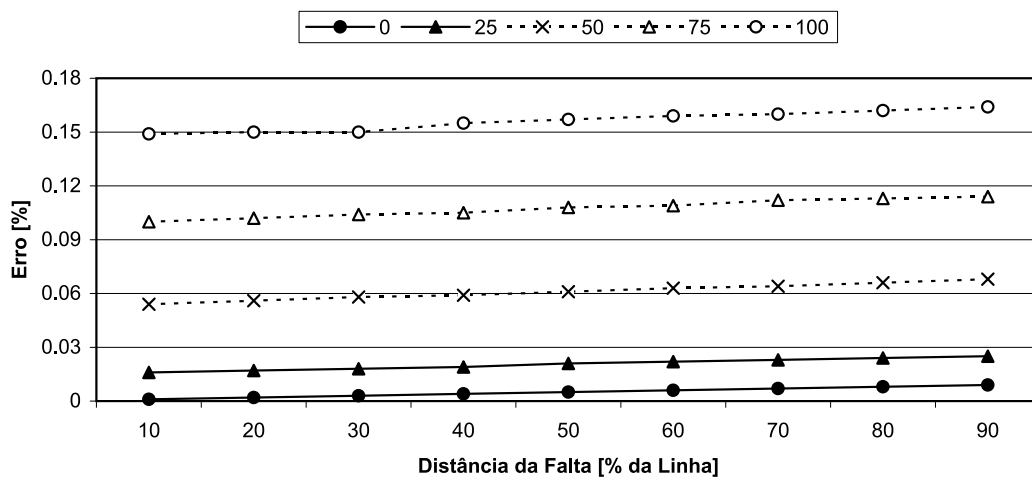


Figura 6.2: Resultados do Método de Lee *et al.* (2004) em função da Distância da Falta para Falhas A-g – Conjunto I

6.2.3 Influência do Tipo da Falta

Para analisar a influência do tipo da falta, considere os resultados apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3. Estas tabelas apresentam resultados para diferentes tipos de falta, entretanto possuindo locais e resistências similares. Considere inicialmente faltas similares independente das fases envolvidas: fase-terra, fase-fase terra, fase-fase, e trifásica-terra. Analisando estes quatro tipos de faltas é possível verificar que as faltas fase-fase são as que possuem o menor erro médio associado aos valores mais elevados de resistência de falta. Em contrapartida, as faltas fase-terra são as que possuem o maior erro médio associado. Desta forma fica evidente que o tipo da falta exerce influência sobre os resultados obtidos utilizando o Método de Lee *et al.* (2004). Entretanto, esta influência é de certa forma pequena, pois a diferença no erro médio obtido entre os diferentes tipos de falta não é excessivamente grande.

Ampliando o conceito de tipo de falta e considerando somente as diferentes combinações de fases para cada um destes quatro tipos de faltas é possível verificar através da Tabela 6.2 que as fases envolvidas na falta apresentaram certa influência nos resultados, especialmente para o caso das faltas bifásicas à terra. Este tipo de falta apresentou respectivamente o maior e o menor erro médio em função da resistência de falta. Esta diferença entre as fases envolvidas na falta é atribuída a erros referentes à estimação fasorial através do método descrito no Apêndice C.2. Este fato ocorre devido à inexistência de um passo de integração dado por um número racional múltiplo da frequência fundamental do sistema, 60 Hz, com precisão compatível à do programa ATP/EMTP, visto que o próprio período fundamental do sistema é dado por uma dízima periódica, 16.6666... ms. Assim sendo, existe um erro associado à estimação fasorial de cada uma das fases. Como as faltas foram simuladas ocorrendo todas no mesmo instante da simulação, os pontos de incidência são diferentes, o que significa que a porção da onda que é desconsiderada na estimação fasorial é diferente para valores de tensão e corrente em fases diferentes, resultando em uma discrepância nas estimações de cada uma das fases.

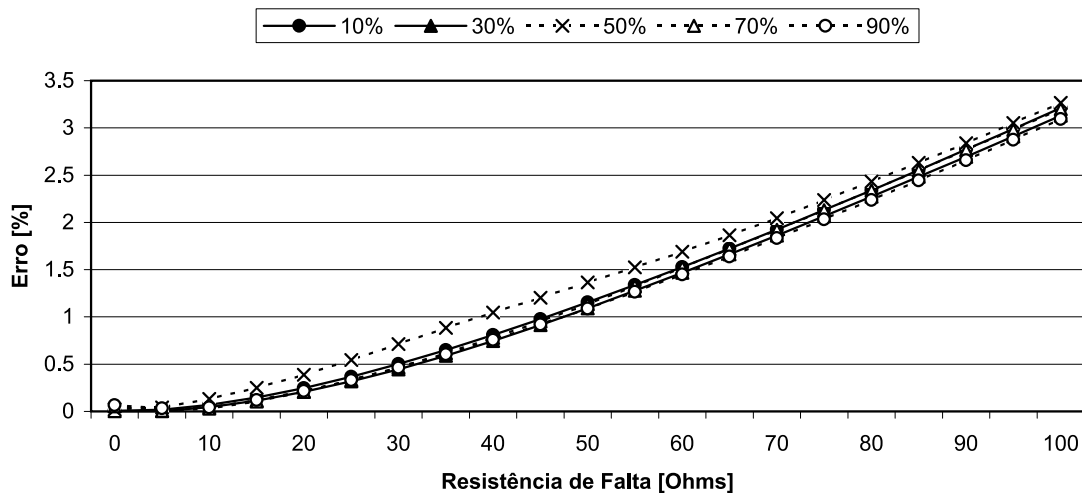


Figura 6.3: Resultados do Método de Lee *et al.* (2004) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II

6.2.4 Influência da Capacitância da Linha

Considere agora os resultados obtidos para as faltas inseridas no Conjunto II. Este conjunto contém as simulações realizadas com um modelo de linha cujo efeito capacitivo é considerado. Os resultados obtidos para estas condições estão apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5 em função da resistência e da distância da falta, respectivamente.

A principal conclusão verificada é a de que o efeito capacitivo insere um grande erro na localização de faltas através do Método de Lee *et al.* (2004). Isto pode ser verificado comparando-se os erros médios apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5 com os erros médios apresentados nas Tabelas 6.2 e 6.3. Nas simulações realizadas desconsiderando o efeito capacitivo (Conjunto I), o erro máximo geral obtido foi de 0.17% da extensão total da linha, ao passo que entre os casos com efeito capacitivo este erro aumentou para 4.5%. Este aumento aconteceu para todos os tipos de faltas, independentemente das fases envolvidas na mesma.

Apesar disto, o erro observado para o Método de Lee *et al.* (2004) quando o efeito capacitivo da linha também é representado ainda é aceitável em termos práticos, dado o erro máximo encontrado entre estes casos. Entretanto, deve-se notar que o sistema utilizado para simulação é um sistema sem cargas intermediárias ou laterais, o que significa que o erro na estimativa seria muito maior com a influência de outras incertezas, como a impedância da carga, os sistemas equivalentes, ou ainda as incertezas das próprias medições e parâmetros da linha. Outras aplicações desta metodologia foram testadas em sistemas com a presença de laterais e cargas intermediárias desprezando o efeito capacitivo da linha (LEE *et al.*, 2004; MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008; SALIM *et al.*, 2008). Nestes trabalhos os erros obtidos foram inclusive inferiores (praticamente quatro vezes inferiores) aos apresentados nesta dissertação. Isto mostra que o efeito da capacitância da linha é significativo mesmo em linhas aéreas de distribuição, onde esta capacitância é comumente desprezada para a análise em regime permanente.

Considere agora a Figura 6.3, que apresenta os resultados obtidos para as simulações de faltas A-g do Conjunto II em função da resistência de falta para cinco locais de falta distintos. Comparando esta com a Figura 6.1 é possível notar que a tendência de aumento do erro com o aumento da resistência de falta ainda acontece quando se considera o efeito capacitivo da linha nas simulações. A principal diferença diz respeito aos valores dos

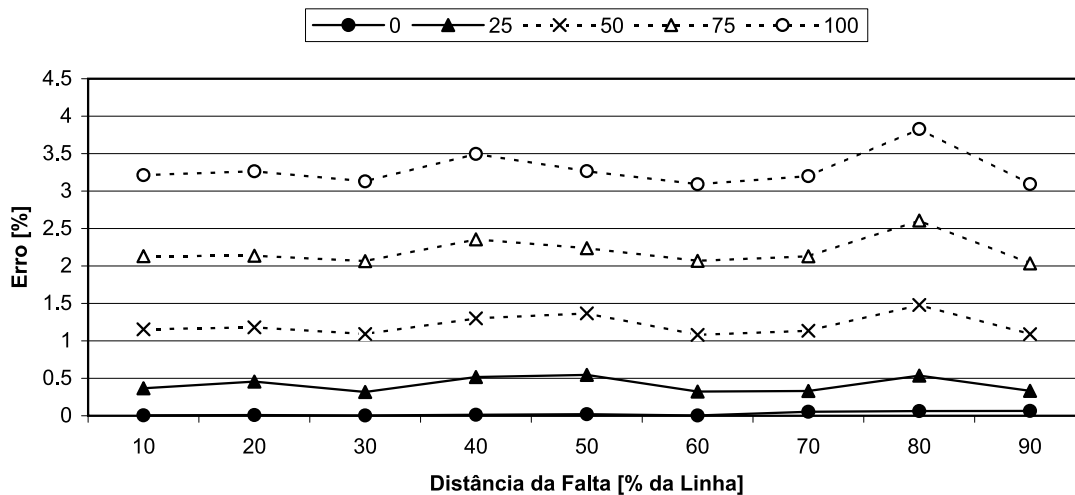


Figura 6.4: Resultados do Método de Lee *et al.* (2004) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II

erros observados. Note que quando a resistência de falta é muito baixa, entre 0 e 10 Ω , o efeito capacitivo pouco influencia os erros obtidos pelo Método de Lee *et al.* (2004). Entretanto, à medida que a resistência de falta aumenta o erro tende a aumentar muito mais significativamente do que no caso em que o efeito capacitivo é desprezado nas simulações, mostrando que é o conjunto de fatores, neste caso a capacitância da linha e a resistência da falta, que determina a real influência tanto das condições da falta como das condições do sistema.

Já em relação à influência da distância da falta é possível verificar uma certa mudança na sua tendência em relação às faltas do Conjunto I. Para analisar tal efeito, considere a Figura 6.4, que apresenta os resultados obtidos para as simulações de faltas A-g do Conjunto II em função da distância da falta para cinco resistências de falta distintas. O que antes era uma relação claramente linear, como ilustrado na Figura 6.2, agora torna-se não-linear. As curvas para diferentes resistências de falta, entretanto, apresentam todas a mesma tendência. Os maiores erros obtidos para cada R_F estão associados a faltas ocorridas em 80% da linha, sendo que em 90% da linha os resultados apresentam alguns dos menores erros associados, o que mostra uma certa uniformidade nos erros encontrados apesar da aparente aleatoriedade.

6.2.5 Influência do Desequilíbrio da Carga

Para analisar o efeito que o desequilíbrio da carga causa nos resultados obtidos através da metodologia analisada, considere os resultados apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7, onde os resultados das simulações do Conjunto III são apresentados respectivamente em função da resistência e do local da falta. É possível verificar que os resultados apresentados são bastante similares aos apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5, o que significa que o desequilíbrio da carga em um sistema onde o efeito capacitivo é considerado afeta pouco significativamente o método analisado, tanto em termos de erro médio como em termos de erro máximo. Em alguns tipos de falta os erros foram maiores para o caso desequilibrado, enquanto para outros tipos de falta os erros foram menores para o mesmo caso. Esta variação, entretanto, foi pouco significativa. Além disso, a mesma tendência de aumento do erro com o aumento da resistência de falta foi observada, assim como no caso com cargas equilibradas. Em relação à influência da distância da falta, as conclusões são as

mesmas: faltas em locais diferentes apresentam erros diferentes, considerando a mesma resistência de falta, no entanto, este comportamento não é linear, sofrendo aumentos e reduções locais do erro, assim como no caso equilibrado.

6.2.6 Análise Geral

A partir dos testes realizados é possível avaliar como seriam os resultados obtidos através da metodologia proposta por Lee *et al.* (2004) para um caso prático. Por mais que a capacitância das linhas aéreas de distribuição seja desprezível (neste sistema ela é da ordem de alguns μS), esta afeta de forma bastante significativa os resultados desta metodologia. Na verdade, pode-se verificar que de certa forma o efeito capacitivo potencializa a influência da resistência da falta, dado que o crescimento do erro com o aumento da resistência foi mais elevado quando o efeito capacitivo foi considerado. Assim sendo, fica evidente que a desconsideração do efeito capacitivo não é uma aproximação adequada para esta metodologia de localização de faltas. No caso de sistemas de distribuição subterrâneos o erro seria ainda maior, visto que o efeito capacitivo é ainda mais significativo. Além disso, o desequilíbrio da carga apresenta pouca influência nos resultados obtidos através desta metodologia.

6.3 Resultados – Método de Choi *et al.* (2004; 2007)

Para a avaliação do Método de Choi *et al.* (2004; 2007), seu desempenho foi analisado para as faltas pertencentes aos Conjuntos I, II e III. Entretanto, como esta metodologia foi desenvolvida somente para faltas fase-terra e fase-fase, os resultados foram obtidos somente para estes tipos de faltas. Os valores médios e máximos dos erros encontrados para as faltas pertencentes ao Conjunto I estão apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9 em

Tabela 6.8: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) – Conjunto I.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]						Erro Máximo [%]					
	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC
0–10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04
15–25	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.04	0.06
30–40	0.04	0.03	0.02	0.01	0.05	0.07	0.05	0.04	0.02	0.01	0.05	0.09
45–55	0.06	0.05	0.03	0.01	0.05	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	0.06	0.11
60–70	0.09	0.06	0.05	0.02	0.06	0.12	0.11	0.08	0.05	0.02	0.07	0.13
75–85	0.12	0.09	0.06	0.03	0.07	0.14	0.14	0.10	0.07	0.04	0.07	0.15
90–100	0.15	0.11	0.08	0.04	0.07	0.15	0.17	0.12	0.09	0.05	0.08	0.16

Tabela 6.9: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) – Conjunto I.

d [%]	Erro Médio [%]						Erro Máximo [%]					
	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC
10–20	0.06	0.05	0.04	0.01	0.05	0.09	0.15	0.11	0.09	0.04	0.08	0.15
30–40	0.06	0.05	0.04	0.01	0.05	0.09	0.15	0.12	0.09	0.04	0.08	0.16
50	0.07	0.05	0.04	0.02	0.05	0.09	0.16	0.12	0.09	0.04	0.07	0.16
60–70	0.07	0.05	0.04	0.02	0.05	0.09	0.16	0.12	0.09	0.04	0.07	0.16
80–90	0.07	0.05	0.04	0.02	0.05	0.10	0.17	0.12	0.09	0.05	0.07	0.16

Tabela 6.10: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) – Conjunto II.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]						Erro Máximo [%]					
	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC
0–10	0.04	0.14	0.09	0.03	0.01	0.02	0.13	0.37	0.23	0.10	0.07	0.09
15–25	0.29	0.54	0.39	0.16	0.08	0.09	0.54	0.97	0.69	0.32	0.12	0.19
30–40	0.70	1.03	0.84	0.40	0.22	0.28	1.07	1.58	1.23	0.61	0.28	0.44
45–55	1.21	1.56	1.36	0.71	0.40	0.54	1.69	2.20	1.82	0.89	0.49	0.74
60–70	1.78	2.11	1.92	1.05	0.62	0.84	2.37	2.82	2.46	1.25	0.73	1.10
75–85	2.39	2.68	2.53	1.43	0.86	1.20	3.08	3.44	3.06	1.66	1.00	1.48
90–100	3.03	3.26	3.14	1.84	1.12	1.57	3.82	4.07	3.70	2.09	1.26	1.88

Tabela 6.11: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) – Conjunto II.

d [%]	Erro Médio [%]						Erro Máximo [%]					
	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC
10–20	1.31	1.96	1.66	0.78	0.48	0.66	3.24	4.07	3.70	1.92	1.25	1.74
30–40	1.35	1.76	1.57	0.79	0.48	0.67	3.48	3.77	3.56	2.09	1.26	1.84
50	1.43	1.62	1.45	0.77	0.49	0.48	3.25	3.46	3.32	1.93	1.26	1.38
60–70	1.26	1.47	1.40	0.80	0.47	0.62	3.19	3.31	3.48	2.08	1.22	1.72
80–90	1.43	1.27	1.25	0.86	0.45	0.74	3.82	3.00	3.01	2.09	1.19	1.88

Tabela 6.12: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) – Conjunto III.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]						Erro Máximo [%]					
	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC
0–10	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.12	0.11	0.06	0.10	0.07	0.09
15–25	0.27	0.23	0.22	0.16	0.08	0.09	0.53	0.33	0.35	0.32	0.14	0.19
30–40	0.68	0.57	0.58	0.41	0.21	0.28	1.06	0.71	0.76	0.59	0.27	0.44
45–55	1.17	1.00	1.04	0.71	0.39	0.54	1.64	1.16	1.41	0.88	0.47	0.74
60–70	1.74	1.48	1.53	1.07	0.59	0.85	2.27	1.66	1.83	1.27	0.69	1.10
75–85	2.35	1.99	2.07	1.46	0.82	1.20	2.88	2.18	2.48	1.67	0.99	1.48
90–100	2.99	2.53	2.64	1.88	1.06	1.57	3.59	2.73	3.00	2.10	1.19	1.88

Tabela 6.13: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) – Conjunto III.

d [%]	Erro Médio [%]						Erro Máximo [%]					
	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC	A-g	B-g	C-g	AB	BC	AC
10–20	1.22	1.11	1.19	0.79	0.46	0.66	3.14	2.71	3.00	1.95	1.18	1.71
30–40	1.39	1.12	1.15	0.80	0.45	0.67	3.59	2.71	2.86	2.09	1.19	1.84
50	1.18	1.12	1.20	0.80	0.47	0.48	2.93	2.71	2.91	2.03	1.19	1.39
60–70	1.50	1.12	1.10	0.82	0.45	0.62	3.58	2.72	2.75	2.10	1.17	1.73
80–90	1.23	1.13	1.18	0.86	0.43	0.74	3.07	2.73	2.89	2.10	1.13	1.88

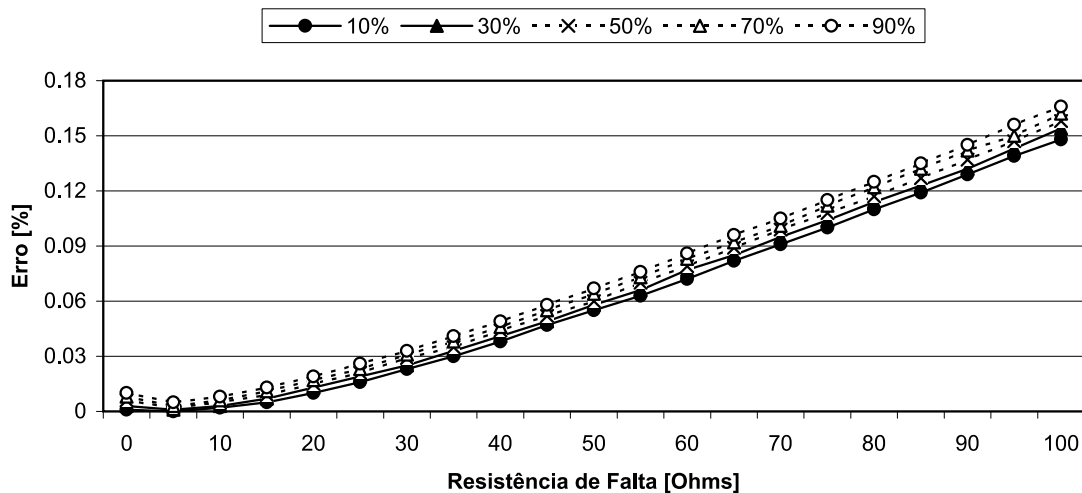


Figura 6.5: Resultados do Método de Choi *et al.* (2004; 2007) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto I

função da resistência e da distância da falta, respectivamente. Analogamente, as Tabelas 6.10 e 6.11 apresentam os resultados do Método de Choi *et al.* (2004; 2007) para as faltas do Conjunto II em função da resistência e da distância da falta, ao passo que as Tabelas 6.12 e 6.13 apresentam os resultados desta metodologia para as faltas do Conjunto III em função da resistência e da distância da falta. Assim, como no método analisado anteriormente, o Conjunto I representa as condições nas quais o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) foi proposto: em um sistema sem o efeito capacitivo. A metodologia de análise é análoga à realizada para o Método de Lee *et al.* (2004).

6.3.1 Influência da Resistência da Falta

Para analisar a influência da resistência de falta, R_F , considere inicialmente os resultados obtidos para as simulações do Conjunto I, apresentados na Tabela 6.8 em função da resistência de falta. Assim como nos resultados obtidos para o Método de Lee *et al.* (2004) é possível verificar que à medida que a resistência de falta aumenta, o erro também aumenta, independentemente do tipo de falta associado. Esta influência pode ser melhor visualizada através da Figura 6.5, que apresenta os resultados obtidos para faltas A-g em função da resistência de falta, considerando cinco locais diferentes de falta. Nesta figura fica evidente o crescimento do erro com o aumento da resistência de falta.

Da mesma forma, mesmo com valores elevados de R_F , da ordem de 100 Ω , os erros obtidos foram sempre muito pequenos, o que também está de acordo com obtidos em outros estudos (CHOI *et al.*, 2004, 2007; MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008), reforçados pela simplicidade da linha de distribuição simulada.

6.3.2 Influência da Distância da Falta

A influência da distância da falta no método em questão pode ser analisada através dos resultados apresentados na Tabela 6.9, que apresenta os resultados obtidos para o Conjunto I em função da distância da falta, considerando todos os valores de resistência de falta simulados. Assim como para o Método de Lee *et al.* (2004) verifica-se uma tendência de aumento do erro com o aumento da distância, fato melhor visualizado através da Figura 6.6, que apresenta os resultados para faltas A-g em função da distância da falta, considerando cinco resistências de falta diferentes. Nesta figura fica claro este aumento

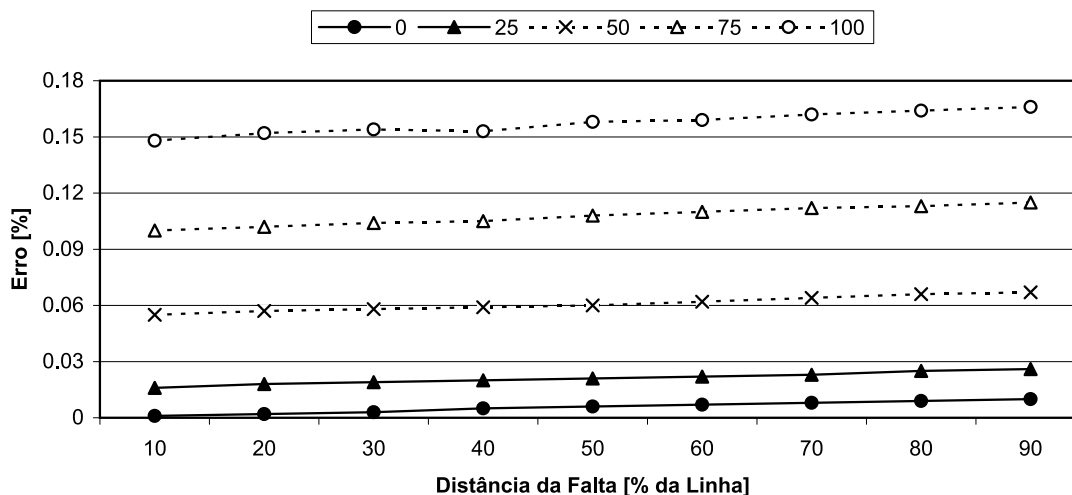


Figura 6.6: Resultados do Método de Choi *et al.* (2004; 2007) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto I

do erro com o aumento da distância da falta. Da mesma forma verifica-se que a influência da distância da falta é muito menor do que a influência da resistência da falta quando as Figuras 6.5 e 6.6 são comparadas.

6.3.3 Influência do Tipo da Falta

Em relação à influência do tipo da falta, considere os resultados apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9. Estas tabelas apresentam os resultados para diferentes tipos de falta, entretanto possuindo locais e resistências similares. Nota-se que os resultados obtidos tanto para as faltas fase-terra como para as faltas entre fases foram bastante similares, apesar das faltas fase-terra terem apresentado um erro um pouco superior. No entanto, ao serem modificadas as fases envolvidas nas faltas a mesma influência da metodologia de estimação fasorial empregada também foi verificado, como discutido na Seção 6.2.3.

6.3.4 Influência da Capacitância da Linha

Considere agora os resultados obtidos para os casos de faltas inseridos no Conjunto II. Os resultados obtidos para estas condições estão apresentados nas Tabelas 6.10 e 6.11 em função da resistência e da distância da falta, respectivamente.

Da mesma forma como observado anteriormente para o Método de Lee *et al.* (2004), a principal conclusão verificada é a de que o efeito capacitivo insere um erro significativo na localização de faltas através do Método de Choi *et al.* (2004; 2007). Este comportamento já era esperado, visto que o efeito capacitivo não é considerado no equacionamento realizado por Choi *et al.* (2004; 2007). Isto pode ser verificado através da comparação dos erros médios apresentados nas Tabelas 6.10 e 6.11 com os erros médios apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9. Nas simulações realizadas desconsiderando o efeito capacitivo (Conjunto I), o erro máximo geral obtido foi de 0,17% da extensão total da linha, ao passo que entre os casos onde este foi considerado, o erro aumentou para 4,07%. Este aumento aconteceu novamente para todos os tipos de faltas, independentemente das fases envolvidas nas mesmas.

Analogamente aos resultados obtidos com o Método de Lee *et al.* (2004), os erros observados para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) quando o efeito capacitivo da linha também é representado ainda é aceitável em termos práticos, sendo as conclusões relativas

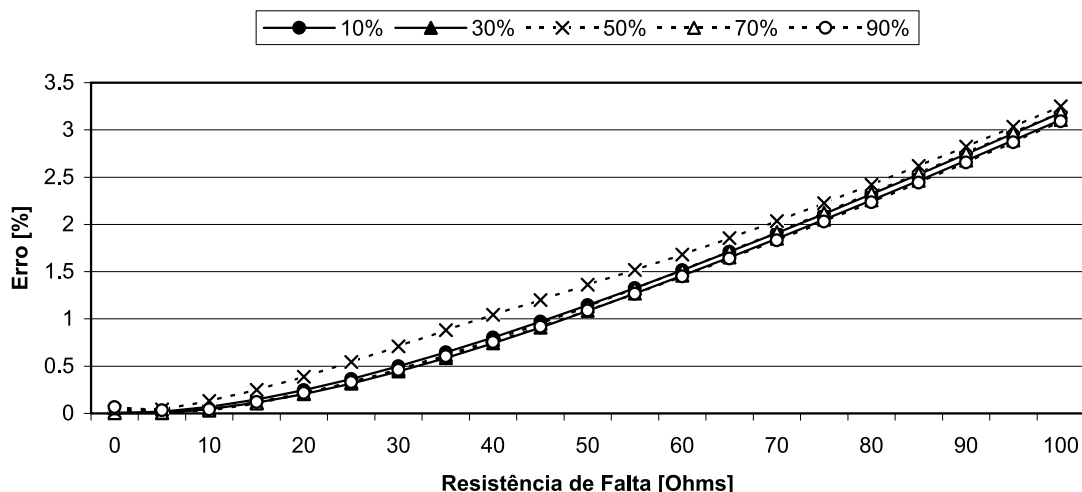


Figura 6.7: Resultados do Método de Choi *et al.* (2004; 2007) em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto II

ao sistema utilizado ainda válidas. Outras aplicações desta metodologia que foram testadas em sistemas com laterais e cargas intermediárias desprezando o efeito capacitivo da linha (CHOI *et al.*, 2004, 2007; MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008) apresentaram erros inferiores aos apresentados nesta dissertação, demonstrando que o efeito da capacitância da linha também é bastante significativo para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007), mesmo em linhas aéreas de distribuição.

Considere agora a Figura 6.7, que ilustra os resultados obtidos para as simulações de faltas A-g do Conjunto II em função da resistência de falta para cinco locais de falta distintos. Comparando esta com a Figura 6.5 é possível notar que a tendência de aumento do erro com o aumento da resistência de falta ainda acontece quando se considera o efeito capacitivo da linha nas simulações. O efeito é similar ao observado para o Método de Lee *et al.* (2004). Note que quando a resistência de falta é muito baixa, entre 0 e 10 Ω , o efeito capacitivo pouco influencia os erros obtidos pelo método estudado. Entretanto, à medida que a resistência de falta aumenta o erro tende a aumentar mais significativamente do que no caso em que o efeito capacitivo é desprezado nas simulações.

Em relação à influência da distância da falta, pode-se verificar uma certa mudança na sua tendência em relação às faltas do Conjunto I. Para analisar tal efeito, considere a Figura 6.8, que apresenta os resultados obtidos para as simulações de faltas A-g do Conjunto II em função da distância da falta para cinco resistências de falta distintas. O que antes era uma relação claramente linear, como ilustrado na Figura 6.6, agora torna-se não-linear. As curvas para diferentes resistências de falta, entretanto, apresentam todas a mesma tendência. Os maiores erros obtidos para cada R_F estão associados a faltas ocorridas em 80% da linha, sendo que em 90% da linha os resultados são alguns dos que possuem menor erro associado, o que mostra uma certa uniformidade nos erros encontrados apesar da aparente aleatoriedade, assim como observado no Método de Lee *et al.* (2004).

6.3.5 Influência do Desequilíbrio da Carga

Para analisar o efeito que o desequilíbrio da carga causa nos resultados obtidos através da metodologia analisada, considere os resultados apresentados nas Tabelas 6.12 e 6.13, onde os resultados das simulações do Conjunto III são apresentados respectivamente em função da resistência e do local da falta. É possível verificar que os resultados apresen-

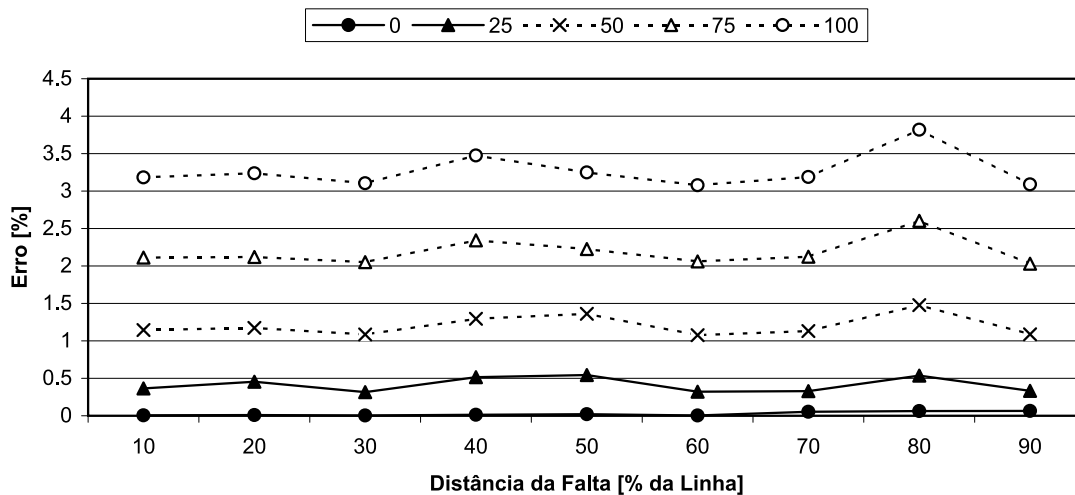


Figura 6.8: Resultados do Método de Choi *et al.* (2004; 2007) em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II

tados são bastante similares aos apresentados nas Tabelas 6.4 e 6.5. Entretanto, os erros médios e máximos apresentaram-se significativamente inferiores no caso desequilibrado, mostrando uma certa tendência de redução do erro com o desequilíbrio da carga. O único caso em que não houve tal redução foi para faltas AB. Além disso, a mesma tendência de aumento do erro com o aumento da resistência de falta foi observada, assim como no caso com cargas equilibradas. Em relação à influência da distância da falta, as conclusões são as mesmas: faltas em locais diferentes apresentam erros diferentes, considerando a mesma resistência de falta, no entanto, este comportamento não é linear, sofrendo aumentos e reduções locais do erro, assim como no caso equilibrado.

6.3.6 Análise Geral

A partir dos testes realizados é possível avaliar como seriam os resultados obtidos através da metodologia proposta por Choi *et al.* (2004; 2007) para um caso prático. Estes foram bastante similares aos resultados apresentados anteriormente pelo Método de Lee *et al.* (2004), tanto para as simulações realizadas sem capacitância como para as simulações realizadas considerando o efeito capacitivo. A capacitância da linha de distribuição do sistema estudado, apesar de praticamente desprezível, deteriora de forma significativa os resultados desta metodologia, sendo o seu papel o de potencializar a influência da resistência da falta. Novamente, fica evidente que a desconsideração do efeito capacitivo também não é uma aproximação adequada para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007). Além disso, o desequilíbrio da carga apresenta certa influência positiva nos resultados obtidos através desta metodologia.

6.4 Resultados – Desenvolvimentos Propostos

Para a avaliação dos desenvolvimentos propostos, seu desempenho foi analisado para as faltas correspondentes aos Conjuntos II e III. As faltas pertencentes ao Conjunto I não foram analisadas através dos desenvolvimentos propostos pois a desconsideração do efeito capacitivo na EGFT e na EGFF resultam no Método de Lee *et al.* (2004), como previamente observado. Os resultados foram obtidos para todos os tipos de falta, e os valores médios e máximos dos erros encontrados para as faltas pertencentes ao Conjunto

II estão apresentados nas Tabelas 6.14 e 6.15 em função da resistência e da distância da falta, respectivamente. Analogamente, as Tabelas 6.16 e 6.17 apresentam os resultados dos desenvolvimentos propostos para as faltas do Conjunto III tanto em função da resistência como da distância da falta. A análise dos resultados obtidos em ambos os conjuntos perante diferentes aspectos é apresentada em detalhes nas subseções a seguir.

6.4.1 Influência da Resistência da Falta

Para analisar a influência da resistência de falta, R_F , considere inicialmente os resultados obtidos para as simulações do Conjunto II, apresentados na Tabela 6.14 em função da resistência de falta. Analisando o erro médio para cada grupo de resistências é possível verificar que à medida que a resistência de falta aumenta, o erro médio também aumenta, independentemente do tipo de falta associado. Entretanto, apesar do erro médio apresentar-se crescente com o aumento resistência de falta, o aumento deste erro não apresenta uma relação linear com o aumento de R_F , como pode ser verificado através da Figura 6.9, que apresenta os resultados obtidos para faltas A-g em função da resistência de falta, considerando cinco locais diferentes de falta.

Como pode ser visualizado na Figura 6.9, a tendência de aumento do erro em função da resistência de falta apresenta-se distinto para locais de falta distintos. Esta diferença não ocorre somente para faltas monofásicas à terra como também para todos os tipos de faltas, como ilustrado nas Figuras 6.10, 6.11, e 6.12, que apresentam resultados para casos de faltas similares, respectivamente para faltas BC-g, BC e ABC-g. Note que na Figura 6.12 foram omitidos os resultados para faltas à 50% do comprimento da linha dado o seu grande erro em relação aos outros locais de falta, de forma que não era possível observar a variação, não uniforme, dos outros locais de falta em função da resistência de falta.

Em todos os casos a tendência é de aumento do erro com o aumento da resistência de falta. Esta tendência, entretanto não é uniforme. Na verdade é possível verificar que para resistência de falta nula o erro é normalmente maior do que para o caso com resistências de 5 Ω , e até 10 Ω em alguns casos. Nas faltas entre fases, ocorreram ainda situações onde o maior erro encontrado para uma dada distância de falta foi exatamente com resistência de falta nula, a saber, faltas a 70% e 90% da linha simulada. O mesmo ocorreu para faltas do tipo BC-g. Em contrapartida, os resultados para as faltas trifásicas à terra foram os que apresentaram maior uniformidade, sendo que a tendência de aumento do erro com o aumento da resistência de falta não pôde ser observada através da análise realizada. Além disso, este foi o tipo de falta com os menores erros médios observados.

6.4.2 Influência da Distância da Falta

A influência da distância da falta, quando da utilização dos desenvolvimentos propostos para a localização de faltas, pode ser analisada através dos resultados apresentados na Tabela 6.15, que apresenta os resultados obtidos para o Conjunto II em função da distância da falta considerando todos os valores de resistência de falta simulados. Através destes resultados não é possível verificar uma tendência de aumento do erro com o aumento da distância, como observado anteriormente nos resultados obtidos através das metodologias existentes de LDF em SDEE. Para visualizar melhor esta influência, considere as Figuras 6.13, 6.14, e 6.15, que apresentam os resultados em função da distância da falta respectivamente para faltas A-g, BC, e ABC-g, considerando cinco resistências de falta diferentes.

A Figura 6.13 ilustra que no caso das faltas A-g há uma tendência de aumento do erro com o aumento da distância. Este aumento, no entanto, apresenta uma elevada oscilação

Tabela 6.14: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto II.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04
15–25	0.07	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03
30–40	0.10	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.07	0.03	0.06	0.03
45–55	0.11	0.07	0.09	0.06	0.07	0.07	0.08	0.05	0.09	0.04
60–70	0.12	0.10	0.15	0.09	0.08	0.11	0.09	0.06	0.12	0.05
75–85	0.14	0.13	0.23	0.10	0.08	0.14	0.09	0.09	0.16	0.06
90–100	0.17	0.16	0.27	0.13	0.10	0.17	0.10	0.11	0.20	0.07

R_F [Ω]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.07	0.13	0.13	0.05	0.14	0.17	0.04	0.22	0.15	0.59
15–25	0.17	0.04	0.04	0.06	0.11	0.10	0.13	0.04	0.10	0.11
30–40	0.25	0.06	0.09	0.08	0.23	0.12	0.22	0.09	0.16	0.14
45–55	0.33	0.09	0.22	0.10	0.18	0.19	0.26	0.13	0.23	0.16
60–70	0.41	0.12	0.28	0.23	0.19	0.23	0.26	0.16	0.31	0.16
75–85	0.47	0.15	0.57	0.19	0.18	0.26	0.25	0.19	0.40	0.20
90–100	0.54	0.18	0.51	0.24	0.40	0.31	0.24	0.21	0.47	0.35

Tabela 6.15: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto II.

d [%]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	0.04	0.07	0.12	0.07	0.07	0.09	0.12	0.06	0.04	0.06
30–40	0.11	0.08	0.13	0.05	0.06	0.10	0.12	0.07	0.07	0.03
50	0.11	0.08	0.10	0.11	0.09	0.10	0.02	0.08	0.20	0.15
60–70	0.07	0.09	0.14	0.08	0.06	0.05	0.03	0.04	0.13	0.03
80–90	0.20	0.08	0.10	0.06	0.06	0.08	0.04	0.05	0.12	0.03

d [%]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	0.43	0.17	0.45	0.24	0.40	0.23	0.26	0.21	0.16	0.21
30–40	0.22	0.17	0.33	0.15	0.14	0.29	0.23	0.21	0.13	0.06
50	0.23	0.17	0.27	0.23	0.18	0.19	0.03	0.15	0.39	0.59
60–70	0.19	0.18	0.57	0.18	0.13	0.15	0.10	0.22	0.47	0.11
80–90	0.54	0.18	0.31	0.15	0.23	0.31	0.12	0.19	0.37	0.35

Tabela 6.16: Erros Percentuais em Função da Resistência de Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto III.

R_F [Ω]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04
15–25	0.07	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.05	0.03
30–40	0.09	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.02	0.14	0.04
45–55	0.11	0.07	0.10	0.06	0.06	0.08	0.08	0.02	0.23	0.05
60–70	0.12	0.09	0.16	0.08	0.07	0.11	0.11	0.02	0.32	0.06
75–85	0.14	0.11	0.25	0.10	0.07	0.14	0.14	0.03	0.39	0.08
90–100	0.16	0.14	0.31	0.12	0.09	0.18	0.18	0.03	0.46	0.09

R_F [Ω]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	0.07	0.14	0.13	0.05	0.14	0.16	0.05	0.22	0.15	0.31
15–25	0.17	0.03	0.05	0.05	0.11	0.10	0.15	0.06	0.09	0.11
30–40	0.25	0.06	0.10	0.08	0.24	0.13	0.19	0.07	0.18	0.13
45–55	0.31	0.12	0.29	0.10	0.17	0.20	0.27	0.05	0.27	0.14
60–70	0.38	0.11	0.29	0.30	0.17	0.24	0.34	0.04	0.40	0.17
75–85	0.45	0.13	0.60	0.20	0.15	0.28	0.40	0.04	0.46	0.22
90–100	0.51	0.16	0.53	0.25	0.35	0.33	0.47	0.04	0.59	0.31

Tabela 6.17: Erros Percentuais em Função da Distância da Falta para os Desenvolvimentos Propostos – Conjunto III.

d [%]	Erro Médio [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	0.03	0.06	0.13	0.07	0.07	0.09	0.14	0.01	0.24	0.07
30–40	0.10	0.07	0.15	0.05	0.06	0.11	0.14	0.02	0.24	0.04
50	0.15	0.07	0.11	0.09	0.03	0.10	0.04	0.04	0.21	0.12
60–70	0.07	0.08	0.14	0.07	0.07	0.05	0.06	0.03	0.23	0.03
80–90	0.19	0.08	0.11	0.06	0.05	0.09	0.05	0.04	0.23	0.04

d [%]	Erro Máximo [%]									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	0.23	0.15	0.45	0.25	0.35	0.24	0.40	0.02	0.59	0.23
30–40	0.21	0.15	0.36	0.13	0.15	0.31	0.47	0.03	0.53	0.08
50	0.26	0.15	0.29	0.18	0.07	0.21	0.18	0.07	0.44	0.31
60–70	0.18	0.15	0.60	0.30	0.14	0.18	0.35	0.22	0.55	0.12
80–90	0.51	0.16	0.34	0.16	0.24	0.33	0.22	0.19	0.46	0.31

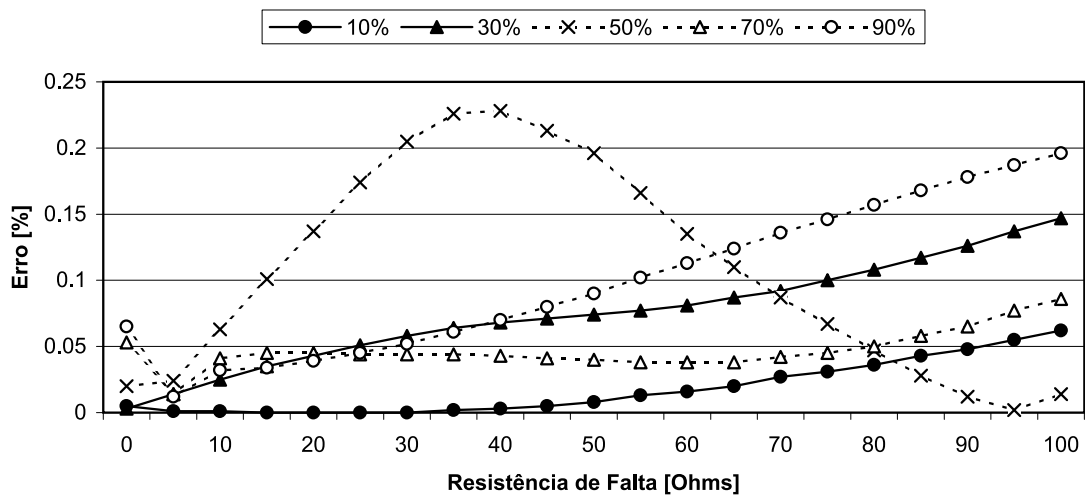


Figura 6.9: Resultados dos Desenvolvidos Propostos em função da Resistência de Falta para Falta A-g – Conjunto II

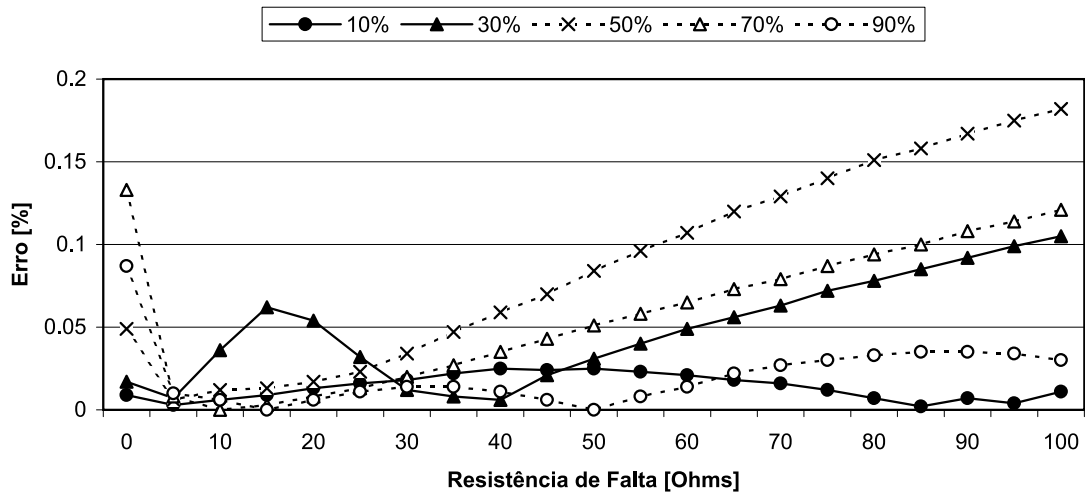


Figura 6.10: Resultados dos Desenvolvidos Propostos em função da Resistência de Falta para Falta BC-g – Conjunto II

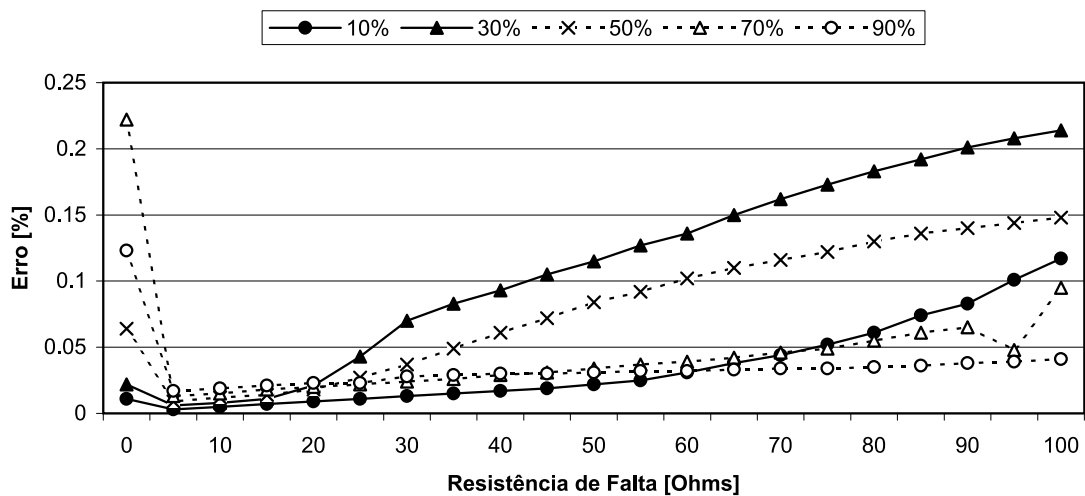


Figura 6.11: Resultados dos Desenvolvidos Propostos em função da Resistência de Falta para Falta BC – Conjunto II

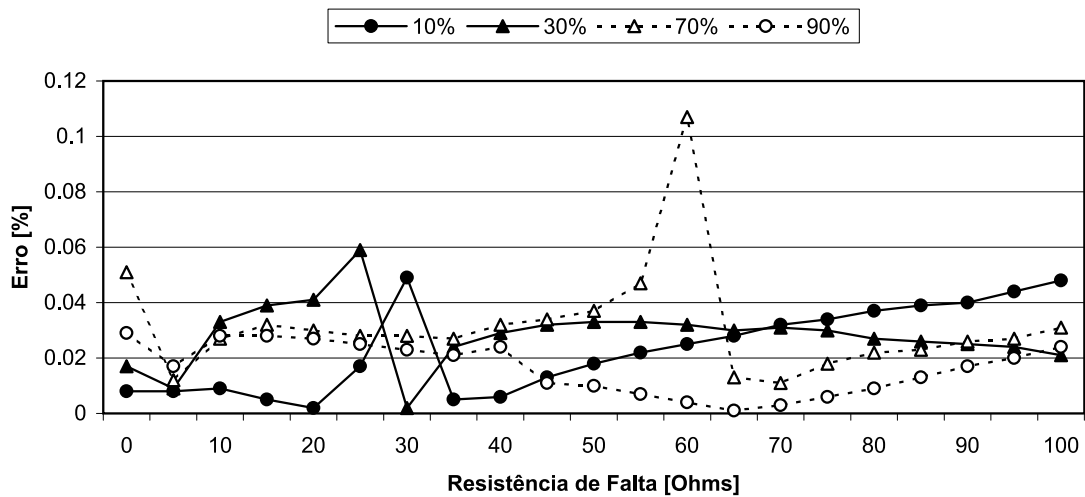


Figura 6.12: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas ABC-g – Conjunto II

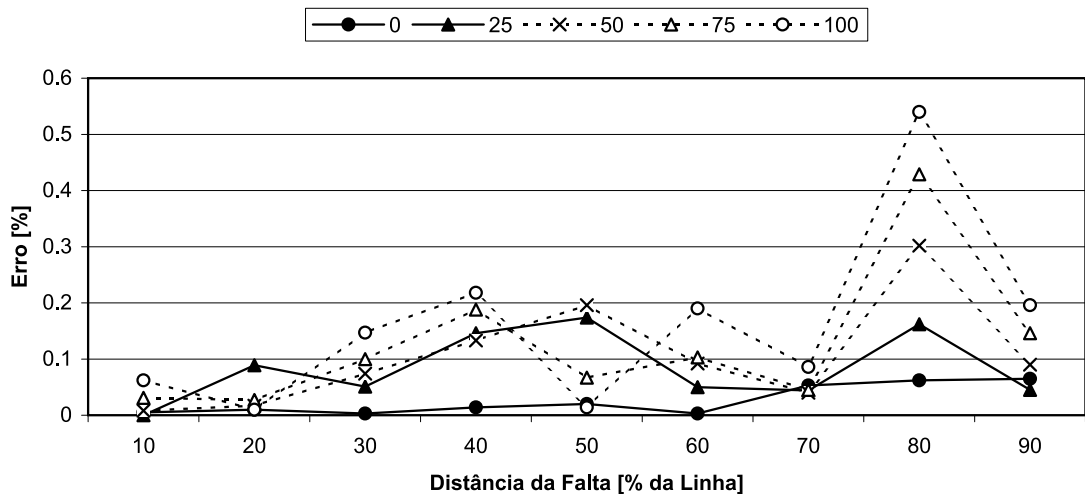


Figura 6.13: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto II

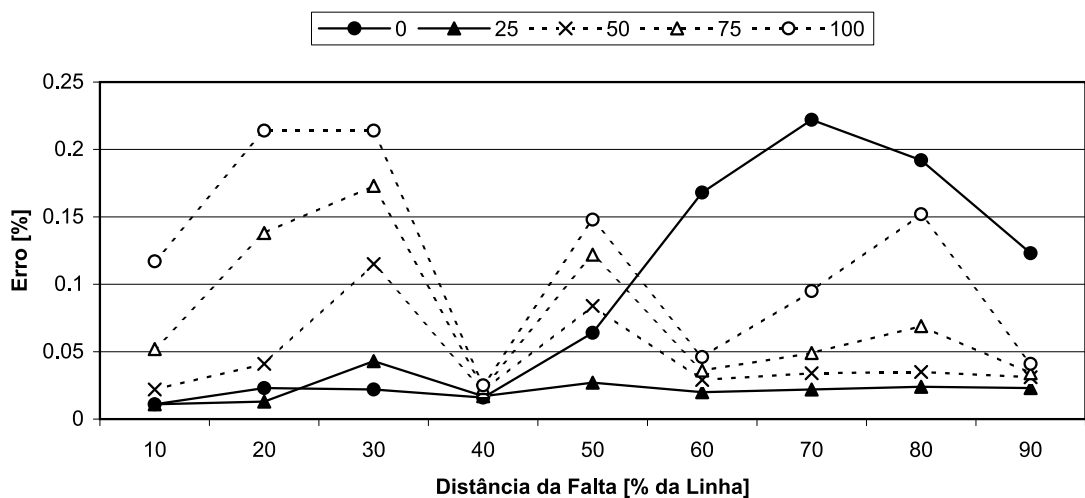


Figura 6.14: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas BC – Conjunto II

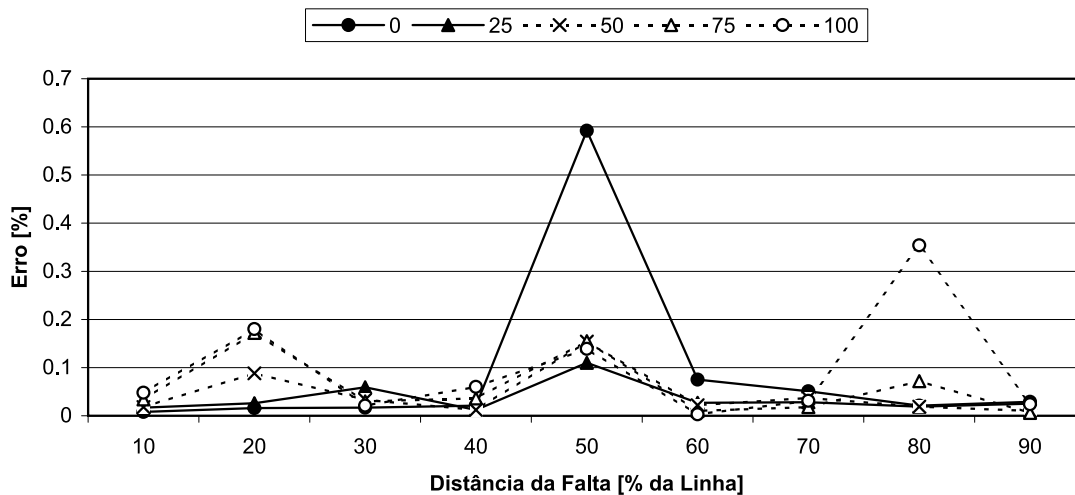


Figura 6.15: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas ABC-g – Conjunto II

entre erros altos e baixos. Já as Figuras 6.14, e 6.15 evidenciam uma característica interessante encontrada nas faltas BC e ABC-g. Nestes tipos de falta é possível observar que alguns pontos específicos apresentaram ou erros muito altos, ou erros muito baixos. No caso das faltas BC, em 40% e 90% da linha os erros foram os mais baixos para este tipo de falta, independentemente da resistência de falta simulada, ao passo que as distâncias intermediárias de 20%, 30%, 50%, 70% e 80% apresentaram os maiores erros, independentemente da resistência de falta associada. No caso das faltas trifásicas à terra as observações são bastante parecidas: erros elevados para faltas cuja distância representa 20%, 50% e 80% da linha, e erros baixos para faltas cuja distância representa 40%, 60% e 90% da linha.

Mesmo assim, a análise mostra que os locais de falta que apresentam os erros máximos e mínimos não necessariamente indicam uma tendência explícita da influência da distância da falta. Sendo assim fica claro que a uniformidade do erro é predominante em relação à distância da falta, apesar da influência do local da falta existir.

6.4.3 Influência do Tipo da Falta

Para analisar a influência do tipo da falta, considere os resultados apresentados nas Tabelas 6.14 e 6.15. Nestas tabelas são apresentados os resultados para diferentes tipos de falta, entretanto com locais e resistências de falta similares. Nota-se que os resultados obtidos para todos os tipos de falta foram bastante similares, apesar das faltas fase-terra terem apresentado um erro um pouco superior e as faltas trifásicas à terra terem apresentado um erro um pouco inferior aos demais tipos de falta. As discrepâncias, entretanto, não são significativas, sendo a ordem de grandeza dos erros médios e máximos bastante similar para os diferentes tipos de falta. Em relação às fases envolvidas na falta, não houveram diferenças significativas. Entretanto, dado que a metodologia de estimação fatorial utilizada neste caso foi a mesma utilizada pelas outras metodologias, as mesmas observações apresentadas na Seção 6.2.3 sobre estes erros ainda se aplicam a este caso.

6.4.4 Influência da Estimativa Inicial da Corrente de Falta

Uma das modificações propostas para fins de localização de faltas foi um método diferente para o cálculo da estimativa inicial da corrente de falta. Para analisar qual a

influência desta estimativa sobre o desempenho do algoritmo proposto, as simulações presentes no Conjunto II foram analisadas também através do algoritmo proposto com a estimativa inicial utilizada em (LEE et al., 2004), como descrito na Seção 2.5. Os resultados obtidos com ambas estimativas iniciais são exatamente os mesmos em todos os casos estudados. Logo, não há uma real melhoria no desempenho do algoritmo proposto em relação ao erro obtido, no que diz respeito à estimativa inicial da corrente de falta. No entanto, existe uma diferença no que diz respeito ao número necessário de iterações para a convergência do algoritmo.

Considere inicialmente somente o número necessário de iterações para a convergência obtido com a estimativa inicial da corrente de falta proposta. O número mínimo e máximo de iterações em função da resistência e da distância da falta estão respectivamente apresentados nas Tabelas 6.18 e 6.19. Note que à medida que a resistência de falta aumenta, aumenta também o número necessário de iterações, tanto em seu valor mínimo como em seu valor máximo, independentemente do tipo da falta. No que tange à distância da falta esta relação já não é a mesma, visto que as faltas que necessitaram um menor número de iterações (tanto máximo como mínimo) foram as que ocorreram exatamente na metade da linha simulada. Este comportamento já era esperado, visto que o ângulo da corrente de falta é estimado como se a falta ocorresse exatamente neste ponto.

Estas conclusões podem ser melhor visualizadas através das Figuras 6.16 e 6.17, que apresentam as iterações necessárias para a convergência das faltas B-g em função da resistência (para cinco distâncias diferentes da falta) e das faltas A-g em função da distância da falta (para cinco resistências de falta distintas), respectivamente. O tipo da falta, como pode ser observado nas Tabelas 6.18 e 6.19, contribui para a determinação do número necessário de iterações. De forma geral as faltas que convergem mais rapidamente são as faltas fase-fase e as faltas trifásicas à terra, ao passo que as faltas monofásicas à terra são as que convergem mais lentamente.

Considere agora a Figura 6.18, que ilustra o número de iterações em função da resistência de falta para faltas A-g ocorridas respectivamente a 10% e 50% da linha. Nesta figura, as linhas contínuas indicam as iterações necessárias utilizando a estimativa inicial tradicional, utilizada em (LEE et al., 2004), ao passo que as linhas tracejadas indicam as iterações necessárias utilizando a estimativa inicial proposta neste trabalho. Analisando esta figura é possível verificar que a estimativa inicial da corrente de falta proposta efetivamente reduz o número de iterações, especialmente para faltas com resistência mais elevada e ocorridas próximas à metade da linha. Entretanto, para faltas com resistência nula houveram casos em que a estimativa proposta resultou em um número maior de iterações, o que é explicado pelas considerações efetuadas para a determinação da estimativa inicial. Para tanto, é considerado que a resistência de falta é elevada, ou seja, que a corrente de falta é desprezível. Apesar disto, a diferença no número de iterações para estes casos de falta foi pouco significativa, não representando um aumento elevado no esforço computacional.

6.4.5 Influência do Desequilíbrio da Carga

Os resultados apresentados relativos às simulações do Conjunto II representam casos onde a carga equivalente do sistema é equilibrada. Os desenvolvimentos propostos foram também utilizados para as simulações do Conjunto III, onde a carga equivalente do sistema é desequilibrada. Os resultados obtidos para estas simulações estão apresentados nas Tabelas 6.16 e 6.17 em função da resistência e da distância da falta, respectivamente. De forma geral, é possível verificar que o desequilíbrio da carga possui uma influência

Tabela 6.18: Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Resistência de Falta para Falta A-g – Conjunto II.

R_F [Ω]	Número Mínimo de Iterações									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3
15–25	5	4	2	4	4	4	4	4	4	5
30–40	7	5	4	6	5	6	4	4	5	6
45–55	8	7	7	7	7	7	4	5	6	7
60–70	9	8	9	9	8	8	5	6	6	8
75–85	10	10	11	10	10	10	5	6	7	9
90–100	5	12	14	11	11	12	5	7	8	10

R_F [Ω]	Número Máximo de Iterações									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
0–10	7	7	7	7	7	7	6	6	6	7
15–25	10	10	10	9	10	10	7	7	7	9
30–40	13	12	12	12	12	12	8	9	9	11
45–55	16	15	15	14	14	14	9	10	10	13
60–70	20	18	19	16	17	17	10	11	11	15
75–85	25	22	22	19	20	20	11	12	12	16
90–100	31	26	27	22	23	24	12	12	13	18

Tabela 6.19: Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Distância da Falta para Falta A-g – Conjunto II.

d [%]	Número Mínimo de Iterações									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
30–40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
50	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3
60–70	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
80–90	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

d [%]	Número Máximo de Iterações									
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
10–20	29	24	26	21	22	23	12	12	13	18
30–40	28	23	24	20	21	22	11	12	12	17
50	10	14	16	13	13	13	5	7	8	10
60–70	29	24	25	21	21	22	11	12	12	17
80–90	31	26	27	22	23	24	12	12	13	18

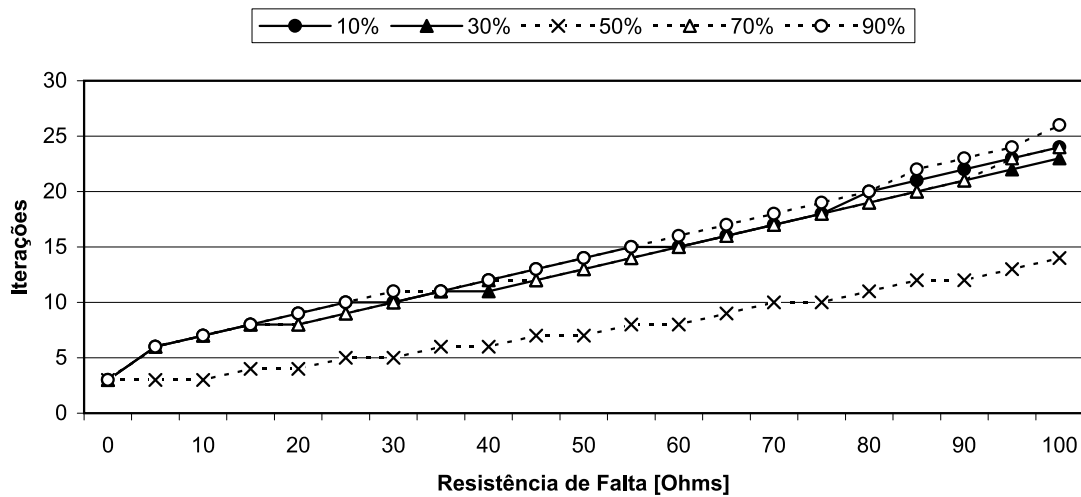


Figura 6.16: Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Resistência de Falta para Falta B-g – Conjunto II

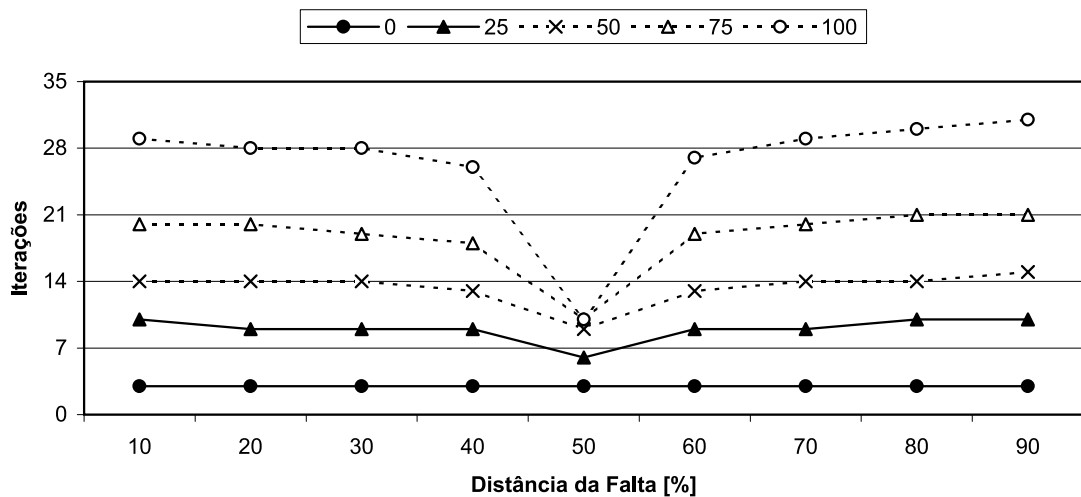


Figura 6.17: Número de Iterações Utilizando a Estimativa Inicial Proposta em função da Distância da Falta para Falta A-g – Conjunto II

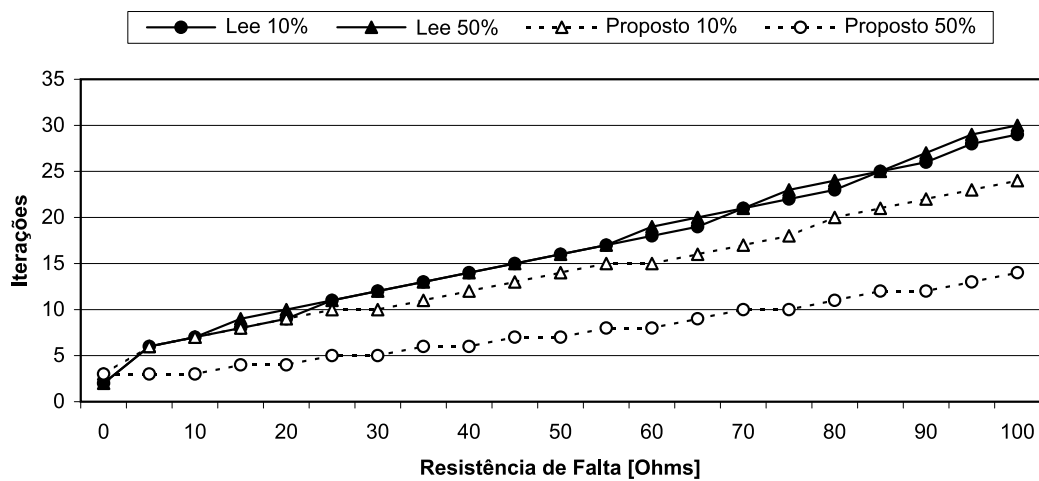


Figura 6.18: Comparação do Número de Iterações em função da Resistência de Falta para Falta A-g – Conjunto II

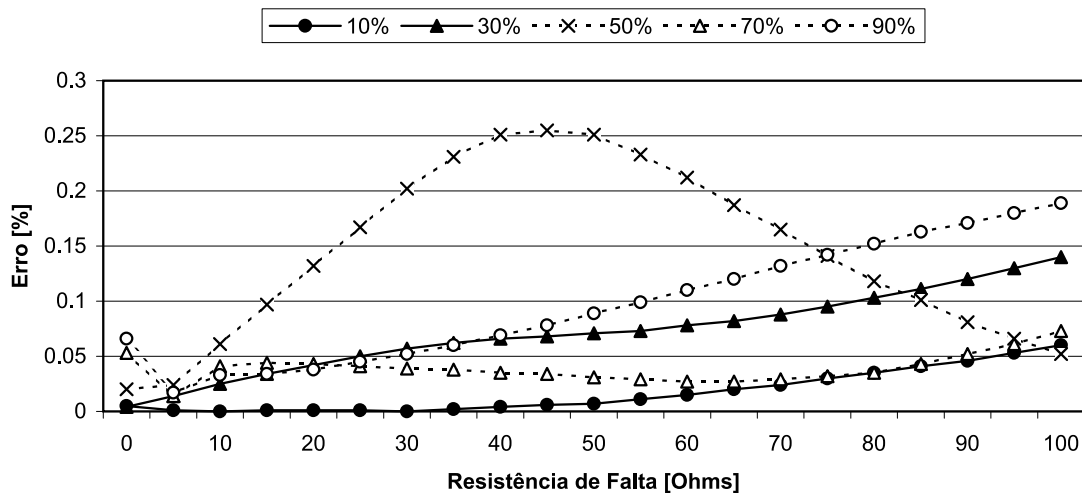


Figura 6.19: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Resistência de Falta para Faltas A-g – Conjunto III

pouco significativa nos resultados obtidos. Somente as faltas fase-fase apresentaram uma variação relevante do erro médio com o desequilíbrio da carga. No caso das faltas AC este erro foi maior com o sistema desequilibrado, ao passo que as faltas BC apresentaram melhores resultados para o mesmo caso.

Em relação às influências da resistência e da distância da falta, verifica-se através das referidas tabelas que estas não são modificadas. Para consolidar esta conclusão observe a Figura 6.19, que apresenta os resultados de LDF para as simulações de faltas A-g do Conjunto III em função da resistência de falta. Em comparação com a Figura 6.9, que apresenta uma relação semelhante para o caso das faltas do Conjunto II, verifica-se que não há uma mudança de tendência desta influência, sendo o padrão verificado anteriormente mantido para o caso o sistema com carga desequilibrada.

O mesmo ocorre quando as Figuras 6.20 e 6.21 são comparadas com as Figuras 6.13 e 6.15. As duas primeiras figuras apresentam os resultados para as faltas A-g e ABC-g do Conjunto III, ao passo que as duas últimas apresentam resultados similares para faltas do Conjunto II, todas em função da distância da falta. Nota-se que o desequilíbrio da carga não afetou significativamente a influência da distância da falta nos desenvolvimentos propostos para LDF.

6.4.6 Análise Geral

A partir dos testes realizados nas simulações do Conjunto II e do Conjunto III é possível avaliar como seriam os resultados obtidos através dos desenvolvimentos propostos para um caso prático. Os erros obtidos apresentam-se todos plausíveis para fins práticos, dado que nenhum dos casos resultou em um erro superior a 0,6% da linha, o que neste caso representa cerca de 12 metros. Dentro destes resultados é possível notar que a maior influência observada nos casos estudados foi a influência da resistência de falta, cujo aumento possui a tendência de elevar também o erro da estimativa do local da falta. Entretanto, esta influência é não linear, sendo somente um aumento do erro médio observado. Outro aspecto relevante diz respeito a estimativa inicial da corrente de falta, cuja nova proposta resulta em uma redução do esforço computacional de uma forma geral, reduzindo também a influência da resistência de falta neste esforço, especialmente para faltas localizadas fisicamente à metade da linha analisada.

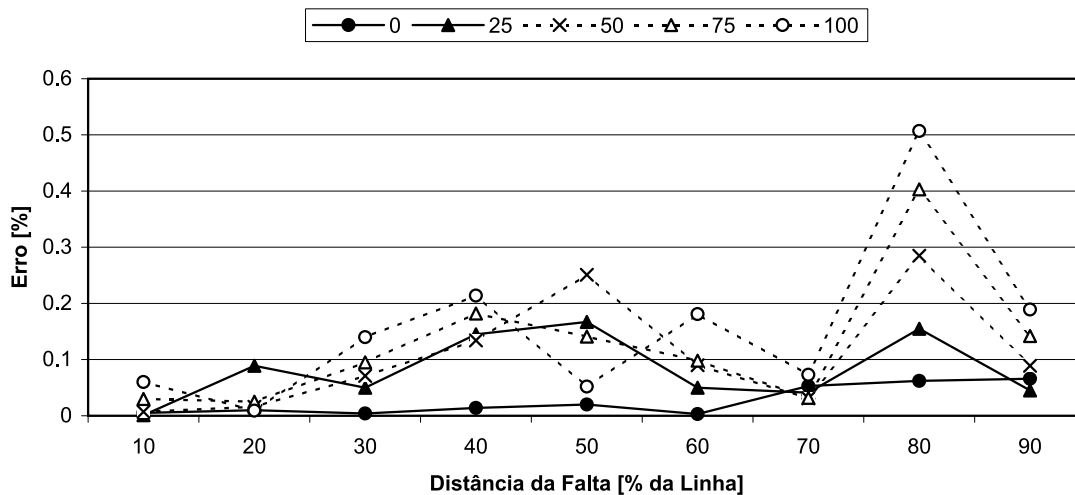


Figura 6.20: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas A-g – Conjunto III

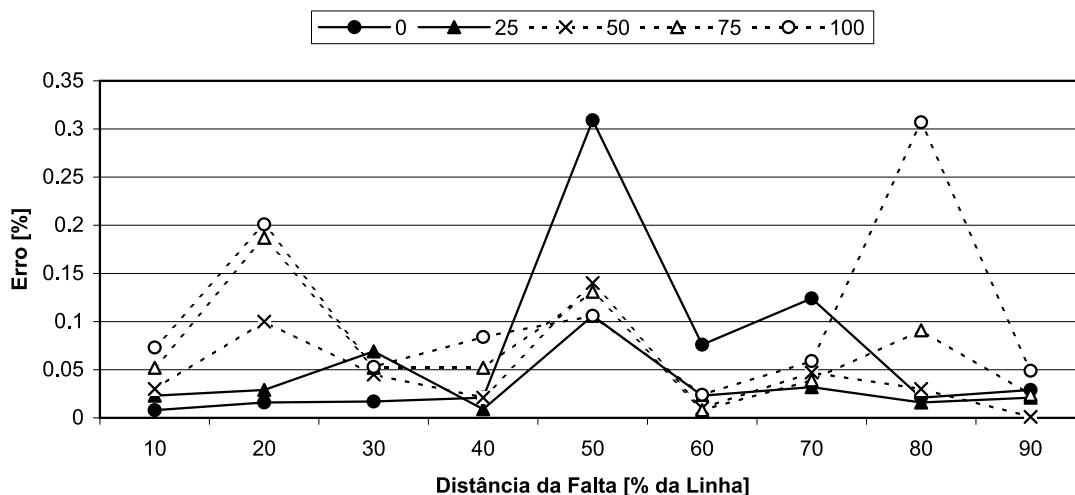


Figura 6.21: Resultados dos Desenvolvimentos Propostos em função da Distância da Falta para Faltas ABC-g – Conjunto III

6.5 Comparação das Metodologias

De forma a apresentar as reais vantagens dos desenvolvimentos propostos para a localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica, é importante analisar as diferenças apresentadas nos resultados obtidos com as duas metodologias existentes, Método de Lee *et al.* (2004) e Método de Choi *et al.* (2004; 2007), com os resultados obtidos através dos desenvolvimentos propostos. Nenhum resultado diferente será apresentado nesta Seção, apenas serão comparados os resultados previamente obtidos para as três metodologias, sempre considerando as simulações agregadas nos Conjuntos II e III, por serem os únicos conjuntos com resultados para as três abordagens de LDF e compreenderem os casos de falta onde o efeito capacitivo foi considerado na modelagem da linha para fins de simulação. Os erros mínimos, máximos e médios para cada metodologia e caso de falta presente no Conjunto II estão apresentados na Tabela 6.20, sintetizando os resultados apresentados neste Capítulo. Analogamente, a Tabela 6.21 apresenta estes erros para as faltas do Conjunto III.

Tabela 6.20: Resultados Comparativos para as Três Metodologias Avaliadas – Conjunto II

Método de Lee <i>et al.</i> (2004)										
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
Erro Mínimo [%]	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Erro Médio [%]	1.35	1.09	1.17	1.49	1.27	1.47	0.93	0.56	0.69	1.73
Erro Máximo [%]	3.83	2.65	3.09	3.93	3.23	3.75	2.41	1.43	2.07	4.50
Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007)										
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
Erro Mínimo [%]	0.00	0.01	0.01	–	–	–	0.00	0.00	0.00	–
Erro Médio [%]	1.35	1.62	1.47	–	–	–	0.80	0.47	0.65	–
Erro Máximo [%]	3.82	4.07	3.70	–	–	–	2.09	1.26	1.88	–
Desenvolvimentos Propostos										
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
Erro Mínimo [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Erro Médio [%]	0.10	0.08	0.12	0.07	0.06	0.08	0.07	0.06	0.10	0.05
Erro Máximo [%]	0.54	0.18	0.57	0.24	0.40	0.31	0.26	0.22	0.47	0.59

Tabela 6.21: Resultados Comparativos para as Três Metodologias Avaliadas – Conjunto III

Método de Lee <i>et al.</i> (2004)										
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
Erro Mínimo [%]	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Erro Médio [%]	1.31	1.13	1.15	1.51	1.27	1.44	0.97	0.59	0.86	1.72
Erro Máximo [%]	3.65	2.73	3.04	3.96	3.18	3.67	2.66	1.43	2.13	4.40
Método de Choi <i>et al.</i> (2004; 2007)										
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
Erro Mínimo [%]	0.00	0.00	0.00	–	–	–	0.00	0.00	0.00	–
Erro Médio [%]	1.32	1.12	1.16	–	–	–	0.82	0.45	0.65	–
Erro Máximo [%]	3.59	2.73	3.00	–	–	–	2.10	1.19	1.88	–
Desenvolvimentos Propostos										
	A-g	B-g	C-g	AB-g	BC-g	AC-g	AB	BC	AC	ABC-g
Erro Mínimo [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Erro Médio [%]	0.10	0.07	0.13	0.07	0.06	0.09	0.09	0.03	0.23	0.05
Erro Máximo [%]	0.51	0.16	0.60	0.30	0.35	0.33	0.47	0.22	0.59	0.31

De acordo com o resultados apresentados na Tabela 6.20 é possível verificar que os resultados obtidos através da utilização dos desenvolvimentos propostos proporciona uma redução considerável no erro obtido, tanto em valores médios como em valores máximos. Em relação ao Método de Lee *et al.* (2004), a redução no erro médio chegou a quase 1.7% no caso das faltas trifásicas à terra, ao passo que o erro máximo chegou a diminuir quase 4% para este mesmo tipo de falta. Já em comparação com o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) a diminuição no erro médio chegou a mais de 1.5% para as faltas B-g ao passo que o erro máximo chegou a diminuir 3.9% para este mesmo tipo de falta. Valores similares são encontrados quando compara-se os erros médios e máximos do caso desequilibrado, apresentados na Tabela 6.21. A redução do erro, no entanto, é um pouco menor para o Método de Choi *et al.* (2004; 2007), devido aos melhores resultados observados com o caso desequilibrado nesta metodologia.

De uma forma geral os menores erros encontrados nas três metodologias avaliadas são relativos às faltas entre fases, seja no caso equilibrado ou no caso com carga desequilibrada. Estas também foram as faltas que apresentaram a menor diferença nos resultados entre as três metodologias. Em comparação com o Método de Lee *et al.* (2004), o erro médio diminuiu 0.5% para faltas BC quando da utilização dos desenvolvimentos propostos com carregamento equilibrado, ao passo que o erro máximo diminuiu 1.2% nas mesmas condições. Já em comparação com o Método de Choi *et al.* (2004; 2007) a redução no erro médio chegou a 0.4% para as faltas BC, ao passo que o erro máximo chegou a diminuir 1.2% para este mesmo tipo de falta.

As Figuras 6.22 a 6.25 apresentam gráficos comparativos entre as três metodologias para faltas A-g, AB-g, AB e ABC-g, respectivamente, em função da resistência de falta, para faltas distantes de 40% do terminal local, no caso em que o sistema possui carga equilibrada. Através destas figuras fica nítida a significativa melhora nos resultados obtidos através dos desenvolvimentos propostos, independentemente do tipo de falta analisado. A mesma melhoria nos resultados também pode ser observada para os casos onde a carga é desequilibrada, como apresentado nas Figuras 6.26 a 6.29 para os mesmos casos de falta. Somente no caso de faltas fase-terra é que o Método de Choi *et al.* (CHOI *et al.*, 2004, 2007) obteve erros significativamente menores do que o Método de Lee *et al.* (LEE *et al.*, 2004), especialmente para resistências de falta mais elevadas, comparando os casos de carga equilibrada e desequilibrada.

Outro aspecto relevante levantado durante a análise dos resultados obtidos a partir dos desenvolvimentos propostos diz respeito às tendências do erro em função da distância e da resistência de falta. Como observado no Capítulo 3, as equações e algoritmos atualmente existentes (LEE *et al.*, 2004; SALIM *et al.*, 2008) são, na verdade, casos especiais da EGFT e da EGFF, quando o efeito capacitivo é desconsiderado. Entretanto, a tendência de aumento do erro com o aumento da distância e da resistência de falta anteriormente observada nestes casos especiais, passa a não ser mais evidente quando o efeito capacitivo é considerado. O erro em função da resistência e da distância da falta passam a ser mais uniformes, sendo que a tendência de aumento do erro depende não somente do local ou da resistência de falta em separado, mas sim de uma combinação de ambos.

É importante lembrar que o sistema utilizado para análise é um sistema de distribuição sem laterais ou cargas intermediárias, o que contribuiu para os ótimos resultados encontrados através dos desenvolvimentos propostos, apesar do efeito capacitivo ter sido representado na modelagem da linha. Entretanto, deve-se salientar que as metodologias propostas por Lee *et al.* (2004) e Choi *et al.* (2004; 2007) foram submetidas a análise neste mesmo sistema, resultando em erros muito maiores do que os observados nos sis-

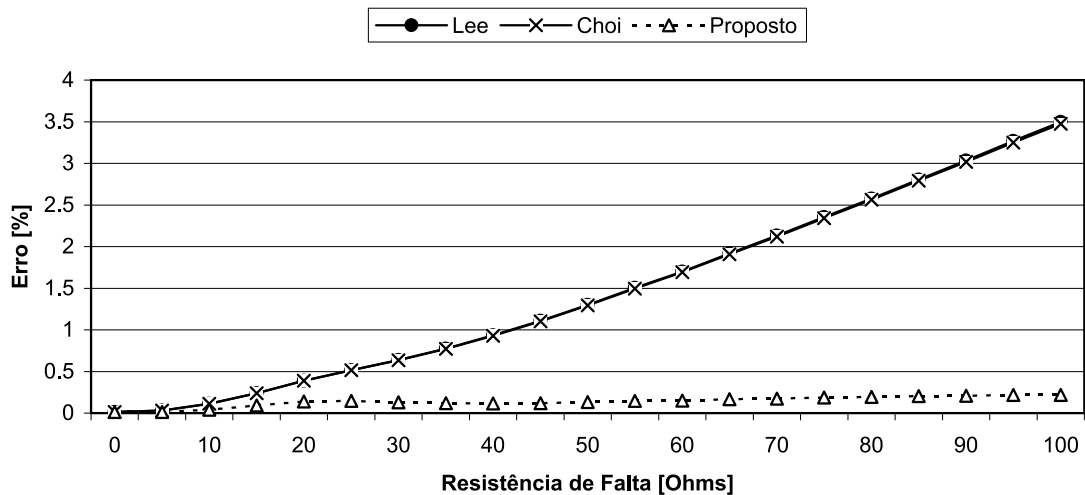


Figura 6.22: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Falta A-g a 40% do Terminal Local – Conjunto II

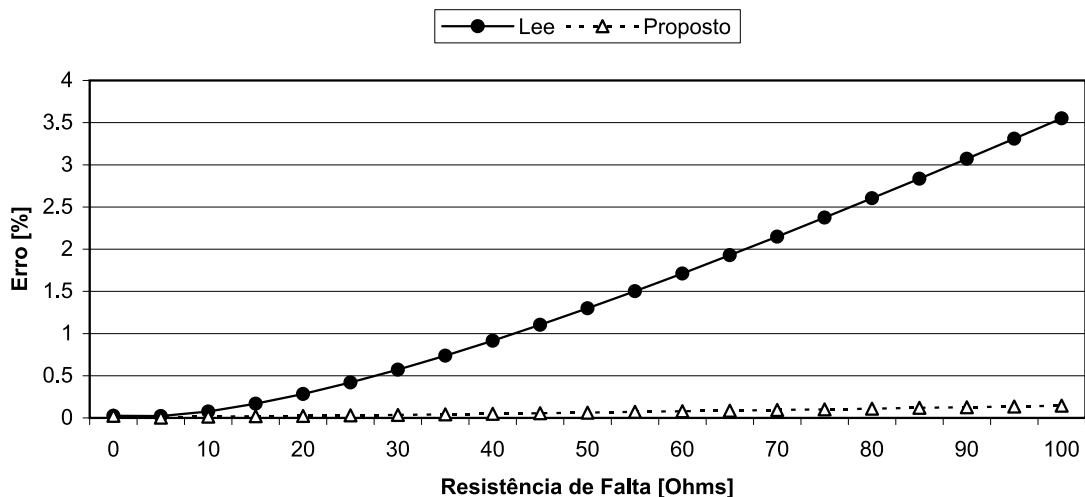


Figura 6.23: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Falta AB-g a 40% do Terminal Local – Conjunto II

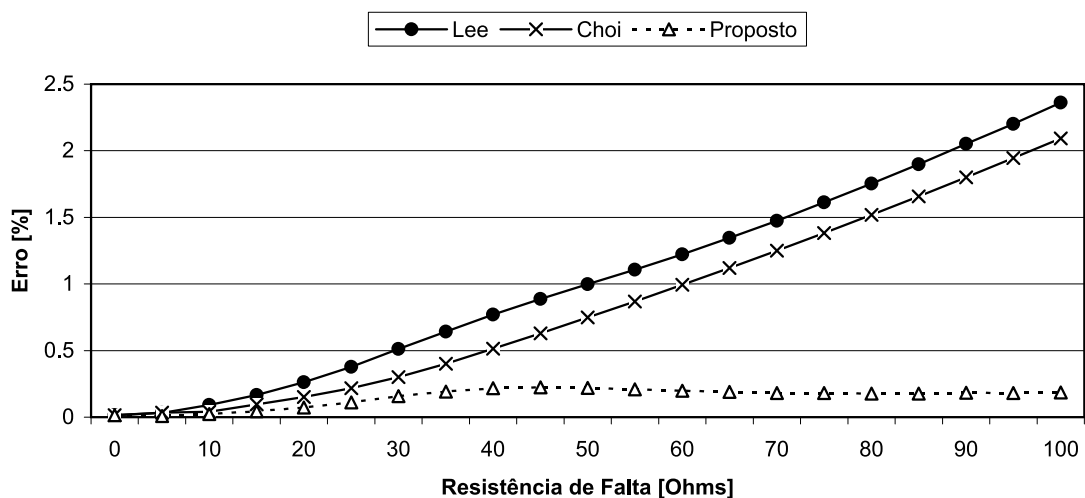


Figura 6.24: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Falta AB a 40% do Terminal Local – Conjunto II

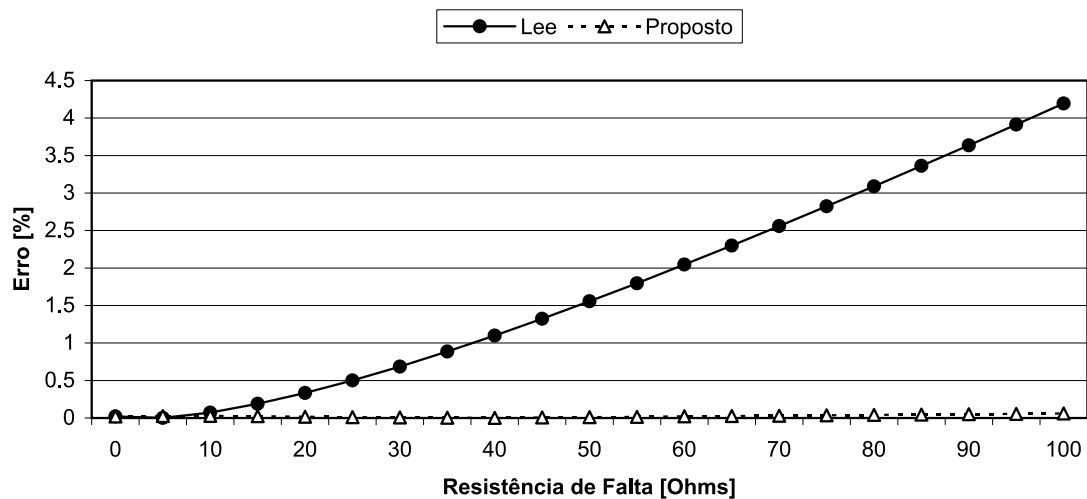


Figura 6.25: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas ABC-g a 40% do Terminal Local – Conjunto II

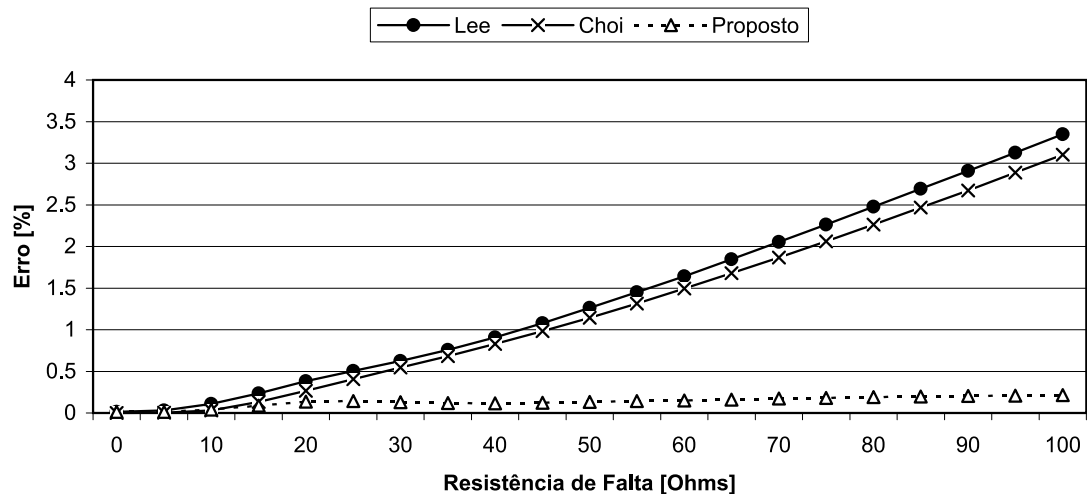


Figura 6.26: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas A-g a 40% do Terminal Local – Conjunto III

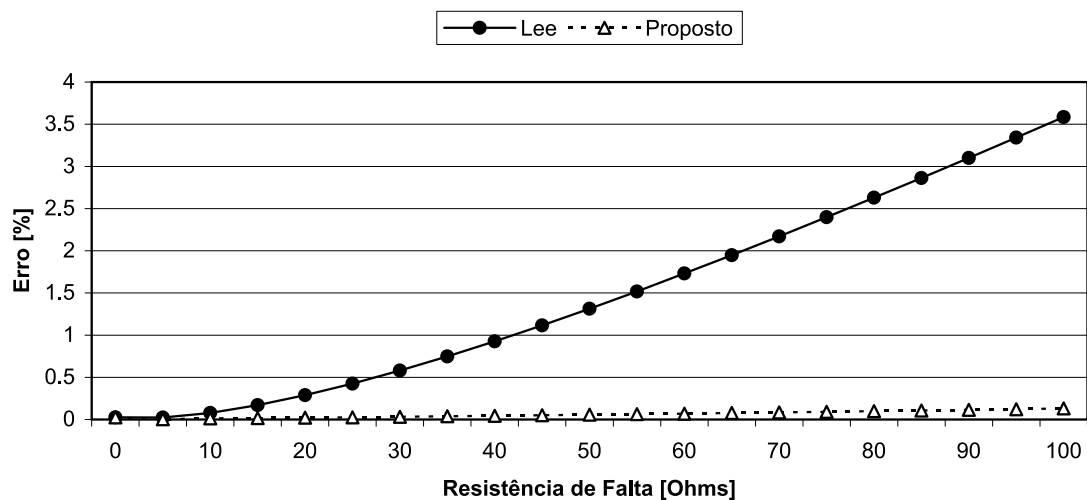


Figura 6.27: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas AB-g a 40% do Terminal Local – Conjunto III

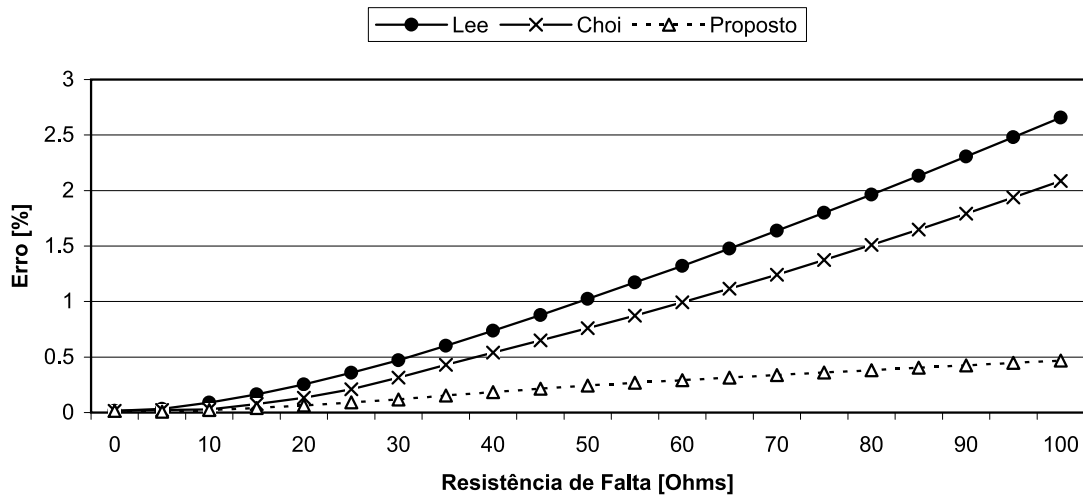


Figura 6.28: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas AB a 40% do Terminal Local – Conjunto III

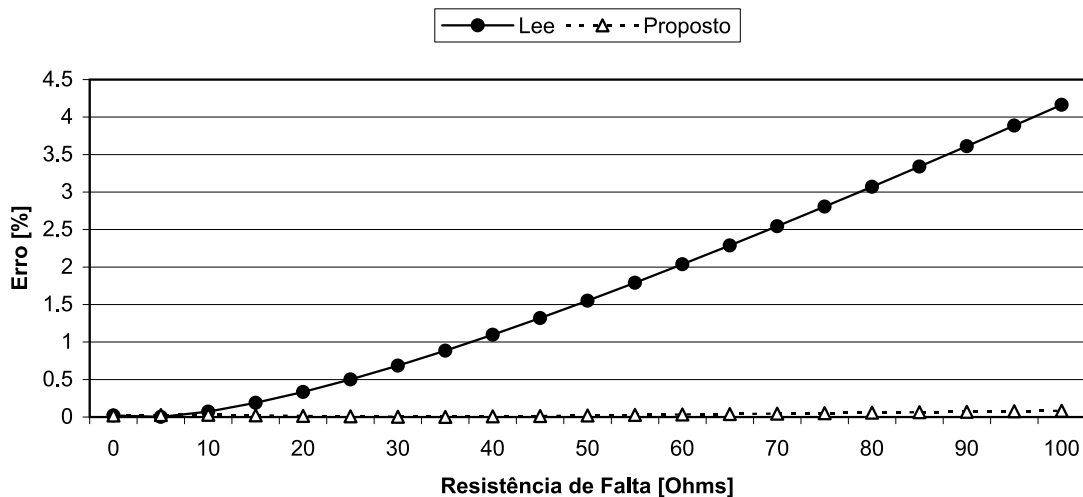


Figura 6.29: Resultados Comparativos em função da Resistência de Falta para Faltas ABC-g a 40% do Terminal Local – Conjunto III

temas em que a capacitância da linha é desprezada. Esta análise comparativa evidencia que o desempenho dos desenvolvimentos propostos é superior ao desempenho das referidas metodologias em sistemas de distribuição de uma forma geral, desde que os sistemas equivalentes sejam calculados da mesma forma. Isto porque os resultados apresentados no presente capítulo mostraram a grande influência do efeito capacitivo nas metodologias analisadas, mesmo em um sistema aéreo de distribuição de energia elétrica.

7 CONCLUSÕES

A localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica vem recebendo atenção especial nos últimos anos devido à necessidade crescente de aumento da qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores. Diversas metodologias foram desenvolvidas para tanto e a escolha da mais adequada depende do sistema a ser analisado e do montante de investimento disponível para tanto. Localizadores de faltas que utilizam a análise das ondas viajantes para a solução o problema dependem de sistemas de medição altamente eficientes, pois necessitam de medições de tensão e/ou corrente em alta frequência para tanto, tornando o investimento mais elevado. Já metodologias que utilizam medidas em mais de um terminal do sistema elétrico necessitam de um sistema de comunicação entre os elementos localizadores de faltas, o que também encarece a implementação prática das mesmas. As metodologias fundamentadas na impedância aparente que utilizam medidas em somente um terminal são atrativas exatamente por não necessitarem de tais investimentos, reduzindo o custo de implementação e a manutenção do sistema de localização de faltas.

Esta dissertação teve como foco contribuir para o desenvolvimento destas metodologias através da consideração da capacitância das linhas de distribuição, efeito nunca antes considerado nas metodologias específicas para a localização de faltas fundamentadas na impedância para sistemas de distribuição. Para tanto, foi utilizado como modelo um circuito π trifásico para a linha de distribuição, sendo o equacionamento realizado totalmente em componentes de fase. Este equacionamento resultou em duas equações distintas: uma para as faltas à terra, a EGFT, e outra para as faltas entre fases, a EGFF. Mostrou-se também que estas equações foram equações generalizadas para linhas modeladas considerando e desconsiderando o efeito capacitivo, visto que equacionamentos previamente existentes constituem-se de casos particulares das equações desenvolvidas. Estas equações, entretanto, constituem-se de polinômios de segunda ordem em x , a distância da falta ao terminal local.

Dado o formato destas equações foi realizada uma análise das mesmas do ponto de vista matemático, físico e numérico, visando a determinação de qual das soluções é a correta, baseada na natureza das soluções possíveis. A partir desta análise as seguintes conclusões puderam ser observadas:

- A natureza das soluções, tanto da EGFT como da EGFF, é altamente dependente da relação entre o ângulo da impedância série da linha e o ângulo da impedância da carga;
- A solução fisicamente correta de ambas as equações pode ser determinada de acordo com o sinal de α_1 , o coeficiente do termo linear de cada uma delas.

As equações desenvolvidas ainda foram inseridas em um algoritmo modificado para a localização de faltas, tomando como base as metodologias existentes de localização de faltas. Neste algoritmo o local da falta é calculado a partir de uma estimativa da corrente de falta, que por sua vez é iterativamente atualizada tendo-se como base a impedância do circuito à jusante da falta. A estimativa inicial proposta para a corrente de falta garante que o ângulo da mesma seja melhor na medida em que a resistência de falta aumenta, e o local se aproxima da metade da linha analisada.

Todos os desenvolvimentos propostos foram submetidos a diversos testes, realizados a partir de simulações computacionais de faltas em um sistema de distribuição de energia elétrica sem a presença de laterais ou cargas intermediárias. Estes mesmos testes foram realizados em outras duas metodologias que compõem o estado da arte em localização de faltas para a classe de sistemas analisados. A partir destes testes, diversas conclusões puderam ser observadas:

- As metodologias propostas por Lee *et al.* (2004) e Choi *et al.* (2004; 2007), que compõem o estado da arte em localização de faltas para estes sistemas, sofrem grande influência da capacitância da linha. O efeito da capacitância da linha nestas metodologias é o de potencializar o aumento do erro com o aumento da resistência de falta;
- A capacitância presente nas linhas dos sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica, mesmo pequena, contribui significativamente para o erro nas metodologias de localização de faltas que compõem o estado da arte;
- O equacionamento proposto, juntamente com o algoritmo adequado para a consideração do efeito capacitivo, mostrou-se altamente eficiente na localização de faltas em linhas cujo efeito capacitivo é considerado;
- Comparando-se os resultados obtidos entre as metodologias que compõem o estado da arte no tópico estudado e os desenvolvimentos propostos, verificou-se uma melhora significativa nos resultados, o que mostra o potencial que o equacionamento proposto possui para maiores desenvolvimentos posteriores;
- A estimativa inicial proposta para a corrente de falta proporcionou uma convergência mais rápida do algoritmo proposto, reduzindo o esforço computacional do mesmo e contribuindo para a rapidez do algoritmo.

É interessante notar que todas as análises apresentadas nesta dissertação foram realizadas considerando um sistema composto por um gerador, um trecho de linha, e uma carga. Na verdade, a carga utilizada nestas análises pode ser entendida como um sistema equivalente passivo, localizado na primeira lateral ou carga intermediária de uma linha muito mais extensa do sistema de distribuição. As conclusões referentes à análise da EGFT e da EGFF apresentam-se genéricas o suficiente para que esta consideração seja plausível. O mesmo pode ser dito da análise comparativa dos desenvolvimentos propostos com os Métodos de Lee *et al.* (2004) e Choi *et al.* (2004; 2007), desde que o sistema equivalente passivo represente corretamente o restante do sistema à jusante deste ponto do sistema.

Baseando-se no desempenho obtido pelos desenvolvimentos propostos em relação aos algoritmos existentes de localização de faltas, é possível concluir que os desenvolvimentos propostos apresentam-se promissores para a localização de faltas em sistemas de distribuição. A consideração do efeito capacitivo foi realizada e mostrou-se necessária para um bom desempenho prático dos localizadores de faltas fundamentados na impedância.

7.1 Trabalhos Futuros

Não obstante o ótimo desempenho apresentado pelo conjunto dos desenvolvimentos propostos (equações e algoritmo), este trabalho não abrangeu toda a gama de configurações de sistemas de distribuição de energia elétrica, na medida em que diversos aspectos referentes aos mesmos fugiam do escopo desta dissertação. Como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta área, são propostas as seguintes questões:

- Avaliação do desempenho dos desenvolvimentos propostos em um sistema de distribuição subterrâneo, para a observação da influência da capacitância nos mesmos;
- Análise da localização de faltas através de simulações considerando erros nos dados da linha, bem como nas medidas de tensão e corrente, para avaliação da robustez e desempenho dos desenvolvimentos propostos;
- Desenvolvimento de uma forma eficiente e robusta de equivalência de laterais e cargas intermediárias;
- Utilização desta metodologia de equivalência de redes para a localização de faltas em sistemas de distribuição com laterais e cargas intermediárias;
- Consideração da variação das cargas através de uma nova metodologia ou através de métodos existentes para tanto;
- Adição da não-linearidade das faltas, oriunda de arcos elétricos, para a obtenção de um método de localização de faltas robusto perante faltas não-lineares.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL N° 24**. Brasília, DF, 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL N° 75**. Brasília, DF, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL N° 24**. Brasília, DF, 2004.

AIEE COMMITTEE REPORT. Bibliography and Summary of Fault Location Methods. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III, Power Apparatus and Systems**, New York, NY, v.74, n.3, p.1423–1428, Fev. 1955.

ANDERSON, P. M. **Analysis of Faulted Power Systems**. New York, NY: IEEE Press, 1995.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems**. New York, NY: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000. 543p.

BOLLEN, M. H. J.; ZHANG, L. D. Different Methods for Classification of Three-Phase Unbalanced Voltage Dips Due to Faults. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, Suíça, v.66, n.1, p.56–69, Jul. 2003.

BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transients Program: ATP-EMTP**. Portland, OR, 2007.

CASTRO, C.; BUNCH, J.; TOPKA, T. Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-99, n.2, p.549–557, 1980.

CHOI, M.-S.; LEE, S.-J.; LEE, D.-S.; JIN, B.-G. A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.19, n.1, p.35–41, Jan. 2004.

CHOI, M.-S.; LEE, S.-J.; LIM, S.-I.; LEE, D.-S.; YANG, X. A Direct Three-Phase Circuit Analysis-Based Fault Location for Line-to-Line Fault. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.22, n.4, p.2541–2547, Oct. 2007.

DAS, R. **Determining the Location of Faults in Distribution Systems**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canadá.

DAS, R.; SACHDEV, M.; SIDHU, T. A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2000, Seattle, WA. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 2000. v.1, p.443–448.

DECKMANN, S.; PIZZOLANTE, A.; MONTICELLI, A.; STOTT, B.; ALSAC, O. Studies on Power System Load Flow Equivalencing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-99, n.6, p.2301–2310, Nov./Dec. 1980.

DECKMANN, S.; PIZZOLANTE, A.; MONTICELLI, A.; STOTT, B.; ALSAC, O. Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-99, n.6, p.2292–2300, Nov./Dec. 1980.

DEVELOPMENT COORDINATION GROUP. **Electromagnetic Transient Program: EMTP-RV**. Montreal, Canadá, 2006.

DOMMEL, H. W. **ATP Rule Book**. Buenos Aires: CAUE – Comité Argentino de Usuarios de EMTP-ATP, 2002.

KERSTING, W. H. Radial Distribution Test Feeders. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus, OH. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 2001. v.2, p.908–912.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2002. 314p. (The Electric Power Engineering Series).

LEE, S.-J.; CHOI, M.-S.; KANG, S.-H.; JIN, B.-G.; LEE, D.-S.; AHN, B.-S.; YOON, N.-S.; KIM, H.-Y.; WEE, S.-B. An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.19, n.2, p.524–532, April 2004.

LIN, Y.-H.; LIU, C.-W. A New DFT-based Phasor Computation Algorithm for Transmission Line Digital Protection. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA PACIFIC., 2002, Yokohama, Japão. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 2002. v.3, p.1733–1737.

MAHSEREDJIAN, J.; DEWHURST, C. **Using EMTP**. Canadá: Hydro-Québec/IREQ, 2005.

MARTI, L. Simulation of Transients in Underground Cables With Frequency-Dependent Modal Transformation Matrices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.3, n.3, p.1099–1110, 1988.

MATLAB. **The Language of Technical Computing**. [S.l.]: The Mathworks, 2002.

MELIPOULOS, A.; MELIPOULOS, A.; KENNEDY, J.; NUCCI, C.; BORGHETTI, A.; CONTAXIS, G. Power Distribution Practices in USA and Europe: impact on power quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 8., 1998, Atenas, Grécia. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 1998. v.1, p.24–29.

MONTICELLI, A.; DECKMANN, S.; GARCIA, A.; STOTT, B. Real-Time External Equivalents for Static Security Analysis. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-98, n.2, p.498–508, March 1979.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

MORA-FLÒREZ, J.; MELÉNDEZ, J.; CARRILLO-CAICEDO, G. Comparison of Impedance Based Fault Location Methods for Power Distribution Systems. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, Suíça, v.78, n.4, p.657–666, Abr. 2008.

MORETO, M. **Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia. Uma Metodologia Baseada em redes Neurais Artificiais**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

NOVOSEL, D.; HART, D.; HU, Y.; MYLLYMAKI, J. **System for Locating Faults and Estimating Fault Resistance in Distribution Networks with Tapped Loads – US Patent N. 5839093**. Vaasa, Finlândia: ABB Transmit Oy, 1998.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**. Baldock, Hertfordshire, Inglaterra: Research Studies Press, 1988. 289p.

RAPPAPORT, E.; MOHLA, D. C. **IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems**. Piscataway, NJ: IEEE Industry Applications Society, 2007. 215 p. (IEEE Std. 142–2007).

ROYTMAN, L.; THOMAS, B.; TRUTT, F.; SWAMY, M. Direct Fault Location in Electrical Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-101, n.10, p.4049–4054, 1982.

SAHA, M. M.; DAS, R.; VERHO, P.; NOVOSEL, D. Review of fault location techniques for distribution systems. In: POWER SYSTEMS AND COMMUNICATIONS INFRASTRUCTURES FOR THE FUTURE, 2002, Beijing, China. **Proceedings...** Calgary, Canadá: ACTA Press, 2002.

SALIM, R. H.; RESENER, M.; FILOMENA, A. D.; OLIVEIRA, K. R. C. de; BRETAS, A. S. Extended Fault Location Formulation for Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, 2008. (Aceito para Publicação Futura).

SRINIVASAN, K.; ST.-JACQUES, A. A New Fault Location Algorithm for Radial Transmission Lines with Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.4, n.3, p.1676–1682, 1989.

STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. Fault Location Methods for Overhead Lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III, Power Apparatus and Systems**, New York, NY, v.76, n.3, p.518–529, Abr. 1957.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part 1 – Fourier Transformation Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-100, n.3, p.1316–1323, 1981.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J.; UEMURA, K.; SAKAGUCHI, T. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part 2 – Laplace Transform Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-101, n.3, p.564–573, 1982a.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAUR, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-101, n.8, p.2892–2898, Aug. 1982b.

WU, F. F.; MONTICELLI, A. Critical Review of External Network Modelling for on-line security analysis. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Lausanne, Suíça, v.5, n.4, p.222–235, Out. 1983.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.12, n.2, p.801–809, April 1997.

ZIMMERMAN, K.; NOVOSEL, D. **IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines**. Piscataway, NJ: IEEE Power Engineering Society, 2005. 36 p. (IEEE Std. C37.114-2004).

APÊNDICE A ESTIMATIVA DE R_F PARA POSSÍVEIS SOLUÇÕES COMPLEXAS DA EGFT MONOFÁSICA

É possível estimar um valor de resistência de falta para o qual as soluções da EGFT monofásica serão reais e iguais. Este valor estimado de R_F é também um valor próximo da região onde as soluções da EGFT podem apresentar natureza complexa. Com base nesta estimativa é possível prever aproximadamente para quais valores de R_F a EGFT pode apresentar soluções complexas, quando da existência de erros de medição, modelagem ou estimação de parâmetros.

Para tanto, considere (4.13), que representa o valor de x quando as raízes são reais e iguais. Este é o ponto onde $\alpha_1^2 = 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0$. Considerando que a falta ocorre nos terminais do alimentador, pode-se escrever que

$$-\frac{\alpha_1}{2 \cdot \alpha_2} = 0, \quad (\text{A.1})$$

que para o caso monofásico resulta em

$$\frac{|N_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle N_k - \angle I_{F_k})}{|M_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle M_k - \angle I_{F_k})} = 0, \quad (\text{A.2})$$

ou seja:

$$|N_k| |I_{F_k}| \text{sen}(\angle N_k - \angle I_{F_k}) = 0. \quad (\text{A.3})$$

Como $|N_k| \cdot |I_{F_k}| \neq 0$, tem-se que

$$\text{sen}(\angle N_k - \angle I_{F_k}) = 0, \quad (\text{A.4})$$

” impondo que

$$\angle N_k - \angle I_{F_k} = 0. \quad (\text{A.5})$$

Substituindo (A.5) em (4.29), obtém-se

$$\angle R/X - \phi + \arctan\left(\frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F}\right) = 0, \quad (\text{A.6})$$

ou seja:

$$\tan(\phi - \angle R/X) = \frac{X_{\text{Load}}}{R_{\text{Load}} + R_F}. \quad (\text{A.7})$$

Explicitando R_F resulta em:

$$R_F = \frac{X_{\text{Load}}}{\tan(\phi - \angle R/X)} - R_{\text{Load}} \quad (\text{A.8})$$

Através de (A.8) pode-se estimar a resistência de falta na fase k para a qual as raízes assumem soluções reais e iguais, que fica próxima à região onde as soluções são complexas conjugadas. Deve-se notar, no entanto, que (A.8) foi obtida para faltas próximas ao terminal local de um alimentador, e também considera todas as aproximações realizadas na obtenção de (4.29).

Note que a estimativa de R_F obtida em (A.8) baseia-se somente em valores de regime permanente do sistema: a carga e o ângulo da impedância série da linha. Isto significa que a estimativa de R_F independe da ocorrência da falta e pode ser obtida antes da ocorrência da mesma.

APÊNDICE B DESCRIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS UTILIZADOS

B.1 Sistema I

O diagrama unifilar do Sistema I está ilustrado na Figura B.1. Este sistema consiste em um sistema de distribuição trifásico subterrâneo, e corresponde a uma parte do sistema IEEE 13 barras (KERSTING, 2001). Os cabos subterrâneos são do tipo neutro concêntrico AWG 250(37x), e estão dispostos como ilustrado na Figura B.2, onde $D = 0,1524$ m e $h = 1,016$ m. A distância total da linha de distribuição é de 2 km. A seguir estão listadas outras informações relevantes dos cabos utilizados:

- Diâmetro sobre o isolante: 2,692 cm
- Diâmetro externo: 3,277 cm
- Capacidade de corrente: 260 A

A partir das Equações de Carson e da Redução de Kron (KERSTING, 2002), calcula-se a matriz impedância de linha, em $[\Omega/\text{km}]$. Considerando a geometria e característica dos cabos deste sistema, a matriz impedância de linha do sistema resulta em:

$$Z_{\text{LineI}} = \begin{bmatrix} 0.16724 + j \cdot 0.05661 & 0.01144 + j \cdot 0.00389 & 0.00672 + j \cdot 0.00108 \\ 0.01144 + j \cdot 0.00389 & 0.16343 + j \cdot 0.05420 & 0.01148 + j \cdot 0.00391 \\ 0.00672 + j \cdot 0.00108 & 0.01148 + j \cdot 0.00391 & 0.16720 + j \cdot 0.05658 \end{bmatrix}. \quad (\text{B.1})$$

O transformador do sistema é do tipo $\Delta - Yg$, 115/24,9 kV, possui 5 MVA de potência nominal e impedância:

$$Z_{\text{TrI}} = 0.01 + j \cdot 0.08 \text{ [pu]}. \quad (\text{B.2})$$

Este sistema foi simulado com dois carregamentos distintos, a saber:



Figura B.1: Diagrama unifilar do Sistema I.

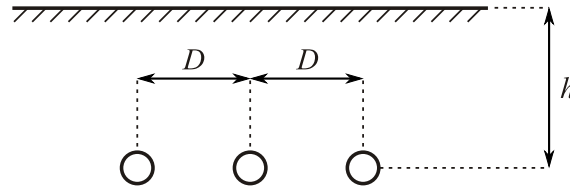


Figura B.2: Disposição geométrica dos cabos subterrâneos do Sistema I.

- *Carregamento I*: É o carregamento nominal do sistema, equilibrado e modelado como uma impedância constante igual a:

$$Z_{\text{Load}} = 62 + j \cdot 36 \approx 71,6 \angle 26,6^\circ \quad [\Omega] \quad (\text{B.3})$$

por fase.

- *Carregamento II*: Equilibrado e modelado como uma impedância constante igual a:

$$Z_{\text{Load}} = 69 + j \cdot 20 \approx 71,8 \angle 16,2^\circ \quad [\Omega] \quad (\text{B.4})$$

por fase.

Este sistema foi modelado no software EMTP-RV da DCG ([DEVELOPMENT COORDINATION GROUP, 2006](#)), onde todas as simulações foram realizadas com um passo de integração de $1 \mu\text{s}$. Os seguintes modelos foram utilizados:

Gerador Fonte de tensão ideal, trifásica, e equilibrada em relação à fase.

Transformador Banco trifásico de transformadores monofásicos em Δ -Yg, considerando a saturação e o lado de alta tensão adiantado de 30° em relação ao lado de baixa tensão.

Carga Impedância constante RL em série, conectada em Yg.

Cabos Subterrâneos Cabo subterrâneo considerando a natureza distribuída dos parâmetros, bem como a sua dependência com a frequência. Neste modelo, a matriz de transformação modal também é tratada como dependente da frequência ([MARTI, 1988](#)).

O modelo do cabo subterrâneo utilizou-se de uma escala logarítmica em frequência, com o cálculo dos parâmetros realizado em 10 pontos a cada década, abrangendo 8 décadas, iniciando de $f_{\text{mín}} = 0,06 \text{ Hz}$. A condutividade da terra foi considerada de $30 \Omega\text{m}$, e sua permeabilidade relativa unitária. A linha foi dividida em 10 partes, cada uma correspondendo a 200 metros de distância, de forma a obter um número maior de locais de falta para simulação.

B.2 Sistema II

O diagrama unifilar do Sistema II está ilustrado na Figura B.3. Este sistema consiste em um sistema de distribuição trifásico aéreo que corresponde a um sistema equivalente ao do sistema IEEE 13 barras ([KERSTING, 2001](#)). Neste equivalente foi considerado o primeiro trecho de linha da subestação até a primeira ramificação do sistema, sendo que as cargas foram mantidas iguais a do Sistema I. Como será visto mais adiante, foram considerados

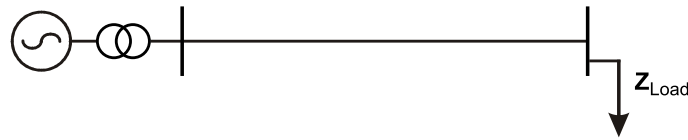


Figura B.3: Diagrama unifilar do Sistema II.

dois casos de carregamento. As linhas aéreas são do tipo ACSR 556,500 26/7, e estão dispostas como ilustrado na Figura B.4. A distância total da linha de distribuição foi considerada igual a 2 km.

A partir das Equações de Carson (KERSTING, 2002) é possível calcular a matriz impedância de linha, em $[\Omega/\text{km}]$. Considerando a geometria e característica das linhas deste sistema, a matriz impedância de linha é igual a

$$Z_{\text{LineII}} = \begin{bmatrix} 0.2166 + j \cdot 0.6362 & 0.0975 + j \cdot 0.3136 & 0.0987 + j \cdot 0.2647 \\ 0.0975 + j \cdot 0.3136 & 0.2109 + j \cdot 0.6549 & 0.0959 + j \cdot 0.2406 \\ 0.0987 + j \cdot 0.2647 & 0.0959 + j \cdot 0.2406 & 0.2134 + j \cdot 0.6467 \end{bmatrix} [\Omega/\text{km}] , \quad (\text{B.5})$$

ao passo que a matriz de capacitâncias da linha é igual a

$$Y_{\text{LineII}} = j \cdot \begin{bmatrix} 3.9374 & -1.2474 & -0.7872 \\ -1.2474 & 3.7248 & -0.4636 \\ -0.7872 & -0.4636 & 3.5241 \end{bmatrix} [\mu\text{S}/\text{km}] . \quad (\text{B.6})$$

O transformador do sistema é do tipo $\Delta - Y_g$, 115/24,9 kV e possui uma impedância total de

$$Z_{\text{TrII}} = 0.01 + j \cdot 0.08 \text{ [pu]} . \quad (\text{B.7})$$

Este sistema foi simulado com dois carregamentos diferentes, a saber:

- *Carregamento I*: É o carregamento nominal do sistema, equilibrado e modelado como uma impedância constante igual a:

$$Z_{\text{Load}} = 62 + j \cdot 36 \approx 71,6 \angle 26,6^\circ [\Omega] \quad (\text{B.8})$$

por fase.

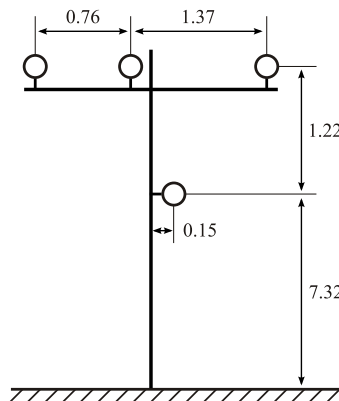


Figura B.4: Disposição geométrica das Linhas Aéreas do Sistema II (distâncias em metros).

- *Carregamento II*: Desequilibrado e modelado como uma impedância constante igual a:

$$Z_{\text{Load}} = \begin{bmatrix} 62 + j \cdot 36 & 0 & 0 \\ 0 & 71 + j \cdot 34 & 0 \\ 0 & 0 & 55 + j \cdot 34 \end{bmatrix} [\Omega]. \quad (\text{B.9})$$

Este sistema foi modelado no software ATP/EMTP da BPA ([BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007](#)), onde todas as simulações foram realizadas com um passo de integração de $65.1 \mu\text{s}$. Os seguintes modelos foram utilizados:

Gerador Fonte de tensão ideal, trifásica, e equilibrada em relação à fase.

Transformador Banco trifásico de transformadores monofásicos em Δ -Yg, considerando a saturação e o lado de alta tensão adiantado de 30° em relação ao lado de baixa tensão.

Carga Impedância constante RL em série, conectada em Yg.

Linhas Aéreas A matrizes impedância e capacitância da linha foram divididas em 10 circuitos π em cascata, representando a natureza distribuída dos parâmetros da linha na frequência nominal do sistema (60 Hz).

APÊNDICE C DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS DE SUPORTE IMPLEMENTADOS

C.1 F-Sim – Ferramenta Automática de Simulação de Falhas para ATP e EMTP-RV

A simulação de transitórios eletromagnéticos possui aplicação em diversas metodologias de trabalho nas diferentes áreas de estudo relativas aos sistemas eletroenergéticos. Em grande parte, isto se deve à grande complexidade existente na análise de tais sistemas, sendo esta complexidade reduzida através do uso de simulações computacionais. Atualmente, a simulação de transitórios eletromagnéticos possui grande aplicação tanto na área de pesquisa como na área de operação e planejamento de sistemas eletroenergéticos.

Muitas vezes ainda é necessário analisar diversos casos de falta diferentes, variando parâmetros como a resistência, o tipo e o local da falta, bem como os instantes em que a mesma ocorre e se extingue, no caso de faltas temporárias. Isto é o que acontece na presente dissertação de mestrado. Sendo assim, uma nova ferramenta foi desenvolvida para automatizar a simulação destes diversos casos de falta nos softwares ATP/EMTP e EMTP-RV, através de uma interface em console para o sistema operacional Windows®. Esta ferramenta, chamada F-Sim e programada através da linguagem C++, torna possível a simulação automática dos casos de falta pré-selecionados pelo usuário. Os parâmetros plausíveis de variação são:

- Tipo da falta (Fase-Terra, Fase-Fase Terra, Fase-Fase, Trifásica);
- Resistência de falta;
- Local da falta;
- Instante de ocorrência da falta;
- Instante de extinção da falta (para faltas temporárias).

A determinação dos casos a serem simulados é executada pelo usuário, através de uma interface simples executada no *prompt* do Windows®. Após escolher os tipos, resistências, locais e instantes de chaveamentos da falta, a ferramenta executa as simulações, variando todos os parâmetros determinados pelo usuário. Além de determinar os casos de falta a serem analisados, ao usuário ainda é permitido escolher quais os tipos de arquivo que deseja manter após as simulações: cartões de entrada do ATP ou EMTP-RV (*.atp e *.net, respectivamente), resultados das simulações no formato padrão do ATP ou EMTP-RV (*.pl4 e *.mda, respectivamente) ou ainda arquivos com resultados de simulações no formato MATLAB® (*.mat), no caso do ATP. Para simulações automáticas no

software EMTP-RV, uma rotina adicional para o MATLAB[®] foi criada com o intuito de automatizar a conversão dos arquivos resultantes da simulação.

Como entrada, o F-Sim utiliza o mesmo cartão utilizado pelos softwares de simulação de transitórios eletromagnéticos. O cartão de entrada definido pelo usuário não necessita representar a falta, mas somente o sistema em que se deseja executar as diferentes simulações. Este cartão serve como um cartão base, onde as informações das faltas (chaves e resistências) serão inseridas pela ferramenta desenvolvida. A partir deste cartão-base, os cartões de entrada referentes aos diferentes casos de falta são criados, deixando ao usuário a possibilidade de manter estes cartões após as simulações.

A ferramenta desenvolvida basicamente lê o cartão de entrada que representa o sistema em regime permanente e cria novos cartões sistematicamente, inserindo as informações da falta nestes novos cartões. Para tanto, é utilizada a linguagem de programação específica de cada um dos softwares de simulação (DOMMEL, 2002; MAHSEREDJIAN; DEWHURST, 2005). Esta inserção automática ainda é realizada de forma que a própria corrente de falta seja automaticamente medida, retornando todos os parâmetros necessários para a análise numérica das raízes. A cada novo cartão criado, uma nova simulação é realizada, e os seus resultados são guardados em um diretório específico.

C.2 Estimação de fasores

A metodologia proposta de localização de faltas foi avaliada através da utilização de simulações de faltas em programas de transitórios eletromagnéticos. A saída destes programas é um sinal senoidal no domínio do tempo, tanto para valores de tensão como para valores de corrente. Como toda a análise realizada para localização de faltas utiliza a teoria fasorial, os sinais provenientes da simulação das faltas foram processados de forma que fasores fossem obtidos a partir dos sinais no domínio do tempo. Para tanto, alguns aspectos foram considerados, de forma que as estimações dos fasores na frequência fundamental (objetos de trabalho) fossem as mais realistas possíveis.

Os sinais analisados correspondem aos sinais durante os períodos transitório e subtransitório da falta, ou seja, correspondente aos primeiros ciclos após a falta. Neste período, o estado do sistema ainda não é de regime permanente, e há a presença de uma componente DC exponencialmente decrescente no sinal analisado. Esta componente DC surge durante chaveamentos em circuitos RL , e seu valor diminui em função da constante de tempo do circuito, dada pela relação entre R e L ¹. A presença da componente DC é comum em faltas sólidas ou de baixa impedância em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

A componente DC pode apresentar valores significativos durante vários ciclos da frequência fundamental (LIN; LIU, 2002). Um filtro simples de Fourier pode ser utilizado na estimação de fasores devido a sua simplicidade e capacidade de rejeitar harmônicas indesejadas. No entanto, sua performance é degradada devido a perda da periodicidade do sinal na presença da componente DC, resultando em erros na estimação dos fasores e podendo levar o sistema de proteção a atuar erroneamente bem como prejudicar o cálculo da distância de falta (LIN; LIU, 2002; PHADKE; THORP, 1988; MORETO, 2005).

Em função disto, para as análises numéricas realizadas neste trabalho, foi utilizado um filtro de Fourier modificado, visando a eliminação da componente DC decrescente dos sinais faltosos. O algoritmo utilizado, apresentado em (LIN; LIU, 2002), consiste na estimação da constante de tempo do termo exponencial decrescente, e posterior com-

¹Quanto mais resistivo for o circuito RL , mais rápido é o decaimento da exponencial.

pensação do mesmo. Este procedimento é realizado através do cálculo de três fasores consecutivos na frequência fundamental do sistema.

Considere um sinal no domínio de tempo discreto, $y[k]$. Matematicamente a transformada discreta de Fourier (DFT) deste sinal é dada por:

$$Y_{r,n} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} y[k+r] \cdot e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (\text{C.1})$$

onde

$Y_{r,n}$	Fasor estimado da n -ésima harmônica
r	Amostra inicial do sinal
n	Ordem da harmônica ($n = 1, 2, 3, \dots$)
N	Número de pontos por ciclo do sinal na frequência fundamental
k	Número da amostra

A partir de (C.1) pode-se provar que o fasor estimado com compensação da componente DC decrescente é dado por (LIN; LIU, 2002):

$$\hat{Y}_{r,n} = \frac{d \cdot Y_{r,n} - Y_{r+1,n}}{d - a_n} \quad (\text{C.2})$$

onde

$$a_n = e^{j\frac{2\pi n}{N}} \quad (\text{C.3})$$

$$d = \frac{a_1 \cdot Y_{r+1,1} - Y_{r+2,1}}{a_1 \cdot Y_{r,1} - Y_{r+1,1}}. \quad (\text{C.4})$$

Analisando (C.2) a (C.4), verifica-se que o algoritmo de estimação fasorial efetivamente estima três fasores subsequentes através da DFT. A partir destas três estimativas, o parâmetro d é calculado, de onde pode-se então, por fim, calcular o fasor estimado com a compensação da exponencial decrescente. Este algoritmo de estimação fasorial é chamado de DFT Estendida (LIN; LIU, 2002).