

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

CESAR AUGUSTO OROZCO HENAO

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO ATIVOS:
METODOLOGIA ANALÍTICA ADAPTATIVA BASEADA NA
ESTIMATIVA DA IMPEDÂNCIA APARENTE**

Porto Alegre

2016

CESAR AUGUSTO OROZCO HENAO

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO ATIVOS:
METODOLOGIA ANALÍTICA ADAPTATIVA BASEADA NA
ESTIMATIVA DA IMPEDÂNCIA APARENTE**

Tese de doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia – Sistemas de Potência

ORIENTADOR: Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2016

CESAR AUGUSTO OROZCO HENAO

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO ATIVOS:
METODOLOGIA ANALÍTICA ADAPTATIVA BASEADA NA
ESTIMATIVA DA IMPEDÂNCIA APARENTE**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor 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, Estados Unidos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adriano Peres de Moraes, UFSM

Doutor pela Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, Brasil

Prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ghendy Cardoso Junior, UFSM

Doutor pela Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, Brasil

Prof. Dr. Gustavo Dorneles Ferreira, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira

Porto Alegre, Janeiro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, que guia meu caminho. À minha família, especialmente minha mãe Maria Consuelo e meus irmãos, Mauricio e Andrés, pelo apoio incondicional ao longo da minha vida. À Juliana, por todos os sacrifícios que fez para estarmos juntos, sua entrega e dedicação durante este tempo.

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente minha mãe Maria Consuelo e meus irmãos, Mauricio e Andrés, pelo apoio incondicional ao longo da minha vida.

Ao Brasil, que junto com o Programa de Estudante-Convênio de Pós-Graduação, PEC-PG da CNPQ, oferecem os espaços necessários para a cooperação internacional, permitindo que cada vez mais pessoas de outros países venham se capacitar e aprender sua cultura.

Ao Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, pela oportunidade e confiança que me foi dada. Por seu apoio e ótima orientação ao longo destes anos de doutorado.

Às pessoas que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento desta tese, especialmente ao professor Roberto Leborgne, pela oportunidade de realizar alguns trabalhos em conjunto, e ao Andrés Ricardo Herrera, pelas muitas ajudas oferecidas na realização desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, por me oferecer toda a infraestrutura e os recursos necessários para a realização da minha pesquisa.

A todas as pessoas que no Brasil me acolheram e me ofereceram uma amizade sincera, Rodolfo, Sergio, Cesar, Mauren, Camila, Sergio Braunstein, Lucas, Juliana, Robert, Martín, André, por mencionar alguns; muito Obrigado a todos.

Aos colegas do PPGEE, especialmente aos membros do Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência, LASEP, pelo seu auxílio, acolhimento e amizade incondicional.

RESUMO

Este documento apresenta uma metodologia analítica adaptativa para localização de faltas baseada na estimativa da impedância para sistemas de distribuição ativos. A metodologia proposta combina a informação fornecida por dispositivos eletrônicos inteligentes alocados na subestação principal e nos terminais de cada unidade de Recurso Energético Distribuído (do inglês *Distributed Energy Resources - DER*), o conhecimento da topologia da rede e os seus parâmetros para estimar a localização da falta. A característica adaptativa é dada pelo uso de modelos elétricos lineares para considerar o efeito das DER conectadas à rede, quando a informação fornecida pelos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (do inglês *Intelligent Electronic Devices - IED*) não é disponível. Adicionalmente, uma estratégia baseada na técnica *Ladder* é desenvolvida para estimar a contribuição de corrente desde as DER até o ponto de falta. Esta estratégia permite considerar vários geradores conectados e seus diferentes modos de operação. A metodologia proposta foi validada com o sistema IEEE 34 barras. Este sistema foi modelado no *Alternative Transients Program (ATP)* e modificado pela inserção de várias unidades DER. A metodologia proposta foi validada em vários cenários. Estes cenários avaliam o efeito da distância até a falta, resistência da falta, incerteza na carga, nível de penetração de DER, número de geradores conectados e erros nas medidas ou na estimação dos parâmetros das DER quando seus modelos forem utilizados. Para estas considerações, o desempenho da formulação proposta é satisfatório, apresentando erros menores do que 3%.

Palavras-chave: Localização de faltas, sistemas de distribuição ativos, recursos energéticos distribuídos.

ABSTRACT

This document presents an adaptive analytical impedance-based fault location methodology for active distribution systems. The proposal combines information provided by Intelligent Electronic Devices (IEDs) located in the substation, each Distributed Energy Resources units terminal, the knowledge of the network topology as well as its parameters to estimate the fault location. Its adaptive feature is given by the use of linear analytical equivalent models to consider of DER effect in case the information provided by a local IED is not available. Additionally, a ladder-based technique is proposed to estimate the current contribution from of DER to the fault point. This process allows considering several DER connected and their different operation modes. The proposed methodology is validated on the IEEE 34-node test feeder. This system is modeled on ATP/EMTP and modified with the insertion of several DER units. The methodology is validated by considering several scenarios. These scenarios evaluate the effect of fault distance, fault resistance, load variation, DER penetration level, numbers of DERs connected and errors in the DER parameters. For these considerations, the proposed methodology performance is satisfactory, presenting fault location errors below 3%.

Keywords: Fault Location, Distributed Energy Resources, Active Distribution Systems, Impedance-Based Method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. MOTIVAÇÃO	17
1.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2.1. Faltas	21
1.2.2. Múltiplas estimativas	22
1.2.3. Resistência de falta	23
1.3. OBJETIVOS	24
1.3.1. Objetivos específicos	24
1.4. CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	25
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA E RECURSOS ENERGÉTICOS DESTRIBUIDOS	27
2.1. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	27
2.1.1. Métodos baseados na inteligência artificial	28
2.1.2. Métodos baseados na impedância aparente	29
2.2. EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA: UMA REVISÃO AO ESTADO DA ARTE	31
2.2.1. Métodos de localização de faltas para sistemas de distribuição passivos	32
2.2.2. Métodos de localização de faltas para sistemas de distribuição ativos	35
2.3. RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS	41
2.3.1. Tecnologias de geração distribuída	42
2.3.2. Tecnologias de armazenamento de energia	45
2.3.3. Modelagem das DER para a LF em rede de distribuição ativos	45
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS	63
3.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA A ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA ATÉ A FALTA	63
3.1.1. Faltas fase-terra	66
3.1.2. Falta fase-fase	67
3.2. FORMULAÇÃO DE UM ALGORITMO GENERALIZADO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS	68
3.2.1. Etapa 1: Processamento da informação da rede de distribuição e das DER	70
3.2.2. Etapa 2: estimação da distância até a falta em cada seção de linha	71
3.2.3. Etapa 3: Estimação da contribuição de corrente do sistema à jusante da falta usando um o processo iterativo baseado na técnica Ladder	72
3.2.4. Etapa 4: Atualização dos fasores de tensão e corrente e cálculo da distância real até a falta	77
3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
4. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE RESULTADOS	81
4.1. SISTEMA TESTE	81
4.2. ESTUDO DE CASOS: DESCRIÇÕES	81

4.2.1.	Análise de sensibilidade	82
4.2.2.	Análise comparativa com métodos do estado da arte	86
4.3.	ANÁLISE DE RESULTADOS	87
4.3.1.	Análise de sensibilidade	87
4.3.2.	Análise comparativa com métodos do estado da arte	102
4.3.3.	Análise geral.....	106
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
5.	CONCLUSÕES.....	109
5.1.	TRABALHOS FUTUROS.....	112
A.	MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.	123
A.1.	MODELO GERALISTA DO SDEE PARA MÉTODOS DE LF.....	123
A.2.	MÉTODOS DE LF PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PASSIVOS.....	125
A.2.1.	Método da componente reativa, (1978).	125
A.2.1.1.	Estimação da distância ao local em falta.	126
A.2.2.	Método do Novosel (1998).....	127
A.2.2.1.	Estimação da distância a falta	127
A.2.3.	Método do Das (1998).....	131
A.2.3.1.	Estimação da distância de falta	131
I.	Detecção e determinação do tipo de falta	131
II.	Estimação da seção em falta	131
III.	Obtenção do sistema radial equivalente	132
IV.	Estimação das cargas	133
V.	Estimação das tensões e correntes de pré-falta nos nós.	133
VI.	Estimação das tensões e correntes no nó N e na falta F.	134
VII.	Estimação da Distância da Falta	136
A.2.4.	Método do Zhu (1997)	137
A.2.4.1.	Estimação da distância de falta	137
A.2.4.2.	Algoritmo sistematizado para a localização da falta.....	139
A.2.5.	Método do Salim (2011)	140
A.2.5.1.	Estimação da distância de falta	141
A.2.5.2.	Falta fase-terra.....	142
A.2.5.3.	Falta fase-fase.....	144
A.2.5.4.	Determinação de uma solução fisicamente correta	145
A.3.	MÉTODOS DE LF PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS	145
A.3.1.	Método do Penkov (2005).....	145
A.3.1.1.	Modelo da GD proposto para a localização de faltas.....	146
A.3.1.2.	Estimação da distância de falta	148
A.3.2.	Método de Bretas et al. (2006)	150
A.3.2.1.	Modelo da GD proposto para a localização de faltas.....	151
A.3.2.2.	Estimação da distância de falta	151
A.3.3.	Método do Marvik et al. (2007), (2009)	155
A.3.3.1.	Modelo da GD proposto para a localização de faltas.....	155
A.3.3.2.	Estimação da distância da falta.....	157
A.3.4.	Método do Nunes (2010).....	158
A.3.4.1.	Modelo da GD proposto para a localização de faltas.....	158
A.3.4.2.	Estimação da distância da falta.....	160
A.3.4.3.	Algoritmo para a localização de faltas.....	161
A.3.5.	Método do Brahma (2011)	163
A.3.5.1.	Modelo da GD proposto para a localização de faltas.....	163

A.3.5.2.	Estimação da distância da falta.....	165
A.3.6.	Método do Orozco (2012).....	167
A.3.6.1.	Modelo da GD proposto para a localização de faltas.....	168
A.3.6.2.	Estimação da distância da falta.....	170
B.	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO EM FALTA DO INVERSOR NO SOFTWARE ATPDRAW.....	175
B.1.	ACONDICIONAMENTO DO MODELO EM FALTA DO INVERSOR PARA SUA PROGRAMAÇÃO EM MODEL.....	175
B.1.1.	Sincronização.....	180
B.1.2.	Controle de corrente.....	180
B.1.3.	Controle de potência.....	181
B.1.4.	Limitação de corrente.....	181
B.2.	PROGRAMAÇÃO DA RESPOSTA DE UM INVERSOR NA FERRAMENTA MODEL DO ATPDRAW.....	181
B.3.	VALIDAÇÃO E COMPARAÇÃO DO MODELO DA RESPOSTA DO INVERSOR PROGRAMADO NO ATPDRAW.....	184
B.3.1.	Sincronização.....	187
B.3.2.	Amortecimento da oscilação numérica.....	188
B.3.3.	Limitação da corrente de referência.....	189
C.	PARÂMETROS UTILIZADOS NA CRIAÇÃO DOS CENÁRIOS PARA A ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	193
C.1.	EFEITO DA RESISTÊNCIA DA FALTA.....	193
C.1.1.	Parâmetros das DER.....	193
C.1.2.	Parâmetros da simulação.....	194
C.2.	EFEITO DA VARIAÇÃO DA CARGA.....	194
C.2.1.	Parâmetros das DER.....	194
C.2.2.	Parâmetros da simulação.....	194
C.3.	EFEITO DAS TECNOLOGIAS DER.....	199
C.3.1.	Efeito do nível de penetração de DER.....	199
C.3.2.	Efeito de erro nos parâmetros das DER.....	200
C.3.3.	Efeito do número de DER conectadas.....	201
D.	DEFINIÇÃO DE MATRIZES PARA COMPONENTES SÉRIES E SHUNT EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	205
D.1.	COMPONENTES SÉRIES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	205
D.1.1.	Linhas de distribuição.....	206
D.1.2.	Transformadores.....	207
D.2.	COMPONENTES SHUNTS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	208
D.2.1.	Conexão estrela.....	208
D.2.2.	Conexão delta.....	209
D.2.3.	Bancos de capacitores.....	210
D.2.4.	Cargas.....	210

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Causas de faltas na rede - Cortesia da UK Energy Networks anteriormente EDF Energy Networks (PLET, 2011)	17
Figura 2 Evolução da compensação por transgressão dos indicadores de continuidade para o período de 2010 a 2015 (ANEEL, 2015).....	18
Figura 3 Tipos de falta (PLET, 2011).....	22
Figura 4 Atribuição de classes para as zonas de uma rede elétrica (GUTIERREZ-GALLEGO; PEREZ-LONDOÑO; MORA-FLOREZ, 2011)	29
Figura 5 Linha de distribuição de energia sob falta com dados medidos em um terminal (FERRAZ, 2014)	30
Figura 6 Tecnologias que suportam as DER (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010)	42
Figura 7 Classificação das tecnologias DER segundo o tipo de interfase de integração	46
Figura 8 Resposta em falta do gerador síncrono (PLET, 2011)	48
Figura 9 Modelo em falta do gerador síncrono (PLET, 2011)	49
Figura 10 Modelo elétrico para DER-IDS (NUNES; BRETAS, 2010a)	50
Figura 11 Topologias VSI e CSI para inversores (PLET, 2011).....	51
Figura 12 Rede de distribuição com inversor operando em modo conectado à rede modo autônomo (PLET, 2011)	52
Figura 13 Sistema de controle de um inversor conectado à rede (PLET, 2011)	53
Figura 14 Circuito equivalente do inversor em componentes de sequência durante operação normal.....	57
Figura 15 Circuito equivalente do inversor em componentes de sequência durante operação em limitação de corrente.....	58
Figura 16 Interação entre o modelo estático das DER e a rede de distribuição em ATP/EMTP	58
Figura 17 Unifilar: sistema de distribuição ativo em falta	64
Figura 18 Modelo trifásico generalizado para uma seção de linha em falta.	65
Figura 19 Diagrama de fluxo da metodologia adaptativa proposta para LF	69
Figura 20 Configuração de circuito à jusante do ponto em falta na seção de análise	73
Figura 21 Modelo para componentes séries em redes de distribuição	74
Figura 22 Modelo de Norton das DER baseadas em geradores tradicionais.....	75
Figura 23 Soma de correntes que alimentam à barra k+1	76
Figura 24 Algoritmo baseado na técnica Ladder para a estimação da corrente I_D^f	78
Figura 25 Sistema IEEE 34 barras modificado	82
Figura 26 Efeito da resistência de falta na metodologia analítica para LF proposta.....	89
Figura 27 Efeito da distância até a falta na metodologia analítica para LF proposta.....	90
Figura 28 Desempenho da metodologia para LF proposta considerando diferentes cenários de carga: baixa-média (30%-60%), média-nominal (60%-100%) e nominal-alta (100%-140%).....	91
Figura 29 Desempenho da metodologia para LF proposta considerando o efeito do desequilíbrio no sistema.	93

Figura 29	Efeito do nível de penetração %DER para a metodologia proposta usando medidas sincronizadas de corrente nas DER	94
Figura 30	Efeito do nível de penetração %DER para a metodologia proposta usando o modelo aproximado do gerador síncorno	95
Figura 31	Efeito do nível de penetração %DER para a metodologia proposta usando o modelo aproximado do gerador síncorno: zoom em curvas de desempenho.	96
Figura 32	Efeito do nível de penetração %DER para DER baseadas em geradores não tradicionais.....	96
Figura 33	Efeito de erros nos fasores de corrente das DER no desempenho da metodologia para LF proposta utilizando medidas sincronizadas de corrente	97
Figura 34	Efeito de erros na reatância sub-transitória da DER no desempenho da metodologia para LF proposta.	98
Figura 35	Desempenho da metodologia para LF proposta com erros entre -10% e 50% na reatância sub-transitória da DER.	99
Figura 36	Efeito de erros na potência de referência S_{ref} da DER no desempenho da metodologia para LF proposta	99
Figura 37	DER baseadas em geradores tradicionais: efeito do número de DER conectadas na metodologia proposta usando medidas sincronizadas de corrente nas DER	100
Figura 38	DER baseadas em geradores tradicionais: efeito do número de DER conectadas na metodologia proposta usando o modelo aproximado do gerador síncorno	101
Figura 39	Efeito do número de DER conectadas: DER baseadas em geradores não tradicionais	102
Figura 40	Efeito da resistência de falta em faltas fase-terra A-T: método de Nunes	104
Figura 41	Efeito da resistência de falta em faltas fase-terra BC: metodologia para LF proposta	104
Figura 42	Efeito da resistência de falta em faltas fase-terra AB-T: metodologia para LF proposta.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sumário dos principais aspetos considerados pelos métodos de LF	36
Tabela 2	Sumário dos principais aspetos considerados pelos métodos de LF para redes de distribuição ativas	40
Tabela 3	Características dos dispositivos semicondutores de potência (PLET, 2011)	52
Tabela 4	Tipos de faltas a partir da combinação das chaves s1, s2, s3 e s4	65
Tabela 5	Cenários para análise de sensibilidade sobre a metodologia analítica para LF proposta.....	88
Tabela 6	Análise comparativa: método de Bedoya e MLF-MSM	103
Tabela 7	Análise comparativa: método de Nunes e MLF-MGS	103
Tabela 8	Análise comparativa: método de Bedoya e metodologia proposta usando modelos lineares que representam os modos de operação do inversor	105

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>A.C</i>	: <i>Alternating Current</i>
<i>AFC</i>	: <i>Alkaline Fuel Cell</i>
<i>ANEEL</i>	: Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>BES</i>	: <i>Battery Energy Storage</i>
<i>CAES</i>	: <i>Compressed Air Energy Storage</i>
<i>CSI</i>	: <i>Current Source Inverters</i>
<i>CT</i>	: <i>Combustion Turbines</i>
<i>DER</i>	: <i>Distributed Energy Resources</i>
<i>DER-IDS</i>	: DER Interconectadas Diretamente ao Sistema de Distribuição
<i>DER-IRI</i>	: DER Interconectadas por Interfaces de Rede Baseada em Inversores
<i>DER-PV</i>	: DER Constituídas por Sistemas Fotovoltaicos
<i>GD</i>	: Geração Distribuída
<i>GD-IDS</i>	: Geração Distribuída Interconectadas Diretamente ao Sistema de Distribuição
<i>GD-IRI</i>	: Geração Distribuída Interconectadas por Interfaces de Rede Baseada em Inversores
<i>GPS</i>	: <i>Global Positioning System</i>
<i>GTO</i>	: <i>Gate Turn Off</i>
<i>HVDC</i>	: <i>High Voltage DC</i>
<i>IED</i>	: <i>Intelligent Electronic Devices</i>
<i>IGBT</i>	: <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>LF</i>	: Localização de Faltas

MLF-MGS	: Metodologia Analítica Proposta Usando o Modelo Aproximado do Gerador Síncrono
MLF-MI	: Metodologia Analítica Proposta Usando Modelos Lineares para Representar os Modos de Operação do Inversor
MLF-MS	: Metodologia Analítica Proposta Usando Medidas de Corrente Sincronizadas nas DER
<i>MOSFET</i>	: <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	: Máximo Ponto de Potência
<i>MPPT</i>	: <i>Maximum Power Point Tracking</i>
<i>PAFC</i>	: <i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
<i>PEMFC</i>	: <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
<i>PS</i>	: <i>Pumped storage</i>
QEE	: Qualidade de Energia Elétrica
SDEE	: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
<i>SMES</i>	: <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
<i>SOFC</i>	: <i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
<i>SRF-PLL</i>	: <i>Three Phase Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop</i>
<i>SVM</i>	: <i>Support Vector Machines</i>
TC	: Transformadores de Corrente
<i>VSI</i>	: <i>Voltage Source Inverters</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) estão expostos continuamente a condições ambientais e de operação que aumentam sua vulnerabilidade a possíveis faltas, gerando interrupção no fornecimento da energia elétrica aos usuários (ANDERSON, 1995). Estas faltas são causadas por diferentes eventos, tais como tempestades elétricas, contato de árvores com linhas que não possuem isolamento, danos à rede elétrica por terceiros, entre outros. A Figura 1 mostra algumas das causas que geram faltas nos SDEE (PLET, 2011). Os percentuais de participação das faltas mostrados nesta figura foram obtidos pela UK Energy Networks, companhia encarregada da operação e manutenção da infraestrutura elétrica no Reino Unido. Estes percentuais podem variar moderadamente dependendo da região e da gestão da concessionária. Porém, a maioria destas faltas é impossível de ser evitada e as entidades de regulamentação da qualidade da energia são cada vez mais exigentes com os indicadores que quantificam a continuidade do serviço (ANEEL, 2012a).

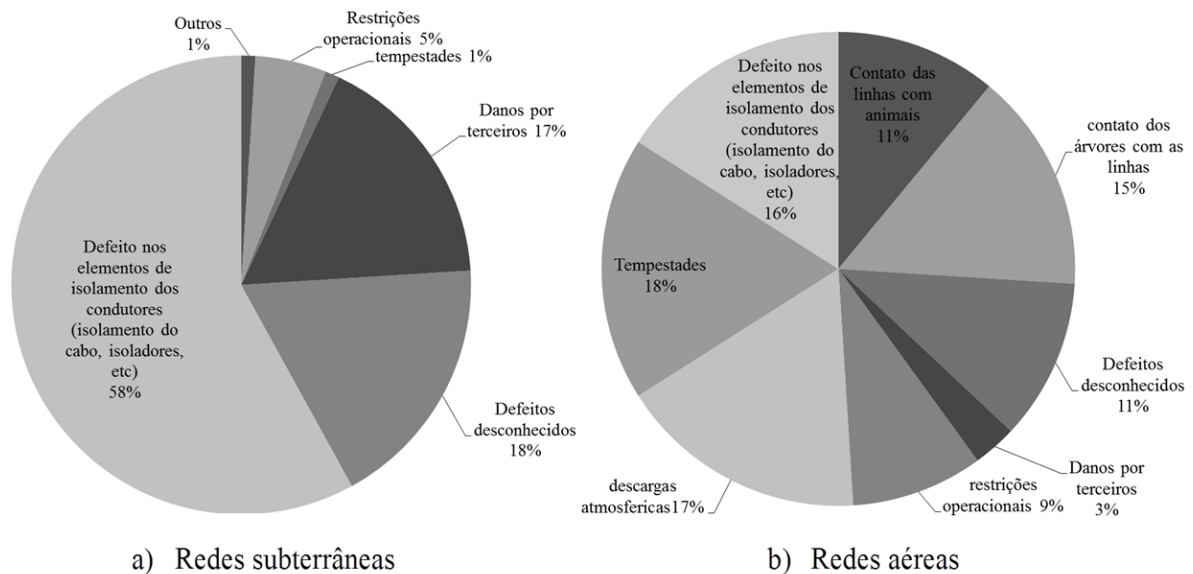


Figura 1 Causas de faltas na rede - Cortesia da UK Energy Networks anteriormente EDF Energy Networks (PLET, 2011)

No Brasil, a qualidade de energia elétrica (QEE) é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Visando manter a qualidade na prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, esta entidade exige que as concessionárias mantenham um padrão de continuidade para a qual dita alguns indicadores coletivos e individuais de continuidade. Estes indicadores são definidos conforme ao Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST (ANEEL, 2012).

Desde o ano 2010 até o momento, as concessionárias têm pagado R\$ 2.173 milhões em compensação aos seus consumidores, devido às interrupções no fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2015). Na Figura 2, mostra-se a evolução da compensação por transgressão dos indicadores de continuidade para o período de 2010 a 2015 (ANEEL, 2015).

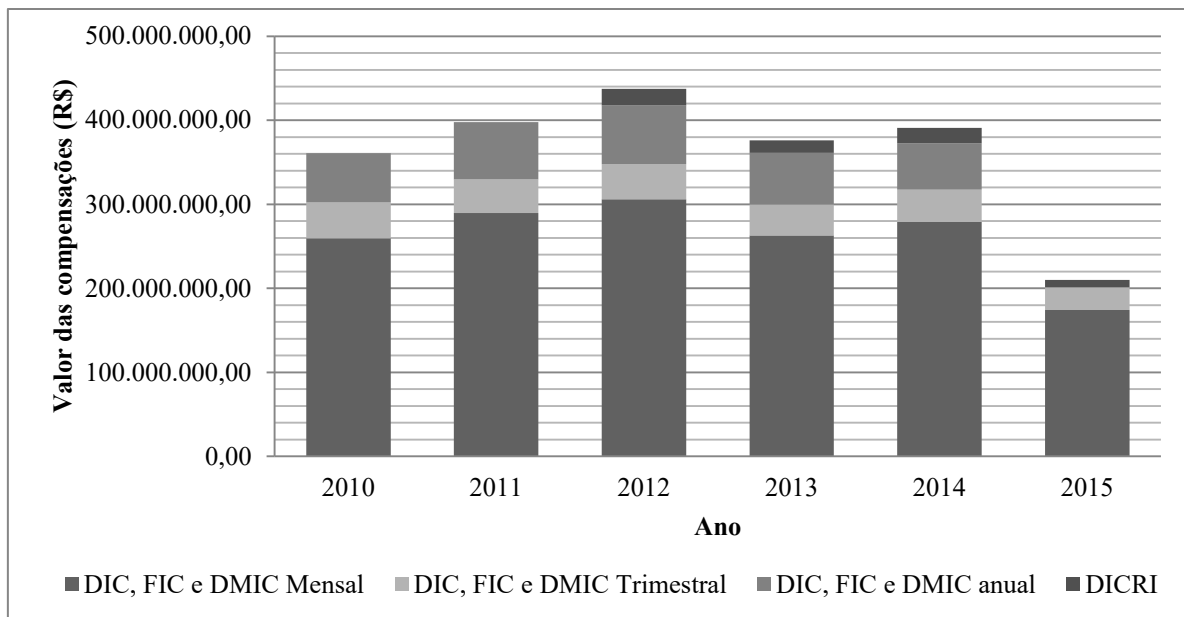


Figura 2 Evolução da compensação por transgressão dos indicadores de continuidade para o período de 2010 a 2015 (ANEEL, 2015)

Na maioria das empresas de distribuição, a Localização de Falhas (LF) é realizada a partir da inspeção da zona afetada, a qual, além de ser um trabalho dispendioso, leva muito tempo, aumentando ainda mais o tempo da interrupção (BOLLEN, 2000). Na atualidade, existem diferentes métodos matemáticos para a LF (MORA-FLÓREZ, 2007), dentre os quais,

os métodos baseados na estimativa da impedância aparente correspondem a uma solução prática e econômica (MORA-FLÓREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008; SAHA *et al.*, 2002). Estes métodos estimam uma distância desde a subestação até o local em falta a partir de registros de tensão e corrente medidos no sistema e seus parâmetros elétricos. Para sua aplicação, é necessário ter um sistema de gestão de informação, que permita ter disponível a informação do sistema, tal como sua configuração atual, seus parâmetros elétricos, e as medições em tempo real das tensões e correntes na subestação principal (DAS, 1998).

Muitos métodos de LF baseados na impedância aparente têm sido propostos em anos recentes, apresentando excelentes desempenhos (MORA-FLÓREZ, 2007; MORA-FLÓREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008). Porém, estes métodos ainda apresentam algumas deficiências como o problema das múltiplas estimativas e o decaimento do desempenho com a incerteza da carga, entre outras (HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2014; KEZUNOVIC; MOUSAVI, 2012; MORALES-ESPANA; MORA-FLOREZ; VARGAS-TORRES, 2009).

Além disso, a sensibilização do uso de energias renováveis e os avanços da tecnologia em armazenamento de energia nos últimos anos têm incentivado a integração de Recursos Energéticos Distribuídos (do inglês *Distributed Energy Resources - DER*) em redes de distribuição de energia (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010; PAZOUKI; HAGHIFAM; OLAMAEI, 2013). O termo DER compreende as tecnologias de Geração Distribuída (GD), tais como os motores diesel, as microturbinas, a fotovoltaica, as pequenas turbinas eólicas, e as tecnologias de armazenamento de energia, tais como as células de combustível, os *flywheels*, entre outros (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010).

Não obstante, desafios adicionais estão relacionados com as alterações que a presença das DER ocasionam nas características típicas radiais das redes de distribuição. Estas

alterações, como a presença de fluxos de energia bidirecionais, modificam a forma como estes sistemas são operados (GIRGIS; BRAHMA, 2001; ZHAO; XU; ZHANG, 2014). Estas novas características devem ser consideradas pelos métodos de LF.

Atualmente, foram propostos na literatura algumas formulações para considerar o efeito destas características, como a presença da GD sobre a LF (ALWASH; RAMACHANDARAMURTHY; MITHULANANTHAN, 2015; BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015; BRAHMA, 2011; NUNES; BRETAS, 2010b; OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012; OROZCO-HENAO, CESAR *et al.*, 2014). Alguns autores (BRETAS; SALIM, 2006; NUNES; BRETAS, 2010a, b) consideram o efeito da GD usando um modelo aproximado da máquina síncrona. Estas técnicas apenas podem ser utilizadas para a rede de distribuição na presença de GD interconectadas diretamente ao sistema (GD-IDS), sendo que as GD interconectadas por uma interface de rede baseada em inversores (GD-IRI), ficam fora do seu escopo. Além disso, estas propostas são formuladas para considerar apenas uma unidade GD.

Diferentes métodos foram formulados usando fasores sincronizados de corrente e tensão fornecidos por Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (do inglês *Intelligent Electronic Devices - IED*) para considerar o efeito da GD na LF (BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015; BRAHMA, 2011; OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012; OROZCO-HENAO, CESAR *et al.*, 2014). Estes métodos consideram a presença de alguns tipos de GD. No entanto, assumem que a rede tem IED instalados na subestação principal e nas unidades de GD. Embora possa ser possível esta premissa no futuro, as redes de distribuição de energia elétrica hoje em dia têm poucos instrumentos de medição e carecem de uma infraestrutura de comunicação que permitam ter essa informação disponível nos centros de controle. Assim, é necessária a criação de técnicas

de FL adaptativas que permitam ser executadas quando não há disponibilidade de medições nas DER.

O exposto acima corresponde à motivação principal desta tese de doutorado, uma vez que, no estado da arte dos métodos de LF baseados na impedância aparente, não existe uma formulação matemática adaptativa para sistemas de distribuição ativos. Entende-se como característica adaptativa a capacidade da formulação de LF de ser executada, utilizando modelos elétricos para considerar o efeito das DER quando a informação fornecida pelos IED não esteja disponível. Este estudo é de grande relevância, devido ao notável crescimento da inserção de DER nos SDEE e às mudanças apresentadas nestes sistemas com a aplicação dos conceitos das *Smart-grid*.

1.2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido à complexidade que envolve a LF em sistemas de distribuição, algumas considerações iniciais são apresentadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2.1. Faltas

A maioria das faltas que ocorrem nos sistemas elétricos são desequilibradas. Essas faltas podem ser do tipo *série* ou do tipo *shunt*. As faltas do tipo *shunt* apresentam como característica o envolvimento de fases/fase e neutro. As faltas do tipo *série* apresentam como característica o envolvimento de fases, causada usualmente pelo rompimento de um ou mais condutores e não envolvendo o neutro ou aterramento (ANDERSON, 1995). Esta tese analisa a LF do tipo *shunt* em SDEE com inserção de DER.

Por outra parte, segundo (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957), as faltas em redes de distribuição de energia elétrica também podem ser classificadas em momentâneas e permanentes. As faltas momentâneas decorrem normalmente de uma condição que se

extingue naturalmente ou pela atuação de um equipamento religador e se caracterizam pela duração de poucos ciclos. As faltas permanentes requerem a atuação de relés e disjuntores de proteção, o que resulta na abertura do alimentador de distribuição envolvido no evento e exige intervenção da equipe de manutenção para a restauração da energia (FERRAZ, 2014). Nesta tese somente faltas permanentes são estudadas. A Figura 3, mostra os diferentes tipos de faltas shunt. Geralmente, estas faltas exibem uma impedância devido à resistência de arco e a impedância de retorno a terra (LAKERVI; HOLMES, 1998; PLET, 2011).

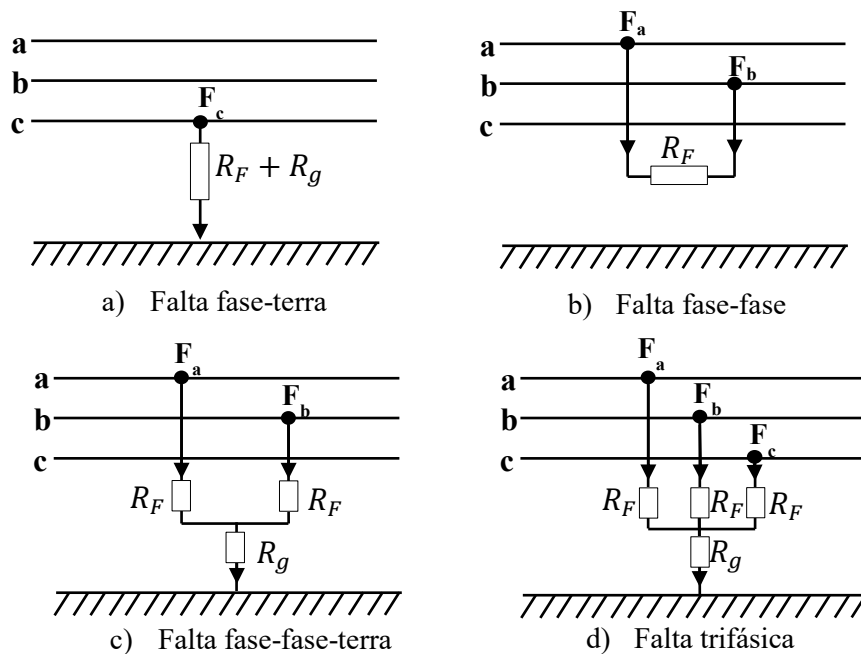


Figura 3 Tipos de falta (PLET, 2011)

1.2.2. Múltiplas estimativas

A LF em SDEE é um problema complexo. Estes sistemas podem ser desequilibrados, possuir uma topologia radial com laterais monofásicas, cargas intermediárias e condutores diferentes. Além disso, devido ao número de subestações de distribuição e a baixa potência que alimentam, comparadas com as subestações no sistema de transmissão, estas apresentam pouca instrumentação. Neste sentido, medidores de tensão e corrente, algumas proteções como relés 50/51 na subestação e elementos próprios de automação como religadores, chaves

seccionadoras e fusíveis ao longo do sistema, são os equipamentos mais comumente encontrados nos SDEE (MORA-FLÓREZ, 2007).

Estas características já são consideradas nos métodos de LF baseados na impedância aparente apresentados na literatura técnica (DAS, 1998). No entanto, outros problemas como a múltipla estimativa de locais de falta devido à presença de muitas laterais ainda são tema de estudo (GAZZANA *et al.*, 2014; KEZUNOVIC; MOUSAVI, 2012; MORALES-ESPANA; MORA-FLOREZ; VARGAS-TORRES, 2009). O problema da múltipla estimativa é ocasionado porque os métodos de LF estimam uma impedância desde a subestação até o local da falta. No entanto, em SDEE radiais com múltiplas laterais, pode existir matematicamente mais de um local cuja impedância equivalente até a subestação seja igual à impedância estimada. Este problema pode ser enfrentado pela implementação de metodologias híbridas que permitam ranquear as possíveis localizações de faltas estimadas ou pela utilização de informação complementar como registros de ligações dos usuários reportando interrupção do fornecimento do serviço de energia elétrica (DAS, 1998). Nesta tese, o problema das múltiplas estimativas não é estudado, assumindo que a zona em falta ou a lateral onde a mesma ocorreu é conhecida pelo operador da rede.

1.2.3. Resistência de falta

Outra característica que afeta o desempenho dos métodos de LF baseados na impedância é o valor da resistência da falta. As faltas podem ser classificadas por baixa impedância ou alta impedância. A definição e formulação matemática que determina o comportamento das faltas de arco de alta impedância em SDEE são apresentadas em (EMANUEL; GULACHENSKI, 1990). Também, uma discussão sobre a consideração do valor de 40Ω para a resistência de falta, na coordenação dos equipamentos de proteção nos SDEE é exibida em (DAGENHART, 2000). Esta consideração também é assumida na

validação dos métodos de LF apresentados na literatura técnica. Para esta tese, analisa-se apenas o problema de localização de faltas de baixa impedância.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal desta tese de doutorado é o desenvolvimento de uma metodologia analítica adaptativa baseada na impedância aparente para a localização de faltas em sistemas de distribuição ativos.

1.3.1. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal desta tese, são definidos os objetivos específicos apresentados a seguir.

- I. Determinar modelos elétricos das DER adequados para considerar o efeito das unidades DER interconectadas diretamente ao sistema de distribuição (DER-IDS) e as unidades DER interconectadas por uma interfase de rede baseada em inversores (DER-IRI) na LF.
- II. Construir um método analítico para a LF em SDEE ativos, considerando o efeito das DER-IDS, utilizando o modelo aproximado da máquina síncrona.
- III. Construir um método analítico para a LF em SDEE ativos, levando em consideração o efeito das DER-IRI, utilizando modelos lineares que representem os diferentes modos de operação do inversor.
- IV. Construir um método analítico para a LF em SDEE ativos, levando em consideração o efeito das DER, utilizando medidas sincronizadas.

- V. Estender os métodos desenvolvidos nos itens II, IV e V para considerar várias DER conectadas.
- VI. Desenvolver uma metodologia analítica adaptativa, baseada na impedância aparente para a LF em SDEE ativos, considerando o efeito das DER a partir de medidas sincronizadas ou desde modelos elétricos lineares das DER quando as medidas fornecidas pelos IED não estejam disponíveis.

1.4. CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Os objetivos acima mencionados descrevem a efetiva importância do desenvolvimento desta pesquisa. Em síntese, são apresentadas a seguir as principais contribuições dadas para o estado da arte dos métodos de LF em sistemas de distribuição.

Introdução de uma característica adaptativa às técnicas de localização de faltas baseada na impedância aparente pela utilização de modelos elétricos das DER quando não se possuem dispositivos de medição nas mesmas ou suas medidas sincronizadas não estejam disponíveis.

Utilização de modelos elétricos lineares que representam os diferentes modos de operação do inversor para considerar o efeito das DER-IRI nas metodologias de LF baseadas na impedância aparente.

Finalmente, destaca-se que não encontrou-se na revisão bibliográfica, o enfoque adotado neste trabalho, mostrando o caráter original e inovador desta tese.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

A seguir, é apresentada a estrutura do presente documento.

O Capítulo 2 expõe uma revisão bibliográfica que aborda as características e generalidades das faltas de baixa impedância e seus tipos. Também uma descrição dos principais métodos de LF, tanto para sistemas de distribuição passivos como ativos e a sua evolução no estado da arte. Por último, uma revisão bibliográfica que aborda as características e generalidades das DER e a sua modelagem em regime permanente é apresentada.

O capítulo 3 descreve a metodologia analítica adaptativa proposta para localização de faltas, baseada na impedância aparente para sistemas de distribuição ativos.

O Capítulo 4 descreve os estudos de casos propostos, divididos em dois grupos: análise de sensibilidade da metodologia proposta e análise comparativa com dois métodos do estado da arte.

O capítulo 5 apresenta as conclusões mais relevantes desta pesquisa, ressaltando as respectivas contribuições agregadas e sugestões para trabalhos futuros.

2. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA E RECURSOS ENERGÉTICOS DESTRIBUIDOS

O problema de LF não é novo em sistemas elétricos de potência. Até meados de 1950 as principais metodologias de LF para sistemas de transmissão não estavam diretamente relacionadas à análise do sistema sujeito à falta, mas sim, na inspeção visual através de carros e helicópteros, em conjunto com métodos fundamentados no princípio das ondas viajantes (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957). Para sistemas de distribuição, as primeiras técnicas desenvolvidas datam do início de 1980 (CASTRO; BUNCH; TOPKA, 1980; SALIM, 2008). No entanto, estas técnicas eram muito simples e apresentavam um desempenho muito baixo. Além disso, na atualidade novas características nos SDEE tem sido apresentadas como são os DER. Estes introduz novos desafios que devem ser enfrentados pelos operadores de rede e que por sua vez, considerados nas metodologias de LF. Nesse capítulo, é apresentada uma introdução ao problema de LF, as generalidades e os principais métodos proposto na literatura técnica. Também, a definição dos DER e como pode ser considerado seu efeito na LF é abordado. Assim, na seção 2.1, uma descrição rápida dos diferentes tipos de técnicas existentes para a LF é abordada. Na seção 2.2, é apresentada a evolução dos métodos de LF baseados na impedância a partir da revisão bibliográfica. Também, nesta seção é feita uma análise qualitativa baseada nos principais aspectos que cada técnica aborda. Na seção 2.3 a definição, classificação e modelagem das DER para considerar seu efeito na LF é apresentada. Finalmente, algumas considerações finais são salientadas neste capítulo.

2.1. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser realizada das seguintes formas: a partir da inspeção visual da rede e/ou a partir da utilização

de medidas elétricas registradas nas subestações da mesma (FERRAZ, 2014). Os métodos que utilizam a segunda forma são denominados métodos automáticos e podem ser classificados em dois grupos, descritos a seguir.

2.1.1. Métodos baseados na inteligência artificial

Métodos baseados na inteligência artificial são técnicas inteligentes de classificação de dados baseados na aprendizagem, por exemplo. Diferentes técnicas de classificação foram utilizadas para a localização de falta, entre elas as Máquinas de Suporte Vectorial (do inglês *Support Vector Machines-SVM*) e as Redes Neurais (GUTIERREZ-GALLEGO; PEREZ-LONDOÑO; MORA-FLOREZ, 2011; ZAYANDEHROODI et al., 2013). Estas técnicas dividem o sistema de distribuição em zonas. Para cada zona é atribuída uma etiqueta ou classe, a qual é caracterizada por um conjunto de faltas simuladas, como se mostra na

Figura 4, e a localização da falta é dada em função das zonas. Em outras palavras, estes métodos, em vez de uma distância de falta, entregam como resultado, uma zona em falta (GUTIERREZ-GALLEGO; PEREZ-LONDOÑO; MORA-FLOREZ, 2011).

Os registros de falta para cada zona são processados para obter uma série de características que identificam cada classe, denominados descritores. No caso das técnicas de LF baseadas em SVM, planos de separação de classes definidos pelos vetores de suporte são obtidos a partir dos descritores. Quando uma falta ocorre, o registro de falta é processado para obter estes descritores, os quais são comparados com os planos de suporte para determinar a que classe pertence ou está mais próxima da falta. A maioria dos métodos baseados em inteligência artificial estão constituídos por dois processos: ajuste ou parametrização da técnica e o treinamento da técnica.

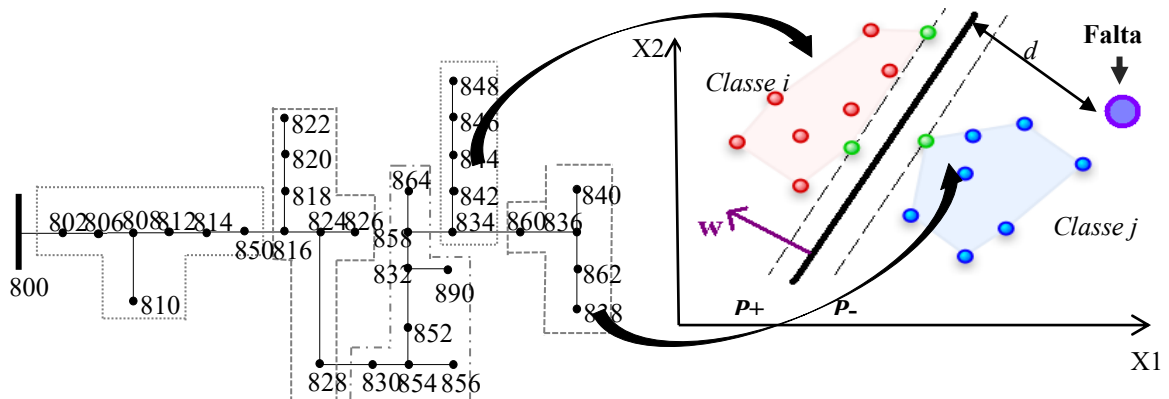


Figura 4 Atribuição de classes para as zonas de uma rede elétrica (GUTIERREZ-GALLEG0; PEREZ-LONDOÑO; MORA-FLOREZ, 2011)

Estes métodos são bastante eficientes e não apresentam o problema das múltiplas estimativas. No entanto, estes são muito dependentes do processo de treinamento e parametrização. Também, quando são apresentadas mudanças significativas no sistema de estudo, tanto na sua topologia como nos seus parâmetros, o método fica obsoleto e um novo processo de parametrização e treinamento devem ser realizados.

2.1.2. Métodos baseados na impedância aparente

Os métodos baseados na impedância estimam uma impedância aparente vista desde um ou mais terminais da rede de distribuição, a partir dos fasores de tensão e corrente na frequência fundamental do sistema que, comparada com a impedância da rede elétrica, permite determinar uma distância à falta. Esta distância fisicamente pode-se realizar para diferentes pontos do sistema, apresentando o problema das múltiplas estimativas. Na formulação de localização de falta, podem ser consideradas todas as características típicas dos sistemas de distribuição, como o desequilíbrio nas linhas e seu efeito capacitivo, a presença de cargas desequilibradas e laterais monofásicas, bifásicas e trifásicas. Para explicar a essência dos métodos baseados na impedância, assumo-se o circuito mostrado na Figura 5.

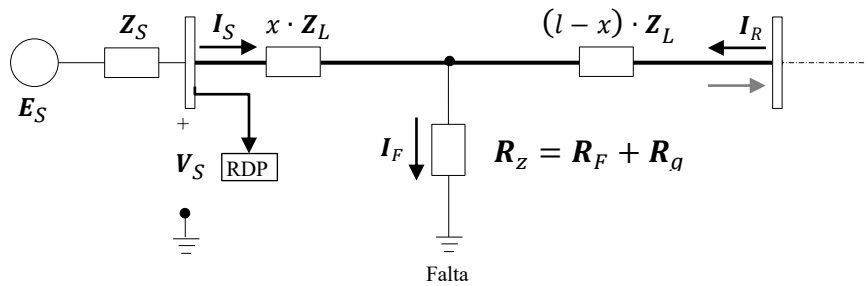


Figura 5 Linha de distribuição de energia sob falta com dados medidos em um terminal (FERRAZ, 2014)

Onde,

E_S : tensão da fonte equivalente da barra local [V].

Z_S : impedância equivalente da barra local [Ω].

I_S : corrente de linha da barra local [A].

V_S : tensão de fase na barra local [V].

x : distância a falta [km].

Z_L : impedância da linha de distribuição [Ω/km].

I_F : corrente de falta [A].

R_Z : Somatório da impedância de falta [Ω] e da impedância de retorno.

I_R : corrente de linha da barra remota [A].

l : comprimento da linha [km].

A tensão de fase medida na barra local pode ser obtida a partir da aplicação das leis de Kirchhoff e é dada pela expressão (2.1)

$$V_S = x \cdot I_S \cdot Z_L + R_Z \cdot I_F = x \cdot I_S \cdot Z_L + R_Z \cdot (I_S \pm I_R) \quad (2.1)$$

A expressão (2.1) pode ser reescrita conforme (2.2):

$$Z_{AP} = \frac{V_S}{I_S} = x \cdot Z_L + R_Z \cdot \frac{(I_S \pm I_R)}{I_S} \quad (2.2)$$

Onde Z_{AP} é a impedância aparente da rede elétrica sob falta determinada desde a barra local S até o ponto da falta. Por tanto, a distância à falta x pode ser estimada segundo ((2.3)

$$x = \frac{Z_{AP}}{Z_L} - \underbrace{\frac{R_Z}{Z_L} \cdot \frac{(I_S \pm I_R)}{I_S}}_M \quad (2.3)$$

O termo M introduz um erro na estimativa da distância da falta, já que a resistência de falta R_Z e a corrente na barra do local remoto I_R devem ser estimados para a condição em que se dispõe de medições de somente um terminal (FERRAZ, 2014). Isto corresponde ao principal inconveniente destas técnicas, já que o aumento na resistência de falta aumenta o erro inserido na distância de falta. Também, o fator M depende da corrente no local remoto, a qual é função dos parâmetros elétricos do circuito a jusante ao ponto em falta. Por tanto, todas as incertezas apresentadas nos parâmetros elétricos, tanto nas cargas como nas linhas de distribuição, aumentam o erro inserido na estimativa da distância da falta. No entanto, estes métodos têm apresentado desempenho satisfatório nas pesquisas publicadas no estado da arte e existe uma tendência a serem implementados em sistemas reais, por serem fáceis de implementar e apresentarem um baixo custo de instalação e operação (DAS, 1998).

2.2. EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA: UMA REVISÃO AO ESTADO DA ARTE

Esta seção apresenta a evolução dos métodos de LF baseados na impedância a partir da revisão dos métodos clássicos publicados na literatura técnica. Esta revisão é dividida em dois grupos: métodos de LF para redes de distribuição passivos e métodos de LF para redes de distribuição ativos. Entende-se como sistemas de distribuição passivos os sistemas de distribuição convencionais sem penetração de DER. Sistemas de distribuição ativos são definidos como aqueles que apresentam penetração de DER. Esta seção tem por objetivo expor a evolução dos métodos de localização de faltas baseados na impedância e embasar a compreensão das principais contribuições desta tese.

2.2.1. Métodos de localização de faltas para sistemas de distribuição passivos

Os primeiros trabalhos baseados na análise do sistema de transmissão surgiram pela publicação de um método baseado na componente reativa (VAN; WARRINGTON, 1978). Este método realizava uma comparação da reatância estimada mediante os valores de tensão e corrente a frequência fundamental, medidas na barra local e a reatância total da linha de transmissão. A comparação destas reatâncias amortece o efeito da resistência da falta. Porém, nesta abordagem não foi considerado o efeito da carga. Em 1981 e 1982, os trabalhos apresentados por Takagi *et al.* impulsionaram fortemente a pesquisa de LF entre a comunidade científica. O método proposto por Takagi *et al.* (1981, 1982) foi formulado para linhas de transmissão para melhorar o método da componente reativa. Esta técnica utiliza o teorema da superposição para decompor o circuito em falta em uma rede em pré-falta e uma puramente faltosa. Com esta decomposição é possível obter uma única equação que relaciona a distância da falta com as tensões e correntes durante o período em falta e pré-falta (TAKAGI *et al.*, 1982). Este método realiza algumas considerações como os fatos da impedância de falta ser puramente resistiva, do ângulo do fator de distribuição ser nulo e do efeito capacitivo das linhas ser desprezável. Aplicando estas considerações, o autor determina uma expressão explícita para a distância da falta (TAKAGI *et al.*, 1982). Porém, o método de Takagi *et al.* é muito sensível ao ângulo do fator de distribuição previamente considerado como igual a zero. Também, o método foi desenvolvido em componentes simétricas desconsiderando o desequilíbrio no sistema.

Em 1997, foi proposto o primeiro método focado para sistemas de distribuição de energia elétrica (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997). Zhu propõe uma análise matricial da seção em falta para obter uma expressão em função da distância de falta, a resistência de falta e as correntes no local da falta. O método é formulado a partir de uma equação complexa com

três incógnitas, portanto é necessário utilizar um método iterativo para sua resolução. O processo iterativo começa assumindo que a corrente de falta é a diferença entre a corrente em falta da barra local (I_k^f) e a corrente de pré-falta na mesma barra (I_k^p). Nesta abordagem, obtém-se como resposta um intervalo de falta, e utiliza-se um método probabilístico para considerar as incertezas na estimação dos parâmetros do sistema. Outros trabalhos baseados nas mesmas considerações e utilizando componentes de fase, foram desenvolvidos simultaneamente (AGGARWAL; ASLAN; JOHNS, 1997; YANG; SPRINGS, 1998).

Em 1998, dois trabalhos importantes de LF foram desenvolvidos em paralelo: o trabalho proposto por Novosel *et. al* (1998) e o método proposto por Das *et. al* (1998).

O método proposto por Novosel *et. al* (1998) é baseado na simplificação do sistema de distribuição com cargas distribuídas ao longo dele, em um circuito com as cargas acumuladas na barra final. Esta simplificação é feita, uma vez que se assume que o somatório das impedâncias das cargas é muito maior do que o somatório das impedâncias das linhas. A partir desta simplificação, é realizada uma análise de superposição em componentes simétricas, considerando as variações da tensão e da corrente em regime permanente no período de pré-falta e falta para estimar a distância de falta (NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998). Por outro lado, a abordagem apresentada por Das *et. al* (1998) utiliza os princípios expostos por Novosel *et. al* (1998) e Van *et. al* (1978) para estimar a localização da falta. No primeiro passo, o método detecta e identifica o tipo de falta. Posteriormente determina a seção em falta de forma aproximada mediante o método da componente reativa (VAN; WARRINGTON, 1978). Após, é feito um refinamento da localização da falta utilizando um sistema radial equivalente do alimentador em estudo. O sistema equivalente considera as cargas à jusante da seção de falta identificada concentradas no ponto final da linha e as laterais à montante da mesma, como cargas concentradas nas barras de derivação. Este

método apresenta um incremento significativo na sua eficiência computacional, comparado com os métodos propostos nessa década. Apesar deste método ter sido publicado antes do que o método por Novosel *et. al* (1998), a realização de ambos os trabalhos foi realizada praticamente ao mesmo tempo, sendo que cada um foi fundamentado de uma forma diferente (DAS, 1998). No entanto, destes três métodos, o Método de Zhu foi um dos primeiros que não foi baseado em componentes simétricas, o qual correspondeu a um grande avanço nas metodologias de LF, já que estes sistemas dificilmente apresentam linhas geometricamente simétricas (ou transpostas).

Alguns anos depois, em 2004, o método proposto por Choi *et al.* (2004) aparece como uma continuação do método de Zhu. Apesar de não analisar o aspecto probabilístico da estimativa da distância da falta e de continuar tratando apenas com faltas fase-terra, sem levar em conta o efeito capacitivo da linha, este trabalho propõe usar uma carga equivalente à jusante da falta ao invés de executar um fluxo de potência radial, o que incrementa a eficiência computacional do algoritmo de localização. Não obstante, assume-se que a corrente e a tensão das cargas são medidas, o que na prática dificilmente é encontrado (CHOI, M. *et al.*, 2004). Uma extensão desta pesquisa para faltas fase-fase é apresentada em (CHOI, M.-S. *et al.*, 2007).

Vários desenvolvimentos foram propostos por Salim *et. al.* entre 2009 e 2011 (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011; SALIM, RODRIGO HARSTEIN *et al.*, 2009). Um dos seus primeiros trabalhos (SALIM, RODRIGO HARSTEIN *et al.*, 2009) propõe uma extensão do método de Choi para considerar todos os tipos de faltas. Nesta abordagem, também é proposto um fluxo de potência no estado pré-falta visando calcular uma impedância equivalente em cada barra usando as tensões e correntes estimadas para cada terminal. Desta forma, o efeito da incerteza na carga é amortecido na LF. Em Salim (2008,

2011) é proposto uma análise matricial da seção em falta utilizando o modelo exato das linhas de distribuição para determinar uma expressão em função da distância de falta. Sua contribuição principal é a consideração do efeito capacitivo das linhas de distribuição na LF. Além disso, o autor propõe uma nova formulação, na qual determina uma equação para os tipos de falta fase-terra e uma equação para falta fase-fase. A proposta é comparada com alguns métodos do estado da arte para mostrar a melhora no desempenho dos métodos de localização pela consideração do efeito capacitivo na formulação de LF (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011; SALIM, 2008).

Para sintetizar a evolução dos métodos de LF baseados na impedância e a revisão bibliográfica aqui apresentada, na Tabela 1 é mostrado o sumário das características consideradas por cada um dos métodos abordados nesta seção. Igualmente, um resumo estendido dos métodos clássicos para a LF aqui estudados é apresentado no apêndice A.

Segundo a Tabela 1, o método mais completo no estado da arte é o método proposto por Salim em (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011). Este método considera as características típicas das redes de distribuição incluindo o efeito capacitivo. Também, todos os tipos de falta e o efeito da resistência da falta são considerados na formulação proposta. Porém, o problema das múltiplas estimativas e a presença de DER não são abordados pelo autor.

2.2.2. Métodos de localização de faltas para sistemas de distribuição ativos

Muitas formulações para a localização de faltas baseadas na impedância foram propostas para redes de distribuição apresentando desempenhos satisfatórios (MORA-FLÓREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008). Porém, na atualidade, os sistemas de distribuição têm apresentado mudanças significativas como a presença de fluxos bidirecionais ocasionados pela inserção de DER.

Tabela 1 Sumário dos principais aspetos considerados pelos métodos de LF

Sumário dos principais aspetos considerados pelos métodos de LF									
Aspecto analisado	Método de LF								
	Warrington 1978	Takagi 1981,1982	Zhu 1997	Aggarwal 1997	Novosel 1998	Das 1998	Choi 2004,2007	Salim 2009	Salim 2011
Processamento de sinais									
Em pré-falta	X	√	√	√	√	√	X	√	√
Em falta	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Características do sistema									
Componentes simétricas	√	√	X	X	√	√	X	X	X
Componentes de fase	X	X	√	√	X	X	√	√	√
Modelo da carga	X	Z=cte	Z=f(V)	Z=f(V)	Z=cte	Z=f(V)	Z=f(V)	Z=f(V)	Z=cte
Desequilíbrio no sistema	X	X	√	√	X	X	√	√	√
Efeito capacitivo	X	X	X	X	X	X	X	X	√
Laterais	X	X	√	√	X	X	X	√	√
Incerteza na carga	X	X	√	√	X	X	X	√	√
Características da falta									
Todos os tipos de falta	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	Todos	X	Todos	Todos
Resistencia de falta	X	√	√	√	√	√	√	√	√
Múltiplas estimativas	√	√	X	X	√	√	X	X	X

DER compreende as tecnologias de GD e tecnologias de armazenamento de energia (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010). Estas novas características devem ser consideradas pelos métodos de LF.

Atualmente, foram propostos na literatura algumas formulações para considerar o efeito destas características, como a presença da GD sobre localização de faltas. Em Penkov *et. al.* (2005), foi apresentado uns dos primeiros trabalhos analíticos para LF em redes de distribuição de energia elétrica com inserção de GD. A formulação proposta está baseada em uma análise de componentes simétricas e utiliza dois modelos de GD para considerar seu efeito na LF. O aporte principal deste trabalho, além de ser uma das primeiras pesquisas nesta temática, é propor um fator de correção da impedância observada desde a subestação principal do sistema de distribuição, a partir dos parâmetros elétricos da GD. Porém, na proposta não é considerado o desequilíbrio nas linhas e as cargas são concentradas no final do circuito. Esta pesquisa utiliza um modelo realista e um modelo ideal da máquina síncrona para considerar o

efeito da GD. Portanto, esta abordagem somente estuda as tecnologias de GD baseadas em máquinas síncronas (PENKOV *et al.*, 2005). Em Bretas *et al.*(2006) foi apresentado um método para a LF baseado na análise de componentes simétricas. O principal objetivo dos autores é mostrar o impacto da GD na LF e os ajustes necessários que devem ser feitos aos métodos baseados na impedância formulados para sistemas passivos para considerar o efeito da GD. A abordagem utiliza o modelo aproximado da máquina síncrona em componentes simétricas e um processo iterativo para estimar a corrente de falta (BRETAS; SALIM, 2006). Porém, a metodologia não considera o desequilíbrio nas linhas, a presença de mais de um gerador no sistema e GD-IRI¹.

Em Marvik *et al.*(2007, 2009) é apresentado um método para LF fase-fase. O método utiliza os fasores de tensão e correntes à frequência fundamental para estimar uma distância desde a subestação ao local em falta. O aporte principal desta pesquisa está relacionado com análise do impacto das cargas e a localização dos geradores conectados nas redes de distribuição na LF. Para isto, são apresentadas duas estratégias de compensação: o método de compensação A, que considera as medições em pré-falta na GD para estimar a corrente de falta e o método de compensação B, que utiliza a medição do módulo de corrente em falta na GD para estimar a corrente de falta. No entanto, este estudo não foi definido para todos os tipos de faltas e características como o desequilíbrio nas linhas, o efeito da resistência de falta e a presença de mais de um gerador distribuído não são abordadas (MARVIK; PETTERTEIG; HOIDALEN, 2007; MARVIK, J. HIDALEN; PETTERTEIG, 2009). Entretanto, em Nunes *et. al.* (2010a,b) é apresentada uma extensão do trabalho publicado em (BRETAS; SALIM, 2006). Nesta pesquisa, é formulado, em componentes de fase, um método de LF para sistemas de distribuição com inserção de GD. O trabalho completo considera características dos sistemas de distribuição reais como o desequilíbrio nas linhas, a

¹ São aquelas baseadas em sistemas de conversão de energias alternativas, cuja totalidade da energia gerada é condicionada por um inversor responsável pela injeção de potência no ponto de conexão

presença de laterais e inserção de GD. Uma estratégia para considerar o impacto da GD a partir do modelo aproximado da máquina síncrona é abordada, ficando fora do escopo as GD-IRI. Também, este método foi desenvolvido para considerar um só gerador conectado (NUNES; BRETAS, 2010a, b).

Em Brahma (2011) é apresentada uma estratégia para considerar o impacto da GD na LF baseada nas medidas sincronizadas de tensão e corrente registradas na GD e na subestação. O autor afirma que esta estratégia pode ser utilizada para qualquer tipo de GD. Porém, considera para sua definição o modelo da máquina síncrona em componentes simétricas, assumindo que a tensão interna do gerador não muda. No entanto, as GD-IRI, apresentam um comportamento não linear que não é possível ser considerado a partir do modelo proposto pelo autor (OROZCO-HENAO, CESAR *et al.*, 2014; PLET; GREEN, 2014). A metodologia também considera mudanças na topologia do sistema de distribuição, já que utiliza a matriz de admitância nodal no processo de LF. Além disso, o autor propôs uma estratégia para mitigar o problema das múltiplas estimativas. No entanto, não se apresenta uma validação para este problema (BRAHMA, 2011).

Outras metodologias para a LF têm sido propostas a partir da consideração do efeito da GD desde suas medidas sincronizadas (ALWASH; RAMACHANDARAMURTHY; MITHULANANTHAN, 2015; BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015; BEDOYA-CADENA, A.; OROZCO-HENAO; MORA-FLOREZ, 2012; OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012). No método de LF proposto por Bedoya *et al.* (2012), as medidas de tensão e corrente registradas e sincronizadas na subestação e na GD são utilizadas para considerar seu impacto na LF, evitando utilizar seus modelos elétricos. A afirmação anterior é apresentada pelos autores como uma vantagem, já que na maioria dos casos não se têm os parâmetros elétricos

necessários para representar de forma adequada a GD. Também, uma estratégia para considerar a incerteza na carga mediante o uso das medições em pré-falta é abordada. Este método é desenvolvido para faltas fase-terra e validado sobre diferentes cenários de carga. Porém, o problema das múltiplas estimativas e a consideração de mais de uma unidade de GD não são abordadas nesta pesquisa (BEDOYA-CADENA, A.; OROZCO-HENAO; MORA-FLOREZ, 2012; OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012). Em Bedoya et. al. (2015), uma extensão do método proposto em Bedoya et. al. (2012), é apresentada. Este método é formulado utilizando componentes simétricas, e a sua maior contribuição está relacionada com a proposta de um fator de correção de carga, o qual amortece o efeito da incerteza nas cargas. Este método é formulado considerando uma só GD no sistema e validado sobre diferentes cenários e modelos de carga (BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015). Uma abordagem mais completa é proposta em (ALWASH; RAMACHANDARAMURTHY; MITHULANANTHAN, 2015). O método proposto identifica as possíveis seções em falta utilizando uma nova abordagem para a LF baseada na impedância. Esta formulação não precisa do conhecimento do tipo de falta, pois é proposta uma equação generalizada aplicável para todos os tipos de falta shunt. A partir das possíveis seções em falta, uma localização exata da falta é estimada utilizando uma regra de correspondência de tensão, baseada na comparação da tensão estimada nas barras terminais das GD e na tensão medida na mesma. O esquema proposto é aplicável para todos os tipos DG sem a necessidade de seus parâmetros individuais. Porém, uma validação considerando diferentes tipos de GD não é abordada.

Novamente, para sintetizar a evolução dos métodos de LF baseados na impedância formulados para sistemas de distribuição ativos, na Tabela 2 é apresentado o sumário das características consideradas por cada um dos métodos discutidos nesta seção. Também, para ter uma melhor compreensão das contribuições desta tese, a metodologia proposta também é

comparada. Um resumo estendido dos métodos para a LF aqui estudados é apresentado no apêndice A

Segundo a Tabela 2, os métodos mais completos apresentados atualmente no estado da arte são o método proposto por Brahma (2011) e a abordagem proposta por Alwash *et. al.* (2015). Estes métodos consideram vários geradores conectados e segundo os autores, várias tecnologias de GD. Porém, testes que exibam o desempenho destas formulações considerando as diferentes tecnologias não são realizados.

Tabela 2 Sumário dos principais aspectos considerados pelos métodos de LF para redes de distribuição ativas

Sumario dos principais aspetos considerados pelos métodos de LF									
Aspecto analisado	Método de LF								
	Penkov 2005	Bretas 2006	Marvik 2007,2009	Nunes 2010a,b	Brahma 2011	Orozco 2012	Bedoya 2012,2015	Alwash, 2015	Metodologia proposta
Processamento de sinais									
Em pré-falta	X	√	√	√	√	√	√	X	√
Em falta	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Modelagem da GD									
Modelo elétrico	√ ²	√ ¹	X	√ ¹	√ ¹	X	X	X	√
Medidas sincronizadas	X	X	√	X	√	√	√	√	√
Várias GD conectadas	X	X	X	X	√	X	X	√	√
Diferentes tecnologias de GD	X	X	X	X	√ ²	√ ²	√ ²	√ ³	√
Características do sistema									
Componentes simétricas	√	√	√	X	X	X	X	X	X
Componentes de fase	X	X	X	√	√	√	√	√	√
Modelo da carga	Z=cte	Z=cte	Z=f(V)	Z=cte	Z=cte	Z=cte	Z=cte	Z=cte	Z=cte
Desequilíbrio no sistema	X	X	X	√	√	√	√	√	√
Efeito capacitivo	X	X	X	X	X	X	X	√	√
Laterais	√	√	X	√	√	√	√	√	√
Incerteza na carga	X	X	√	X	X	√	√	X	√
Características da falta									
Todos os tipos de falta	X	√	X	X	√	X	√	√	√
Múltiplas estimativas	X	X	X	X	√	X	X	√	X
Resistência de falta	X	√	√	√	√	√	√	√	√

² Somente para GD-IDS. Modelo aproximado da máquina síncrona

³ Assuma-se que diferentes tecnologias de GD são consideradas pelo fato de utilizar medidas sincronizadas na GD. Porém, estes trabalhos não apresentam uma validação das formulações propostas considerando diferentes tipos de GD.

Também, uma desvantagem que apresentam estes métodos é a sua dependência de um sistema de comunicação e sincronização das medidas registradas nas GD com a subestação principal, já que, se estas medições não estiverem disponíveis, seja porque o sistema de distribuição não possua IED nas GD ou seu sistema de comunicação falhe, estes métodos não poderiam ser utilizados.

A dependência destes dados remotos é superado na metodologia proposta pelo desenvolvimento de uma estratégia adaptativa. Esta característica adaptativa é dada pelo uso de modelos elétricos lineares para considerar o efeito das DER conectadas à rede de distribuição, quando a informação fornecida pelos IED não é disponível. A partir desta característica adaptativa, outra importante contribuição é realizada, já que modelos lineares que representam os diferentes modos de operação dos inversores foram considerados na formulação da metodologia de LF para considerar o efeito das DER, o qual não foi abordado pelos métodos propostos até o momento no estado da arte.

2.3. RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

Uma das tecnologias que foi recentemente introduzida nas redes de distribuição foi a dos Recursos Energéticos Distribuídos (do inglês *Distributed Energy Resources - DER*). DER refere-se aos recursos de geração de energia elétrica que estão diretamente conectadas na baixa tensão ou média tensão nas redes de distribuição de energia. As DER compreendem as tecnologias de GD, tais como motores diesel, microturbinas, fotovoltaica, pequenas turbinas eólicas e as Tecnologias de Armazenamento de Energia (TAE), como as células de combustível, supercondutores de armazenamento de energia magnética, os *flywheels* entre outros (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010). Sua integração em redes de distribuição de energia nos últimos anos tem sido incentivada pela sensibilização do uso de energias renováveis e os avanços da tecnologia em armazenamento de energia (AKOREDE;

HIZAM; POURESMAEIL, 2010; PAZOUKI; HAGHIFAM; OLAMAEI, 2013). A Figura 6 ilustra as tecnologias que suportam as DER (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010).

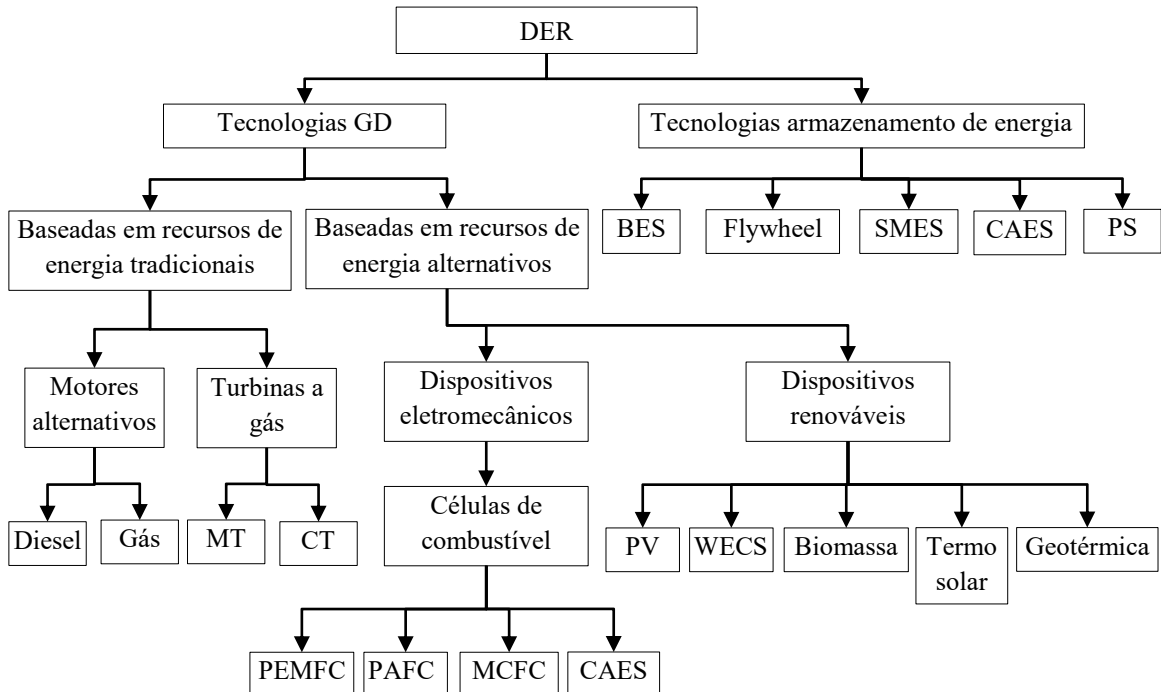


Figura 6 Tecnologias que suportam as DER (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010)

2.3.1. Tecnologias de geração distribuída

A definição exata da geração distribuída (GD) varia entre os tipos de fontes e suas capacidades. No entanto, geralmente é definida como qualquer fonte de energia elétrica de capacidade limitada, diretamente ligada à rede de distribuição, onde é consumida pelos utilizadores finais. A GD não é um novo conceito na evolução da indústria de eletricidade. As GD podem ser alimentadas por micro-turbinas, motores de combustão, células de combustível, turbinas eólicas, geotérmica e sistemas fotovoltaicos, entre outras.

As GD têm lugar de instalação em dois níveis, chamados de: em nível local e em nível de ponto final. Usinas de geração de energia em nível local, muitas vezes incluem tecnologias de energias renováveis que são de instalação em lugares específicos, como geradores eólicos, produção de energia geotérmica, sistemas solares fotovoltaicos, e algumas plantas

hidrotérmicas. Em nível de ponto final, o consumidor individual de energia pode aplicar muitas dessas mesmas tecnologias com efeitos semelhantes. Uma tecnologia GD frequentemente utilizada por usuários de ponto final é o motor de combustão interna modular e os sistemas fotovoltaicos. Estas tecnologias, também podem ser divididas segundo o tipo de energia primária utilizada (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010).

2.3.1.1. GD baseadas em recursos de energia tradicionais

São GD baseadas em geradores eletromecânicos que operam com combustíveis tradicionais como os derivados do petróleo. Estão constituídas principalmente por motores alternativos, como motores diesel ou a gasolina, e turbinas a gás, tais com microturbinas (MT) e turbinas de combustão (do inglês *combustion turbines* - *CT*). A utilização de motores diesel e a gasolina no fornecimento de energia para clientes industriais e comerciais não é nova. Estes foram os primeiros utilizados na geração de energia distribuída, e sua abrangência vai desde pequenas unidades de 1 kVA até usinas grandes de várias dezenas de MVA. As turbinas a gás, também conhecidas como turbinas de combustão, estão constituídas por um motor rotativo que extrai energia da combustão de um fluxo de gás. As turbinas a gás dividem-se em três categorias: de marco pesado (do inglês *Heavy Frame*), aeroderivadas e microturbinas (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010).

2.3.1.2. GD baseadas em recursos de energia não tradicionais

São GD baseadas em sistemas de transformação de energia alternativas que operam com combustíveis não tradicionais como os derivados de recursos renováveis e processos químicos. Estes tipos de GD abrangem as tecnologias baseadas em dispositivos eletromecânicos como células de combustível e sistemas renováveis, tais como os sistemas fotovoltaicos (PV) e sistemas de conversão de energia eólica (do inglês *Wind Energy Conversion System* - *WECS*), entre outras (AKOREDE; HIZAM; POURESMAEIL, 2010).

- **Células de combustível:** as células de combustível convertem a energia química diretamente em energia elétrica e calor. Este processo pode ser comparado ao das baterias, uma vez que ambas usam um processo eletroquímico entre hidrogênio e oxigênio para gerar uma corrente DC. Estes dois dispositivos, baterias e as células de combustível, consistem de dois eléctrodos, separados por um eletrólito. As células de combustível são geralmente caracterizadas pelo material de eletrólito utilizado. Existem atualmente cinco tipos de células de combustível (HUANG; ZHANG; JIANG, 2006): células de combustível de membrana de intercâmbio de prótons (do inglês *Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC*), célula de combustível alcalinas (do inglês *Alkaline Fuel Cell - AFC*), células de combustível de ácido fosfórico (do inglês *Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC*), células de combustível de óxido sólido (do inglês *Solid Oxide Fuel Cell - SOFC*), e célula de combustível de carbonato fundido (do inglês *Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC*). Porém, para obter corrente alternada (do inglês *Alternating Current - A.C*) a partir deste tipo de tecnologia, equipamentos de condicionamento de energia são necessários para lidar com a inversão da corrente DC gerada pela célula de combustível para corrente alternada, que é requerida para ser integrada na rede de distribuição.
- **Sistemas Renováveis:** os sistemas renováveis são aqueles que aproveitam qualquer fonte de energia que naturalmente é reabastecida, como a derivada de energia solar, eólica, geotérmica ou ação hidrelétrica. A energia produzida a partir do refinamento da biomassa também é muitas vezes classificada como renovável. Os sistemas considerados como renováveis são: sistemas fotovoltaicos (PV), sistemas de conversão de energia eólica (WECS), biomassa, sistemas termo solares, sistemas geotérmicos, e pequenas hidro turbinas.

2.3.2. Tecnologias de armazenamento de energia

A produção de energia elétrica exige a conversão da energia primária em eletricidade. No entanto, os processos de conversão, tais como solar, eólico e hidrelétrico, dependem de uma fonte de combustível flutuante. Nestes casos, o sistema de alimentação deve ter alguma capacidade de armazenamento de energia para superar as flutuações no fornecimento de energia. Normalmente, o armazenamento de energia ocorre por meio de um processo de conversão de energia elétrica para outra forma de energia potencial. Algumas opções para o armazenamento de energia em larga escala incluem o armazenamento de energia em baterias (do inglês *Battery Energy Storage - BES*), volantes ou *Flywheels*, armazenamento de energia por supercondutores magnéticos (do inglês *Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES*), armazenamento de energia por ar comprimido (do inglês *Compressed Air Energy Storage - CAES*) e armazenamento por bombeado (do inglês *Pumped storage - PS*).

2.3.3. Modelagem das DER para a LF em rede de distribuição ativos

Os tipos de tecnologias utilizadas pelas DER mencionadas anteriormente podem ser agrupadas em dois tipos quando sua interface de integração com a rede é analisada. Assim, é possível classificar as DER conforme a tecnologia de interface de conexão com a rede elétrica em DER interconectadas diretamente ao sistema de distribuição (DER-IDS) e DER conectadas por uma interface de rede baseada em inversores (DER-IRI). A Figura 7 mostra a classificação das tecnologias DER segundo o tipo de gerador utilizado.

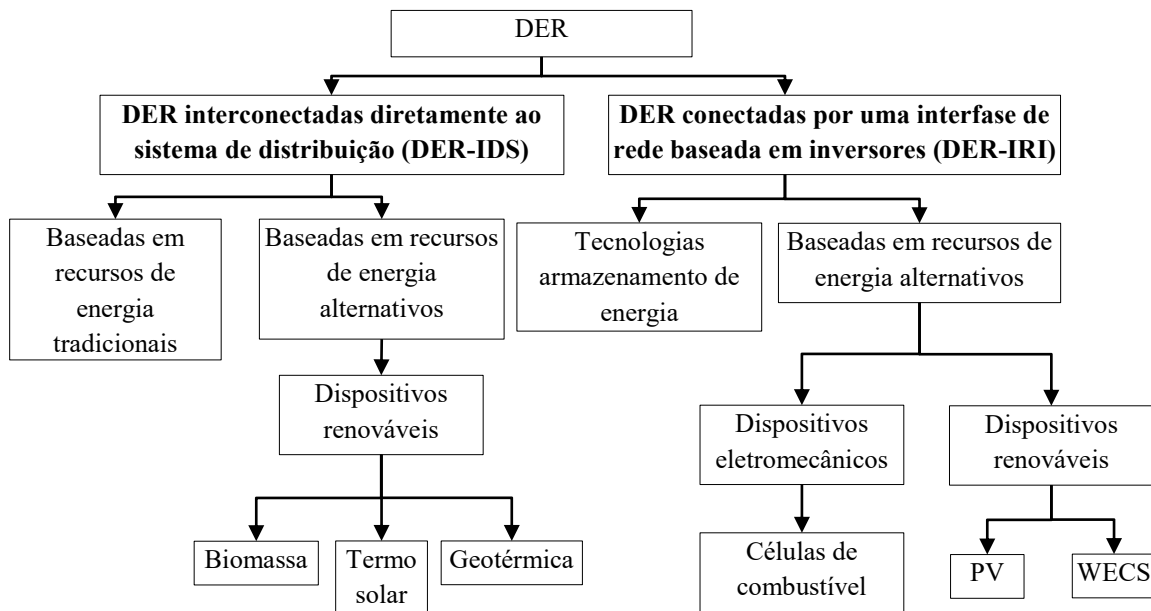


Figura 7 Classificação das tecnologias DER segundo o tipo de interfase de integração

Nesta seção apresenta-se a modelagem das DER a fim de considerar seu efeito na LF em redes de distribuição ativos. A formulação matemática para a modelagem das DER é apresentada conforme a classificação dada na seção anterior. Os itens 2.3.3.1 e 2.3.3.2 apresentam a modelagem para as DER-IDS e DER-IRI. Uma terceira forma para considerar o efeito das DER é apresentada no item 2.3.3.3, onde são utilizadas medidas sincronizadas registradas nas barras terminais das DER.

2.3.3.1. DER interconectadas diretamente ao sistema de distribuição (DER-IDS)

As DER-IDS são aquelas baseadas em geradores eletromecânicos que operam em sincronismo com a tensão da rede. Estas DER têm um gerador síncrono como equipamento principal para a transformação da matéria prima em energia elétrica AC. Portanto, seu modelo elétrico está determinado pelo modelo aproximado do gerador síncrono em regime permanente (PLET, 2011; SAADAT, 2002).

A resposta em falta de um gerador síncrono de excitação separada operando sem carga é dada por (2.4) (SAADAT, 2002).

$$I_{Ga}^f = \underbrace{I_{DC}^f}_{comp\ DC} + \sqrt{2}E_0 \left[\underbrace{\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right) e^{-t/\tau_a''}}_{Subtransitório} + \underbrace{\left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right) e^{-t/\tau_a'}}_{Transitório} + \underbrace{\frac{1}{X_d}}_{regime\ p.} \right] \sin(w_s t + \alpha) \quad (2.4)$$

Com,

$$I_{DC}^f = \sqrt{2}E_0 \frac{1}{X_d''} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \sin \alpha \quad (2.5)$$

Onde,

- I_{Ga}^f : corrente de armadura da máquina síncrona no período em falta
- I_{DC}^f : componente DC da corrente da máquina síncrona no período em falta
- E_0 : tensão em terminais quando ocorre a falta
- X_d'' : reatância subtransitória de eixo direto
- X_d' : reatância transitória de eixo direto
- X_d : reatância síncrona de eixo direto
- α : ângulo de fase da tensão em terminais
- τ_a'' : constante de tempo subtransitória da armadura
- τ_a' : constante de tempo transitória da armadura
- t : tempo
- w_s : frequência angular do gerador

A corrente de armadura da máquina síncrona está constituída por quatro componentes distintos, caracterizados por uma reatância equivalente e uma constante de tempo de decaimento exponencial (PLET, 2011; SAADAT, 2002).

A componente DC, a qual decai de forma exponencial, depende do ângulo de fase α e do módulo de tensão em terminais E_0 quando ocorre a falta. Seu módulo depende da reatância subtransitória de eixo direto e da constante de tempo da armadura τ_a .

A componente subtransitória AC decai rapidamente em aproximadamente dois ciclos e surge devido aos fluxos que atravessam os enrolamentos amortecedores. Seu módulo depende da reatância subtransitória de eixo direto X_d'' e da constante de tempo subtransitória da armadura τ_a'' .

A componente transitória AC decai lentamente em aproximadamente dois segundos e depende do fluxo através do enrolamento de campo da máquina. Seu módulo depende da reatância transitória de eixo direto e da constante de tempo transitória da armadura τ'_a .

A componente AC em regime permanente é constante e é determinada pelo fluxo através do enrolamento da armadura. Seu módulo depende da reatância síncrona de eixo direto X_d da máquina.

As reatâncias de curto-circuito e as constantes de tempo são determinadas por meio de testes de curto-circuito (PLET, 2011; SAADAT, 2002). A Figura 8(a) mostra a forma de onda da corrente de falta de um gerador síncrono descrito pela equação (2.4) para uma falta apresentada em $t = 0$ s.

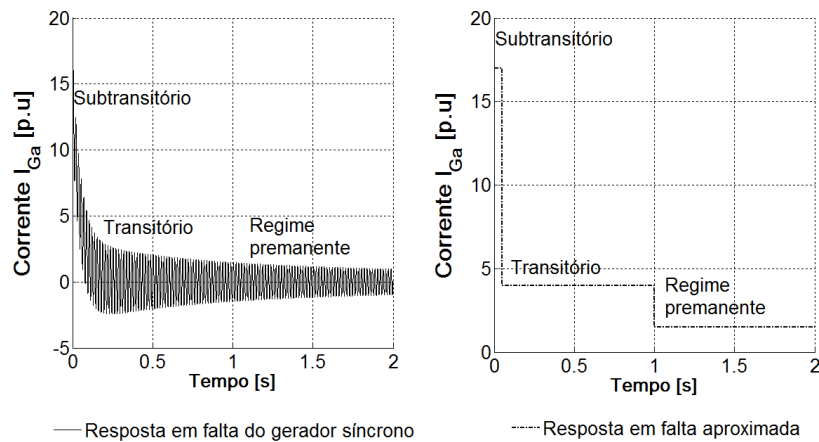


Figura 8 Resposta em falta do gerador síncrono (PLET, 2011)

A resposta não linear não pode ser facilmente incorporada nas técnicas lineares de análise de faltas. Em vez disso, a partir da resposta em falta aproximada do gerador mostrada na Figura 8(b), o gerador é modelado como uma fonte constante de tensão E_0 atrás de uma reatância série, cujo valor depende do objetivo do estudo de falta e o período de tempo de interesse como se ilustra na Figura 9.

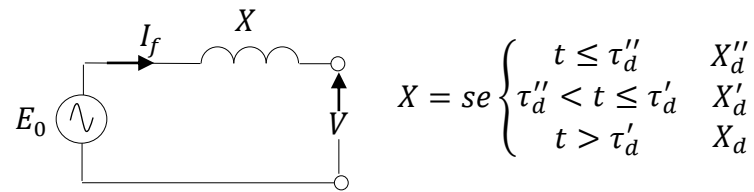


Figura 9 Modelo em falta do gerador síncrono (PLET, 2011)

Qualquer efeito devido às cargas presentes no sistema pode ser compensado pelo ajuste da tensão E_0 , sendo $V_0^{p,f}$ a tensão no terminal de pré-falta ou falta desejado a uma dada corrente de carga (PLET, 2011; SAADAT, 2002). Deve-se notar que, se o gerador é autoexcitado, a energia necessária para gerar o campo do rotor é derivada da saída do gerador. Portanto, durante uma falta sólida (franca), não é mais possível excitar o gerador e isto resulta em uma contribuição à corrente de falta igual à zero no regime permanente.

Nesta tese, para a localização de faltas, utiliza-se um modelo trifásico do gerador síncrono baseado no modelo apresentado na Figura 9. Para este caso, considera-se que o gerador está conectado em Y e com neutro solidamente aterrado. A impedância do gerador está representada por sua resistência de armadura e reatância subtransitória. Portanto, o período estudado é o subtransitório para garantir que os fluxos concatenados no rotor permaneçam constantes, da mesma forma que a tensão interna E_0 . O modelo utilizado é adequado para estudos de curto-circuito, nos quais se deseja computar o valor da componente de frequência fundamental das correntes de curto-circuito. A Figura 10 apresenta o modelo trifásico do gerador síncrono utilizado na LF.

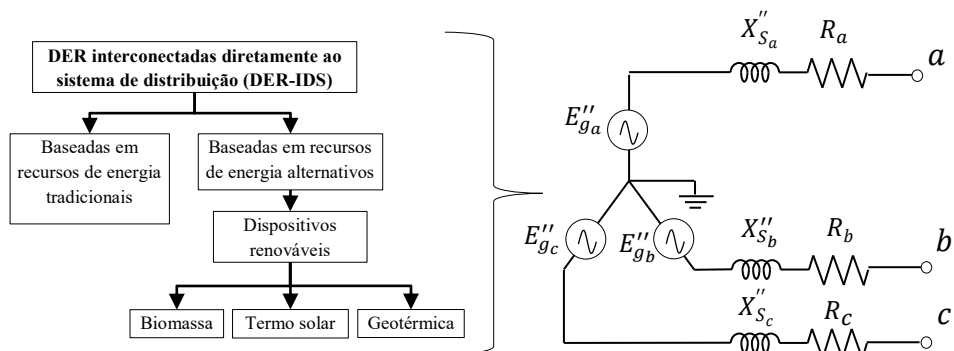


Figura 10 Modelo elétrico para DER-IDS (NUNES; BRETAS, 2010a)

2.3.3.2. DER conectadas por uma interface de rede baseada em inversores (DER-IRI)

As DER-IRI são aquelas baseadas em sistemas de conversão de energias alternativas, cuja totalidade da energia gerada é condicionada por um inversor responsável pela injeção de potência no ponto de conexão. O comportamento das DER que utilizam estes tipos de tecnologias está determinado pelo inversor, especialmente por seu sistema de controle. Portanto, o estudo de um modelo para considerar o efeito das DER na LF será focado nas características próprias do inversor durante a falta. A análise do inversor apresentado nesta seção divide-se no estudo dos seus componentes físicos (hardware) e seu sistema de controle.

- Componentes físicos

Existem diferentes tipos de dispositivos semicondutores e, desse modo, diferentes características de operação segundo sua aplicação específica. Uma diferenciação pode ser realizada pela forma como os dispositivos são comutados ou por seu dispositivo de comutação forçada: *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)*, *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*, *Gate Turn Off (GTO) Thyristor*. Em inversores, uma diferenciação pode ser feita a partir da topologia do inversor: inversores de fonte de tensão (do inglês *Voltage Source Inverters - VSI*) e inversores de fontes de corrente (do inglês

Current Source Inverters – CSI) e o filtro utilizado. A Figura 11 apresenta a topologia típica de inversores tipo VSI e CSI (PLET, 2011; PRODANOVI, 2006).

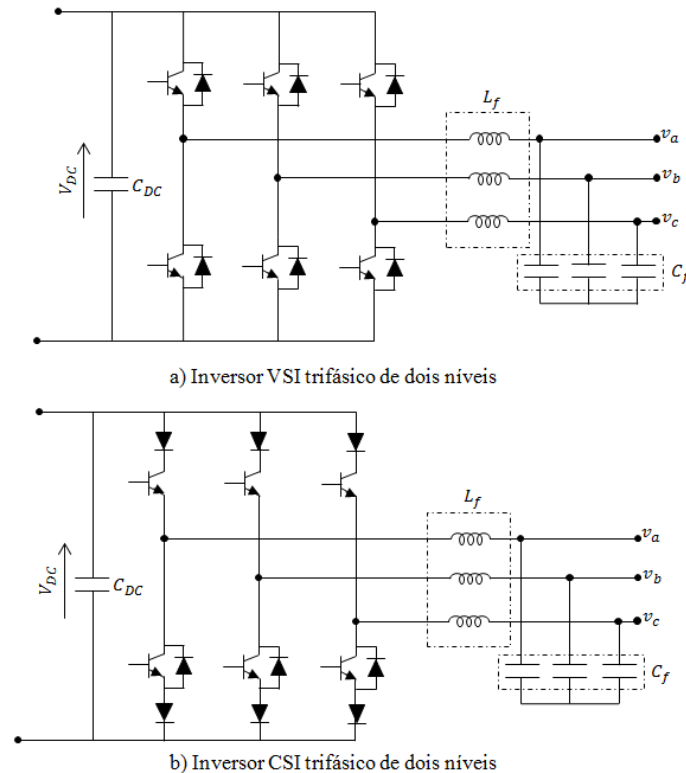


Figura 11 Topologias VSI e CSI para inversores (PLET, 2011)

A diferença principal entre estes dois tipos de inversores é que o VSI tem como entrada uma tensão CC e o CSI uma corrente CC e, em consequência, têm uma disposição diferente dos interruptores. Devido às características e capacidades dos dispositivos semicondutores disponíveis, os inversores de alta potência (50MW-7GW), tal como em aplicações de alta tensão CC (*HighVoltage DC-HVDC*), tendem ser da classe CSI, enquanto que para baixa potência (<1GW) tendem ser da classe VSI.

Uma gama de elementos de potência comumente usados para a comutação é listada na Tabela 3 junto com seus valores máximos típicos. Pode ser observado que, à medida que a relação de tensão e corrente nos dispositivos aumenta, sua máxima frequência de comutação diminui. Os inversores VSI geralmente são de comutação forçada e utilizam diodos e MOSFET ou IGBTs de potência, enquanto os inversores de alta potência tipo CSI usam

tiristores ou GTOs. Os inversores VSI oferecem uma série de benefícios como um melhor controle, harmônicos reduzidos e, portanto, um filtro de saída mais simples e pequeno.

Tabela 3 Características dos dispositivos semicondutores de potência (PLET, 2011)

Dispositivo	Tensão	Corrente	Máx. Frequência de Comutação
Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor (MOSFET)	< 1.5kV	< 300A	< 1MHz
Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)	< 7kV	< 3600A	<100kHz
Bipolar Junction Transistor (BJT)	< 1.5kV	< 750A	< 10kHz
Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT)	< 7kV	< 4000A	<50kHz
Gate-Turn-Off (GTO) Thyristor	< 5kV	< 4500A	< 1kHz
Thyristor	< 7kV	< 6000A	< 500Hz

O modelo em falta do inversor apresentado nesta seção considera uma topologia VSI de dois níveis como se mostra na Figura 11(a).

- Sistema de controle

Um inversor pode operar de duas formas: modo autônomo e modo conectado à rede. A Figura 12 ilustra os modos de operação do inversor.

Com interruptor de transferência aberto, as cargas 2, 3, 4 são alimentadas pelo inversor operando independente da rede (modo autônomo). Quando o interruptor de transferência é fechado, a tensão de saída do inversor é determinada pela rede e as cargas são alimentadas pelo sistema de distribuição (PLET, 2011).

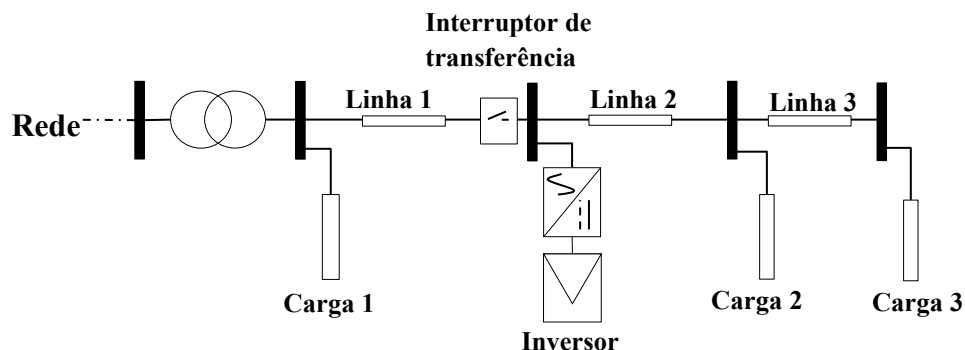


Figura 12 Rede de distribuição com inversor operando em modo conectado à rede modo autônomo (PLET, 2011)

A mudança do modo autônomo para o modo conectado à rede requer que o inversor apresente uma mudança no seu sistema de controle. No modo autônomo, o inversor regula a saída de tensão, e no modo conectado à rede, ele é tipicamente controlado para obter uma saída de potência ativa e reativa constante (AWAD; WU; JENKINS, 2008). Dependendo das políticas e do contrato de acesso à rede assinadas pelo proprietário da instalação da DER e pelo operador de rede, este pode participar no suporte de tensão através da injeção de potência reativa ou simplesmente operar a um fator de deslocamento de um (1). Além disso, uma característica importante do modo conectado à rede está relacionada com a injeção de uma corrente trifásica equilibrada durante o período em falta.

Um sistema de controle popular para inversores conectados à rede é apresentado na Figura 13.

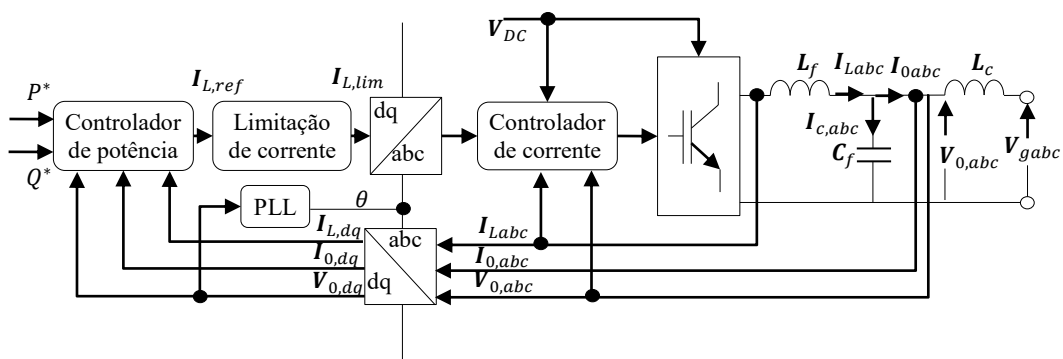


Figura 13 Sistema de controle de um inversor conectado à rede (PLET, 2011)

Este é um sistema de controle multi-laço, constituído por um laço externo e um laço interno. O laço interno corresponde a um laço de controle de corrente para atingir uma saída de potência de alta qualidade, exibindo uma alta impedância de saída para todas as frequências exceto a fundamental. O laço externo de controle de potência gera uma corrente de referência do indutor do filtro, estimando a saída de corrente requerida para acompanhar a potência de referência a uma dada saída de tensão. Os módulos principais do sistema de controle que devem ser considerados para a definição de um modelo em falta do inversor são descritos a seguir.

Sincronização: independente do controle de potência ativa e reativa é necessário o conhecimento do ângulo de fase de sequência positiva do componente fundamental da tensão da rede para sincronizar o inversor com o sistema de distribuição. Este processo é realizado por um sistema de laço de bloqueio em um sistema de referência síncrono trifásico “*Three Phase Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop (SRF-PLL)*”. Este sistema, por sua vez, durante um colapso de tensão em terminais, fixa a frequência de referência a seu valor de pré-falta para manter a estimação do ângulo de fase ao longo da falta (PLET; GREEN, 2014; PLET, 2011).

Controle de corrente: este módulo apresenta um laço de controle para o filtro, o qual garante uma corrente do indutor senoidal e balanceada quando a tensão da rede é distorcida (PLET, 2011; TEODORESCU *et al.*, 2006).

Controle de potência: o controle de saída da potência complexa é realizado a partir de um sistema de referência síncrono, para obter uma corrente de referência baseada na tensão da rede para a corrente que atravessa o indutor do filtro. Em regime permanente, este controle garante que a corrente que atravessa o indutor do filtro não apresente componente DC nem ondulações causadas por harmônicas de segunda ordem devido a algum desequilíbrio.

Em uma rede desequilibrada, a tensão se caracteriza pela presença de uma componente de sequência positiva, negativa e zero $V_0 = V_0^{(+)} + V_0^{(-)} + V_0^{(0)}$. Porém, na estimação da corrente de referência para inversores trifásicos de três fios, não se considera a componente de sequência zero. A componente de sequência negativa surge como uma componente com o dobro da frequência fundamental no sistema de referência síncrona e esta é filtrada por um filtro passa-baixa. Por conseguinte, a estimação da corrente de referência se realiza somente com a componente de sequência positiva da tensão da rede, gerando, em consequência, uma corrente de referência apenas de componente de sequência positiva (PLET, 2011).

Limitação de corrente: os dispositivos de comutação de eletrônica de potência utilizados na construção dos inversores apresentam uma baixa inércia térmica. Por conseguinte, precisam uma limitação ativa da corrente que atravessa o indutor do filtro. Existem várias opções para realizar esta limitação, entre elas estão as de limitação instantânea no sistema de referência de fase, limitação instantânea no sistema de referência síncrona e limitação por imposição de uma corrente de falta predefinida para a corrente de referência do indutor do filtro. Nesta última estratégia, a corrente do indutor é limitada pela imposição de uma corrente de referência $I_{L,sat}$ caso esta exceda um limite $I_{L,thld}$. Uma vez que é provável que o sistema de distribuição precise de serviços de suporte de potência de qualquer gerador conectado, a última opção é escolhida neste trabalho, já que permite ao inversor injetar uma corrente predefinida durante a falta (PLET, 2011).

- Modelo em falta de um inversor conectado à rede

O modelo em falta do inversor utilizado para considerar o efeito das DER-IRI é o modelo proposto por Plet (2011). Este modelo é desenvolvido para um inversor de fonte de tensão (VSI) trifásico de dois níveis e filtro LCL. O sistema de controle do inversor é mostrado na Figura 13 e corresponde a um sistema de controle multi-laço. Este sistema está constituído por um laço externo e um laço interno. O laço interno corresponde a um laço de controle de corrente para atingir uma saída de potência de alta qualidade, exibindo uma alta impedância de saída para todas as frequências exceto a fundamental. O laço externo de controle de potência gera uma corrente de referência do indutor do filtro $I_{L,ref}$ pelo cálculo da corrente de saída I_0 requerida para realizar o seguimento da potência de referência S_{ref} a uma dada saída de tensão V_0 (PLET, 2011).

Quando uma falta ocorre, a resposta natural do inversor é incrementar a corrente de saída em ordem de seguir a potência S_{ref} . As equações (2.6) e (2.7) definem a corrente de referência do indutor do filtro do inversor $I_{L,ref}$ e a corrente de saída do inversor I_0 .

$$I_{L,ref} = conj\left(\frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}}\right) + V_o^{(+)} \cdot j\omega C_f \quad (2.6)$$

$$I_0 = conj\left(\frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}}\right) - V_o^{(-)} \cdot j\omega C_f \quad (2.7)$$

Onde,

S_{ref} : potência aparente de referência

$I_{L,ref}$: corrente de referência que atravessa o indutor do filtro

$V_o^{(+)}$: componente de sequência positiva da tensão no ponto de conexão do inversor

$V_o^{(-)}$: componente de sequência negativa da tensão no ponto de conexão do inversor

C_f : capacitor do filtro

ω : frequência de operação da rede

No entanto, os dispositivos de comutação eletrônica de potência da ponte do inversor apresentam uma baixa inércia térmica e, por tanto, precisam ser protegidos contra sobreaquecimento, sendo necessário realizar uma limitação ativa da corrente que atravessa o indutor do filtro. Geralmente, esta corrente é limitada pelo sistema de controle a duas (2) vezes a corrente nominal do inversor (PLET; GREEN, 2014). As equações (2.8) e (2.9) definem a corrente de referência do indutor do filtro do inversor $I_{L,ref}$ e a corrente de saída do inversor I_0 quando o sistema de controle do inversor executa sua estratégia de limitação de corrente.

$$I_{L,ref} = I_{L,sat} \quad (2.8)$$

$$I_0^{sat} = I_{L,sat} - V_o \cdot j\omega C_f \quad (2.9)$$

A partir da análise anterior, podem ser obtidos modelos lineares analíticos equivalentes que representem os diferentes modos de operação do inversor (PLET; GREEN, 2014). Com base nas equações (2.6) e (2.7), pode ser concluído que, durante a operação do inversor sem limitação de corrente, este pode ser representado por uma fonte de potência constante P&Q de sequência positiva atrás de uma reatância de acoplamento como se ilustra na Figura 14. Neste modelo, o capacitor do filtro aparece no circuito equivalente de sequência negativa porque o sistema de controle é habilitado para suprimir a componente de sequência negativa da corrente.

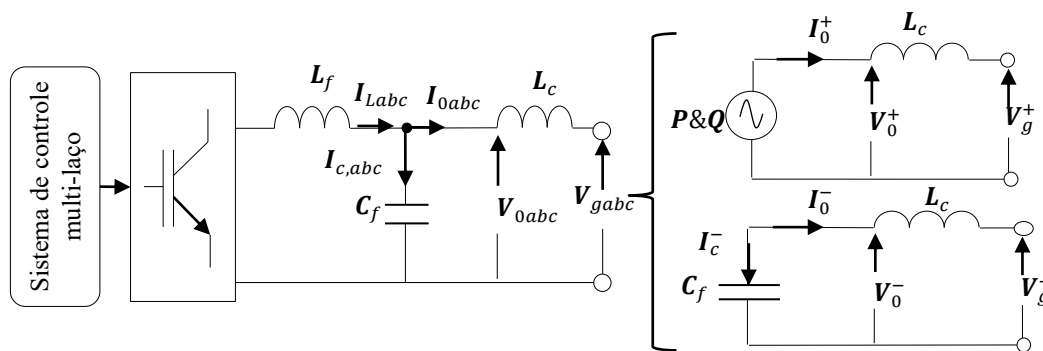


Figura 14 Circuito equivalente do inversor em componentes de sequência durante operação normal

Por outro lado, quando o inversor opera sob uma condição de tensão de saída reduzida ocasionada por um afundamento de tensão, e a estratégia de limitação de corrente é executada, o inversor pode ser representado como uma fonte de corrente atrás de uma reatância de acoplamento e do capacitor do filtro, como se ilustra na Figura 16.

Com base no modelo anteriormente exposto, um modelo estático de resposta em falta das DER-IRI foi programado usando as ferramentas de MODEL e TACS do ATP/EMTP (ATP, 1996; DUBÉ, 1996).

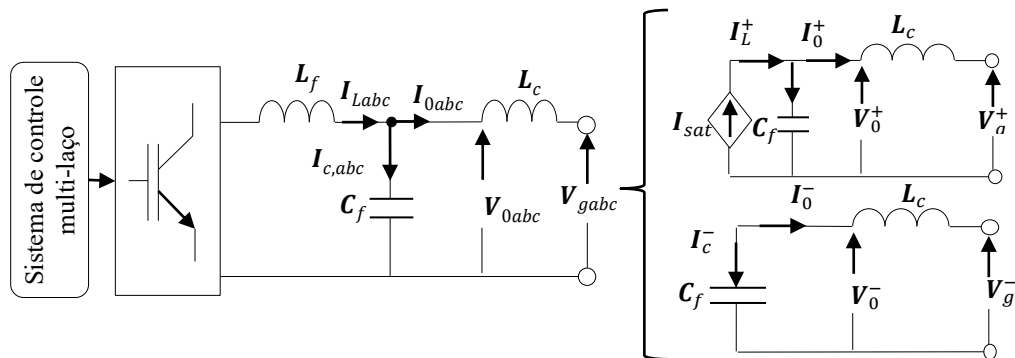


Figura 15 Circuito equivalente do inversor em componentes de seqüência durante operação em limitação de corrente

Assim, o modelo anteriormente apresentado do inversor é programado como um MODEL, o qual determina o valor de corrente que deve ser injetado pela fonte de corrente tipo TACS conectada à rede de distribuição simulada. A interação entre o modelo estático das DER programado e o sistema de distribuição é apresentado na Figura 16.

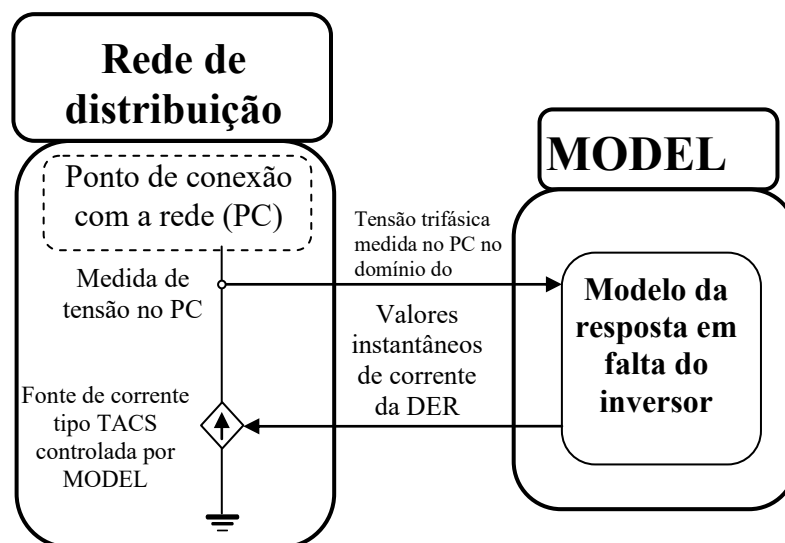


Figura 16 Interação entre o modelo estático das DER e a rede de distribuição em ATP/EMTP

Uma análise detalhada da implementação e validação deste modelo é apresentada no apêndice B

- Estimação da potência de referência do inversor S_{ref}

Um dos principais problemas da LF em sistemas de distribuição ativos é a estimação da contribuição da corrente desde as DER. Os métodos recentemente propostos na literatura técnica (ALWASH; RAMACHANDARAMURTHY; MITHULANANTHAN, 2015; BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015) determinam sua contribuição de corrente desde as medições de tensão e corrente registradas nas unidades de geração. Porém, hoje em dia as redes de distribuição de energia têm poucos instrumentos de medição instalados e carecem de uma infraestrutura de comunicação que permita ter esta informação disponível.

Por outro lado, os registros de dados locais de temperatura, radiação solar e variação de vento, podem ser utilizados para estimar a contribuição de corrente das DER. Isto é possível porque esta corrente é proporcional à energia gerada pela DER a partir de sua fonte de energia primária. Assim, para DER constituídas por sistemas fotovoltaicos (DER-PV), previsões de temperatura e radiação solar por séries temporais podem ser usadas para estimar a potência gerada pela DER-PV. Alguns métodos utilizados para este objetivo são analisados em (REIKARD, 2009). Com a obtenção de um modelo que permita determinar a radiação e a temperatura no tempo, é possível determinar a potência gerada pela DER-PV tendo como base o modelo elétrico dos módulos PV a partir da determinação do Máximo Ponto de Potência (MPP) (PERERA *et al.*, 2012). No entanto, antes de estimar o MPP, os parâmetros do módulo PV devem ser ajustados para as condições ambientais locais a partir dos dados de radiação solar e temperatura, como é apresentado em (CHATTERJEE; KEYHANI; KAPOOR, 2011). Assim, após os parâmetros do módulo PV serem ajustados, o MPP é estimado por meio de um algoritmo de Seguimento de Máximo Ponto de Potência (do inglês

Maximum Power Point Tracking - MPPT), como é proposto em (PERERA *et al.*, 2012). Finalmente, o MPP é assumido como a potência de referência S_{ref} para as DER-PV.

Similarmente, a potência gerada pelas DER constituídas por geradores eólicos (DER-GE) pode ser estimada. A injeção de potência das DER-GE é usualmente estimada em dois passos: estimação da potência ativa utilizando a curva de potência da turbina e estimação da potência reativa necessária para um fator de potência especificado (ACKERMANN, 2012).

A curva de potência de uma turbina eólica relaciona a potência ativa gerada com a velocidade do vento. Consequentemente, esta curva varia dependendo de vários fatores, tais como o sistema de controle da turbina, variáveis meteorológicas, a localização e as condições topográficas do parque eólico (TASTU *et al.*, 2014). No entanto, curvas de potência podem ser construídas usando registros de dados de locais da velocidade do vento, como é mostrado em (TAYLOR; MCSHARRY; BUIZZA, 2009). Assim, os métodos de previsão de energia eólica são usados para estimar a potência gerada pelas DER-GE (TAYLOR; MCSHARRY; BUIZZA, 2009). Para este caso, a potência gerada pela DER-GE é assumida como a potência de referência S_{ref} .

2.3.3.3. Medidas sincronizadas nas DER

Com a introdução dos conceitos dos smart-grid nos sistemas de distribuição, é possível haver sistemas de medição distribuída (do inglês *Distributed Measurement System - DMS*) que permitam ao operador de rede ter um maior acesso à informação sobre o sistema e um controle mais eficiente. Estes sistemas geralmente são compostos por três componentes básicos: os objetos, a rede de comunicação e o centro de controle. Os objetos são elementos como dispositivos eletrônicos inteligentes (IED), relés baseados em microprocessadores e unidades de terminal remoto (RTU) instalados no sistema. Estes dispositivos realizam um

controle local e enviam ou recebem sinais do Sistema Mestre de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) (ZHABELOVA; VYATKIN, 2012). A rede de comunicação interconecta os dispositivos com o sistema de SCADA, permitindo a transmissão dos dados. O sistema SCADA determina as funções de controle central, como o processamento da informação e tomada de decisões.

O principal problema desde sistemas, além do alto custo de implementação, é o fato de que a comunicação e transmissão de dados devem ser realizadas de forma sincronizada. Diferentes estratégias inspiradas nas tecnologias de medição fasorial sincronizadas foram propostas para sistemas de distribuição (PALLARÉS, 2012). Estas estratégias utilizam um Sistema de Posicionamento Global (do inglês *Global Positioning System – GPS*) que emite um sinal de PPT (pulso por segundo) e permite fazer o sincronismo da informação (AZEVEDO, 2009). Diferentes estudos para a localização de faltas utilizando medidas sincronizadas foram recentemente propostos na literatura (DING et al., 2011; ZHENG; JIA, 2011). No entanto, nestes trabalhos, é considerado um número significativo de dispositivos de medição, o qual é dificilmente apresentado nos sistemas de distribuição reais.

Nesta tese, são considerados somente equipamentos de medida na subestação e, se existentes, nas DER capazes de armazenar os sinais de tensão e corrente e um sistema de comunicação para transmitir a informação de forma sincronizada ao centro de controle. A partir do processamento desta informação, são estimados os fasores de tensão e corrente em pré-falta e falta à frequência fundamental. O efeito das DER é considerado a partir dos fasores corrente registrados nas mesmas.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foram apresentadas as definições de tipos de faltas, bem como uma descrição resumida das principais técnicas de LF. Outro aspecto analisado neste capítulo é a evolução dos métodos de LF baseados na impedância. Esta análise foi realizada para os métodos de LF propostos tanto para sistemas de distribuição passivos como ativos. Para as técnicas focadas em sistemas de distribuição passivos, foi estudado principalmente características típicas da rede consideradas na sua formulação. Para as técnicas focadas para sistemas ativos, foram analisados os diferentes modelos de GD na formulação de LF. Definições, classificações e características importantes das DER foram retratadas e, finalmente, modelos elétricos das DER para considerar seu efeito na LF foram definidos.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS

Este capítulo apresenta uma metodologia adaptativa para LF baseada na estimativa da impedância aparente para sistemas de distribuição ativos. A metodologia proposta combina a informação fornecida por dispositivos eletrônicos inteligentes alocados na subestação principal e nos terminais de cada unidade de DER, quando disponíveis, o conhecimento da topologia da rede e os seus parâmetros para estimar a LF. A sua característica adaptativa é dada pelo uso de modelos elétricos lineares para considerar o efeito das DER conectadas à rede, quando a informação fornecida pelos IED não está disponível. Adicionalmente, uma estratégia baseada na técnica *Ladder* é desenvolvida para estimar a contribuição de corrente desde as DER até a falta. Esta estratégia permite considerar vários geradores conectados e seus diferentes modos de operação. Além disso, os modelos propostos na literatura para cada um dos componentes série (segmentos de linha e transformadores) e shunt (cargas pontuais, cargas distribuídas e bancos de condensadores) das redes de distribuição de energia são utilizados.

3.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA A ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA ATÉ A FALTA

Inicialmente, o desenvolvimento da metodologia analítica proposta parte da formulação matemática baseada na impedância proposta por Salim et al. (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011). A ideia central é incluir esta formulação matemática em uma metodologia analítica de LF, considerando sistemas de distribuição ativos. Este método foi escolhido porque, segundo a evolução dos métodos de LF baseados na impedância aparente apresentada no capítulo 2, sua formulação matemática é a mais completa, considerando características típicas dos sistemas de distribuição como o desequilíbrio nas linhas, desequilíbrio nas cargas, a presença de laterais no sistema, o efeito capacitivo, entre outras.

No apêndice A, é apresentada uma análise detalhada da formulação matemática proposta em (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011). A análise é dividida para faltas fase-terra e faltas fase-fase. Na continuação, a apresentação da metodologia analítica é feita através da análise da formulação proposta em (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011) em sistemas de distribuição ativos.

Considerando o sistema de distribuição apresentado na Figura 17, o mesmo é representado por um modelo unifilar, o qual, na barra Se está conectada a subestação principal e nas barras G e N as DER. Cada seção é representada pelo modelo exato de linha de distribuição (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011). O alimentador tem uma falta entre as barras k e $k+1$.

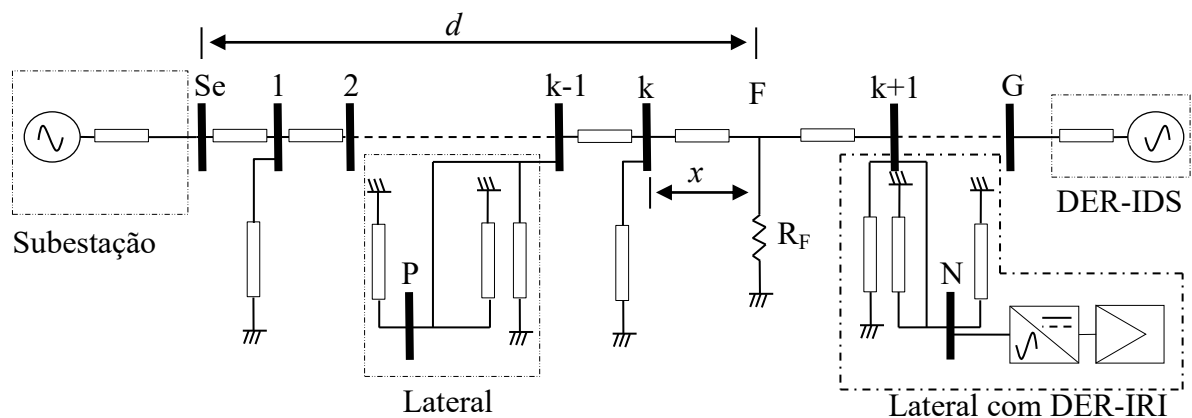


Figura 17 Unifilar: sistema de distribuição ativo em falta

O objetivo principal da análise em falta baseada em impedância é estimar uma distância d desde a subestação até o local em falta através de uma impedância aparente. No entanto, como a seção de linha em falta é desconhecida, múltiplas estimativas podem ser encontradas. Assim, inicialmente, todas as seções do sistema são assumidas em falta e uma distância x é estimada para cada seção, até ser determinado um valor que esteja entre a seção de linha em análise. Por esta razão, a análise para determinar a distância até a falta é reduzida à seção de linha em estudo, como é apresentado nos itens 3.1.1 e 3.1.2.

Considera para a seguinte análise o modelo generalizado para uma seção de linha em falta mostrado na Figura 18.

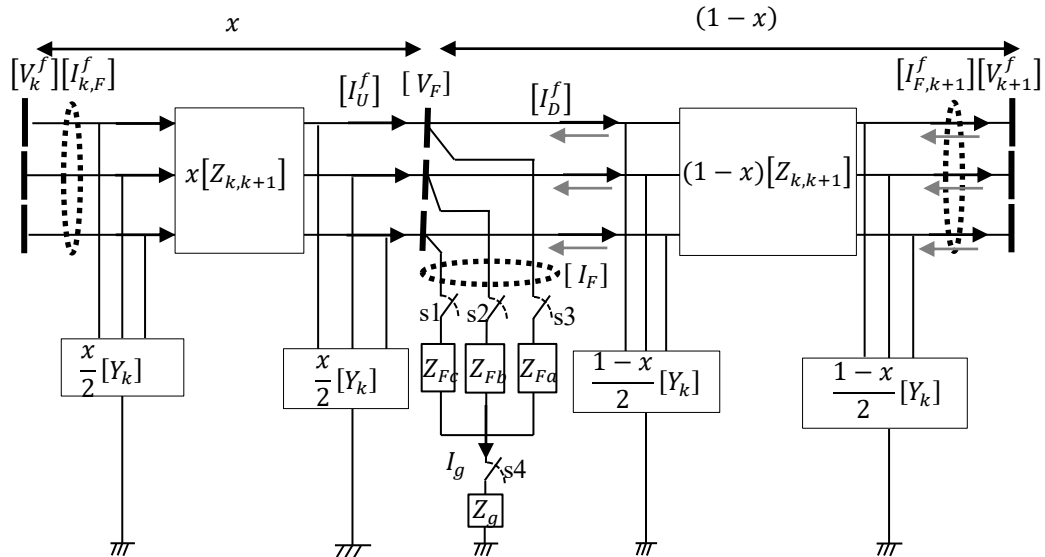


Figura 18 Modelo trifásico generalizado para uma seção de linha em falta.

Os diferentes tipos de faltas podem ser obtidos a partir da combinação das chaves s_1 , s_2 , s_3 e s_4 como se mostra na Tabela 4. Onde, zero (0) significa que o interruptor está aberto e um (1), que está fechado. Considera-se ainda, que o estado inicial de todos os interruptores é aberto.

Tabela 4 Tipos de faltas a partir da combinação das chaves s_1 , s_2 , s_3 e s_4

Tipo de falta	s_i	s_j	s_h	s_4
Fase i -terra	1	0	0	1
Fase-fase i - j	1	1	0	0
Fase-fase i - k -terra	1	1	0	1
Trifásica	1	1	1	0
Trifásica-terra	1	1	1	1

A análise é dividida em faltas fase-terra e faltas fase-fase (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011).

3.1.1. Falta fase-terra

Considere-se o modelo generalizado de uma falta como se mostra na Figura 18. Modificando os estados das chaves s1, s2 e s3, pode ser obtido qualquer tipo de falta fase-terra se a chave s4 tiver o valor de 1, sendo que a partir deste modelo, é possível obter que (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011; SALIM, 2008)

$$\begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{F_a} + Z_{F_g} & Z_{F_g} & Z_{F_g} \\ Z_{F_g} & Z_{F_b} + Z_{F_g} & Z_{F_g} \\ Z_{F_g} & Z_{F_g} & Z_{F_c} + Z_{F_g} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{F_a} \\ I_{F_b} \\ I_{F_c} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Em (3. 1), somente as fases em falta apresentam correntes que são diferentes de zero. A partir da Figura 18, também pode ser obtida uma expressão para a tensão no ponto em falta, como uma função da distância de falta.

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{d}_x \cdot \mathbf{V}_k - \mathbf{b}_x \cdot \mathbf{I}_{k,F} \quad (3.2)$$

Onde,

$$\mathbf{d}_x = \mathbf{I} + 0.5 \cdot x^2 \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{b}_x = x \cdot \mathbf{Z}_{abc} \quad (3.4)$$

Substituindo (3. 2) em (3. 1), é possível escrever para cada fase w em falta que:

$$Z_{F_w} \cdot I_{F_w} + Z_{F_g} \cdot I_g = V_w + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_w - x \cdot N_w \quad (3.5)$$

Onde, I_g corresponde à soma das correntes de falta das fases em falta, como se mostra na Figura 18 e,

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{k_a} \\ V_{k_b} \\ V_{k_c} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{k,F_a} \\ I_{k,F_b} \\ I_{k,F_c} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Como é mostrado no apêndice A, separando em parte real e imaginária a equação (3. 5) e considerando que a natureza da falta é puramente resistiva, pode-se determinar uma expressão generalizada para faltas fase-terra, onde w são as fases que envolvem a falta.

$$x^2 \cdot \left[0,5 \cdot \sum_{w \in \Omega_w} \Im\{M_w \cdot I_{F_w}^*\} \right] - x \cdot \left[\sum_{w \in \Omega_w} \Im\{N_w \cdot I_{F_w}^*\} \right] + \left[\sum_{w \in \Omega_w} \Im\{V_{k_w} \cdot I_{F_w}^*\} \right] = 0 \quad (3. 8)$$

3.1.2. Falta fase-fase

Considere o modelo generalizado de uma falta como se mostra na Figura 18. Modificando os estados das chaves s_1 , s_2 e s_3 , pode ser obtido qualquer tipo de falta fase-fase se a chave s_4 tiver o valor de 0. Desde o modelo, é possível obter que (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011)

$$I_{F_b} = -I_{F_a} \quad (3. 9)$$

$$V_{F_a} = V_{k_a} + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_a - x \cdot N_a = V_{k_b} + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_b - x \cdot N_b + Z_F \cdot I_{F_a} \quad (3. 10)$$

Fazendo o mesmo procedimento que já foi realizado para as faltas a terra, como é mostrado no apêndice A, separando em parte real e imaginária a equação (3. 10) e considerando que a natureza da falta é puramente resistiva, pode-se determinar uma expressão generalizada para faltas fase-fase, onde u e v são as fases que envolvem a falta.

$$x^2 \cdot 0,5 \cdot \Im\{(M_u - M_v) \cdot I_{F_u}^*\} - x \cdot \Im\{(N_u - N_v) \cdot I_{F_u}^*\} + \Im\{(V_{k_u} - V_{k_v}) \cdot I_{F_u}^*\} = 0 \quad (3. 11)$$

As equações (3. 8) e (3. 11) são polinômios de ordem dois em x , por tanto, duas soluções para a distância até a falta são obtidas. A determinação da distância até a falta fisicamente correta é realizada da forma apresentada na seção A.2.5.4

A análise anteriormente apresentada permite estimar a distância até o local em falta. Porém, é necessário realizar um algoritmo que permita sua aplicação em cada seção do sistema, atualizando todos os parâmetros necessários para estimar a distância da falta x . Na seção 3.2, apresenta-se um algoritmo de LF baseado na estimação iterativa da corrente de

falta. O algoritmo apresentado permite considerar tanto o efeito das DER na LF a partir de modelos elétricos lineares das DER, quanto pela informação fornecida pelos IED.

3.2. FORMULAÇÃO DE UM ALGORITMO GENERALIZADO PARA A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS

Os algoritmos existentes para a LF em redes de distribuição ativos não consideram o efeito capacitivo na formulação da distância da falta, assumindo as linhas de distribuição como um modelo RL (BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015; BEDOYA-CADENA, A.; OROZCO-HENAO; MORA-FLOREZ, 2012; BRAHMA, 2011; BRETAS; SALIM, 2006; MA *et al.*, 2008; NUNES; BRETAS, 2010a, b; OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012; ZHENG; JIA, 2011). Em Salim *et. al.* (2011), foi demonstrado que esta característica afeta consideravelmente o desempenho dos métodos de LF (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011). Também, no estado da arte não se apresenta uma metodologia que permita considerar o efeito das DER na LF a partir dos seus modelos elétricos, quando a informação fornecida pelos IED não esteja disponível. Esta situação permite ao operador de rede utilizar a informação que possua das DER, fazendo com que a formulação proposta na seção 3.1 possa ser aplicada em sistemas de distribuição ativos com ou sem sistemas de medição distribuídos (DMS). O algoritmo proposto para a LF está orientado à estimação da corrente de falta a partir da informação conhecida das DER. O algoritmo utiliza principalmente os fasores de corrente fornecidos pelos IED nas barras terminais das DER. No entanto, se estes não estiverem disponíveis em uma ou várias DER, é possível que a informação típica possa ser utilizada para considerar seu efeito a partir do seu modelo elétrico. Adicionalmente, uma estratégia baseada na técnica *Ladder* é desenvolvida para estimar a contribuição de corrente desde as DER até a falta. Esta estratégia permite considerar vários geradores conectados e seus

diferentes modos de operação. Além disso, os modelos propostos na literatura para cada um dos componentes série (segmentos de linha e transformadores) e componentes shunts (cargas pontuais, cargas distribuídas e bancos de condensadores) das redes de distribuição de energia podem ser utilizados. O algoritmo generalizado para a estimação da distância da falta se compõe de quatro etapas, como mostra a Figura 19.

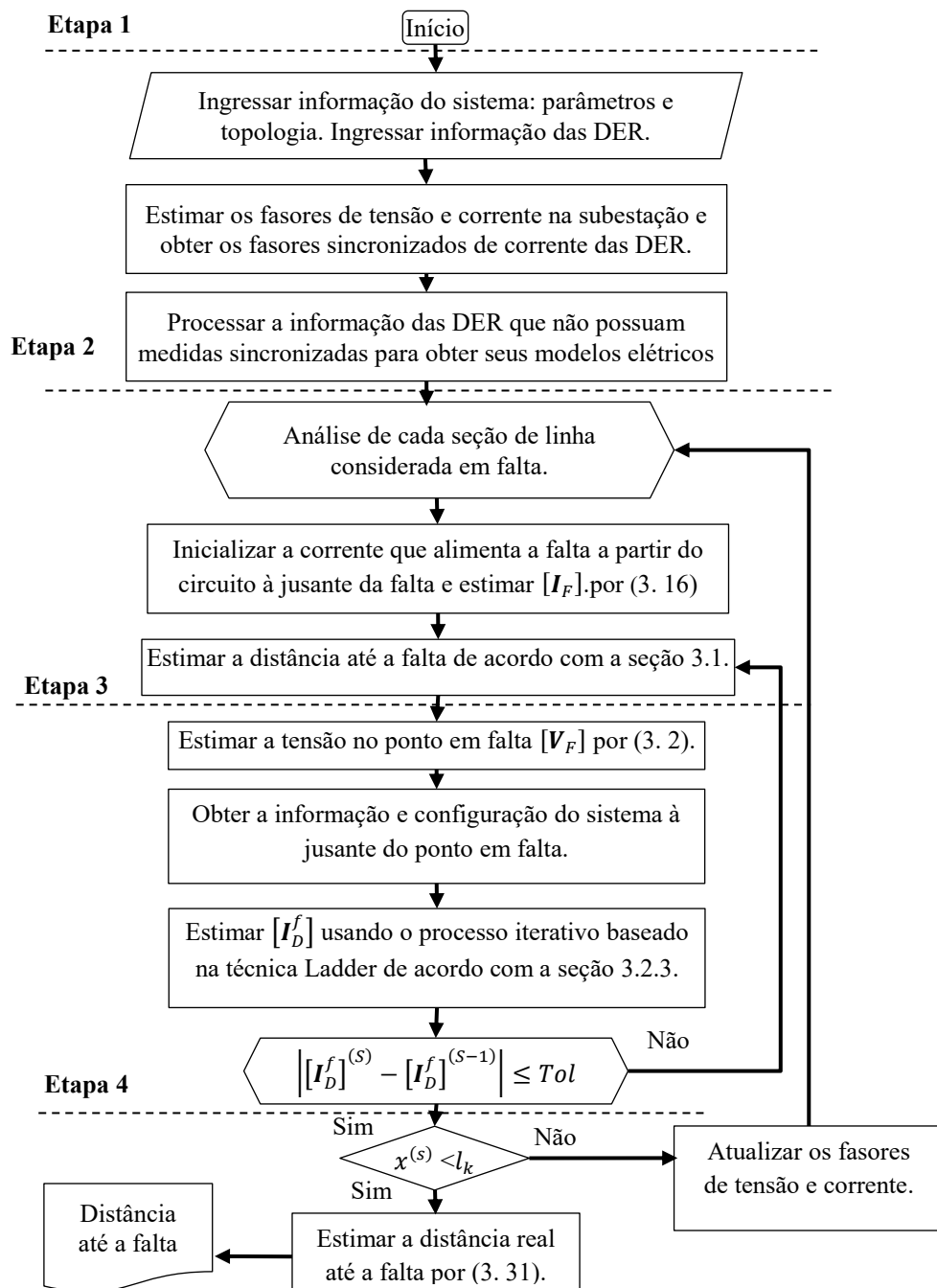


Figura 19 Diagrama de fluxo da metodologia adaptativa proposta para LF

A seguir, nos itens 3.2.1 e 3.2.4 são analisadas cada uma das etapas da metodologia proposta.

3.2.1. Etapa 1: Processamento da informação da rede de distribuição e das DER

Processamento da informação da rede: nesta etapa é ingressada a informação da rede de distribuição. Esta informação está constituída por sua topologia e os parâmetros elétricos das cargas e linhas de distribuição. Como os sistemas testes utilizados nesta tese são simulados no ATP/EMTP, esta informação pode ser obtida e processada de forma automática, como é apresentado em (BEDOYA; MORA; PÉREZ, 2012). Também, os fasores de tensão e corrente em pré-falta e falta na subestação principal são estimados a partir das amostras de sinais discretos de tensão e corrente armazenados no registro de falta. Para sua estimação, é utilizada a transformada discreta de Fourier com remoção da componente DC apresentada em (SAHA; ROSOLOWSKI, 2002).

Processamento da informação das DER: a transformada discreta de Fourier mencionada anteriormente também é utilizada para estimar os fasores de corrente no período de falta nas DER que possuam dispositivos de medição ou IED. Nesta abordagem, somente os fasores de corrente são necessários, dado o fato que um processo iterativo baseado na técnica Ladder é utilizado para estimar a contribuição de corrente das DER até a falta. Isto corresponde a uma vantagem com relação aos métodos existentes no estado da arte, já que estes utilizam tanto os fasores de tensão quanto os de corrente no período de falta.

Por outro lado, para as DER que não possuem dispositivos de medição ou sua informação não está disponível, os modelos elétricos das DER são utilizados. Para DER-IDS, é necessário o conhecimento da reatância sub-transitória e a potência nominal da máquina. Caso a reatância sub-transitória não seja conhecida, valores típicos são reportados na literatura técnica (ANDERSON, 1995; KUNDUR, 1994). Com esta informação, um fluxo de

carga é executado para determinar a tensão interna do modelo aproximado do gerador síncrono.

Para as DER-IRI, a potência de referência do inversor deve ser conhecida. Esta potência pode ser estimada a partir de registros de dados locais de temperatura e radiação se a DER é de tipo DER-PV, ou registros de dados locais de velocidade de vento no caso de DER-GE, como foi apresentado na seção 2.3.3.2. Também, são necessários o conhecimento do capacitor do filtro e da reatância de acoplamento do inversor. Geralmente, estes valores são fornecidos pelos proprietários das usinas ao operador de rede no momento da solicitação do acesso à rede (ANEEL, 2012b). Porém, no caso de não serem conhecidos, estes podem ser estimados a partir da teoria básica de design de filtros, como é apresentado em (AHMED; FINNEY; WILLIAMS, 2007).

3.2.2. Etapa 2: estimativa da distância até a falta em cada seção de linha

Como a seção em falta é desconhecida, a formulação matemática para estimar a distância da falta é aplicada para cada seção do sistema a partir das expressões (3. 8) e (3. 11), como foi explicado na seção 3.1. No entanto, para estimar a distância até a falta é necessário conhecer a corrente de falta $[I_F]$. Tendo como base a Figura 18, a corrente de falta pode ser definida por (3. 12).

$$[I_F] = [I_U^f] - [I_D^f] \quad (3. 12)$$

Onde,

$$[I_U^f] = -[c_x] \cdot [V_k^f] + [a_x] \cdot [I_{k,F}^f] \quad (3. 13)$$

$$a_x = [I] + 0.5 \cdot x^2 \cdot [Z_{k,k+1}] \cdot [Y_k^{sh}] \quad (3. 14)$$

$$c_x = x \cdot [Y_k^{sh}] + 0.25 \cdot x^3 \cdot [Y_k^{sh}] \cdot [Z_{k,k+1}] \cdot [Y_k^{sh}] \quad (3. 15)$$

E $[I_D^f]$ é a contribuição de corrente do circuito à jusante da falta. Esta corrente depende da contribuição de corrente individual de cada DER e da corrente consumida pelas cargas

conectadas no sistema à jusante da falta. No caso do sistema possuir DER baseadas em geradores não tradicionais, sua contribuição de corrente vai depender do seu modo de operação, instantes depois de ter acontecido a falta. Este modo de operação é influenciado pela severidade do afundamento de tensão na sua barra de conexão com a rede (PLET; GREEN, 2014). Por tanto, é necessário implementar uma estratégia que permita estimar esta tensão e a corrente de saída do inversor para, assim, determinar seu modo de operação e a verdadeira corrente injetada pela mesma no momento da falta. Este objetivo é atingido usando um processo iterativo baseado na técnica Ladder, como é apresentado na etapa 3.

Por outro lado, como a corrente de falta $[I_F]$ depende da distância x e esta, por sua vez, é definida como uma função de $[I_F]$, é necessário realizar um processo iterativo para refinar a corrente $[I_F]$, como se mostra na Figura 19. Para iniciar este processo iterativo, a corrente de falta é inicializada como a subtração entre a corrente em pré-falta (p) e a corrente em falta (f) no terminal k , como é apresentado em (3. 16):

$$I_F = I_{k,F}^f - I_{k,F}^p \quad (3. 16)$$

3.2.3. Etapa 3: Estimação da contribuição de corrente do sistema à jusante da falta usando um o processo iterativo baseado na técnica Ladder

Para aplicar o processo iterativo baseado na técnica Ladder, assume-se que a seção em análise está em falta, como se mostra na Figura 20. A técnica Ladder é aplicada no sistema à jusante da falta. Por tanto, a configuração deste sistema deve ser obtida como se mostra na Figura 20. Também, no sistema à jusante da falta, a tensão na barra de referência é assumida como a tensão no ponto de falta $[V_F]$ e estimada usando a expressão (3. 2). No entanto, esta tensão depende da distância da falta x . Por esta razão, é necessário realizar um processo iterativo em conjunto com a corrente de falta $[I_F]$. Com a informação anterior pode ser aplicada a técnica Ladder para estimar a corrente $[I_D^f]$.

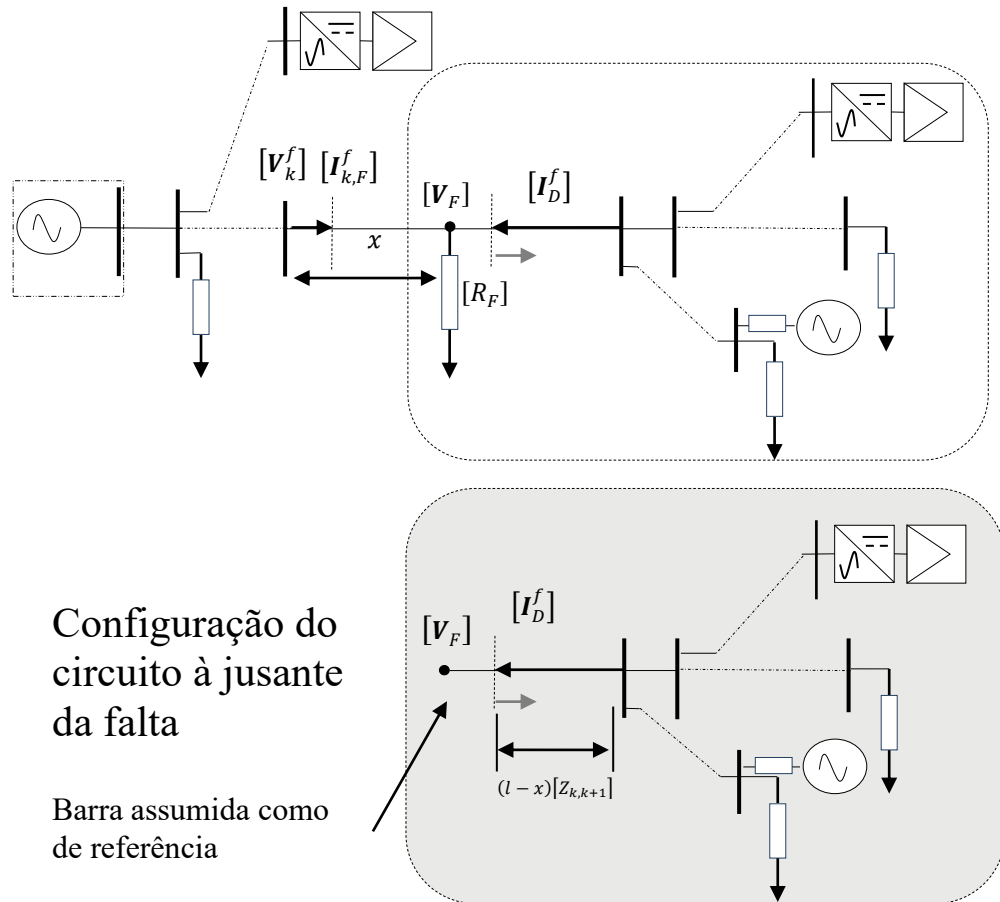


Figura 20 Configuração de circuito à jusante do ponto em falta na seção de análise

A técnica *Ladder* é composta por dois processos: o processo de varredura para trás (*backward-sweep*) e o processo de varredura para frente (*forward-sweep*).

No processo *backward-sweep*, os fasores de tensão e corrente são estimados usando as leis de tensão e corrente de *Kirchhoff* a partir da barra mais afastada até a barra referência. De acordo com o modelo generalizado para componentes séries em sistemas de distribuição apresentado na Figura 21, as expressões que relacionam os fasores de tensão e corrente nas barras local (barra k) e remota (barra $k+1$) utilizadas neste processo são dadas por (3. 17) e (3. 18) (KERSTING, 2002).

$$[V_k^f] = [A] \cdot [V_{k+1}^f] + [B] \cdot [I_{k+1}^f] \quad (3. 17)$$

$$[I_k^f] = [c] \cdot [V_{k+1}^f] + [d] \cdot [I_{k+1}^f] \quad (3. 18)$$

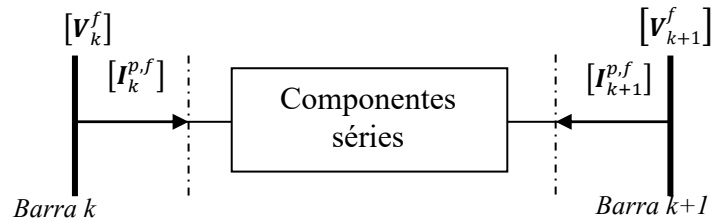


Figura 21 Modelo para componentes séries em redes de distribuição

Onde as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{c} , \mathbf{d} são as matrizes de impedância para os diferentes componentes séries apresentados nos sistemas de distribuição. Estas matrizes de impedâncias são definidas para cada componente no apêndice D.

Na primeira iteração do processo *backward-sweep*, as tensões nas barras finais são inicializadas iguais à tensão na barra referência, a qual foi assumida como a tensão no ponto em falta $[\mathbf{V}_F]$. Com as tensões nas barras finais conhecidas, são estimados os fasores de correntes \mathbf{I}_{k+1}^f nas barras finais. Seu cálculo é realizado a partir do modelo elétrico do componente conectado na barra. Estes componentes podem ser componentes shunts da rede, tais como cargas concentradas ou distribuídas, banco de capacitores, ou também unidades DER.

Para componentes shunts, diferentes modelos são propostos na literatura técnica (KERSTING, 2002). No caso das cargas, estas podem ser modeladas como modelos estáticos polinomiais (ZIP). No entanto, nesta tese, as cargas são consideradas como modelos de impedância constante, permitindo determinar a corrente \mathbf{I}_{k+1}^f dos componentes shunts, a partir de sua matriz de admitância e da tensão na barra de conexão por (3. 19)

$$[\mathbf{I}_{k+1}^f] = [\mathbf{Y}_{k+1}][\mathbf{V}_{k+1}^f] \quad (3. 19)$$

As matrizes de admitância $[\mathbf{Y}_{k+1}]$ dos componentes shunts são definidas a partir da configuração de cada componente como é apresentado no apêndice D.

A estimação da corrente $[I_{k+1}^f]$ quando se tem uma DER conectada é realizada a partir dos modelos lineares apresentados na seção 2.3.3.

Para DER-IRI, a corrente de referência do indutor do filtro $I_{L,ref}$ é estimada a partir da expressão (2.6). A partir da estimação de $I_{L,ref}$, é determinado o modo de operação do inversor e estimada sua contribuição de corrente como é apresentado em (3. 20)

$$[I_{k+1}^f] = if \begin{cases} |I_{L,ref}| < I_{thld} \rightarrow -[I_0] \\ |I_{L,ref}| \geq I_{thld} \rightarrow -[I_0^{sat}] \end{cases} \quad (3. 20)$$

Onde, I_0 e I_0^{sat} são definidas por (2.7) e (2.9) respetivamente.

Para DER-IDS, o modelo aproximado do gerador síncrono apresentado na seção 2.3.3.1 é transformado a um modelo de Norton como é mostrado na Figura 22.

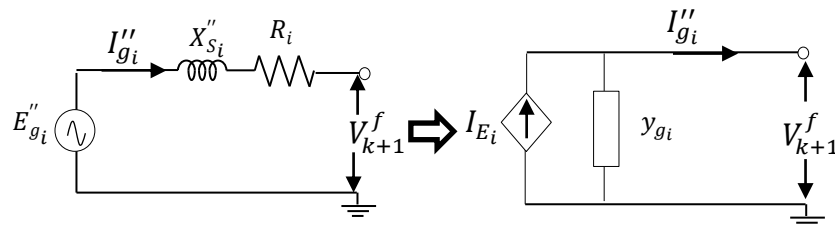


Figura 22 Modelo de Norton das DER baseadas em geradores tradicionais

Onde,

$$I_{E_i} = \frac{E''_{g_i}}{R_{a_i} + X''_{S_i}} \quad (3. 21)$$

$$y_{g_i} = \frac{1}{R_{a_i} + X''_{S_i}} \quad (3. 22)$$

A nova apresentação do modelo das DER-IDS permite modelar sua contribuição de corrente como uma injeção de corrente constante, já que a matriz de admitância resultante da transformação Y_g pode ser inserida na configuração do sistema como uma carga. Portanto,

$[I_{k+1}^f]$ para DER-IDS é definido por

$$[I_{k+1}^f] = -[I_E] \quad (3. 23)$$

Assim mesmo, quando se tem IED instalados nas DER e estes têm sua informação disponível, a contribuição de corrente à falta das DER pode ser considerada a partir dos fasores de corrente sincronizados. A utilização da técnica *Ladder* permite que somente sejam utilizadas as medidas de corrente nas DER. Isto corresponde uma vantagem com relação aos métodos existentes na literatura, já que eles utilizam tanto as medições de tensão quanto de corrente. Assim, para este caso, a corrente $[I_{k+1}^f]$ é determinada pelo fasor de corrente sincronizado obtidos desde o IED nas barras das DER, como é apresentado em (3. 24).

$$[I_{k+1}^f] = -[I_{IED_{k+1}}^f] \quad (3. 24)$$

Por outro lado, quando $k + 1$ não é uma barra final, a corrente $[I_{k+1}^f]$ é definida como a soma das correntes que saem desta barra, como é mostrado na Figura 23.

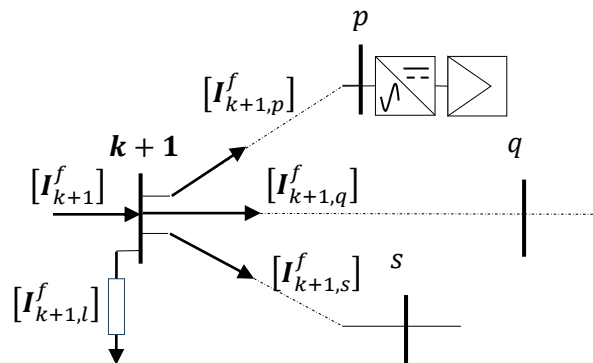


Figura 23 Soma de correntes que alimentam à barra k+1

Assim, de acordo a Figura 23, a corrente $[I_{k+1}^f]$ pode ser expressa como (3. 25)

$$[I_{k+1}^f] = \sum_{j \in \Omega_{k+1}} [I_{k+1,j}^f] \quad (3. 25)$$

No processo *forward-sweep*, os fasores de tensão nas barras são estimados usando a lei de tensão de *Kirchhoff*, começando desde a barra de referência até as barras finais. As correntes $[I_{k+1}^f]$ são determinadas de acordo as expressões (3. 20) até (3. 25) segundo o componente conectado. A expressão generalizada que define os fasores de tensão na barra

remota (barra k+1) com relação à tensão na barra local (barra k) usada neste processo é dada por (3. 26)

$$\mathbf{V}_{k+1}^f = [\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{V}_k^f] - [\mathbf{B}] \cdot [\mathbf{I}_{k+1}^f] \quad (3. 26)$$

Os processos *backward* e *forward sweep* são aplicados consecutivamente até que o erro na tensão da barra de referência estimado (\mathbf{V}_{ref}^f) em relação ao seu valor especificado (\mathbf{V}_F) seja menor a uma tolerância T_{BFS} , como é exposto em (3. 27).

$$|[\mathbf{V}_{ref}^f] - [\mathbf{V}_F]| \leq T_{BFS} \quad (3. 27)$$

O algoritmo baseado na técnica *Ladder* para a estimação da corrente $[\mathbf{I}_D^f]$ é ilustrado na Figura 24. No diagrama de fluxo, N_l corresponde ao numero de linhas do circuito.

3.2.4. Etapa 4: Atualização dos fasores de tensão e corrente e cálculo da distância real até a falta

A etapa 4 divide-se em dois passos, descritos a seguir.

3.2.4.1. Atualização das tensões e correntes em falta para cada seção em análise

No algoritmo apresentado na Figura 19, se a falta não é determinada dentro da primeira seção em análise, é necessário atualizar os fasores de tensão e corrente para a barra seguinte do sistema. Este processo realiza-se pelas expressões (3.28) e (3.29) respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{k+1}^f \\ \mathbf{I}_{k+1}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_l & -\mathbf{b}_l \\ -\mathbf{c}_l & \mathbf{a}_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k^f \\ \mathbf{I}_{k,k+1}^f \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$[\mathbf{I}_{k+1,k+2}^f] = [\mathbf{I}_{k+1}^f] - [\mathbf{I}_{L_{k+1}}^f] \quad (3.29)$$

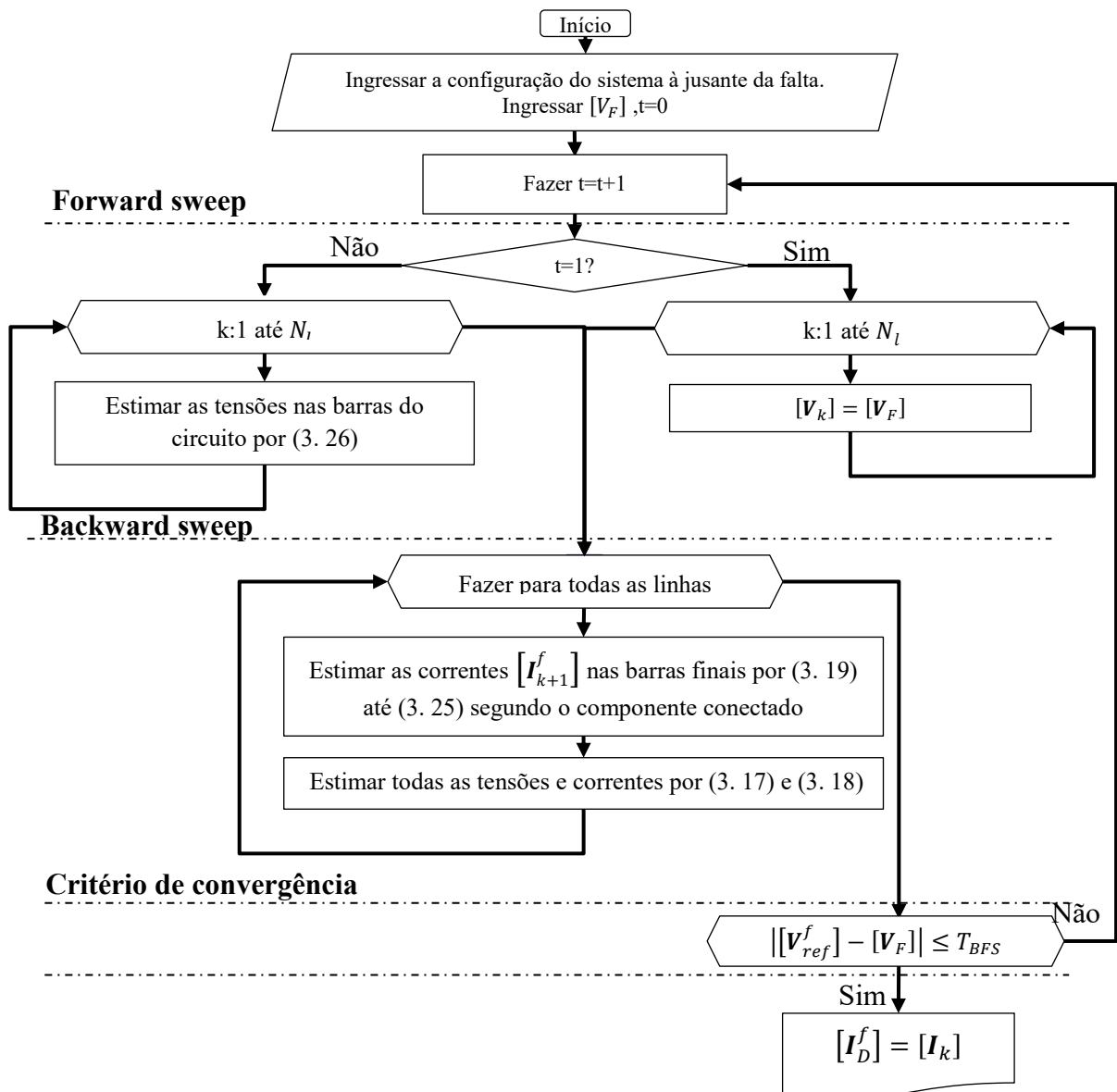


Figura 24 Algoritmo baseado na técnica Ladder para a estimação da corrente $[I_D^f]$

Onde, I_{k+1}^f é o fasor de correntes da seção de linha atual, $I_{k+1,k+2}^f$ é o fasor de correntes da seção de linha seguinte e $I_{L_{k+1}}^f$ representa a soma das correntes, que são derivados pelos circuitos laterais ligadas em nó $k + 1$. $I_{L_{k+1}}^f$ não contém as correntes das laterais que possuam DER conectadas.

Para as barras que possuam laterais com DER conectadas, a corrente $I_{k+1,k+2}^f$ é atualizada por (3.30)

$$[I_{k+1,k+2}^f] = [I_{k+1}^f] - [I_{L_{k+1}}^f] - [I_{DER}^f] \quad (3.30)$$

Onde $[I_{DER}^f]$ é a soma de correntes das laterais que tem DER conectadas. Estas correntes são estimadas a partir da técnica *Ladder*.

3.2.4.2. Estimação da distância desde a subestação até o local em falta

Após determinar o local em falta dentro de uma seção de linha, estima-se a distância real da falta d mostrada na Figura 17. Esta distância é estimada como a somatória dos comprimentos das seções de linha analisadas pelo algoritmo de faltas, mais a porção de linha da seção onde foi determinada a falta (x). A distância real da falta está dada por (3.31).

$$d = \sum_{i=1}^{nt-1} L_i + x \quad (3.31)$$

Onde,

- d : distância estimada desde a subestação até o local em falta.
- nt : número de seções de linha analisadas pelo algoritmo de LF.
- L_i : comprimento da seção de linha i .
- x : distância até falta na última seção de linha analisada.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo, foi apresentada uma nova metodologia para a LF em sistemas de distribuição ativos fundamentada na impedância aparente. Esta técnica faz uma extensão do trabalho apresentado em (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011) para sistemas de distribuição ativos, considerando o efeito das DER na corrente de falta. Destaca-se que a metodologia apresentada é uma estratégia adaptativa, dada pelo uso de modelos elétricos lineares para considerar o efeito das DER conectadas na rede, quando a informação fornecida pelos IED não está disponível. Adicionalmente, foi desenvolvida uma estratégia baseada na técnica *Ladder* para estimar a contribuição de corrente desde as DER até a falta. Esta

estratégia permitiu considerar vários geradores conectados e seus diferentes modos de operação.

O capítulo seguinte apresenta os estudos de casos e os resultados obtidos na aplicação da metodologia de LF proposta para redes de distribuição ativas. Divididos em uma análise de sensibilidade e uma análise comparativa, os estudos de caso têm como objetivo a validação da metodologia proposta.

4. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os estudos de casos e os resultados obtidos na estimativa da distância da falta usando a metodologia de LF descrita no capítulo 3.

4.1. SISTEMA TESTE

O sistema teste utilizado foi o IEEE 34 barras, o qual é tomado dos “*test feeders*” do “*Distribution System Analysis Subcommittee*” do “*Institute Electrical and Electronics Engineers-IEEE*” (DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE, 2001). Este alimentador está localizado no estado de Arizona, Estados Unidos e opera a um nível de tensão de 24,9 kV. Uma de suas principais características é a presença de laterais monofásicas, bifásicas e trifásicas, de diferentes tipos de condutores e de cargas desequilibradas. O sistema foi modelado no software de simulação ATPDraw e foi modificado pela troca do transformador conectado na barra 832 por uma carga de potência equivalente e pela inserção de uma unidade DER-IDS e dois unidades DER-IRI. Na Figura 25 é apresentado o sistema IEEE 34 barras.

As cargas no sistema são representadas por um modelo de impedância constante e a metodologia é validada em diferentes cenários de operação e condições de falta. Durante a simulação para avaliar seu desempenho considera-se: a influência da resistência de falta, influência da variação da carga e a influência das tecnologias DER.

4.2. ESTUDO DE CASOS: DESCRIÇÕES

Com o objetivo de avaliar o desempenho da metodologia de LF proposta, os estudos de caso serão divididos em dois grupos: análise de sensibilidade e análise comparativa com métodos de LF do estado da arte.

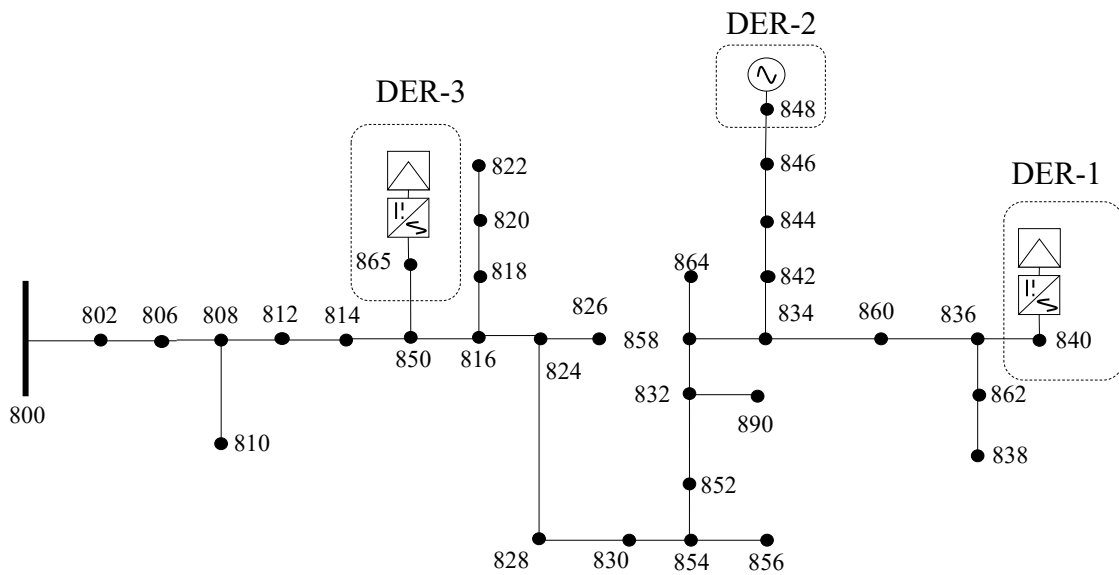


Figura 25 Sistema IEEE 34 barras modificado

Para os casos mencionados anteriormente, as faltas são simuladas no sistema IEE 34 barras, usando uma ferramenta de simulação automática de faltas como proposto em (HERNÁNDEZ; LONDOÑO; FLÓREZ, 2009). Esta ferramenta e o algoritmo da metodologia proposta foram implementados no programa computacional Matlab (MATLAB, 2010).

Na continuação, uma descrição dos cenários validados na análise de sensibilidade e análise comparativa é apresentada nos itens 4.2.1 e 4.2.2. O apêndice C apresenta os valores dos parâmetros utilizados para a criação de cada cenário avaliado na metodologia de LF proposta.

4.2.1. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste na avaliação do efeito das variações dos parâmetros que de forma explícita ou implícita definem a distância da falta. Assim, para análise de sensibilidade, serão considerados os cenários apresentados a seguir.

4.2.1.1. Efeito da resistência de falta

Uma das características que mais influenciam na LF é a resistência da falta. Para avaliar esta característica na metodologia proposta, são simuladas faltas em todas as barras do sistema, todos os tipos de faltas e com valores de resistência entre 0.005Ω até 100Ω com passos de 10Ω . Também, é assumido que a condição de carga do circuito é conhecida e o nível de penetração para todas as DER é de 10%. O nível de penetração é definido por (4.1):

$$\%DER_i = \left(\frac{P_{DER_i}}{\sum S_{cargas} + P_{DER_i}} \right) \times 100\% \quad (4.1)$$

Onde $\%DER_i$ é o nível de penetração da DER i , $\sum S_{cargas}$ é a soma da potência aparente de todas as cargas do sistema e P_{DER} é a potencia da DER. Ao todo, foram simuladas 2299 faltas. Para este cenário o efeito das DER na LF é considerado como segue.

DER-1: modelos lineares que representam os modos de operação do inversor.

DER-2: modelo aproximado do gerador síncrono.

DER-3: medidas sincronizadas de corrente.

4.2.1.2. Efeito da carga

Uma característica típica das redes de distribuição é que sua carga varia significativamente ao longo do dia. Para a avaliação do desempenho da metodologia proposta em relação à variação da carga, são simuladas faltas fase-terra A-g em todas as barras do sistema, considerando três cenários de carga obtidos a partir da condição de carga nominal. Estas condições de variação de carga são obtidas a partir de uma função aleatória de Matlab que retorna números pseudoaleatórios uniformemente distribuídos (MATLAB, 2010). Para este cenário, o efeito das DER na LF é considerado como apresentado no caso anterior. O número total de faltas simuladas é de 57 e os cenários de carga validados são:

- variação de carga baixa-média: variação aleatória da carga entre 30% e 60% da carga nominal.
- variação de carga média-nominal: variação aleatória da carga entre 60% e 100% da carga nominal.
- variação de carga nominal-alta: variação aleatória da carga entre 100% e 140% da carga nominal.

Estes cenários foram definidos segundo Norris *et. al.* (1967), onde é apresentada uma análise da regulamentação para carregamento de transformadores em sistemas de distribuição (NORRIS, 1967).

4.2.1.3. Efeito das tecnologias DER

O efeito das tecnologias DER sobre a metodologia de LF proposta é validado sob três condições de análise. Estas condições são avaliadas tanto para DER-IDS quanto para DER-IRI. Para este cenário, são simuladas faltas fase-terra A-g em todas as barras do sistema com resistência de falta de 10Ω e considerando condição de carga nominal. As condições analisadas são apresentadas a seguir.

- Efeito do nível de penetração (%DER)

Existem muitos estudos sobre a máxima penetração de GD admissível nos sistemas de distribuição. Porém, ainda não existe um consenso sobre o seu valor, já que este nível de penetração depende significativamente das características próprias da rede de distribuição e da regulamentação adotada por cada país. Nesta seção é assumido 50% como o máximo valor %DER para validar a metodologia de LF proposta. Hoke *et. al.* (2013) mostra que para 86%

dos casos validados, uma penetração de 30% de GD não gera problemas na operação do sistema (HOKE *et al.*, 2013).

Os cenários definidos para avaliação do efeito do %DER são: 10%, 20%, 30% e 50%. Para este cenário, considera-se somente uma DER conectada no sistema. Em outras palavras, para avaliar o efeito das DER-IDS, assume-se que só a DER-2 está conectada no sistema apresentado na Figura 25 e, para avaliar o efeito das DER-IRI, que só a DER-1 está conectada.

- Efeito do erro nos parâmetros

Incertezas nos parâmetros que compõem o modelo elétrico das DER podem afetar consideravelmente o desempenho da metodologia de LF proposta no capítulo 3. Por tanto, erros nos parâmetros que definem seus modelos elétricos devem ser avaliados para analisar a sensibilidade da metodologia aos mesmos. Assim, para avaliar o efeito de erros nos parâmetros do modelo aproximado do gerador síncrono para modelar as DER-IDS, erros fixos de +50%, +30%, +10%, -10%, -30% e -50% são inseridos na reatância sub-transitória.

Para DER-IRI, o efeito de erros nos parâmetros é avaliado na potência de referência do inversor S_{ref} . Este parâmetro é escolhido porque é o que pode apresentar na sua estimação o maior erro inserido, uma vez que a mesma é obtida a partir de registros de dados locais, como foi apresentado na seção 2.3.3.2. Assim, para este parâmetro, erros fixos de +50%, +30%, +10%, -10%, -30% e -50% são inseridos para avaliar a sensibilidade da metodologia de LF proposta com relação às incertezas na S_{ref} . Para este cenário, o nível de penetração %DER considerado é de 30%.

- Efeito do número de unidades conectadas

O número de unidades DER conectadas na rede de distribuição e sua localização podem também afetar o desempenho da metodologia proposta. Para observar o quanto sensível é a metodologia proposta à condição anteriormente mencionada, três casos são propostos a seguir.

Caso 1: uma DER conectada na barra N840, com um nível de penetração $\%DER = 30\%$

Caso 2: duas DER conectadas nas barras N840 e N848, com um nível de penetração $\%DER = 15\%$ cada unidade.

Caso 3: três DER conectadas nas barras N840, N848 e N814, com um nível de penetração $\%DER = 10\%$ cada unidade.

4.2.2. Análise comparativa com métodos do estado da arte

Dois métodos de LF do estado da arte foram implementados e comparados com a metodologia analítica proposta: o método de Nunes *et. al.* (2010a, b) e método de Bedoya *et. al.* (2015). Esses métodos foram validados e comparados usando o cenário 1, que avalia o efeito resistência de falta. No entanto, como estes métodos foram formulados para considerar só uma unidade DER conectada, dois casos são considerados para sua comparação com a metodologia proposta.

Caso 1: uma DER-IDS conectada na barra N848. Comparação do método proposto por Bedoya *et. al.* (2015) e o método proposto por Nunes *et. al.* (2010a, b) com a metodologia analítica proposta, usando medidas de corrente sincronizadas nas DER (MLF-MSD) e usando

o modelo aproximado do gerador síncrono (MLF-MGS) para considerar o efeito das DER-IDS.

Caso 2: uma DER-IRI conectada na barra N840. Comparação do método de Bedoya *et. al.* (2015) com a MLF-MSD e usando modelos lineares para representar os modos de operação do inversor (MLF-MI). A Tabela 5 mostra um sumário dos testes realizados para a validação da metodologia analítica de LF proposta.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta subseção, são apresentados os resultados dos estudos de casos relativos às análises de sensibilidade e comparativa da metodologia analítica para LF proposta no capítulo 3. Estes resultados são apresentados pela estimação do erro relativo em porcentagem dado por (4.2) e o erro absoluto do mesmo para cada falta localizada.

$$\%erro = \frac{d_{real} - d_{estimada}}{d_{total}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Para a análise dos resultados define-se:

Sobrestimação - Quando a distância estimada é maior do que a distância real onde ocorre a falta. Em outras palavras, quando $d_{estimada} \geq d_{real}$.

Subestimação - Quando a distância estimada é menor do que a distância real onde ocorre a falta. Em outras palavras, quando $d_{estimada} \leq d_{real}$.

4.3.1. Análise de sensibilidade

A seguir, são apresentados os resultados para os estudos de casos relativos à análise de sensibilidade.

Tabela 5 Cenários para análise de sensibilidade sobre a metodologia analítica para LF proposta

Teste	Descrição	Nº de faltas localizadas
Efeito da Resistência de falta	Tipo de falta: todas	
	Faltas entre: 0.0005Ω - 100Ω com passos de 10Ω .	
	Número de DER conectadas: 3	2299
	Nível de penetração das DER: 10% cada unidade	
Efeito da incerteza na carga	Condição de carga: Nominal	
	Tipo de falta: Fase-terra (A-T)	
	Resistência de falta: 10Ω .	
	Número de DER conectadas: 3	
	Nível de penetração das DER: 10% cada unidade	57
	Condição de carga:	
	Baixa-média (30%-60%), Média-nominal (60%-100%), Nominal-alta (100%-150%),	
Efeito das tecnologias DER	Tipo de falta: Fase-terra (A-T)	
	Resistência de falta: 10Ω .	
	Condição de carga: Nominal	
	Efeito do nível de penetração das DER	
	Nível de penetração das DER: 10%, 20%, 30%, 50%	228
	Número de DER conectadas: 1	
	Efeito de erro nos parâmetros das DER	
	Nível de penetração das DER: 30%	
	Número de DER conectadas: 1	
	Erros nos fasores de corrente das DER: entre -50% e +50%	399
Erro na reatância sub-transitória das DER-T: entre -50% e +50%		
Erro na potência de referência das DER-NT: entre -50% e +50%		
Efeito do número de DER conectadas	Efeito do número de DER conectadas	
	caso 1:	
	Número de DER conectadas: 1 na barra 840	
	Nível de penetração das DER: 30%	
	caso 2	
	Número de DER conectadas: 2 nas barras 840 e 848	171
	Nível de penetração das DER: 15% cada unidade	
caso 3		
Número de DER conectadas: 3 nas barras 840, 848 e 814		
Nível de penetração das DER: 10% cada unidade		
Total		3154

4.3.1.1. Efeito da resistência de falta

Para este estudo de caso, são localizadas 2299 faltas. Devido ao número significativo de resultados obtidos para este cenário, os mesmos são apresentados usando um gráfico de barras. A Figura 26 mostra o erro médio absoluto e o erro máximo absoluto estimado para faltas com resistências de falta entre 0-20 Ω , 20-40 Ω , 40-60 Ω , 60-80 Ω e 80-100 Ω .

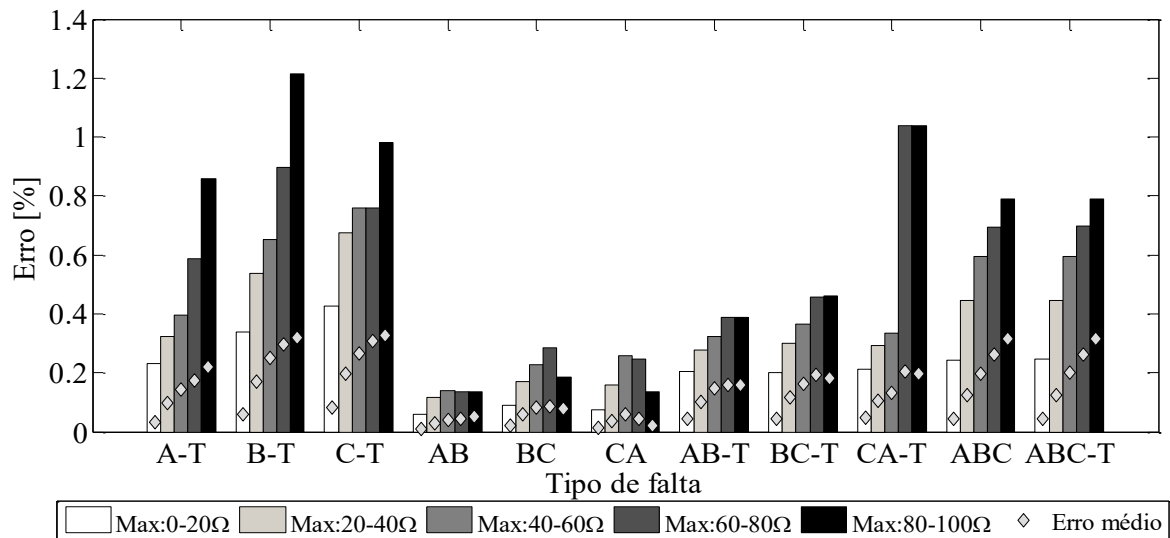


Figura 26 Efeito da resistência de falta na metodologia analítica para LF proposta

De acordo com a Figura 26, uma sensibilidade perceptível é exibida pela metodologia proposta com relação ao efeito da resistência de falta. Os resultados obtidos mostram uma tendência a incrementar o erro na estimação da distância até a falta, conforme incrementa a resistência de falta. Esta tendência ocorre porque o incremento da resistência de falta faz com que a mesma tenda a ser comparável com a impedância do sistema vista desde a subestação. Esta característica tem como consequência que seja mais difícil localizar as faltas e, portanto, que o desempenho dos métodos de LF baseados na impedância seja reduzido (HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2014). No entanto, o desempenho da metodologia analítica proposta é adequado, apresentando um erro médio menor a 0,4% para todos os tipos de faltas e um máximo erro de 1,2% na estimação da distância até a falta, para as condições avaliadas.

Outra característica que pode ser avaliada neste cenário é o efeito da distância até a falta. Na Figura 27 é apresentado o desempenho da metodologia analítica de LF aqui proposta como uma função da distância até a falta. Seu desempenho é avaliado considerando todos os tipos de falta com resistência de falta de 40Ω .

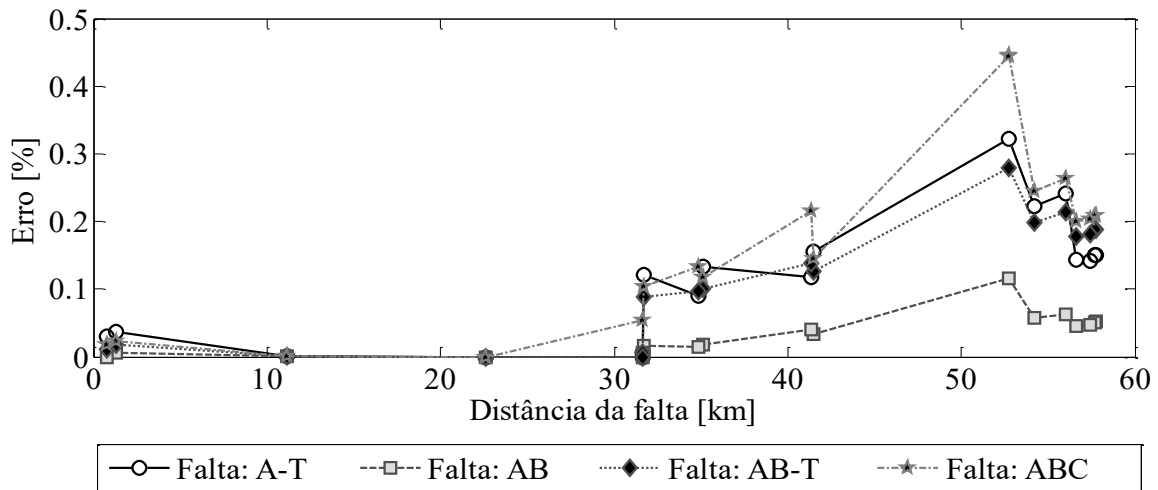


Figura 27 Efeito da distância até a falta na metodologia analítica para LF proposta

A Figura 27 mostra que a metodologia analítica para LF proposta reduz seu desempenho conforme incrementa a distância até a falta. Este comportamento é apresentado porque, à medida que a falta está mais afastada, o afundamento de tensão e o incremento da corrente na subestação são menores devido à presença de uma maior impedância entre a subestação até a falta, fazendo com que um efeito similar ao ocasionado pelo incremento da resistência de falta seja exibido. Este fato permite verificar uma apreciável sensibilidade da metodologia proposta ao efeito da distância à falta.

Por outro lado, também pode ser observado que, para todos os tipos de falta, a metodologia tende a estimar uma distância até a falta menor do que a distância real. Em outras palavras, a metodologia proposta tende a subestimar a distância até a falta. Este comportamento é apresentado pela consideração do efeito capacitivo na formulação de LF, já que desta forma, a metodologia observa uma impedância mais capacitiva do que a

apresentada no sistema, fazendo que uma menor impedância seja estimada e por tanto, uma menor distância à falta.

4.3.1.2. Efeito da carga

Para este estudo de caso, são localizadas 57 faltas divididas em três cenários de carga: baixa-média (30%-60%), média-nominal (60%-100%) e nominal-alta (100%-140%). Os resultados são apresentados em curvas de desempenho para cada cenário de carga, que enfrentam o erro porcentual da estimacão da falta e a distância real até a falta, como é mostrado na Figura 28.

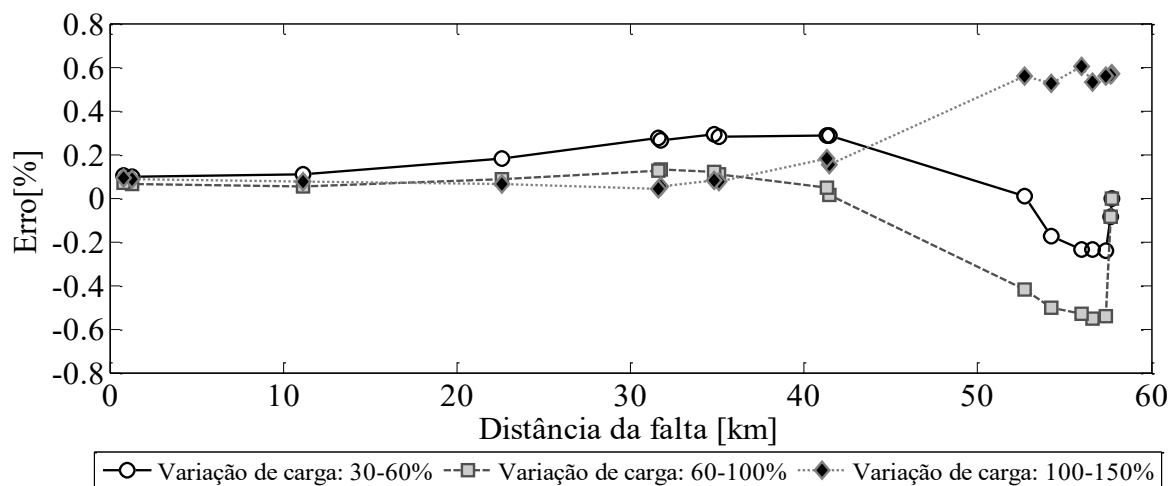


Figura 28 Desempenho da metodologia para LF proposta considerando diferentes cenários de carga: baixa-média (30%-60%), média-nominal (60%-100%) e nominal-alta (100%-140%)

A Figura 28 exibe uma correlaco entre a precisão da metodologia analítica de LF proposta e a incerteza da carga. Este comportamento é observado porque nesta abordagem não é utilizada uma estratégia de compensaco da variao da carga. Porém, uma estratégia de compensaco como a proposta em Ferreira *et. al.* (2012) pode ser implementada (FERREIRA *et al.*, 2012). Também, a metodologia analítica proposta no capítulo 3 permite a utilizao de curvas de carga típicas, que podem ser sincronizadas com o tempo de ocorrência da falta

armazenado no registro de falta. Desse modo uma condição de carga aproximada poderia ser determinada para melhorar o desempenho da metodologia proposta.

Para os resultados obtidos com uma variação de carga nominal-alta (100%-150%), a metodologia expôs um comportamento de subestimação da distância da falta. No entanto, para os cenários onde uma menor carga no sistema foi considerada (30-60% e 60-100%), seu comportamento é de subestimação nas primeiras seções de linha e de sobrestimação para as últimas seções de linha do circuito. Este comportamento aparece pelo fato de não ser compensada a variação da carga, fazendo com que a metodologia, para as primeiras seções, considere uma carga maior devido ao fato de que esta utiliza a carga nominal do sistema. Assim, uma impedância menor é observada pela abordagem e, portanto, uma menor distância até a falta. Para as últimas seções de linha, a metodologia observa uma maior impedância pelo fato de que, na atualização das correntes no terminal local (I_{k+1}^f), uma maior carga é considerada. Conseqüentemente, este fato faz com que uma menor corrente na seção seguinte seja estimada e, conseqüentemente, a metodologia proposta estime uma maior distância até a falta. Assim, com base na análise anteriormente apresentada, é possível concluir que a metodologia proposta mostra uma moderada sensibilidade às variações da carga.

Outra característica que pode ser avaliada neste cenário é o efeito do desequilíbrio de no sistema como é mostrado na Figura 29. Para este caso, assumam-se conhecidas as condições de carga por parte da metodologia e o fator de desequilíbrio de tensão (FDV) e o fator de desequilíbrio de corrente (FDI) são estimados pelas expressões (4.3) e (4.4).

$$\%FDV = \frac{V_{se}^{(-)}}{V_{se}^{(+)}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

$$\%FDI = \frac{I_{se}^{(-)}}{I_{se}^{(+)}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Onde.

$V_{se}^{(-)}$: Componente de sequência negativa da tensão medida na subestação.

$V_{se}^{(+)}$: Componente de sequência positiva da tensão medida na subestação.

$I_{se}^{(-)}$: Componente de sequência negativa da corrente medida na subestação.

$I_{se}^{(+)}$: Componente de sequência positiva da corrente medida na subestação.

Estes fatores são estimados usando as medidas de tensão e correntes na subestação.

Estas medições são exibidas na Tabela C. 16, do Apêndice C.

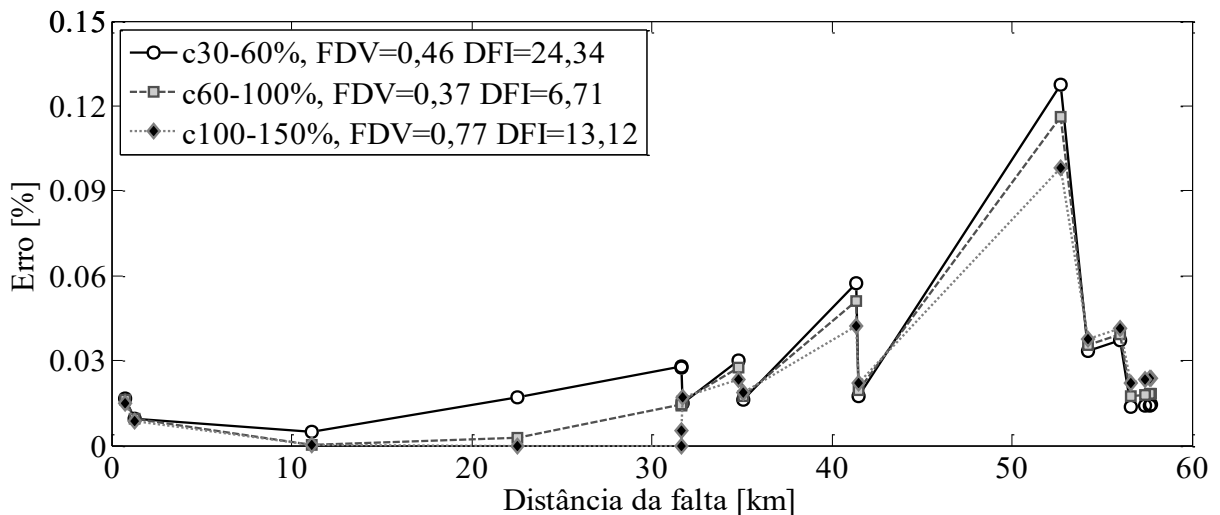


Figura 29 Desempenho da metodologia para LF proposta considerando o efeito do desequilíbrio no sistema.

Na Figura 29 observa-se uma perceptível variação entre as curvas de desempenho da metodologia de LF proposta para os três casos de desequilíbrio avaliados. Apesar de o desequilíbrio de tensão apresentado seja baixo, o desequilíbrio na corrente é considerável. Com tudo, não é exibido um efeito sobre o desempenho da metodologia com o incremento ou diminuição do desequilíbrio no sistema. No entanto, uma correlação entre a precisão da metodologia proposta e a condição de carga avaliada é observada, onde para condições de baixa carga, a precisão da metodologia de LF proposta diminui e vice-versa.

4.3.1.3. Efeito das tecnologias DER

Três cenários que avaliam o efeito das tecnologias DER na metodologia para LF proposta são considerados. Estes cenários analisam o efeito do nível de penetração de DER, o efeito de erros nos parâmetros do modelo da DER e efeito do número de unidades DER conectadas. Para este estudo de caso, são localizadas um total de 798 faltas, tipo fase-terra A-T. Também, são apresentados os resultados para cada caso validado.

- Efeito do nível de penetração

O desempenho da metodologia proposta em relação ao nível de penetração %DER é validado nesta subseção. Foram localizadas 228 faltas divididas em três cenários de penetração %DER: 10%, 20%, 30% e 50%. Esta análise é realizada considerando DER-IDS e DER-IRI. Os resultados são apresentados em curvas de desempenho para os diferentes níveis %DER que enfrentam o erro percentual na estimativa da falta e a distância real até o local em falta. O efeito do incremento do %DER sobre a MLF-MSD é analisado considerando uma DER-IDS conectada à rede. A Figura 30 apresenta o desempenho da metodologia para diferentes níveis de penetração de DER.

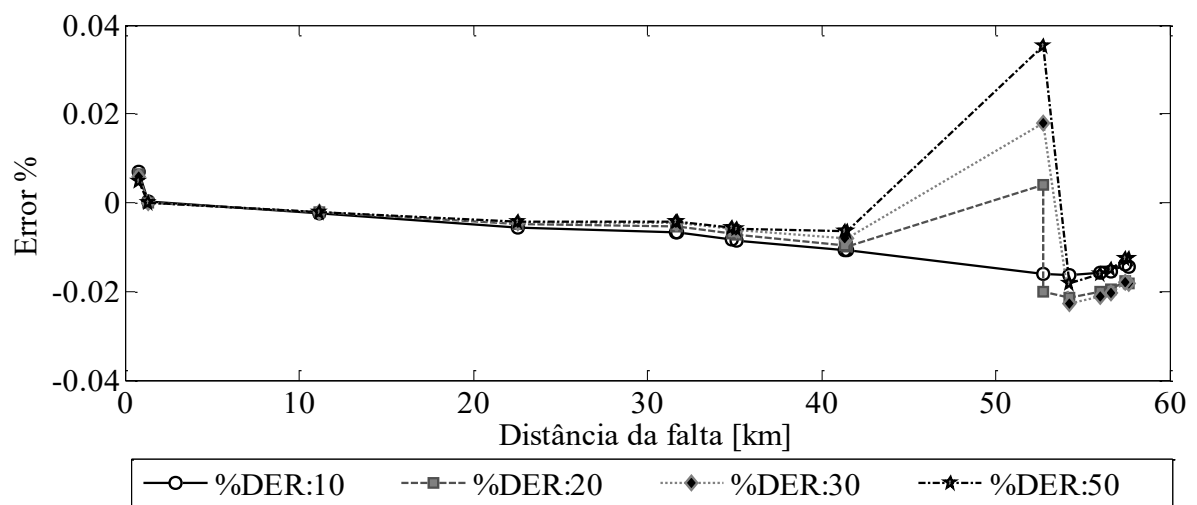


Figura 30 Efeito do nível de penetração %DER para a metodologia proposta usando medidas sincronizadas de corrente nas DER

A justaposição das curvas para a maioria das faltas localizadas, mostradas na Figura 30, permite concluir que a MLF-MSC apresenta pouca sensibilidade ao incremento do nível de penetração de DER. Nota-se ainda que mesmo com incremento até 50% do nível de penetração, os erros percentuais máximos são da ordem de 0,04%.

Considerando o cenário anterior, também é analisado o efeito do nível de penetração sobre a MLF-MGS. A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para DER-IDS.

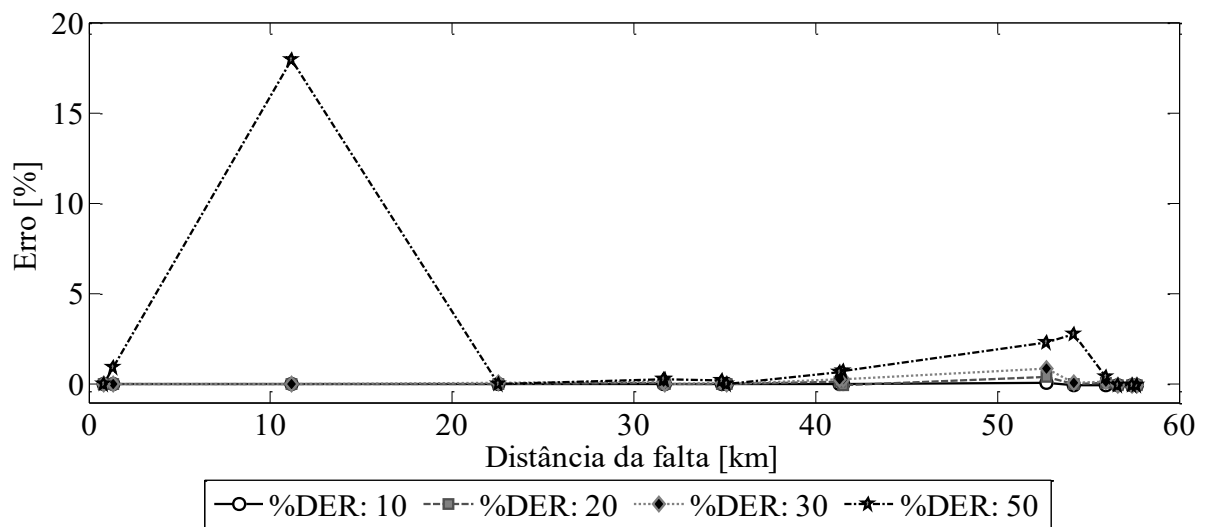


Figura 31 Efeito do nível de penetração %DER para a metodologia proposta usando o modelo aproximado do gerador síncrono

Para este caso, pode-se observar uma clara influência do aumento do nível de penetração das DER no desempenho da MLF-MGS. Apesar do erro máximo ser alto (aproximadamente 20%), este erro corresponde a um erro atípico apresentado por problemas de convergência na técnica Ladder, a qual finaliza o processo por número de iterações e realiza uma estimativa errada da contribuição de corrente das DER ao ponto em falta.

Por outra, observando os resultados obtidos pela metodologia sem considerar o erro atípico como mostrada na Figura 32, nota-se que o erro é menor a 3%, porém, este aumenta de forma potencial, podendo atingir valores inadequados com níveis muito altos de penetração de DER. Contudo, a literatura mostra que uma porcentagem de penetração de 30%

é um nível prático e aceitável, para o qual, os sistemas de distribuição não apresentam problemas de operação. Para níveis de penetração DER menores a 30%, a metodologia não exibe erros atípicos, sendo seu desempenho adequado, mostrando erros menores a 1% (HOKE *et al.*, 2013).

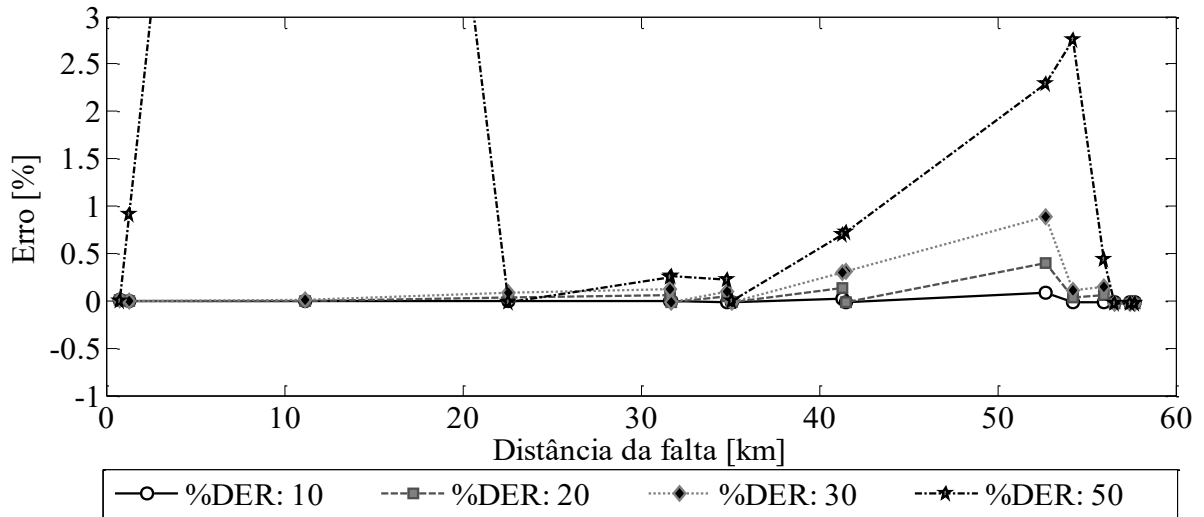


Figura 32 Efeito do nível de penetração %DER para a metodologia proposta usando o modelo aproximado do gerador síncrono: zoom em curvas de desempenho.

Um comportamento similar, mas sem a presença de erros atípicos é apresentado pela MLF-MI quando o nível de DER-IRI aumenta segundo os resultados exibidos na Figura 33.

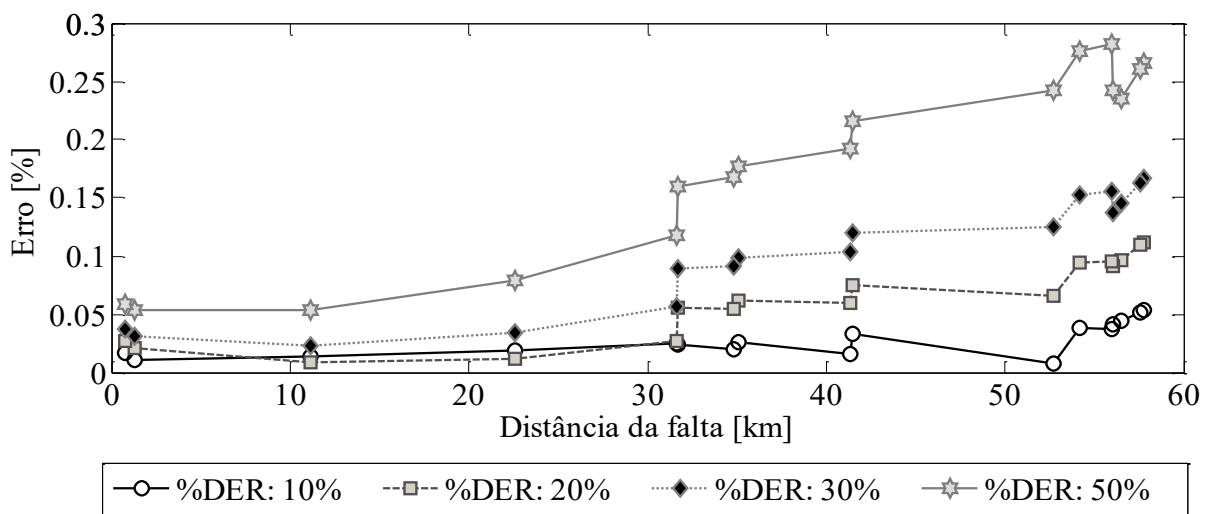


Figura 33 Efeito do nível de penetração %DER para DER baseadas em geradores não tradicionais

Com base nas figuras 32 e 33, pode ser observado um comportamento característico para o caso de aumento do nível de penetração de DER. Este comportamento é consequência de um aumento no erro e da característica de subestimação da distância até a falta conforme aumenta o nível de penetração (%DER). Este efeito é ocasionado pelo erro inserido na estimação da contribuição de corrente a partir das DER até a falta, o qual aumenta à medida que o nível de penetração é maior. Para os casos avaliados, foi observado que a metodologia tende a estimar uma contribuição de corrente das DER maior do que a verdadeira contribuição apresentada, ocasionando que uma maior corrente de falta seja estimada.

- Efeito do erro nos parâmetros

Nesta subseção, é apresentada a sensibilidade da metodologia relacionada aos erros apresentados nos parâmetros do modelo elétrico das DER como nas medidas registradas.

Para avaliar a sensibilidade da metodologia proposta com relação a erros nas medidas registradas nas DER, erros fixos entre -50 e +50% são considerados nos fasores de corrente medidos nas unidades DER. Considerando a afirmação anterior, foram localizadas faltas fase-terra A-T e os resultados obtidos pela MLF-MSC são apresentados na Figura 34.

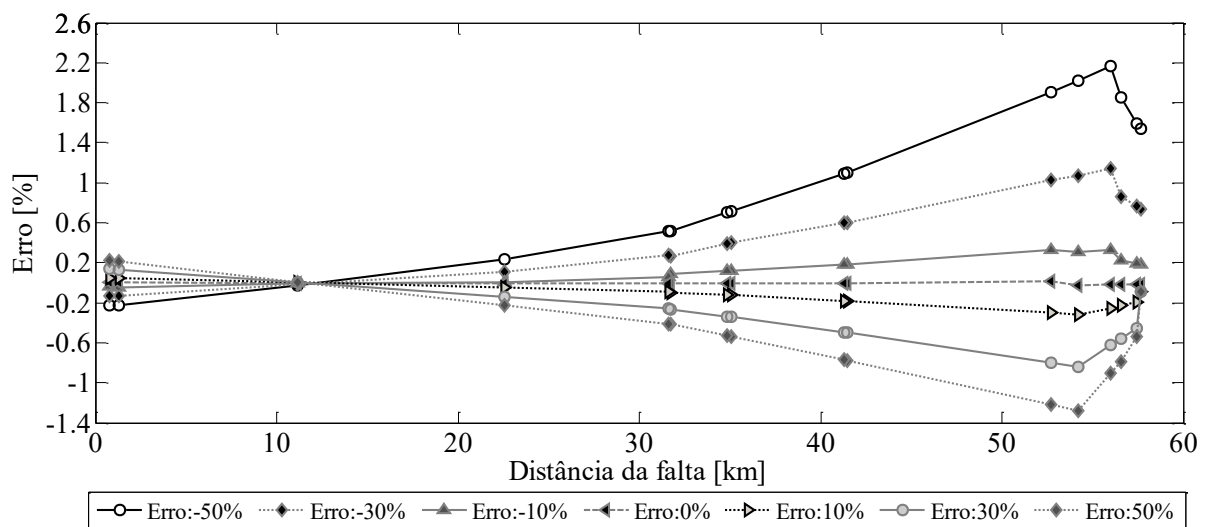


Figura 34 Efeito de erros nos fasores de corrente das DER no desempenho da metodologia para LF proposta utilizando medidas sincronizadas de corrente

Os resultados retratados na Figura 34 indicam que a MLF-MSC apresenta uma perceptível sensibilidade aos erros inseridos nas medidas. Observa-se que erros de $\pm 50\%$ nos fasores de corrente das DER impõem erros máximos da ordem de 2,5% na estimativa da distância da falta. Também é observada uma correlação na tendência a subestimar ou sobrestimar a distância da falta com a característica do erro. Assim, para erros negativos, ou seja, erros que inferem uma estimacão do fasor de corrente menor, a tendência da metodologia é de estimar uma distância até a falta menor que a distância real, e vice-versa.

Para avaliar a sensibilidade da MLF-MGS com relao a erros nos parâmetros das DER-IDS, erros fixos entre -50 e +50% são inseridos na reatância subtransitória da DER. A Figura 35 apresenta os resultados obtidos para este caso.

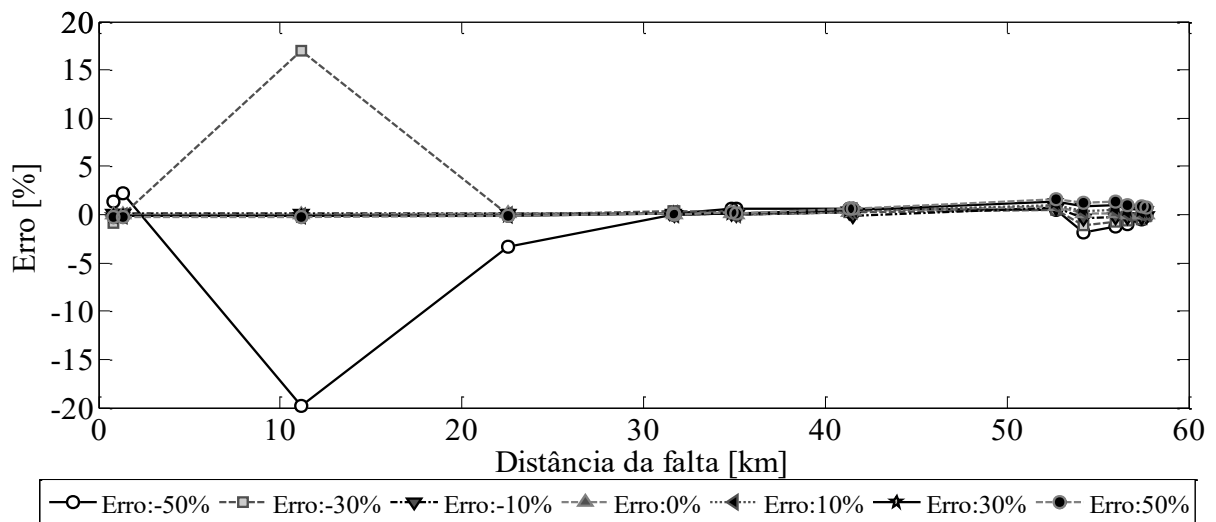


Figura 35 Efeito de erros na reatância sub-transitória da DER no desempenho da metodologia para LF proposta.

O desempenho da metodologia apresenta erros atípicos para este caso. Estes erros faz que a metodologia exiba um erro máximo de aproximadamente 20%. Porém, estes são apresentados só para 2 casos dos 133 avaliados. Porém, observando o desempenho da metodologia para erros entre -10% e 50%, nota-se que o erro na reatância sub-transitória nas DER-IDS não afeta significativamente o desempenho da MLF-MGS como se mostra na Figura 36. Também, é observada uma correlação entre o comportamento da metodologia e o

erro inserido, sendo que para erros positivos (que infere a consideração de uma reatância maior), a metodologia tende ainda mais a subestimar a distância da falta e para erros negativos, ou seja, a consideração de uma reatância menor, a metodologia tende ainda mais a sobrestimá-la.

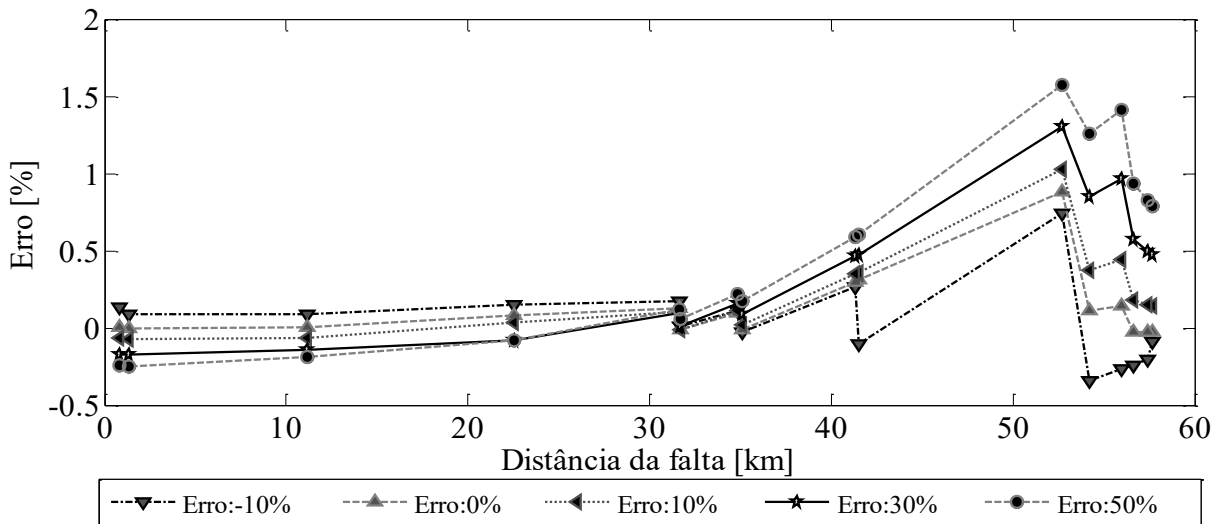


Figura 36 Desempenho da metodologia para LF proposta com erros entre -10% e 50% na reatância sub-transitória da DER.

Um comportamento similar é observado para quando erros na potência de referência das DER-IRI são apresentados. A Figura 37 mostra o desempenho da MLF-MI quando erros fixos entre -50% e +50% são inseridos na potência de referência das DER.

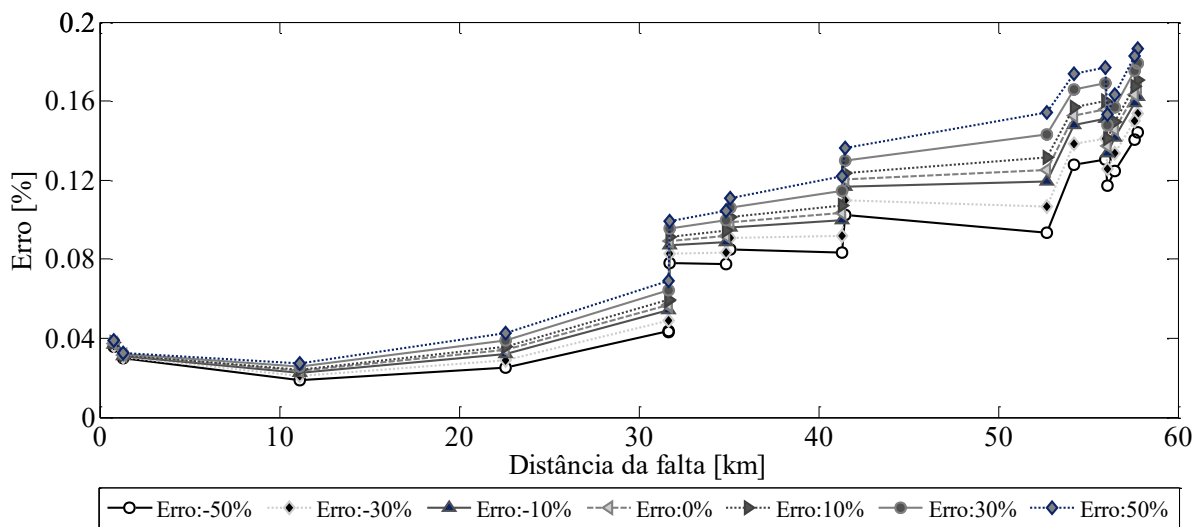


Figura 37 Efeito de erros na potência de referência S_{ref} da DER no desempenho da metodologia para LF proposta

Analisando os resultados da Figura 37 é possível verificar que, tanto para erros de -50% quanto +50% na potência S_{ref} , a variação do desempenho da metodologia é pouco significativa. Isto ocorre porque a contribuição de corrente do inversor sob uma condição de curto-circuito esta limitada para proteger os dispositivos de comutação da ponte do inversor e portanto a contribuição de corrente das DER-IRI é baixa comparada com a contribuição das DER-IDS. No entanto, a metodologia proposta mostrou ser pouco sensível aos erros apresentados na potência de referência das DER-IRI.

- Efeito do número de unidades conectadas

A sensibilidade da metodologia relacionada ao número de DER conectadas na rede de distribuição é apresentada nesta subseção.

Para análise da influência do número de DER-IDS conectadas ao sistema, considere os erros percentuais em função da distância até a falta, apresentados nas figuras 37, 38 e 39.

A Figura 38 mostra os resultados obtidos com a MLF-MSC.

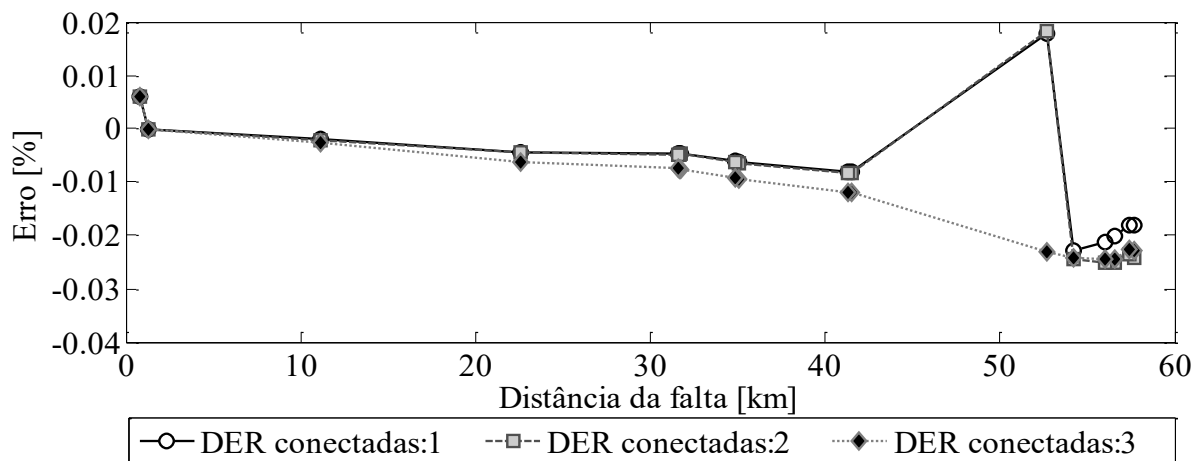


Figura 38 DER baseadas em geradores tradicionais: efeito do número de DER conectadas na metodologia proposta usando medidas sincronizadas de corrente nas DER

A justaposição na maioria dos pontos das curvas para as faltas localizadas mostradas na Figura 38 permite concluir que a metodologia proposta usando medidas sincronizadas de

corrente apresenta pouca sensibilidade ao número de DER conectadas no sistema de distribuição. Nota-se ainda que, quando são comparadas as curvas dos erros percentuais obtidas para o incremento do nível de penetração DER (Figura 30) e as obtidas para este cenário, seu comportamento é muito similar, motivo pelo qual é possível identificar que o desempenho da metodologia para este caso está mais influenciado pelo nível de penetração de DER do que pelo efeito ocasionado na metodologia pelo número de DER conectadas.

Do mesmo modo, a Figura 39 apresenta os resultados obtidos com a MLF-MGS.

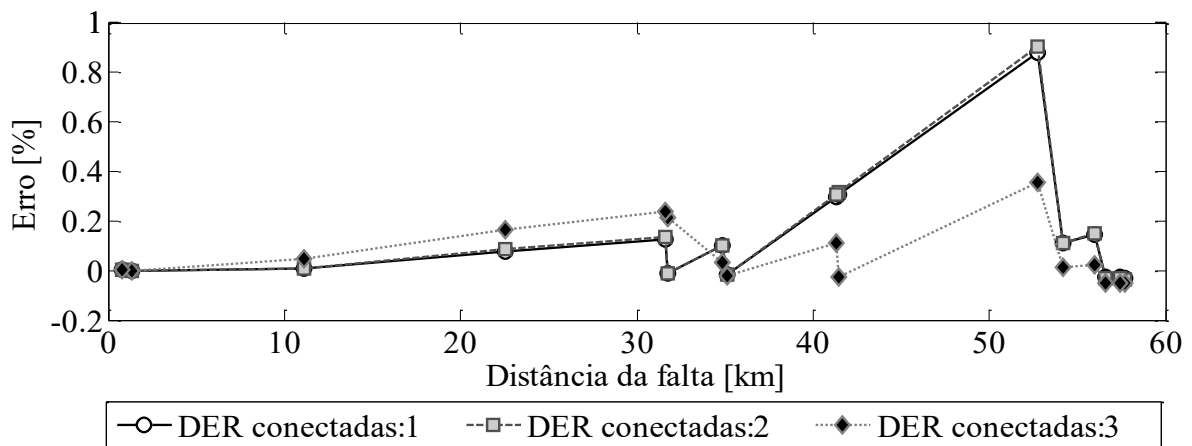


Figura 39 DER baseadas em geradores tradicionais: efeito do número de DER conectadas na metodologia proposta usando o modelo aproximado do gerador síncrono

Os resultados retratados na Figura 39 mostram que a MLF-MGS apresenta uma perceptível sensibilidade ao número de DER conectadas na rede de distribuição. No entanto, esta sensibilidade pode estar influenciada pela localização mesma das DER e seu nível de penetração, já que, como pode ser observado na Figura 39, uma diminuição do erro é apresentada quando é incrementado a três o número de DER conectadas. Porém, para este caso, o nível de penetração das DER é menor, sendo isso o que pode estar ocasionando a diminuição no erro de estimação da distância até a falta.

Um comportamento similar ao apresentado anteriormente é exposto pela MLF-MI para o efeito do número de DER-IRI, como é mostrado na Figura 40.

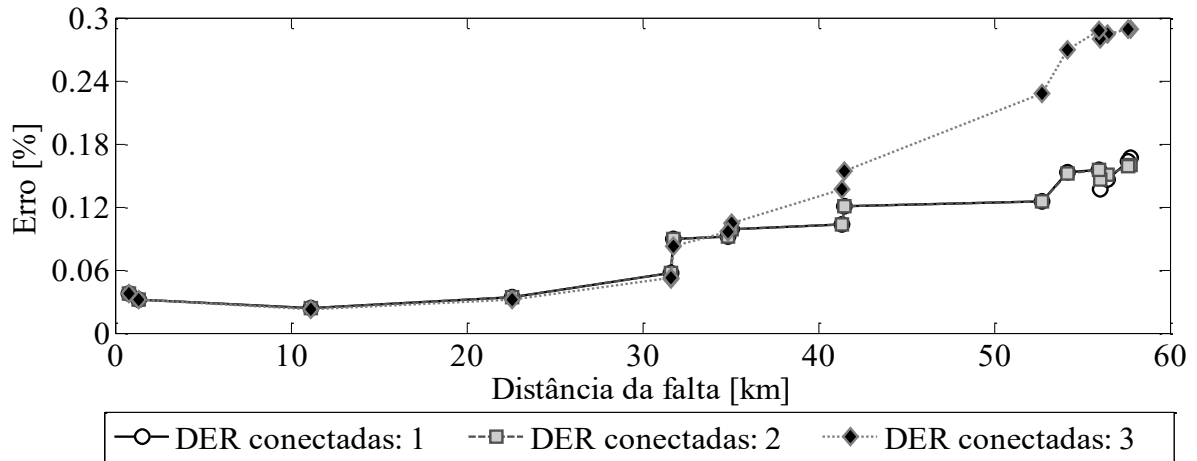


Figura 40 Efeito do número de DER conectadas: DER baseadas em geradores não tradicionais

Na Figura 40 para quando se tem uma e duas DER-IRI conectadas, as curvas dos erros percentuais estão praticamente sobrepostas, mostrando pouca sensibilidade ao número de DER conectadas. No entanto, quando uma terceira DER é inserida no sistema, o erro na estimativa da falta aumenta. Este fato mostra que a metodologia proposta apresenta uma maior sensibilidade à localização da DER no sistema do que ao número de DER conectadas.

4.3.2. Análise comparativa com métodos do estado da arte

Esta subseção apresenta os resultados do estudo do caso relativo à análise comparativa entre a metodologia proposta para LF e dois métodos do estado da arte (BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO; MORA-FLÓREZ, 2015; NUNES; BRETAS, 2010a, b). A comparação é realizada considerando como cenário de validação o cenário 1, que avalia o efeito da resistência da falta.

4.3.2.1. Análise comparativa considerando DER-IDS

Para este caso, a análise comparativa é realizada entre o método proposto por Bedoya *et. al.* (2015) e a MLF-MSD e método proposto por Nunes *et. al.* (2010) e MLF-MGS. Para análise comparativa, considere as tabelas 6 e 7. Devido ao número significativo de resultados

obtidos, as tabelas 6 e 7 apresentam o erro médio absoluto e o erro máximo absoluto para cada tipo de falta.

Tabela 6 Análise comparativa: método de Bedoya e MLF-MS

Tipo de falta	Método de Bedoya		MLF-MS	
	Erro médio [%]	Erro máximo [%]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]
Faltas fase-terra	0,239	2,936	0,010	0,061
Faltas fase-fase	0,540	1,615	0,007	0,038
Faltas fase-fase-terra	1,505	3,814	0,006	0,034
Faltas trifásicas	0,013	0,074	0,004	0,042

Tabela 7 Análise comparativa: método de Nunes e MLF-MGS

Tipo de falta	Método de Nunes		MLF-MGS		
	Erro médio [%]	Erro máximo [%]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]	Erros atípicos [%]
Faltas fase-terra	2,637	15,821	0,162	1,290	--
Faltas fase-fase	--	--	0,094	0,466	4,718
Faltas fase-fase-terra	--	--	0,074	0,407	10,292
Faltas trifásicas	2,937	9,253	0,121	0,606	--

Analisando os resultados apresentados pela MLF-MS, mostrados na Tabela 6, observa-se que tanto o erro médio quanto o erro máximo apresentado pela metodologia proposta é significativamente menor aos apresentados pelo método de Bedoya. Segundo o cenário avaliado, o máximo erro esperado pela MLF-MS para qualquer tipo de falta é de 0.061%, contra um máximo erro esperado de 3,81% pelo método de Bedoya. No entanto, analisando o erro médio, na maioria dos tipos de falta, o desempenho do método de Bedoya é satisfatório, apresentando um erro médio menor a 0,54%. Somente para faltas fase-fase-terra este erro aumenta, chegando a exibir um erro médio de 1,505%. Porém, o desempenho da MLF-MS segue sendo claramente superior ao desempenho do Método de Bedoya.

Em relação aos resultados obtidos pela MLF-MGS, apresentados na Tabela 7, também é observado um desempenho superior da MLF- MGS com relação ao desempenho do método de Nunes. Este resultado ocorre porque o método de Nunes é afetado significativamente pelo aumento da resistência de falta, como é observado na Figura 41.

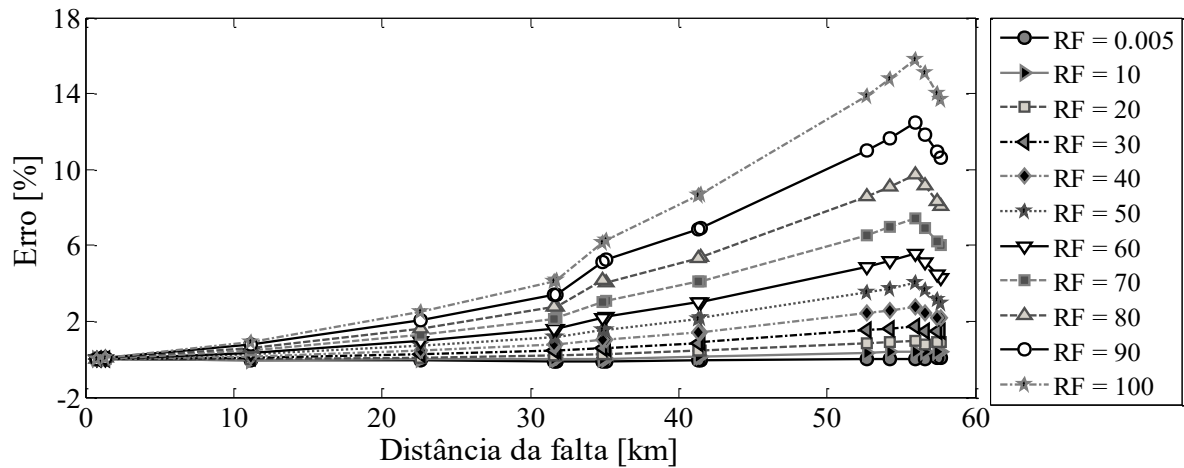


Figura 41 Efeito da resistência de falta em faltas fase-terra A-T: método de Nunes

Por outro lado, foram observados erros atípicos na localização de algumas faltas por parte da MLF-MGS. Estes erros atípicos foram apresentados para faltas fase-fase BC e fase-fase-terra AB-T, como é mostrado nas figuras 40 e 41. Os erros são apresentados para faltas com resistência de falta altas (80 Ω e 100 Ω) e são devidos ao fato de que a metodologia apresenta uma convergência forçada devido a estimação consecutiva de distâncias de faltas negativas, para o qual o algoritmo assume a distância de falta estimada como zero ($x = 0$). Desta forma, o processo de refinamento da corrente de falta estimará a mesma corrente em várias iterações, cumprindo com o seu critério de convergência.

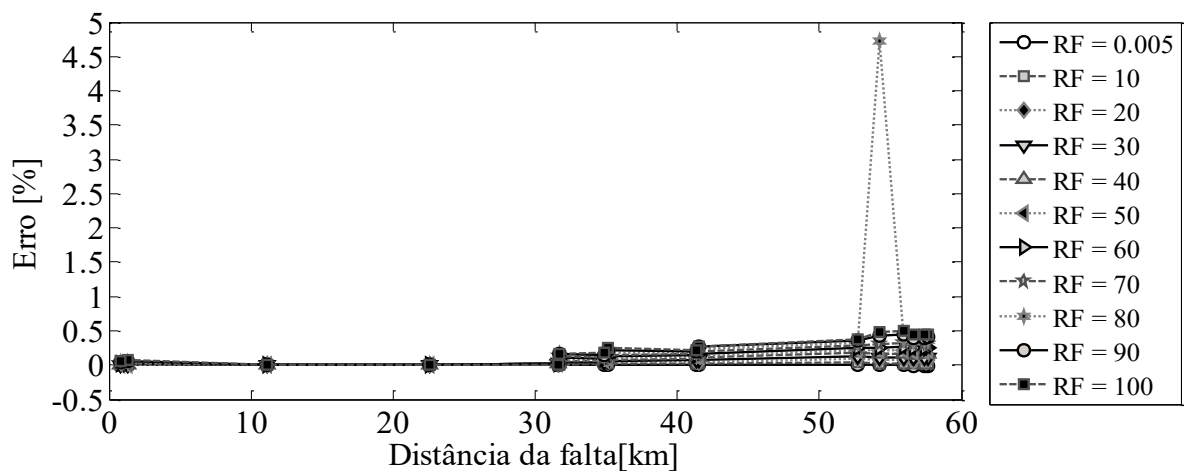


Figura 42 Efeito da resistência de falta em faltas fase-terra BC: metodologia para LF proposta

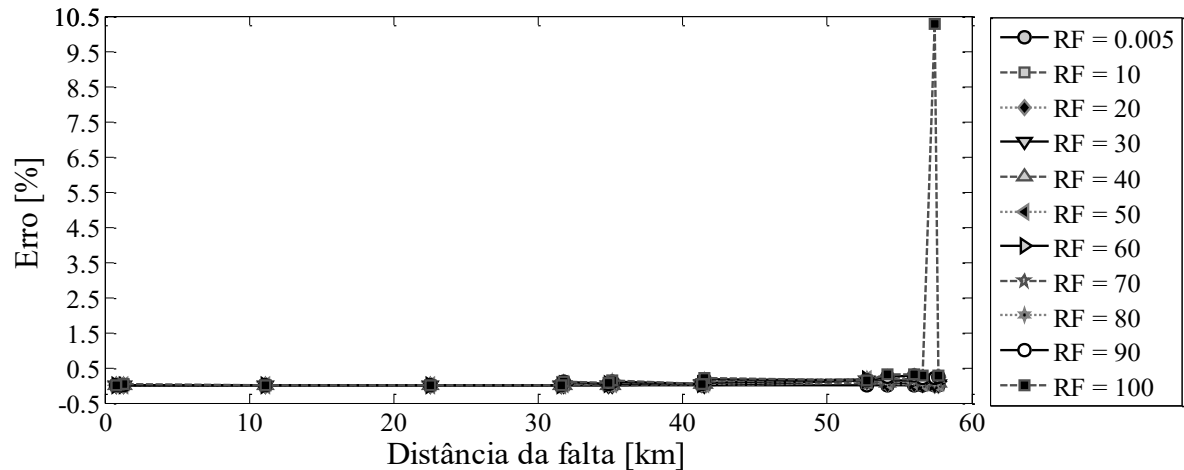


Figura 43 Efeito da resistência de falta em faltas fase-terra AB-T: metodologia para LF proposta

4.3.2.2. Análise comparativa considerando DER baseadas em geradores não tradicionais

Para este caso, a análise comparativa é realizada entre o método proposto por Bedoya *et. al.* (2015) e MLF-MSD e a MLF-MI. Para a seguinte análise comparativa, considere a Tabela 8.

Tabela 8 Análise comparativa: método de Bedoya e metodologia proposta usando modelos lineares que representam os modos de operação do inversor

Tipo de falta	Método de Bedoya		Metodologia analítica para LF proposta			
	Erro médio [%]	Erro Máximo [%]	Modelo elétrico da DER		Medidas de corrente	
			Erro médio [%]	Erro máximo [%]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]
Faltas fase-terra	0,177	2,829	0,139	0,739	0,006	0,017
Faltas fase-fase	0,529	1,872	0,018	0,309	0,005	0,014
Faltas fase-fase-terra	1,209	4,049	0,082	0,785	0,005	0,013
Faltas trifásicas	0,026	0,280	0,090	0,442	0,005	0,010

Do mesmo modo que para o caso anterior, a Tabela 8 apresenta o erro médio absoluto e o erro máximo absoluto para cada tipo de falta.

Na análise da Tabela 8, observa-se que o desempenho do método de Bedoya é muito similar ao apresentado no caso anterior. Isto é esperado, uma vez que este método utiliza medições sincronizadas de tensão e correntes nas DER para considerar seu efeito na LF. O

anterior também é observado nos resultados obtidos MLF-MSD. Assim, igualmente para este caso é evidenciado claramente um desempenho superior da MLF-MSD com relação aos métodos do estado da arte.

No tocante dos resultados obtidos com a MLF-MI, é observado um desempenho satisfatório da metodologia. A partir dos resultados mostrados na Tabela 8, é possível verificar que, para a maioria dos tipos de faltas, um desempenho superior da metodologia proposta é apresentado com relação ao desempenho do método de Bedoya. Porém, o método de Bedoya apresenta um melhor desempenho para faltas trifásicas do que a MLF-MI, exibindo erros menores que 0,28%, enquanto a MLF-MI apresenta erros menores que 0,45%.

4.3.3. Análise geral

A partir dos três cenários validados nas análises de sensibilidade e comparativa com dois métodos do estado da arte, podem ser obtidas algumas conclusões gerais sobre a metodologia proposta. Uma delas é que a metodologia apresenta um comportamento de subestimação da distância até a falta. Em outras palavras, a metodologia sempre estima uma distância menor do que a distância real até a falta. Em adição, foi observado que, para todos os casos validados, existe um aumento do erro conforme aumenta a distância da falta. Também, como é esperado, o desempenho da metodologia é superior quando as medidas sincronizadas de corrente nas DER são utilizadas. No entanto, o desempenho da mesma quando os modelos elétricos das DER são utilizados é satisfatório. Por outro lado, foi observada uma diminuição na precisão da metodologia quando é utilizado o modelo do gerador síncrono para considerar o efeito das DER-IDS na LF. Esta diminuição é apresentada para todos os casos avaliados e alguns erros atípicos são apresentados. Porém, sem considerar os erros atípicos, a metodologia apresenta erros na estimação da distância da falta menores que 2%.

Finalmente, a análise comparativa com dois métodos de LF do estado da arte permitiu verificar um desempenho superior da metodologia para a maioria dos casos validados, tanto quando foram utilizadas medidas sincronizadas de corrente nas DER quanto seus modelos elétricos. Somente para faltas trifásicas o método de Bedoya apresentou um melhor desempenho do que a MLF-MI.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos nos estudos de casos, cujo objetivo principal foi à avaliação do desempenho da metodologia de LF proposta nesta tese. Para isso, os estudos de casos foram divididos em dois grupos: análise de sensibilidade e análise comparativa com dois métodos de LF do estado da arte.

Na análise de sensibilidade, verificou-se que a metodologia de LF proposta apresenta resultados satisfatórios frente às variações dos parâmetros avaliados e que os erros percentuais absolutos não excedem 2,5%, exceto quando erros atípicos são apresentados. Na análise comparativa, observou-se que a metodologia de LF proposta possui um melhor desempenho em relação aos métodos propostos por Nunes e Bedoya, particularmente quando medidas sincronizadas de corrente são utilizadas para considerar o efeito das DER na LF. Porém, resultados aceitáveis são apresentados pela metodologia proposta quando os modelos elétricos das DER são utilizados.

5. CONCLUSÕES

Os sistemas de distribuição de energia elétrica estão expostos continuamente a condições ambientais e de operação que aumentam sua vulnerabilidade a possíveis faltas, gerando interrupção no fornecimento da energia elétrica. As faltas comprometem a continuidade do serviço de eletricidade, prejudicando principalmente os usuários no seu conforto e, em alguns casos, com perdas econômicas. As concessionárias também se vêm afetadas pela percepção por parte dos clientes de um serviço oferecido ruim e pelos pagamentos de compensações que devem ser realizadas aos usuários quando não é fornecida uma qualidade mínima do serviço de energia. Nesse contexto, uma rápida e precisa LF possibilita que equipes de manutenção procedam ao restabelecimento do serviço de energia em menor tempo, mitigando o efeito da interrupção sobre o conforto dos usuários e as penalizações sofridas sobre as concessionárias. Assim, fica clara a importância geral do estudo de LF em sistemas de distribuição de energia elétrica. Vários métodos de LF para sistemas de distribuição já foram desenvolvidos e implementados em sistemas reais. No entanto, devido à sensibilização do uso de energias renováveis e os avanços da tecnologia em armazenamento de energia nos últimos anos, novas características dos sistemas de distribuição causadas pela integração de DER têm sido apresentadas e que não foram consideradas na formulação dos métodos de LF. Desta forma, esta tese de doutorado consistiu em um estudo teórico que aborda o problema da LF em sistemas de distribuição considerando a presença de DER, tendo como foco principal o desenvolvimento de uma metodologia analítica adaptativa que permita considerar o efeito das DER na LF a partir da informação disponível.

Assim, procurando mostrar o estado atual da pesquisa de LF em redes de distribuição de energia elétrica, no capítulo 2 foi apresentada uma revisão bibliográfica dos principais

métodos de LF, bem como dos estudos reportados sobre a modelagem das DER. Destaca-se nesse capítulo a análise das características e parâmetros considerados pelos métodos do estado da arte na formulação de LF, a qual permitiu mostrar os pontos fortes e fracos dos métodos propostos atualmente e as principais contribuições desta tese. Também, nesse capítulo foi apresentada uma nova classificação das DER, que permitiu definir dois modelos elétricos que abrangem todas as tecnologias de DER. Estes modelos foram definidos e apresentados neste capítulo para serem utilizados no capítulo 4 para a formulação de LF, levando em consideração o efeito das DER.

A seguir, no capítulo 4, foi apresentada a metodologia adaptativa proposta de LF baseada na estimativa da impedância aparente para sistemas de distribuição ativos. A metodologia proposta combina, para estimar a LF, a informação fornecida por dispositivos eletrônicos inteligentes alocados na subestação principal e nos terminais de cada DER, o conhecimento da topologia da rede e os seus parâmetros. Sua característica adaptativa foi dada pelo uso de modelos elétricos lineares para considerar o efeito das DER conectadas à rede, quando a informação fornecida pelos IED não está disponível. Adicionalmente, foi desenvolvida uma estratégia baseada na técnica *Ladder* para estimar a contribuição de corrente a partir das DER até a falta. Esta estratégia permitiu considerar vários geradores conectados e seus diferentes modos de operação.

Assim mesmo, os resultados obtidos indicam claramente a validade da metodologia de LF proposta nesta tese em decorrência do desempenho demonstrado sobre análise de sensibilidade e análise comparativa com métodos de LF do estado da arte. Também, sua simplicidade e os requerimentos de informação necessários para sua aplicação, viabilizam sua implementação sobre sistemas de distribuição reais sem precisar de grandes investimentos econômicos nem a intervenção do sistema de distribuição.

Finalmente, com base no estudo apresentado nesta tese e nos resultados obtidos nos estudos de casos é possível fazer as seguintes considerações finais:

- a utilização de modelos elétricos das DER permitiram introduzir uma característica adaptativa na metodologia de LF aqui apresentada para considerar seu efeito na LF;
- uma estratégia baseada na técnica Ladder para estimar a contribuição de corrente das DER até a falta permite considerar adequadamente as diferentes tecnologias DER, seus modos de operação e o número de unidades DER conectadas;
- desconsiderando os casos onde a metodologia proposta apresenta erros atípicos na estimativa da distância da falta, o desempenho da abordagem de LF proposta é satisfatório, considerando-se às variações dos parâmetros avaliados na análise de sensibilidade e na análise comparativa com métodos do estado da arte;
- a metodologia de LF proposta apresenta pouca sensibilidade à variação dos parâmetros avaliados quando são utilizadas as medidas sincronizadas de corrente (MLF-MS). Também, é observada uma sensibilidade perceptível quando é utilizado o modelo do inversor para considerar o efeito das DER na LF (MLF-MI). Do mesmo modo, é exibida uma sensibilidade considerável quando é empregado o modelo do gerador síncrono (MLF-MGS). Porém, os resultados mostram um horizonte promissório para a aplicação da metodologia sobre sistemas de distribuição reais.

Finalmente, este trabalho de tese apresenta uma contribuição relevante ao estado da arte dos métodos de LF. A metodologia analítica proposta aborda o problema de LF para sistemas de distribuição ativos considerando o efeito das diferentes tecnologias DER a partir de seus modelos elétricos, procurando assim, introduzir uma característica adaptativa nas

metodologias de LF para quando medições nos terminais das DER não existirem ou não estejam disponíveis.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Embora a pesquisa desenvolvida nesta tese traga importantes contribuições para a solução do problema de LF em redes de distribuição ativas, este trabalho pode ser melhorado e aperfeiçoado a partir das seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- considerar o problema das múltiplas estimativas na formulação de LF;
- validar o desempenho da metodologia de LF proposta frente a situações reais;
- considerar a utilização de uma técnica de estimação de parâmetros para compensar o efeito das incertezas nos parâmetros do sistema de distribuição;
- considerar de maneira automática, a utilização de curvas típicas de carga sincronizadas com o tempo do evento de falta para melhorar o desempenho da metodologia proposta;
- considerar a utilização de técnicas robustas para a estimação dos parâmetros relativos aos modelos elétricos das DER, tais como a potência de referência S_{ref} , o capacitor do filtro do inversor e a potencia injetada pelas DER-IDS; e
- desenvolver estratégias que permitam considerar de maneira automática variações na topologia do sistema de distribuição.

REFERÊNCIAS

ABB POWER T&D COMPANY, YANG, L.; SPRINGS, C. **One-Terminal Fault Location System that Corrects For Fault Resistance Effects**. PI: US5773980 A, 30 Jan 1997, 30 Jun 1998.

ABB TRANSMIT OY. NOVOSEL, D.; DAVID, H.; JORMA, M. **System for Locating Faults and Estimating Fault Resistance in Distribution Networks with Tapped Loads**. PI:US5839093 A. 31 Dez 1996, 17 Nov 1998.

ACKERMANN, T. **Wind Power in Power Systems**. [S.l: s.n.], 2012. v. 8.

AGGARWAL, R. K.; ASLAN, Y.; JOHNS, A. T. An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, n. 434, p. 25–27, 1997.

AHMED, K. H.; FINNEY, S. J.; WILLIAMS, B. W. Passive filter design for three-phase inverter interfacing in distributed generation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE-WORKSHOP COMPATIBILITY IN POWER ELECTRONICS, 5., 2007, Gdansk, **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 1–9.

AKOREDE, M. F.; HIZAM, H.; POURESMAEIL, E. Distributed energy resources and benefits to the environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 14, p. 724–734, 2010.

ALWASH, S. F.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; MITHULANANTHAN, N. Fault-Location Scheme for Power Distribution System with Distributed Generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 30, n. c, p. 1187–1195, 2015.

ANDERSON, P. **Analysis of Faulted Power Systems**. Ames: Iowa State University, 1973.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf>. Acesso em: 12 Nov. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo3_Revisao_5_Retificação_1.pdf>. Acesso em: 22 set. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Compensação de continuidade, concessionárias Brasil**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Compensacao_de_Continuidade_Conformidade_v2/pesquisaGeral.cfm>. Acesso em: 12 Nov. 2015.

ATP. **The Rule Book of the Alternative Transient Program**. [S.I]: Comité Argentino de Usuarios EMTP/ATP, 2002.

AWAD, B.; WU, J.; JENKINS, N. Control of distributed generation. **E&I Elektrotechnik und Informationstechnik**, [S.I], v. 125, n. 12, p. 409–414, dez. 2008. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00502-008-0591-3>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

AZEVEDO, M. **Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em Metodologias de Localização de Falhas em Linhas de Transmissão**. 2009. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BEDOYA, A.; MORA, J.; PÉREZ, S. Estrategia de reducción para la aplicación generalizada de localizadores de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica. **Revista EIA**, [S.I], p. 21–37, 2012.

BEDOYA-CADENA, A. F.; HERRERA-OROZCO, R. A.; MORA-FLÓREZ, J. J. Fault location considering load uncertainty and distributed generation in power distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [S.I], v. 9, n. 3, p. 287–295, 2015. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2014.0325>>. Acesso em: 12 Nov. 2015

BEDOYA-CADENA, A.; OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLOREZ, J. Single phase to ground fault locator for distribution systems with distributed generation. In: **IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION: LATIN AMERICA CONFERENCE AND EXPOSITION (T&D-LA)**, 6., 2012, Montevideo. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012. p. 1–7.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: voltage sags and interruptions**. New York: [s.n.], 2000.

BRAHMA, S. M. Fault Location in Power Distribution System With Penetration of Distributed Generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 1545–1553, 2011.

BRETAS, A.; SALIM, K. C. O. Fault Location in Unbalanced DG Systems using the Positive Sequence Apparent Impedance. In: **TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA**, 2006. Caracas. **Proceedings...** New York: IEEE, 2006. p. 1–6.

CASTRO, C.; BUNCH, J.; TOPKA, T. Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.I], n. 2, p. 549–557, 1980.

CHATTERJEE, A.; KEYHANI, A.; KAPOOR, D. Identification of photovoltaic source models. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [S.I], v. 26, n. 3, p. 883–889, 2011.

CHOI, M. et al. A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 19, n. 1, p. 35–41, 2004.

- CHOI, M.-S. et al. A Direct Three-Phase Circuit Analysis-Based Fault Location for Line-to-Line Fault. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 22, n. 4, p. 2541–2547, 2007.
- DAGENHART, J. The 40- Ground-Fault Phenomenon. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 36, n. 1, p. 30–32, 2000.
- DAS, R. **Determining the locations of faults in distribution systems**. 1998. 232f. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy) - Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, 1998.
- DING, R. et al. Research on intelligent fault location for multistage in large-scale distributed measurement environment. **Procedia Engineering**, [S.I.], v. 15, p. 2403–2407. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811019527>>. Acesso em: 8 maio 2014.
- DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE. **IEEE 34 Node Test Feeder**. [S.l: s.n.], 2001.
- DUBÉ, L. **Users Guide To MODELS in ATP**. [S.l: s.n.], 1996.
- EMANUEL, A. E.; GULACHENSKI, E. M. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 5, n. 2, p. 676–686, 1990.
- FERRAZ, R. G. **Localização de faltas de alta impedância: formulação baseada na impedância aparente e no método de mínimos quadrados**. 2014. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- FERREIRA, G. D. *et al.* Impedance-based fault location for overhead and underground distribution systems. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM (NAPS), 2012, Champaign, **Proceedings...** New York: IEEE], 2006. p. 1–6.
- GAZZANA, D. S. et al. An integrated technique for fault location and section identification in distribution systems. **Electric Power Systems Research**, [S.I.], Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877961400039X>>. Acesso em: 17 jul. 2014.
- GIRGIS, A.; BRAHMA, S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. In: LARGE ENGINEERING SYSTEMS CONFERENCE, 2001 Halifax, **Proceedings...** New York: IEEE, 2001. p. 115–119.
- GUTIERREZ-GALLEGO, J.; PEREZ-LONDOÑO, S.; MORA-FLOREZ, J. Efficient adjust of a learning based fault locator for power distribution systems. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, T&D-LA, 2011, São Paulo, **Proceedings...** New York: IEEE. 2011. p. 774–779.
- HERNÁNDEZ, L. P.; LONDOÑO, S. P.; FLÓREZ, J. M. Diseño de una herramienta eficiente de simulación automática de fallas en sistemas eléctricos de potencia. **Revista DYNA**, Medellín, v. 164, p. 178–188, 2009.

- HERRERA-OROZCO, A.; MORA-FLÓREZ, J.; PÉREZ-LONDOÑO, S. An impedance relation index to predict the fault locator performance considering different load models. **Electric Power Systems Research**, [S.I.], v. 107, p. 199–205, fev. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779613002782>>. Acesso em: 8 maio 2014.
- HOKÉ, A. et al. Steady-State Analysis of Maximum Photovoltaic Penetration Levels on Typical Distribution Feeders. **IEEE transaction on sustainable energy**, [S.I.], v. 4, n. 2, p. 350–357, 2013.
- HUANG, X.; ZHANG, Z.; JIANG, J. Fuel cell technology for distributed generation : An overview. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2006, Québec: **Proceedings...** New York: IEEE, 2006. p. 1613–1618.
- KERSTING, W. **Distribution System Modeling and Analysis**. Nuevo Mexico: [s.n.], 2002.
- KEZUNOVIC, M.; MOUSAVI, M. J. A Systematic Approach for Ranking Distribution Systems Fault Location Algorithms and Eliminating False Estimates. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, p. 1–9, 2012.
- KUNDUR, P. **Power System Stability And Control**. New York: [s.n.], 1994.
- LAKERVI, E.; HOLMES, E. **Electricity distribution network design**. London: [s.n.], 1998.
- MA, J. *et al.* A New Fault Location Scheme Based on Distributed Short-circuit Current in Distribution System with DGs. In: SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES, 2008, Singapore: **Proceedings...** New York: IEEE, 2008. p. 1189–1194.
- MARVIK, J. I.; PETTERTEIG, A.; HOIDALEN, H. K. Analysis of Fault Detection and Location in Medium Voltage Radial Networks with Distributed Generation. In: POWER TECH, 2007, Lausanne, **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 1191–1196.
- MARVIK, J. HIDALEN, H. K.; PETTERTEIG, A. Localization of Short-Circuits on a Medium Voltage Feeder with Distributed Generation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 20., 02009, Prague. **Proceedings...** New York: IEEE, 2009. p. 8–11.
- MATLAB. **The Language of Technical Computing**. [S.I.]: The Mathworks, 2010.
- MORA-FLÓREZ, J. J. **Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el modelo y métodos basados en el conocimiento**. 2007. 151f. Tesis (Doctorado en tecnologías de la información) - Programa de Doctorado en Tecnologías de la Información, Universitat de Girona, Girona, 2007.
- MORA-FLÓREZ, J.; MELÉNDEZ, J.; CARRILLO-CAICEDO, G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems. **Electric Power Systems Research**, [S.I.], v. 78, n. 4, p. 657–666, abr. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877960700123X>>. Acesso em: 3 jun. 2014.
- MORALES-ESPANA, G.; MORA-FLOREZ, J.; VARGAS-TORRES, H. Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 24, n. 3, p. 1382–1389, jul. 2009.

MORALES-ESPANA, G.; MORA-FLOREZ, J.; VARGAS-TORRES, H. Fault location method based on the determination of the minimum fault reactance for uncertainty loaded and unbalanced power distribution systems. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA (T&D-LA), 2010, São Paulo. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 803–809.

NORRIS, F. Loading of power transformers. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, [S.I.], v. 114, n. 2, 1967.

NUNES, J. U. N.; BRETAS, A. S. An Extended Fault Location Formulation for Unbalanced Distribution Feeders with Distributed Generation. In: MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS (MEPS), 2010, Wroclaw. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 1–6.

NUNES, J. U. N.; BRETAS, A. S. Impedance-Based Fault Location Formulation for Unbalanced Primary Distribution Systems with Distributed Generation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2010, Hangzhou. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 1–6.

OROZCO-HENAO, C. *et al.* Inverter-based DG impact on fault location for energy distribution system. In: IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS –INDUSCON, 2014, Juiz de Fora. **Proceedings...** New York: IEEE, 2014. p. 6–11.

OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ, J.; PÉREZ-LONDOÑO, S. A robust method for single phase fault location considering distributed generation and current compensation. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION: LATIN AMERICA CONFERENCE AND EXPOSITION (T&D-LA), 2012, Montevideo. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012. p. 1–7

PALLARÉS, V. **Aplicación de Técnicas de Sincronismo para Sistemas de Medida Distribuidos y Desarrollo de un Medidor Fasorial basado en el protocolo IEEE1588.** 2012. 252f. Tese (Doctorado en ingeniería) - Departamento de Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2012.

PAZOUKI, S.; HAGHIFAM, M.-R.; OLAMAELI, J. Economical Scheduling of Multi Carrier Energy Systems integrating Renewable , Energy Storage and Demand Response under Energy Hub Approach. In: SMART GRID CONFERENCE (SGC), 2013, Tehran **Proceedings...** New York: IEEE, 2013. p. 80–84.

PENKOV, D. *et al.* DG impact on three fault location. DG use for fault location purposes? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE POWER SYSTEMS, 2005, Amsterdam. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005. p.1-6.

PERERA, B. K. *et al.* Simulation model of a grid-connected single-phase photovoltaic system in PSCAD/EMTDC. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, POWERCON, 2012, Auckland. **Proceedings...** New York: IEEE, 2012.

PLET, C. **Fault Response of Inverter-Based Distributed Generation.** 2011. 302f. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy) - Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, London, 2011.

- PLET, C. A.; GREEN, T. C. Fault response of inverter interfaced distributed generators in grid-connected applications. **Electric Power Systems Research**, [S.I], v. 106, p. 21–28, jan. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779613001946>>. Acesso em: 8 maio 2014.
- PRODANOVI, M. High-Quality Power Generation Through Distributed Control of a Power Park Microgrid. **IEEE transactions on industrial electronics**, [S.I], v. 53, n. 5, p. 1471–1482, 2006.
- REIKARD, G. Predicting solar radiation at high resolutions: A comparison of time series forecasts. **Solar Energy**, [S.I], v. 83, n. 3, p. 342–349, 2009.
- SAADAT, H. **Power System Analysis**, New York: [s.n.], 2002.
- SAHA, M. M. et al. Review of Fault Location Techniques for Distribution Systems. In: POWER SYSTEMS AND COMMUNICATIONS INFRASTRUCTURES FOR THE FUTURE, 2002, Beijing: **Proceedings...** New York: IEEE, 2002. p. 1–6.
- SAHA, M.; ROSOŁOWSKI, E. **Method and device of fault location for distribution networks**. PI: US20020053912 A1, 11 Jul 2000, 9 May 2002.
- SALIM, R. H. *et al.* Extended fault-location formulation for power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 24, n. 2, p. 508–516, 2009.
- SALIM, R. H. **Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica fundamentada na impedância**. 2008. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SALIM, R. H.; SALIM, K. C. O.; BRETAS, A. S.. Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [S.I], v. 5, n. 4, p. 467, 2011. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2010.0446>>. Acesso em: 9 maio 2014.
- STRINGFIELD, T. W.; MARIHART, D. J.; STEVENS, R. F. Fault Location Methods for Overhead Lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.I], v. 76, n. 3, p. 518–529, 1957.
- TAKAGI, T. *et al.* A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II - Laplace Transform Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [S.I], v. PAS-101, n. 3, p. 564–573, 1982.
- TASTU, J. *et al.* Probabilistic forecasts of wind power generation accounting for geographically dispersed information. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S.I], v. 5, n. 1, p. 480–489, 2014.
- TAYLOR, J. W.; MCSHARRY, P. E.; BUIZZA, R. Wind power density forecasting using ensemble predictions and time series models. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, [S.I], v. 24, n. 3, p. 775–782, 2009.

TEODORESCU, R. *et al.* Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters. **IEEE Transactions on Electric Power Applications**, [S.I], v. 153, n. 5, 2006.

THOMAS, D. W. P.; CARVALHO, R. J.; PEREIRA, E. T. Fault location in distribution system based on traveling waves. In: POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **Proceedings...** New York: IEEE, 2003. p. 1–5.

VAN, A. R.; WARRINGTON, C. **Protective Relays Their Theory and Practice**. London: [s.n.], 1978. v. 49.

ZAYANDEHROODI, H. *et al.* An optimal radial basis function neural network for fault location in a distribution network with high penetration of DG units. **Journal of the International Measurement Confederation**, [S.I], v. 46, n. 9, p. 3319–3327, nov. 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224113001929>>. Acesso em: 8 maio 2014.

ZHABELOVA, G.; VYATKIN, V. Multiagent Smart Grid Automation Architecture Based on IEC 61850 / 61499 Intelligent Logical Nodes. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S.I], v. 59, n. 5, p. 2351–2362, 2012.

ZHAO, W.; XU, B.; ZHANG, L. Evaluation method for impact on protection of distribution network with distributed electric resources. In: CHINA INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CICED), 2014, Shenzhen. **Proceedings...** New York: IEEE, 2014. p. 23–26.

ZHENG, T.; JIA, H. Application of Multi-Agent and impedance-based algorithm for fault location in power distribution systems with DG. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED POWER SYSTEM AUTOMATION AND PROTECTION, 2011, Beijing. **Proceedings...** New York: IEEE, p. 1044–1049, 2011

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 2, p. 801–809, 1997.

APÊNDICE A:

Métodos de Localização de Falhas Baseados na Estimativa da Impedância: Um Sumário
Estendido dos Métodos Principais do Estado da Arte

A. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

O problema de localização de faltas não é um problema novo aos sistemas elétricos de potência. Até meados de 1950 as principais metodologias de localização de faltas para sistemas de transmissão não estavam diretamente relacionadas à análise do sistema sujeito à falta, mas sim, a técnicas baseadas na inspeção visual através de carros e helicópteros em conjunto com métodos fundamentados no princípio das ondas viajantes, (STRINGFIELD; MARIHART; STEVENS, 1957). Para sistemas de distribuição, as primeiras técnicas desenvolvidas datam do início de 1980, (CASTRO; BUNCH; TOPKA, 1980; SALIM, 2008). Neste apêndice apresenta-se um sumário estendido dos métodos de LF principais do estado da arte. Assim, na seção A.1 apresenta-se um modelo geralista do sistema de distribuição de energia elétrica para LF. A seguir, na seção A.2 apresentam-se os principais métodos que constituem o estado da arte dos métodos de LF baseados na impedância para sistemas de distribuição passivos. Finalmente, na seção A.3, os métodos de LF baseados na impedância para sistemas de distribuição ativos ou com GD, principais da literatura técnica são apresentados.

A.1. MODELO GERALISTA DO SDEE PARA MÉTODOS DE LF

Para a análise dos diferentes métodos de LF baseados na impedância aparente apresenta-se um modelo unificado do sistema de distribuição. Este modelo contém todos os elementos utilizados pelos autores aqui referenciados para a realização de sua metodologia em particular.

Na Figura A. 1 apresenta-se um modelo unifilar generalizado de um SDEE, no qual os parâmetros das linhas podem ser tratados como de parâmetros concentrados ou distribuídos dependendo das considerações do autor. Além disso, a consideração de cargas laterais e seu modelo, também é um aspecto que varia entre cada autor.

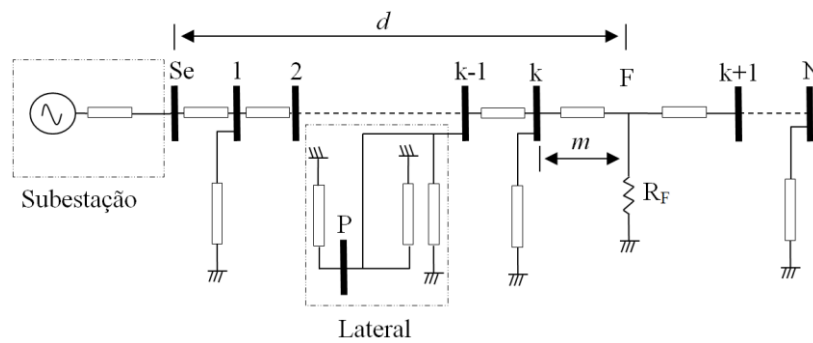


Figura A. 1 Modelo generalizado de um sistema distribuição, (MORA, 2007)

Onde,

- m : distância da falta na seção analisada
- Se : Nó da subestação
- k : Nó de envio da seção em análise
- $k+1$: Nó de recibo da seção em análise
- F : Local da falta
- d : Distância desde a subestação ao local em falta
- R_F : Resistência de falta

Na Figura A. 2 apresenta-se um modelo trifásico generalizado para uma seção de linha em falta, entre os nós k e $k+1$ de um SDEE, (MORA-FLÓREZ, 2007).

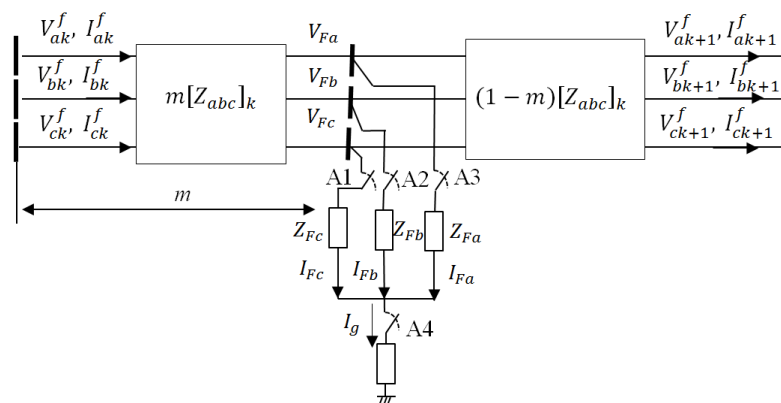


Figura A. 2 Modelo trifásico generalizado para uma seção de linha em falta.

Onde, os diferentes tipos de faltas podem ser obtidos a partir da combinação das chaves A1, A2, A3 e A4 como se mostra na Tabela A.1.

Onde, zero (0) significa que a chave está aberta e um (1) que está fechada. Além disso, o estado inicial de todas as chaves é aberta.

Tabela A. 1 Tipos de faltas a partir da combinação das chaves A1, A2, A3 e A4

Tipo de falta	A_i	A_j	A_h	A_4
Fase i-terra	1	0	0	1
Fase-fase i-j	1	1	0	0
Fase-fase i-k-terra	1	1	0	1
Trifásica	1	1	1	0
Trifásica-terra	1	1	1	1

A.2. MÉTODOS DE LF PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PASSIVOS

Nesta seção apresenta-se um sumário dos métodos de localização de faltas para sistemas de distribuição passivos mais sobressalentes na literatura técnica. Consideram-se como sistemas de distribuição passivos aqueles que são alimentados por uma única subestação. Em outras palavras, que não possuem geração distribuída.

A.2.1. Método da componente reativa, (1978).

O método apresentado em (VAN; WARRINGTON, 1978), considera a localização de uma falta entre os nós Se e N, como se mostra na Figura A. 1. Para estimar a distância da subestação ao local em falta (d), realiza-se uma comparação da reatância estimada mediante os valores de tensão e corrente a frequência fundamental medidos na subestação (Nó Se) e a reatância total da linha entre Se e N. A comparação das reatâncias atenuam o efeito da resistência da falta. O método não considera as cargas do sistema de distribuição. A partir deste método foram desenvolvidos métodos de LF baseados na impedância que utilizam o mesmo princípio considerando algumas características, como a carga, que não foram

abordadas nesta proposta, (MORALES-ESPANA; MORA-FLOREZ; VARGAS-TORRES, 2010; NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998; SAHA; ROSOLOWSKI, 2002).

A.2.1.1. Estimação da distância ao local em falta.

A impedância aparente desde a subestação ao local em falta estima-se com os registros de tensão e corrente tomados na subestação principal do SDEE (Nó Se). Como consequência da presença da resistência de falta, a impedância aparente vista desde Se é maior do que a impedância de linha da subestação até o local em falta F. Para sistemas alimentados por um só terminal, a reatância da subestação ao local da falta F permanece constante, sem importar o valor da resistência de falta. Esta característica é o princípio fundamental dos métodos baseados na reatância. Na Figura A. 3, apresenta-se o gráfico da reatância para uma falta com valor R_F na linha Se-N da Figura A. 1. Neste caso as seções do nó Se até o nó N pode ser considerada como uma única linha, já que este método desconsidera as cargas.

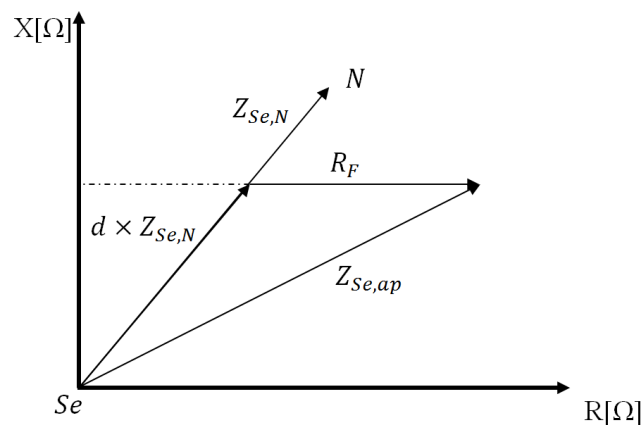


Figura A. 3 Gráfico da reatância para sistemas alimentados por um só terminal, (FLÓREZ, 2007; Van & Warrington, 1978)

Onde, $Z_{Se,N}$ é a soma das impedâncias do nó Se até o nó N e $Z_{Se,ap}$ é a impedância estimada com as tensões e correntes em falta registradas em Se. Da Figura A. 3. pode ser estimada a distância ao local de falta por (A. 1).

$$d = \frac{\Im\{Z_{Se,ap}\}}{\Im\{Z_{Se,N}\}} \quad (\text{A. 1})$$

As medições utilizadas para estimar a impedância aparente variam com o tipo de falta. Nesta seção, o método formula-se para sistemas radiais, no entanto pode ser estendido para sistemas alimentados pelos dois terminais da linha.

A.2.2. Método do Novosel (1998)

O método proposto em (NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998), é baseado na simplificação do sistema de distribuição com cargas distribuídas ao longo dele, em um circuito com as cargas acumuladas no nó final. Esta simplificação é feita já que se assume que o somatório das impedâncias das cargas é muito maior do que o somatório das impedâncias das linhas. A partir desta simplificação é realizada uma análise de superposição que considera as variações da tensão e a corrente em regime permanente em falta e pré-falta para estimar a distância ao local de falta.

A.2.2.1. Estimação da distância a falta

Para determinar uma expressão que defina o valor da distância da falta desde a subestação, o circuito da Figura A. 1 é simplificado pela acumulação da sua carga ao final do alimentador como se mostra na Figura A. 4.

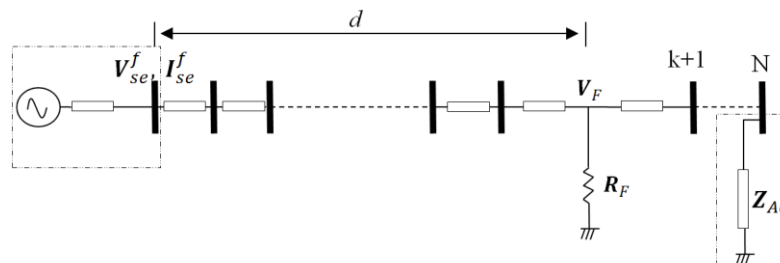


Figura A. 4 Simplificação do sistema de distribuição acumulando as cargas no nó final do alimentador, (FLÓREZ, 2007; Novosel et al., 1998)

Deste circuito, é obtido um equivalente puramente faltoso como se mostra na Figura

A. 5

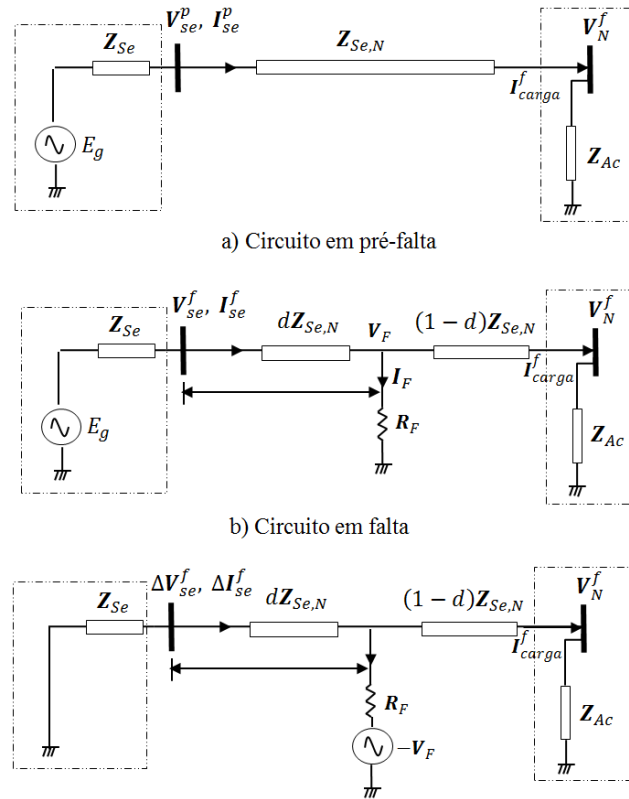


Figura A. 5 Equivalente puramente faltoso do circuito da figura A.4, (SALIM, 2008)

Onde,

$V_{se}^{p,f}$: Vetor de fasores de tensão no nó Se

$I_{se}^{p,f}$: Vetor de fasores de correntes no nó Se

Z_{Se} : Matriz de impedância da subestação ou sistema externo.

I_{carga}^f : Vetor de fasores de correntes no nó N ou corrente de carga

Z_{Ac} : Matriz de acumulação de carga

V_F : Vetor de fasores de tensão no local de falta

I_F : Vetor de fasores de corrente de falta

Dos circuitos (a) e (c) da Figura A. 5, determina-se a impedância puramente faltosa da fonte Z_{Se} e a impedância da carga Z_{Ac} . Estas são definidas por (A. 2) e (A. 3).

$$Z_{Ac} = \frac{V_{se}^P}{I_{se}^P} - Z_{Se,N}^{(1)} \quad (A. 2)$$

$$Z_{Se} = \frac{V_{se}^f - V_{se}^P}{I_{se}^f - I_{se}^P} \quad (\text{A. 3})$$

Devido a que podem se apresentar erros no cálculo da impedância da fonte, um circuito de sequência negativa é utilizado para a realização deste cálculo em faltas desequilibradas.

Este método baseia-se principalmente na impedância observada em falta desde a subestação até o local de falta, a qual é dada por (A. 4).

$$Z_{ob} = \frac{V_{se}^f}{I_{se}^f} = d \cdot Z_{Se,N}^{(1)} + R_F \cdot \frac{I_F}{I_{se}} \quad (\text{A. 4})$$

Onde, d é um valor adimensional que é porcentual ao tamanho total da linha, I_F é a corrente de falta e $Z_{Se,N}^{(1)}$ a impedância de sequência positiva da linha Se-N.

A partir da resolução da equação (A. 4), em (NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998) se propõem duas formas de estimar a distância da falta. A primeira corresponde à solução de uma equação quadrática que não requer um algoritmo iterativo para sua solução. A segunda proposta corresponde à solução de uma equação linear que requer um processo iterativo para sua solução. Para a primeira proposta, utilizando (A. 4) e outras relações do circuito é possível determinar uma equação quadrática em função da distância da falta d .

$$d^2 - d \cdot k_1 - k_3 \cdot R_F = 0 \quad (\text{A. 5})$$

Onde,

$$k_1 = \frac{V_{se}^f}{I_{se}^f \cdot Z_{Se,N}^{(1)}} + \frac{Z_{Ac}}{Z_{Se,N}^{(1)}} + 1 \quad (\text{A. 6})$$

$$k_2 = \frac{V_{se}^f}{I_{se}^f \cdot Z_{Se,N}^{(1)}} \cdot \left(\frac{Z_{Ac}}{Z_{Se,N}^{(1)}} + 1 \right) \quad (\text{A. 7})$$

$$k_3 = \frac{I_{se}^f - I_{se}^P}{I_{se}^f \cdot Z_{Se,N}^{(1)}} \cdot \left(\frac{Z_{Se} + Z_{Ac}}{Z_{Se,N}^{(1)}} + 1 \right) \quad (\text{A. 8})$$

A equação (A. 5) é uma equação com coeficientes complexos que possui duas incógnitas d e R_F . Separando esta equação em sua parte real e imaginária pode ser obtida uma solução direta destas duas incógnitas por:

$$d = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot c}}{2} \quad (\text{A. 9})$$

Onde, b e c são definidos por (A. 10) e (A. 11).

$$b = \frac{\Im\{k_1\} \cdot \Re\{k_3\}}{\Im\{k_3\}} - \Re\{k_1\} \quad (\text{A. 10})$$

$$c = \Re\{k_2\} - \frac{\Im\{k_2\} \cdot \Re\{k_3\}}{\Im\{k_3\}} \quad (\text{A. 11})$$

O equacionamento apresentado é para um sistema monofásico. Porém, os autores fazem uma extensão para sistemas trifásicos a partir da substituição apropriada das medidas V_{Se} , I_{Se} e ΔI_{Se} pelos valores apresentados na Tabela A. 2, onde k é definido por (A. 12)

$$\frac{Z_{Se,N}^{(0)} - Z_{Se,N}^{(1)}}{Z_{Se,N}^{(1)}} \quad (\text{A. 12})$$

Onde $Z_{Se,N}^{(0)}$ e $Z_{Se,N}^{(1)}$ são as impedâncias totais de sequência zero e de sequência positiva da linha analisada e I representa a corrente de sequência zero medida na subestação do sistema em falta.

Tabela A. 2 Tensões e correntes para cada tipo de falta, (NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998)

Tipo de falta	V_{Se}^f	I_{Se}^f	ΔI_{Se}
A-g	V_{Sea}^f	$I_{Sea}^f + k \cdot I$	$3 \cdot \Delta I_{Sea}$
B-g	V_{Seb}^f	$I_{Seb}^f + k \cdot I$	$3 \cdot \Delta I_{Seb}$
C-g	V_{Sec}^f	$I_{Sec}^f + k \cdot I$	$3 \cdot \Delta I_{Sec}$
AB	$V_{Sea}^f - V_{Seb}^f$	$I_{Sea}^f - I_{Seb}^f$	$\Delta I_{Sea} - \Delta I_{Seb}$
BC	$V_{Seb}^f - V_{Sec}^f$	$I_{Seb}^f - I_{Sec}^f$	$\Delta I_{Seb} - \Delta I_{Sec}$
AC	$V_{Sea}^f - V_{Sec}^f$	$I_{Sea}^f - I_{Sec}^f$	$\Delta I_{Sea} - \Delta I_{Sec}$
AB-g	$V_{Sea}^f - V_{Seb}^f$	$I_{Sea}^f - I_{Seb}^f$	$\Delta I_{Sea} - \Delta I_{Seb}$
BC-g	$V_{Seb}^f - V_{Sec}^f$	$I_{Seb}^f - I_{Sec}^f$	$\Delta I_{Seb} - \Delta I_{Sec}$
AC-g	$V_{Sea}^f - V_{Sec}^f$	$I_{Sea}^f - I_{Sec}^f$	$\Delta I_{Sea} - \Delta I_{Sec}$
ABC-g	$V_{Seb}^f - V_{Sec}^f$	$I_{Seb}^f - I_{Sec}^f$	$\Delta I_{Seb} - \Delta I_{Sec}$

Uma das principais contribuições do método apresentado por Novosel é a consideração das cargas e laterais intermediárias.

A.2.3. Método do Das (1998)

O método apresentado em (DAS, 1998) utiliza os princípios mostrados em (NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998) e (VAN; WARRINGTON, 1978) para estimar a localização da falta. No primeiro passo o método detecta e identifica o tipo de falta. Posteriormente determina a seção em falta do sistema para após, fazer um refinamento da localização da falta utilizando um sistema radial equivalente do alimentador em estudo. Na continuação apresenta-se uma descrição mais detalhada do método.

A.2.3.1. Estimação da distância de falta

Para a estimação da distância de falta realizam-se os seguintes passos:

I. Detecção e determinação do tipo de falta

A corrente em falta medida na subestação está constituída pela corrente de carga e a corrente de falta. Portanto, se a corrente em uma ou mais fases são maiores do que um limite assume-se que o sistema esta em falta. E se a magnitude da corrente de sequência zero é maior do que um limite se determina que uma ou mais fases estão em curto-circuito com terra. A partir desta análise, determina-se o tipo de falta por comparações sucessivas das correntes medidas em cada fase com seu limite. Estes limites dependem das características próprias do circuito em estudo.

II. Estimação da seção em falta

A estimação da seção em falta realiza-se pela comparação da reatância estimada com as tensões e correntes medidas na subestação e a estimada a partir da análise em componentes

simétricas e os parâmetros do sistema, desconsiderando os efeitos das cargas (Método da reatância modificado). Para o caso de uma falta fase-terra A-T a reatância é definida por:

$$X_{Se,app}^{(1)} = \Im\{Z_{Se,app}^{(1)}\} = \Im\left\{\frac{V_{se}^f}{I_{se}^f}\right\} \quad (\text{A. 13})$$

Onde,

$Z_{Se,app}^{(1)}$: Impedância aparente de sequência positiva da subestação até o local da falta.

$X_{Se,app}^{(1)}$: Reatância aparente de sequência positiva da subestação até o local da falta.

A reatância modificada para a primeira seção entre o nó *Se* e o nó 1 do sistema mostrado na Figura A. 1 obtém-se por (A. 14).

$$X_{Se,1}^M = X_{Se,1}^{(1)} + \frac{X_{Se,1}^{(0)} - X_{Se,1}^{(1)}}{3} \quad (\text{A. 14})$$

Onde,

$X_{Se,1}^M$: Reatância modificada entre os nós *Se* e 1

$X_{Se,1}^{(0)}$: Reatância de sequência zero entre os nós *Se* e 1.

$X_{Se,1}^{(1)}$: Reatância de sequência positiva entre os nós *Se* e 1

Se a reatância aparente é maior do que a reatância modificada, então a falta está localizada a jusante do nó 1. A reatância da seguinte seção calcula-se utilizando a equação (A. 14) e se adiciona a impedância calculada na seção anterior para obter uma reatância modificada total. Este processo iterativo se faz até que a reatância aparente total seja menor do que a reatância modificada. Nesse caso a localização da falta é determinada na última seção que foi analisada (DAS, 1998; MORA-FLÓREZ, 2007; SALIM, 2008).

III. Obtenção do sistema radial equivalente

Estabelecida a localização da falta pelo processo descrito no item II, as cargas a jusantes da seção definida como em falta, são acumuladas no final do radial ficando um circuito simplificado dado por uma linha com uma carga conectada ao final como se mostra na Figura A. 6.

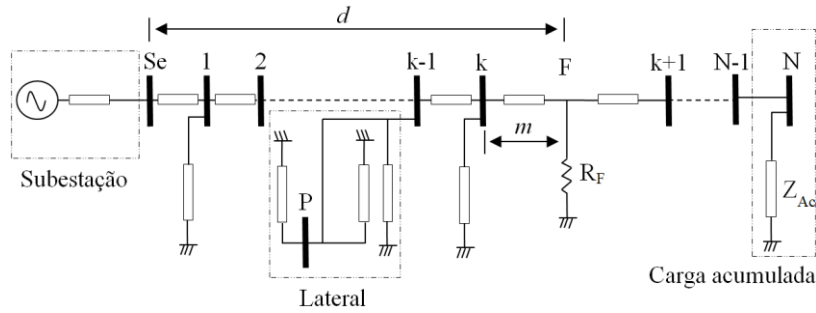


Figura A. 6 Sistema radial equivalente para uma falta em F, (MORA, 2007)

IV. Estimação das cargas

O comportamento das cargas é considerado a partir da compensação das correntes aplicando o princípio de superposição. Para este caso, assume-se que as cargas são dependentes da tensão como se define em (A. 15).

$$Y_i = G_i \cdot |V_i|^{np-2} + jB_i \cdot |V_i|^{nq-2} \quad (\text{A. 15})$$

Onde,

V_i : Tensão no ponto de conexão da carga i .

Y_i : Admitância da carga i .

G_i, B_i : Constantes proporcionais à condutância e susceptância da carga, estimadas a partir dos fasores em pré-falta.

n_p, n_q : Constantes para as componentes ativa e reativa da carga.

As constantes G_i e B_i para cada carga calculam-se com a tensão em pré-falta. As constantes n_p e n_q definem-se segundo o comportamento da carga como:

$n_p = n_q = 0$: Modelo de carga de potência constante.

$n_p = n_q = 1$: Modelo de carga de corrente constante.

$n_p = n_q = 2$: Modelo de carga de impedância constante.

V. Estimação das tensões e correntes de pré-falta nos nós.

As tensões e correntes no sistema radial obtêm-se utilizando um modelo de parâmetros distribuídos para linhas longas. Este modelo é simplificado devido ao cumprimento das linhas de distribuição como se apresenta em (A. 16).

$$\begin{bmatrix} V_i \\ I_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -B_{i,j} \\ C_{i,j} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ I_{j,i} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 16})$$

Onde as constantes das linhas definem-se por (A. 17).

$$B_{i,j} = Z_{i,j}^c \cdot \sinh(\gamma_{i,j} \cdot L_{i,j}) \quad (\text{A. 17})$$

$$C_{i,j} = \frac{\sinh(\gamma_{i,j} \cdot L_{i,j})}{Z_{i,j}^c} \quad (\text{A. 18})$$

E,

V_i, V_j : Fasor de Tensões nos nós i e j

$I_{i,j}, I_{j,i}$: Fasor de correntes de i a j e vice-versa.

$\gamma_{i,j}$: Constante de propagação.

$L_{i,j}$: Comprimento da linha.

$Z_{i,j}^c$: Impedância característica da linha.

VI. Estimación das tensões e correntes no nó N e na falta F.

A tensão e a corrente de sequência no nó k calculam-se antes do que nos nós F e N. As tensões e correntes de sequência zero no nó 1 em falta, são estimadas a partir das medidas no nó Se por (A. 16).

Para o nó seguinte, as correntes obtêm-se subtraindo a corrente da carga conectada no nó a jusante. Este procedimento é feito até determinar a corrente no nó k , (MORA-FLÓREZ, 2007).

Os fasores de tensão e corrente no local em falta F são estimados com as grandezas calculadas no nó k como se apresenta em (A. 19)

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{f,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -m \cdot B_{k,k+1} \\ m \cdot C_{k,k+1} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ I_{j,i} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 19})$$

As tensões e correntes de sequência nos nós N e F em falta estão relacionadas por (A. 20).

$$\begin{bmatrix} V_N \\ -I_{N,F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-m) \cdot B_{k,k+1} \\ -(1-m) \cdot C_{k,k+1} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_F \\ I_{F,N} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 20})$$

Onde A_e , B_e , C_e , e D_e são constantes equivalentes às seções compreendidas entre os nós $k+1$ e N . As correntes no nó F são definidas por (2.21).

$$I_{F,N} = -I_{F,k} - I_F \quad (\text{A. 21})$$

Transformando em componentes simétricas as equações (A. 19), (A. 20) e (A. 21) e fazendo as devidas substituições, determinam-se a corrente de falta e a tensão no nó N , em componentes simétricas.

Onde,

$$V_F^{(0)} = V_k^{(0)} - m \cdot B_{k,k+1}^{(0)} \cdot I_{k,F}^{(0)} \quad (\text{A. 22})$$

$$V_F^{(1)} = V_k^{(1)} - m \cdot B_{k,k+1}^{(1)} \cdot I_{k,F}^{(1)} \quad (\text{A. 23})$$

$$V_F^{(2)} = V_k^{(2)} - m \cdot B_{k,k+1}^{(2)} \cdot I_{k,F}^{(2)} \quad (\text{A. 24})$$

E,

$$I_F^{(0)} = \frac{1}{K'_{0v} + m \cdot K'_{0w}} \left((K'_{0q} + m \cdot K'_{0r}) \cdot V_k^{(0)} + (K'_{0v} + m \cdot K'_{0u}) \cdot I_{k,F}^{(0)} \right) \quad (\text{A. 25})$$

$$I_F^{(1)} = \frac{1}{K'_{1v} + m \cdot K'_{1w}} \left((K'_{1q} + m \cdot K'_{1r}) \cdot V_k^{(1)} + (K'_{1v} + m \cdot K'_{1u}) \cdot I_{k,F}^{(1)} \right) \quad (\text{A. 26})$$

$$I_F^{(2)} = \frac{1}{K'_{2v} + m \cdot K'_{2w}} \left((K'_{2q} + m \cdot K'_{2r}) \cdot V_k^{(2)} + (K'_{2v} + m \cdot K'_{2u}) \cdot I_{k,F}^{(2)} \right) \quad (\text{A. 27})$$

$$V_N^{(0)} = \frac{1}{K'_{0v} + m \cdot K'_{0w}} \left((K'_{0m} + m \cdot K'_{0n}) \cdot V_k^{(0)} + m \cdot K'_{0p} \cdot I_{k,F}^{(0)} \right) \quad (\text{A. 28})$$

$$V_N^{(1)} = \frac{1}{K'_{1v} + m \cdot K'_{1w}} \left((K'_{1m} + m \cdot K'_{1n}) \cdot V_k^{(1)} + m \cdot K'_{1p} \cdot I_{k,F}^{(1)} \right) \quad (\text{A. 29})$$

$$V_N^{(2)} = \frac{1}{K'_{2v} + m \cdot K'_{2w}} \left((K'_{2m} + m \cdot K'_{2n}) \cdot V_k^{(2)} + m \cdot K'_{2p} \cdot I_{k,F}^{(2)} \right) \quad (\text{A. 30})$$

A estimação da tensão no terminal N e da corrente no ponto da falta depende da distância da falta, m . Portanto, este passo se realiza em conjunto com o passo do item VII, até estimar o local da falta.

VII. Estimação da Distância da Falta

A distância desde o nó k ao local da falta F , dada por m , é estimada através da relação tensão-corrente no ponto da falta. O método utiliza o mesmo princípio do método da reatância, onde se considera que a impedância de falta é de natureza puramente resistiva. Para cada tipo de falta há uma equação diferente obtida através de uma formulação em componentes simétricas da impedância no ponto da falta. Em (A. 31) mostra-se a equação definida para uma falta monofásica.

$$\Im \left\{ \frac{V_F^{(0)} + V_F^{(1)} + V_F^{(2)}}{I_F^{(0)} + I_F^{(1)} + I_F^{(2)}} \right\} = 0 \quad (\text{A. 31})$$

Onde $V_F^{(0)}, V_F^{(1)}, V_F^{(2)}, I_F^{(0)}, I_F^{(1)}$ e $I_F^{(2)}$ são as tensões e correntes de sequência zero, positiva e negativa no local da falta.

A partir das equações (A. 22) até (A. 31) determina-se uma expressão para a distância ao local da falta.

$$m = \frac{K_{AR}'' \cdot K_{CI}'' - K_{AI}'' \cdot K_{CR}''}{(K_{CR}'' \cdot K_{BI}'' - K_{CI}'' \cdot K_{BR}'') + K_{DR}'' \cdot K_{AI}'' - K_{DI}'' \cdot K_{AR}''} \quad (\text{A. 32})$$

Onde os termos K_A'', K_B'', K_C'' e K_D'' são função de $V_k, I_{k,F}$ e $B_{k,k+1}$ (NOVOSEL; DAVID; JORMA, 1998).

Esta metodologia destaca-se por apresentar um excelente desempenho para todos os tipos de falta independente do local ou da resistência de falta apesar de apresentar limitações referentes ao uso das componentes de sequência e a desconsideração do efeito capacitivo da linha, (MORA-FLÒREZ; MELÉNDEZ; CARRILLO-CAICEDO, 2008; SALIM, 2008)

A.2.4. Método do Zhu (1997)

A metodologia apresentada em (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997) propõe uma análise matricial da seção em falta para obter uma expressão em função da distância da falta, a resistência e as correntes no local da falta. O método é formulado a partir de uma equação complexa com três incógnitas, portanto é necessário utilizar um método iterativo para sua resolução. O método iterativo começa assumindo que a corrente de falta é a diferença entre a corrente em falta I_k^f e a corrente de pré-falta I_k^p . O método obtém como resposta um intervalo de falta, e utiliza um método probabilístico para considerar as incertezas na estimação dos parâmetros do sistema.

Apesar de este método ter sido publicado antes do que o método apresentado em (DAS, 1998), a realização de ambos os trabalhos foi realizada praticamente ao mesmo tempo, sendo que cada um foi fundamentado de uma forma diferente. No entanto o Método de Zhu foi um dos primeiros que não baseou-se em componentes simétricas, o qual correspondeu a um grande avanço nas metodologias de localização de faltas para sistemas de distribuição, já que estes sistemas dificilmente apresentam linhas geometricamente simétricas (ou transpostas). A partir deste método foram desenvolvidos a maioria dos métodos de LF baseados na impedância que utilizam componentes de fase, (AGGARWAL; ASLAN; JOHNS, 1997; CHOI, M. et al., 2004; CHOI, M.-S. et al., 2007; YANG; SPRINGS, 1998).

A.2.4.1. Estimação da distância de falta

Considere o circuito equivalente da Figura A. 7, que representa um sistema de distribuição em falta ($A-g$). Todas as cargas posteriores ao local da falta foram acumuladas no nó R .

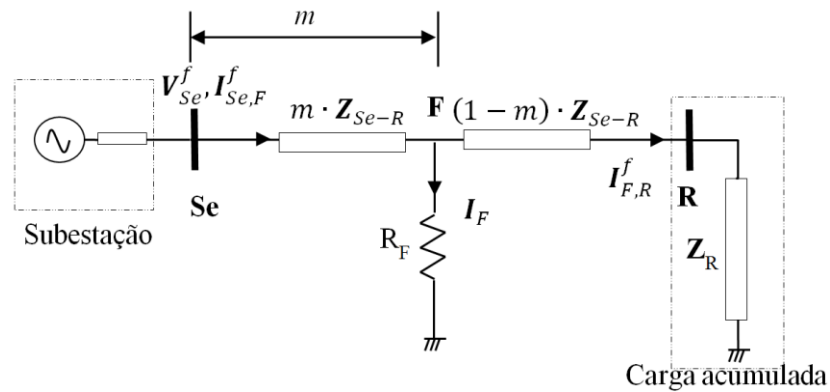


Figura A. 7 Falta Fase-Terra em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)

Onde,

V_{Se}^f : Vetor de fasores de tensão em falta no nó Se

$I_{Se,F}^f$: Vetor de fasores de corrente de linha em falta entre os nós $Se-F$

Z_{Se-R} : Matriz de impedância de falta da linha $Se-R$

Z_R : Matriz de impedância de carga acumulada no nó R

I_F : Vetor de correntes de Falta.

A tensão medida na fase a do terminal local é dada por (A. 33)

$$V_{Sa}^f = m \cdot (Z_{abc_{aa}} \cdot I_{Se, Fa}^f + Z_{abc_{ab}} \cdot I_{Se, Fb}^f + Z_{abc_{ac}} \cdot I_{Se, Fc}^f) + R_F \cdot I_F \quad (\text{A. 33})$$

Com I_F definida para uma falta fase-terra por (A. 34).

$$I_F = I_{Se, Fa}^f - I_{F, Ra}^f \quad (\text{A. 34})$$

Multiplicando (A. 33) pelo conjugado da corrente de falta I_F^* , pode ser determinado o valor da distância ao local de falta m em $p. u.$

$$m = \frac{\Im\{I_F \cdot V_{Se_a}^*\}}{\Im\{I_F \cdot \sum_{i=\{a,b,c\}} (Z_{abc_{am}} \cdot I_{Se_m}^f)^*\}} \quad (\text{A. 35})$$

Este foi o primeiro trabalho que fez um tratamento das laterais de forma sistemática em conjunto com a atualização das tensões e correntes aproveitando a estrutura ramificada do sistema de distribuição. Além disso, o método faz uma estimação da distância da falta em

cada seção de linha do sistema até determinar conjuntamente a seção em falta e o local da falta. Esta estratégia é utilizada pelos métodos de localização atuais.

A.2.4.2. Algoritmo sistematizado para a localização da falta

O algoritmo para estimar o local da falta é descrito a seguir:

- I. Assumir a corrente de carga do sistema em falta, I_{F,R_a}^f , igual a corrente de carga em pré-falta $I_{F,R_a}^f = I_{F,R_a}^p = I_{Se,F_a}^f$.
- II. Calcular a corrente de falta utilizando (A. 34).
- III. Estimar o local da falta utilizando (A. 35).
- IV. Calcular a tensão no ponto da falta utilizando (A. 36).

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{V}_{Se}^f - m \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{I}_{Se}^f \quad (\text{A. 36})$$

- V. Atualizar a corrente de carga I_{F,R_a}^f , utilizando a tensão no ponto da falta calculada no passo anterior e um algoritmo de fluxo de potência para sistemas de distribuição.
- VI. Utilizar (A. 34) para estimar a corrente de falta e calcular de novo a distância da falta. Este processo se repete até que a distância da falta m convirja para algum valor. O local estimado da falta pode estar em qualquer seção do sistema de distribuição. Quando o valor de m converge para um valor maior do que o tamanho da primeira seção da linha, a falta é determinada como após da primeira seção, e então é necessário atualizar os valores de tensão e corrente para a próxima barra. Esta atualização é realizada através da análise direta de circuitos, como se mostra na Figura A. 8 e com as equações de (A. 37) até (A. 39).

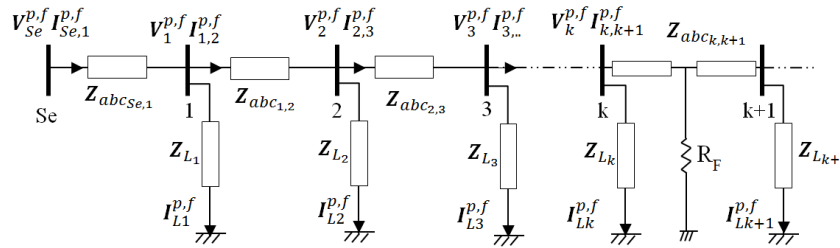


Figura A. 8 Atualização das Tensões e Correntes medidas na Subestação, (ZHU; LUBKEMAN; GIRGIS, 1997)

$$\mathbf{V}_k^{p,f} = \mathbf{V}_{k-1}^{p,f} - \mathbf{Z}_{abc_{k-1,k}} \cdot \mathbf{I}_{k-1,k}^{p,f} \quad (\text{A. 37})$$

$$\mathbf{I}_{L_k}^{p,f} = \mathbf{Z}_{L_k}^{-1} \cdot \mathbf{V}_k^{p,f} \quad (\text{A. 38})$$

$$\mathbf{I}_{k,k+1}^{p,f} = \mathbf{I}_{k-1,k}^{p,f} - \mathbf{I}_{L_k}^{p,f} \quad (\text{A. 39})$$

Com,

- $\mathbf{V}_k^{p,f}$: Vetor de fasores de tensão em pré-falta (p) ou falta (f) no nó k
 $\mathbf{I}_k^{p,f}$: Vetor de fasores de corrente de linha ($k, k+1$) em pré-falta (p) ou falta (f)
 $\mathbf{Z}_{L_k}^{-1}$: Inversa da matriz de impedância da lateral k

As equações são utilizadas para atualizar tanto os valores de tensão como de corrente em pré-falta e falta. Quando for atualizar os valores em pré-falta é utilizado o sobrescrito (p) para cada variável. Quando for atualizar os valores em falta utiliza-se o sobrescrito (f) para cada variável.

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 ou que se chegue ao final do alimentador.

A.2.5. Método do Salim (2011)

A metodologia apresentada em (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011; SALIM, 2008) propõe um análise matricial da seção em falta utilizando o modelo exato das linhas de distribuição para obter uma expressão em função da distância ao local de falta. Sua contribuição principal é a consideração do efeito capacitivo das linhas nos métodos de LF baseados na impedância. Além disso, o autor propõe uma nova formulação na qual determina uma equação para os tipos de faltas fase-terra e uma equação para faltas fase-fase. A proposta é comparada com alguns métodos do estado da arte para mostrar a melhora no desempenho dos métodos de localização pela consideração do efeito capacitivo na formulação da localização da falta.

A.2.5.1. Estimação da distância de falta

Considera-se o modelo exato de linha apresentado na Figura A. 9. Utilizando a segunda lei do Kirchoff é possível determinar que: (KERSTING, 2002; SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011).

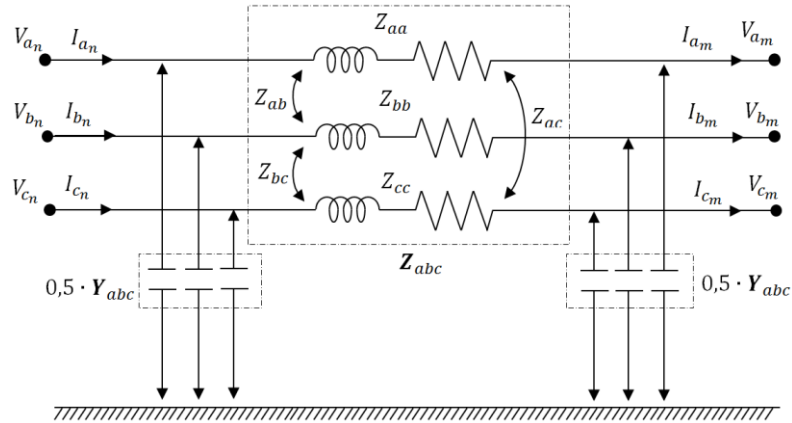


Figura A. 9 Modelo exato de uma linha de distribuição de energia elétrica, (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{abc_m} \\ \mathbf{I}_{abc_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_l & -\mathbf{b}_l \\ -\mathbf{c}_l & \mathbf{a}_l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{abc_n} \\ \mathbf{I}_{abc_n} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 40})$$

Onde,

$$\mathbf{a}_l = \mathbf{d}_l = \mathbf{I} + 0,5 \cdot l^2 \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc} \quad (\text{A. 41})$$

$$\mathbf{b}_l = l \cdot \mathbf{Z}_{abc} \quad (\text{A. 42})$$

$$\mathbf{c}_l = l \cdot \mathbf{Y}_{abc} + 0,25 \cdot l^3 \cdot \mathbf{Y}_{abc} \cdot \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{Y}_{abc} \quad (\text{A. 43})$$

E;

\mathbf{V}_{abc_m} : Vetor de tensões no terminal m em volts

\mathbf{V}_{abc_n} : Vetor de tensões no terminal n em volts

\mathbf{I}_{abc_m} : Vetor de correntes no terminal m em Amperes

\mathbf{I}_{abc_n} : Vetor de correntes no terminal n em Amperes

\mathbf{I} : Matriz de identidade de ordem três

\mathbf{Z}_{abc} : Matriz de impedância da linha em ohms/km

l : Comprimento da linha em km

\mathbf{Y}_{abc} : Matrix de admitância shunt da linha em $\text{ohms}^{-1} / \text{km}$

Para faltas localizadas a x quilômetros desde o início da linha e considerando a Figura A. 2, a equação (A. 40) pode ser reescrita como (A. 44).

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{d}_x \cdot \mathbf{V}_k - \mathbf{b}_x \cdot \mathbf{I}_{k,F} \quad (\text{A. 44})$$

Onde \mathbf{d}_x e \mathbf{b}_x são definidos a partir de (A. 41) e (A. 42) substituindo l por x .

A partir da equação (A. 44) formula-se uma proposta generalizada para faltas fase-terra e fase-fase como se apresenta nos seguintes itens.

A.2.5.2. Falta fase-terra

Considera-se o modelo geral de uma falta como se mostra na Figura A. 2. Modificando os estados das chaves A1, A2 e A3, pode ser obtido qualquer tipo de falta fase-terra se a chave A4 tem o valor de 1. Deste modelo, a relação entre a tensão de falta V_F e a corrente de falta I_F esta dada por (A. 45), (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011).

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{Fa} + Z_{Fg} & Z_{Fg} & Z_{Fg} \\ Z_{Fg} & Z_{Fb} + Z_{Fg} & Z_{Fg} \\ Z_{Fg} & Z_{Fg} & Z_{Fc} + Z_{Fg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 45})$$

Em (A. 45), somente as fases em falta apresentam correntes que são diferentes de zero.

Substituindo (A. 45) em (A. 44) é possível escrever para cada fase w em falta que:

$$Z_{Fw} \cdot I_{Fw} + Z_{Fg} \cdot I_g = V_w + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_w - x \cdot N_w \quad (\text{A. 46})$$

Onde I_g corresponde à soma das correntes de falta das fases faltosas, como se mostra na Figura A. 2 e,

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 47})$$

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ka} \\ I_{kb} \\ I_{kc} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 48})$$

A equação (A. 46) é obtida para as n fases em falta sendo cada uma destas, uma equação complexa. Portanto, separando (A. 46) em sua parte real e complexa, e considerando que Z_{F_a}, Z_{F_b} e Z_{F_c} são puramente resistivas obtém-se:

$$R_{F_w} \cdot I_{F_{w_r}} + R_{F_g} \cdot I_{g_i} - X_{F_g} \cdot I_{g_i} = V_{k_{w_r}} + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_{w_r} - x \cdot N_{w_r} = T_{k_r} \quad (\text{A. 49})$$

$$R_{F_w} \cdot I_{F_{w_i}} + R_{F_g} \cdot I_{g_i} + X_{F_g} \cdot I_{g_r} = V_{k_{w_i}} + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_{w_i} - x \cdot N_{w_i} = T_{k_i} \quad (\text{A. 50})$$

Onde os subscritos r e i representam a parte real e imaginária das variáveis. Como resultado, obtém-se $2 \cdot n$ equações para $2 \cdot n$ incógnitas. Usando (A. 49) e (A. 50) é possível resolver as equações para a resistência de falta R_{F_w} como se mostra em (A. 51) obtendo um conjunto de n equações que são independentes de R_{F_w} e dependentes de x , R_{F_g} e X_{F_g} .

$$R_{F_w} = \frac{1}{I_{F_{w_r}}} \cdot [T_{k_r} - R_{F_g} \cdot I_{g_r} + X_{F_g} \cdot I_{g_i}] = \frac{1}{I_{F_{w_i}}} \cdot [T_{k_i} - R_{F_g} \cdot I_{g_i} - X_{F_g} \cdot I_{g_r}] \quad (\text{A. 51})$$

Rescrevendo (A. 51) é possível obter para cada fase w que,

$$R_{F_g} \cdot \left[-\frac{I_{g_r}}{I_{F_{w_r}}} + \frac{I_{g_i}}{I_{F_{w_i}}} \right] + X_{F_g} \cdot \left[\frac{I_{g_i}}{I_{F_{w_r}}} + \frac{I_{g_r}}{I_{F_{w_i}}} \right] + \left[\frac{T_{k_r}}{I_{F_{w_r}}} - \frac{T_{k_i}}{I_{F_{w_i}}} \right] = 0 \quad (\text{A. 52})$$

Multiplicando (A. 52) por $(-I_{F_{w_r}} \cdot I_{F_{w_i}})$ e fazendo algumas manipulações algébricas determina-se a expressão (2.53).

$$R_{F_g} \cdot \Im\{I_{F_w} \cdot I_g^*\} - X_{F_g} \cdot \Re\{I_{F_w} \cdot I_g^*\} + [T_{k_r} \cdot I_{F_{w_i}} - T_{k_i} \cdot I_{F_{w_r}}] = 0 \quad (\text{A. 53})$$

Onde $\Re\{\cdot\}$ e $\Im\{\cdot\}$ representam a parte real e imaginária dos números complexos e $*$ denota o conjugado complexo.

Para cada fase em falta w a equação (A. 53) pode-se reescrever, dependendo do número de fases em falta. Somando as n equações é possível escrever somente uma equação dada por (A. 54).

$$R_{F_g} \cdot \Im\{I_g \cdot I_g^*\} - X_{F_g} \cdot \Re\{I_g \cdot I_g^*\} + \sum_{w \in \Omega_w} [T_{k_r} \cdot I_{F_{w_i}} - T_{k_i} \cdot I_{F_{w_r}}] = 0 \quad (\text{A. 54})$$

Sendo que,

$$\Im\{I_g \cdot I_g^*\} = \Im\{|I_g|^2\} = 0 \quad (\text{A. 55})$$

E considerando uma falta puramente resistiva ($X_{F_g} = 0$) é obtido (A. 56).

$$\sum_{w \in \Omega_w} [T_{k_r} \cdot I_{F_{w_i}} - T_{k_i} \cdot I_{F_{w_r}}] = 0 \quad (\text{A. 56})$$

Onde Ω_w é o conjunto de fases em falta dado por uma combinação das fases do sistema (a , b e c). Em um sistema trifásico existem sete combinações de faltas a terra envolvendo uma, duas ou três fases como se mostra na Figura A. 2.

Substituindo T_{k_r} e T_{k_i} a partir de (A. 49) e (A. 50) em (A. 56) e realizando algumas manipulações algébricas, uma expressão generalizada para faltas a terra pode ser encontrada, (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011; SALIM, 2008)

$$x^2 \cdot \left[0,5 \cdot \sum_{w \in \Omega_w} \Im\{M_w \cdot I_{F_w}^*\} \right] - x \cdot \left[\sum_{w \in \Omega_w} \Im\{N_w \cdot I_{F_w}^*\} \right] + \left[\sum_{w \in \Omega_w} \Im\{V_{k_w} \cdot I_{F_w}^*\} \right] \quad (\text{A. 57})$$

A.2.5.3. Falta fase-fase

Considera-se o modelo geral de uma falta como se mostra na Figura A. 2. Modificando os estados das chaves A1, A2 e A3, pode ser obtido qualquer tipo de falta fase-fase se a chave A4 tem o valor de 0. Do modelo, é possível obter que, (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011; SALIM, 2008)

$$I_{F_b} = -I_{F_a} \quad (\text{A. 58})$$

$$V_{F_a} = V_{k_a} + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_a - x \cdot N_a = V_{k_b} + x^2 \cdot 0,5 \cdot M_b - x \cdot N_b \quad (\text{A. 59})$$

Fazendo o mesmo procedimento que é feito para as faltas a terra, separando em parte real e imaginária a equação (A. 59) e considerando que a natureza da falta é puramente

resistiva, pode-se determinar uma expressão generalizada para faltas fase-fase, onde u e v são as fases que envolvem a falta.

$$x^2 \cdot 0,5 \cdot \Im\{(M_u - M_v) \cdot I_{F_u}^*\} - x \cdot \Im\{(N_u - N_v) \cdot I_{F_u}^*\} + \Im\{(V_{k_u} - V_{k_v}) \cdot I_{F_u}^*\} = 0 \quad (\text{A. 60})$$

A.2.5.4. Determinação de uma solução fisicamente correta

As equações para a localização de faltas (A. 57) e (A. 60) são polinômios de segunda ordem da forma:

$$\alpha_2 \cdot x^2 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_0 = 0 \quad (\text{A. 61})$$

Portanto, são estimadas duas soluções da distância da falta x. Porém, somente uma solução destas corresponde a uma solução fisicamente correta. Em (SALIM, 2008) apresenta-se uma análise mais ampla sobre este tema, onde a conclusão obtida está sintetizada nas equações de (A. 62), (SALIM, R. H.; SALIM; A. S. BRETAS, 2011)

$$x = \begin{cases} \frac{-\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_2}, & \text{se } \alpha_1 > 0 \\ \frac{-\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_0}}{2 \cdot \alpha_0}, & \text{se } \alpha_1 < 0 \end{cases} \quad (\text{A. 62})$$

A.3. MÉTODOS DE LF PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATIVOS

Nesta seção apresentam-se um sumário dos métodos de localização de faltas para sistemas de distribuição ativos mais relevantes na literatura técnica.

A.3.1. Método do Penkov (2005)

Em (PENKOV et al., 2005) apresenta-se uns dos primeiros trabalhos analíticos para localização de faltas para sistemas de distribuição de energia elétrica com inserção de geração distribuída. A metodologia proposta está baseada em uma análise de componentes simétricas e utiliza dois modelos de geração distribuída para considerar seu efeito na localização da falta. O aporte principal do artigo, além de ser uns dos primeiros trabalhos nesta temática, é propor

um fator de correção da impedância observada pela subestação principal do sistema de distribuição, a partir dos parâmetros elétricos da GD. Porém, na proposta não se considera o desequilíbrio nas linhas e as cargas são concentradas no final do circuito.

A.3.1.1. Modelo da GD proposto para a localização de faltas.

Em (PENKOV et al., 2005) apresentam-se dois modelos para considerar o efeito da GD na localização de faltas. Estes são:

I. Modelo ideal da GD

Para o modelo ideal da GD se considera o modelo aproximado da máquina síncrona dado por uma fonte de tensão ideal atrás de uma impedância, conforme é mostrado na Figura A. 10.

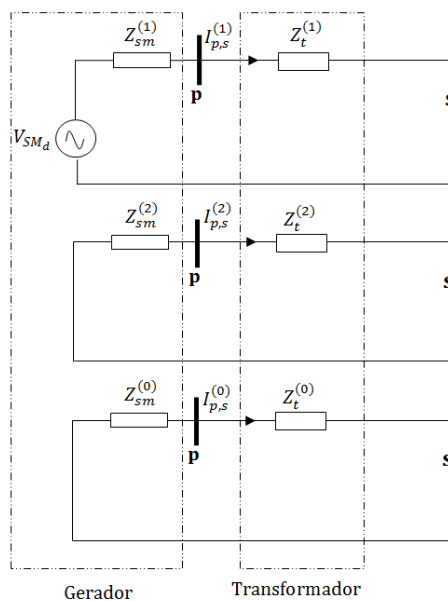


Figura A. 10 Representação das componentes simétricas de um gerador síncrono ideal, (PENKOV *et al.*, 2005)

Neste modelo, a geração distribuída é conectada ao sistema através de um transformador de potência, o qual se representa neste esquema, por uma impedância Z_t entre os nós p e s .

II. Modelo realista da GD

O modelo real de geração distribuída está determinado por uma máquina síncrona com reguladores de tensão e de velocidade, conforme é ilustrado na Figura A. 11. Este modelo foi simulado em ATP-EMTP.

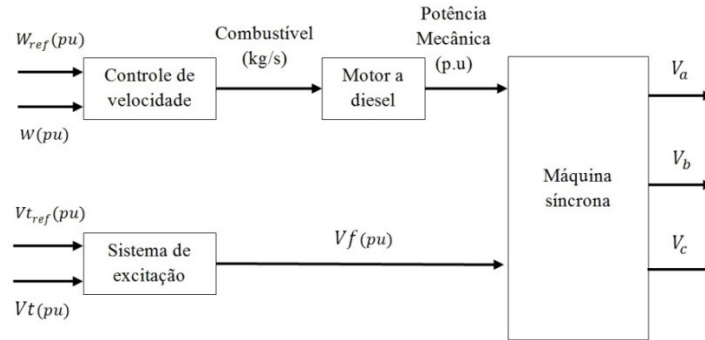


Figura A. 11 Estrutura real de geradores distribuídos (PENKOV *et al.*, 2005)

No modelo, o controle de tensão nos terminais da máquina é realizado a partir da excitação do campo. O controle de velocidade, por outra parte, é feito a través de um regulador que controla a abertura ou o fechamento das válvulas de combustível. Para a localização de faltas trifásicas, a expressão genérica da impedância da máquina síncrona é dada por (A. 63).

$$X_d(t) = \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right]^{-1} \quad (\text{A. 63})$$

Onde,

X'_d : Reatância da máquina síncrona no período transitório.

X''_d : Reatância da máquina síncrona no período subtransitório.

T'_d : Constante de tempo de curto-circuito da máquina síncrona no período transitório

T''_d : Constante de tempo de curto-circuito da máquina síncrona no período subtransitório

Para os estudos de localização de faltas, o autor considera a impedância da máquina no período transitório, ou seja, para um tempo de 100 ms após a ocorrência da falta. Nesse caso, a reatância do gerador é igual à reatância transitória.

$$X_d(t) = X'_d \quad (\text{A. 64})$$

A.3.1.2. Estimação da distância de falta

Em (PENKOV et al., 2005) mais que uma metodologia de localização de faltas, os autores desejam mostrar o impacto da geração distribuída na localização de faltas. Para isto se propõe um método de localização de faltas baseado no cálculo das componentes simétricas. Para a demonstração da metodologia será considerado um sistema de distribuição representado por sua rede de sequência positiva, conforme ilustrado na Figura A. 12.

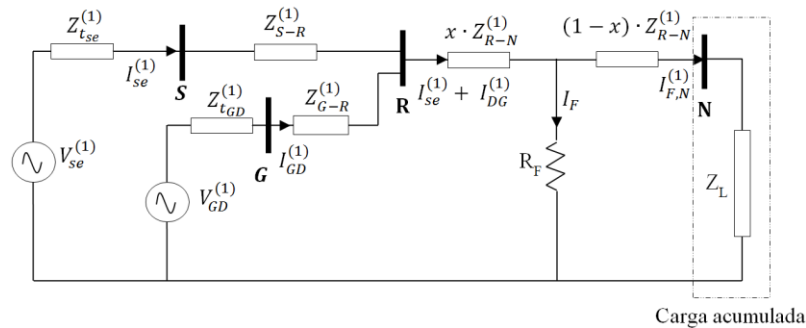


Figura A. 12 Sistema de distribuição com a geração distribuída representada por sua rede de sequência positiva, (PENKOV et al., 2005).

Sendo,

- $V_{se}^{(1)}$: Tensão de sequência positiva no terminal da subestação
- $V_{GD}^{(1)}$: Tensão de sequência positiva no terminal do gerador
- $I_{se}^{(1)}$: Corrente de sequência positiva no terminal da subestação
- $I_{DG}^{(1)}$: Corrente de sequência positiva no terminal do gerador
- $Z_{tse}^{(1)}$: Impedância de sequência positiva do transformador da subestação
- $Z_{tDG}^{(1)}$: Impedância de sequência positiva do transformador do gerador
- $Z_{S-R}^{(1)}$: Impedância de sequência positiva entre o nó S ao nó R
- $Z_{G-R}^{(1)}$: Impedância de sequência positiva entre o nó G ao nó R
- $Z_{R-N}^{(1)}$: Impedância de sequência positiva entre o nó R ao nó N
- I_F : Corrente de falta
- R_F : Resistência de falta
- Z_L : Impedância acumulada da carga
- x : Distância da subestação até o local em falta

O modelo da geração distribuída utilizado para esta análise é o modelo ideal. A equação da tensão no alimentador é dada por (A. 65).

$$V_{se}^{(1)} = I_{se}^{(1)} \cdot \left(Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)} \right) + \left(I_{se}^{(1)} + I_{GD}^{(1)} \right) \cdot Z_{R-N}^{(1)} \cdot x + R_F \cdot I_F \quad (\text{A. 65})$$

Considerando uma falta trifásica franca ($R_F = 0$) no alimentador, a tensão no alimentador pode ser reescrita por (A. 66).

$$V_{se}^{(1)} = I_{se}^{(1)} \cdot \left(Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)} \right) + \left(I_{se}^{(1)} + I_{GD}^{(1)} \right) \cdot Z_{R-N}^{(1)} \cdot x \quad (\text{A. 66})$$

Considerando que $V_{se}^{(1)} = V_{GD}^{(1)}$ a corrente do gerador $I_{GD}^{(1)}$ pode ser escrita por (A. 67)

$$I_{GD}^{(1)} = I_{se}^{(1)} \cdot \frac{Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)}}{Z_{tDG}^{(1)} + Z_{G-R}^{(1)}} \quad (\text{A. 67})$$

Substituindo a equação (A. 67) em (A. 66), obtém-se a impedância de sequência positiva da subestação até o local da falta.

$$Z_{fse}^{(1)} = \frac{V_{se}^{(1)}}{I_{se}^{(1)}} = Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)} + \left(1 + \frac{Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)}}{Z_{tDG}^{(1)} + Z_{G-R}^{(1)}} \right) \cdot Z_{R-N}^{(1)} \cdot x \quad (\text{A. 68})$$

De (A. 68) pode ser determinada uma expressão para a distância desde a subestação até o local da falta.

$$x = \frac{Z_{fse}^{(1)} - \left(Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)} \right)}{\left(1 + \frac{Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)}}{Z_{tDG}^{(1)} + Z_{G-R}^{(1)}} \right) \cdot Z_{R-N}^{(1)}} \quad (\text{A. 69})$$

Generalizando a equação (A. 69) para múltiplos geradores distribuídos conectados a montante do local em falta, é determinada a equação (A. 70).

$$x = \frac{Z_{fse}^{(1)} - \left(Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)} \right)}{\left(1 + \sum_{k=1}^n \frac{Z_{tse}^{(1)} + Z_{S-R}^{(1)}}{Z_{tDG}^{(1)} + Z_{G-R}^{(1)}} \right) \cdot Z_{R-N}^{(1)}} \quad (\text{A. 70})$$

Sendo n o número de geradores entre a subestação e o ponto da falta.

A partir da formulação apresentada o autor faz uma análise do impacto da geração distribuída na localização de faltas. Esta análise mostrou que o impacto da GD aumenta consideravelmente com o aumento do nível de potência das unidades geradoras e também com a quantidade de unidades geradoras a montante da falta.

Também, pode-se observar que a formulação sugerida pelos autores se mostra bastante eficiente quando é utilizado o modelo ideal do gerador síncrono apresentando erros inferiores a 0,6%. Porém, quando é utilizado o modelo realista do gerador síncrono, o desempenho da metodologia diminui apresentando erros inferiores a 8%. No último caso, o aumento no erro na estimação da distância da falta, é justificado pelo fato de que a impedância transitória do gerador varia no tempo, afetando a precisão do método. Uma abordagem para o método foi discutida considerando a presença de gravadores de falta nos terminais das GDs.

A.3.2. Método de Bretas et al. (2006)

Em (BRETAS; SALIM, 2006), apresenta-se uma metodologia para a localização de faltas baseada na análise de componentes simétricas. O principal objetivo dos autores é mostrar o impacto da geração distribuída na localização de faltas e os ajustes necessários que devem ser feitos aos métodos de LF baseados na impedância para sistemas passivos para considerar o efeito da GD. A metodologia utiliza o modelo aproximado da máquina síncrona em componentes simétricas e um processo iterativo para estimar a corrente de falta. Porém, a metodologia não considera o desequilíbrio nas linhas, e a presença de mais de um gerador no sistema.

A.3.2.1. Modelo da GD proposto para a localização de faltas.

Em (BRETAS; SALIM, 2006) utiliza-se o modelo do gerador síncrono no período de tempo subtransitório, (KUNDUR, 1994). O modelo é mostrado na Figura A. 10. A tensão interna do gerador no período de pré-falta é estimada através de um programa de fluxo de potência baseado na técnica Ladder, (KERSTING, 2002). Também, como o período de tempo estudado é o subtransitório, considera-se que a tensão interna do gerador se mantém constante durante a falta. Assim, é possível estimar a contribuição de corrente fornecida pelo gerador durante a falta, conforme a equação (A. 71).

$$I_g^f = \frac{E_g'' - V_k^f}{R + j \cdot X_S''} \quad (\text{A. 71})$$

Onde,

E_g'' : Tensão interna do gerador síncrono

V_k^f : Tensão na barra onde o gerador está conectado durante a falta

X_S'' : Reatância subtransitória

R : Resistência de armadura

I_g^f : corrente injetada pelo gerador durante a falta

A.3.2.2. Estimação da distância de falta

Para a estimação da distância da falta, o autor primeiro analisa o sistema de distribuição como se não tivesse GD e propõe uma estimação da distância da falta. Após, mostra-se que deve ser considerado o efeito da GD, dependendo se a análise de falta está sendo feita a montante ou a jusante do ponto de conexão da GD. Considere um sistema de distribuição com presença da geração distribuída representado na Figura A. 13.

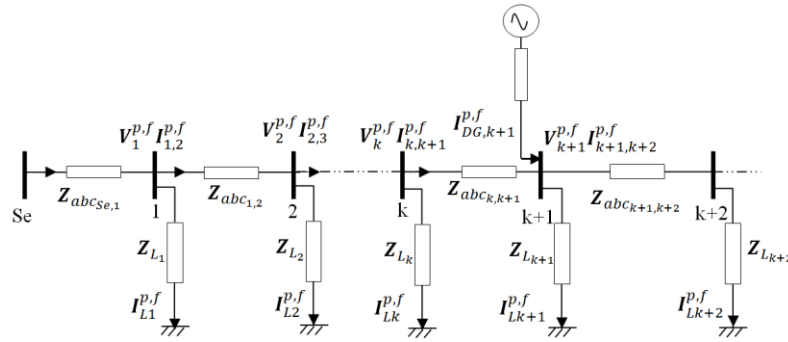
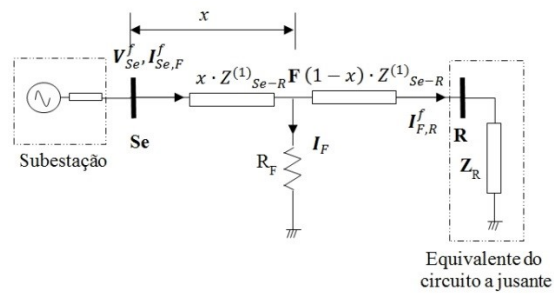
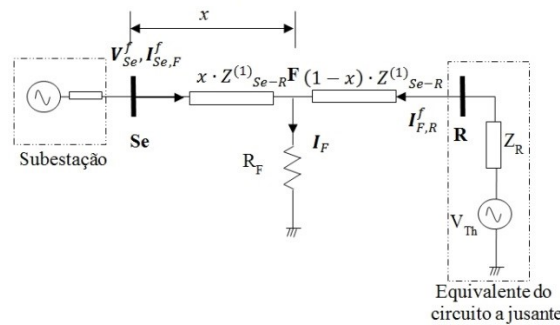


Figura A. 13 Sistema de distribuição com a geração distribuída (BRETAS; SALIM, 2006)

A partir da Figura A. 13, pode-se definir dois sistemas faltosos equivalentes como se mostra na Figura A. 14.



(a) Sistema de distribuição com falta a jusante da GD



(b) Sistema de distribuição com falta a montante da GD

Figura A. 14 Circuitos equivalentes de um sistema faltoso com a presença da geração distribuída (BRETAS; SALIM, 2006)

Onde,

$V_{Se_a}^f$: Tensão em falta no nó Se

$I_{Se,Fa}^f$: Corrente na fase *a* durante a falta entre os nós *Se-F*

$Z_{Se-R}^{(1)}$: Matriz de impedância de sequência positiva da linha *Se-R*

Z_R : Matriz de impedância equivalentes do circuito a jusante da falta.

I_F : Corrente de Falta.

R_F : Resistência de falta

x : distância da falta

$I_{F,R}^f$: Corrente na fase *a* durante a falta entre os nós *F-R*

V_{Th} : Tensão equivalente de Thévenin

Para faltas a jusante do gerador, o sistema faltoso pode ser representado por uma impedância equivalente Z_R , na extremidade remota da falta, conforme se mostra na Figura A. 14(a). Para faltas a montante do gerador, apresenta-se uma contribuição de corrente da extremidade remota para a falta. Esta contribuição é ocasionada pela presença do gerador. Nesse caso, o sistema faltoso é representado por uma impedância equivalente Z_R e uma fonte V_{Th} localizadas na extremidade remota da falta, conforme ilustrado na Figura A. 14 (b).

Dos circuitos equivalentes da Figura A. 14, pode ser obtida a tensão $V_{Se_a}^f$ por (A. 72).

$$V_{sa}^f = x \cdot (Z^{(1)}_{se-R} \cdot I_{sa}^f) + R_F \cdot I_F \quad (A. 72)$$

Multiplicando ambos os lados da expressão (A. 72) por I_F^* e fazendo manipulações algébricas é obtida (A. 73).

$$x = \frac{\Im\{V_{sa}^f \cdot I_F^*\}}{\Im\{Z^{(1)}_{se-R} \cdot I_{sa}^f \cdot I_F^*\}} \quad (A. 73)$$

Com I_F definida para uma falta fase-terra por (A. 74).

$$I_F = I_{Se, Fa}^f - I_{F, Ra}^f \quad (A. 74)$$

Como a corrente de $I_{F, Ra}^f$ é função da distância da falta x , um processo iterativo é realizado para sua estimação como se apresenta a continuação:

- I. Assume-se $I_{F, Ra}^f = I_{Se, Fa}^p$ sendo $I_{Se, Fa}^p$ a corrente de carga antes da falta.
- II. Estima-se a corrente de falta utilizando a equação (A. 74).
- III. Estima-se o local da falta, utilizando a equação (A. 73).
- IV. Determina-se a tensão no ponto da falta utilizando a equação (A. 75). As tensões e as correntes na seção em análise são estimadas a partir das tensões e correntes na subestação e os parâmetros elétricos.

$$V_F = V_{sa}^f - x \cdot Z^{(1)}_{se-R} \cdot I_{sa}^f \quad (\text{A. 75})$$

V. Determina-se a corrente $I_{F,Ra}^f$ utilizando a equação (A. 76) a partir da tensão no ponto da falta e o equivalente de Thévenin do circuito a jusante da falta. Caso o local da falta estimado no passo III esteja à jusante da GD, conforme ilustrado na Figura A. 14 (a), o circuito equivalente é simplesmente o paralelo de todas as impedâncias do sistema depois do ponto da falta. No caso contrário, o equivalente de Thévenin estará composto por uma impedância e uma fonte conforme à Figura A. 14(b) e a corrente $I_{F,Ra}^f$ é definida por (A. 77).

$$I_{F,Ra}^f = \frac{V_F}{Z_{Th}} \quad (\text{A. 76})$$

Ou,

$$I_{F,Ra}^f = \frac{V_F - V_{Th}}{Z_{Th}} \quad (\text{A. 77})$$

Com,

$$Z_{Th} = (1 - x) \cdot Z^{(1)}_{se-R} + Z_R \quad (\text{A. 78})$$

VI. Retorna-se ao passo II.

Após este algoritmo ter convergido, o local de falta é estimado. Caso a falta seja estimada na primeira seção do alimentador, o método é finalizado e obtém-se uma estimativa final para o local da falta. Se a falta for estimada após a primeira seção do sistema, os valores de tensão e de corrente medidos no terminal local são atualizados para a barra seguinte do sistema e os passos I ao V são executados novamente. Esta atualização é executada sucessivamente até que a falta seja estimada dentro da seção analisada.

Devido a que o principal objetivo deste estudo era mostrar o impacto da geração distribuída na localização de faltas, não foram consideradas algumas condições como são o desequilíbrio nas linhas, a presença de mais de um gerador síncrono, o problema das múltiplas estimativas de distância da falta, diferentes tecnologias de geração, entre outras. Porém, esta pesquisa foi a base para os trabalhos apresentados em (NUNES; BRETAS, 2010a) que propõem metodologias completas que consideram as características relevantes dos sistemas de distribuição e que influenciam na localização de faltas como são, o desequilíbrio nas

linhas, a presença de laterais, o impacto da resistência de falta, entre outras. Porém, ainda têm-se alguns atributos que não foram abordados nestes estudos como o problema das múltiplas estimativas, a presença de mais de um gerador síncrono, diferentes tecnologias de geração distribuída.

A.3.3. Método do Marvik et al. (2007), (2009)

O trabalho apresentado em (MARVIK; PETTERTEIG; HOIDALEN, 2007; MARVIK, J. HIDALEN; PETTERTEIG, 2009) apresenta um método para localização de faltas fase-fase para sistemas de distribuição com geração distribuída. O método utiliza os fasores de tensão e correntes à frequência fundamental para estimar uma distância desde a subestação ao local em falta. O aporte principal desta pesquisa está relacionado com análise do impacto das cargas e a localização dos geradores conectados nos sistemas de distribuição em relação à localização de faltas. Para isto, são apresentados duas estratégias de compensação: o método de compensação A, que considera as medições em pré-falta na GD para estimar a corrente de falta e o método de compensação B, que utiliza a medição do módulo de corrente em falta na GD para estimar a corrente de falta. No entanto este estudo não foi definido para todos os tipos de faltas e características como o desequilíbrio nas linhas, o efeito da resistência de falta, a presença de mais de um gerador distribuído não são consideradas.

A.3.3.1. Modelo da GD proposto para a localização de faltas.

Em (MARVIK; PETTERTEIG; HOIDALEN, 2007; MARVIK, J. HIDALEN; PETTERTEIG, 2009) são apresentadas duas estratégias para a consideração do impacto da GD na localização de faltas: o método de compensação A e método de compensação B.

I. Método A: Compensação utilizando as medições em pré-falta da GD.

A contribuição à corrente de falta desde a GD pode ser estimada a partir das medições em pré-falta na unidade de geração distribuída. Somente os módulos de tensão e corrente e o ângulo de fase são assumidos como disponíveis ($|U_{DG,0}|$, $|I_{DG,0}|$, $\varphi_{DG,0}$). A vantagem de não utilizar o fasor é que as medições não precisam estar sincronizadas.

Utilizando o modelo do gerador síncrono nos eixos de quadratura d e q obtém-se:

$$E'_{d0} = U_{DG,d0} + (X'_{DG,q} \cdot I_{DG,q0}) \quad (\text{A. 79})$$

$$E'_{q0} = U_{DG,q0} - (X'_{DG,d} \cdot I_{DG,d0}) \quad (\text{A. 80})$$

Onde, E' é a força eletromotriz da máquina síncrona, X'_{DG} a soma das reatâncias transitória da máquina e do transformador que conecta à GD e I_{DG} a corrente injetada pelo gerador. Os subscritos d0 e q0 correspondem aos quadrantes do eixo direto e de quadratura.

Para faltas trifásicas, a corrente do gerador pode ser determinada como sua componente de sequência positiva. A equação (A. 81) e (A. 82) define as correntes do eixo direto e de quadratura.

$$I_{DG,q0} = \frac{E'_{d0} - U_{DG,d0}}{X'_{DG,q}} \quad (\text{A. 81})$$

$$I_{DG,d0} = -\frac{E'_{q0} - U_{DG,q0}}{X'_{DG,d}} \quad (\text{A. 82})$$

Para faltas fase-fase, as redes de sequência positiva e negativa devem ser conectadas em paralelo para a localização de faltas. As correntes do eixo direto e de quadratura são estimadas por (A. 83) e (A. 84).

$$I_{DG,q}^+ = \frac{E'_{d0} - U_{DG,d0}^+}{X'_{DG,q}} \quad (\text{A. 83})$$

$$I_{DG,d}^+ = -\frac{E'_{q0} - U_{DG,d0}^+}{X'_{DG,d}} \quad (\text{A. 84})$$

A corrente de sequência negativa da GD é dada por (A. 85).

$$I_{DG}^- = -\frac{U_{DG}}{j \cdot X_{DG}} = \frac{U_{DG}^-}{j \cdot \sqrt{X_{DG,d}'' \cdot X_{DG,q}''}} \quad (\text{A. 85})$$

E,

$$I_{DG}^B = h^2 \cdot I_{DG}^+ + h \cdot I_{DG}^- + I_{DG}^0 \quad (\text{A. 86})$$

$$I_{DG}^C = h \cdot I_{DG}^+ + h^2 \cdot I_{DG}^- + I_{DG}^0 \quad (\text{A. 87})$$

Com $h = e^{j \cdot 2\pi/3}$

II. Método B: Compensação utilizando as medições do módulo da corrente em falta da GD.

Este método de compensação assume conhecidos os fasores de tensão e corrente durante a falta U_{DG}, I_{DG} a partir das medidas registradas no ponto de conexão da GD.

A.3.3.2. Estimação da distância da falta

Considera-se o modelo de falta fase-fase como se mostra na Figura A. 15.

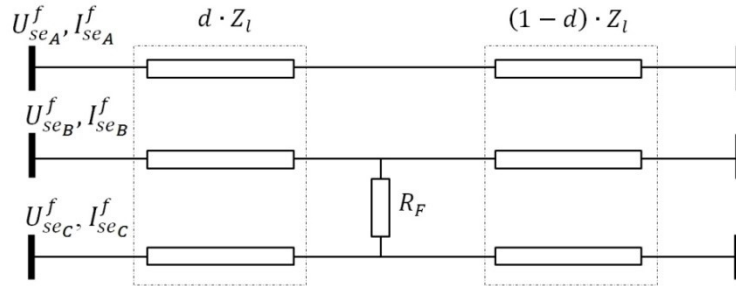


Figura A. 15 Modelo Falta fase-fase B-C, (MARVIK; PETTERTEIG; HOIDALEN, 2007)

Da Figura A. 15 pode ser determinada uma equação que relaciona as tensões e as correntes das fases faltosas.

$$U_{seB}^f - U_{seC}^f = Z_v \cdot (I_{seB}^f - I_{seC}^f) \quad (\text{A. 88})$$

Onde $U_{seB}^f, U_{seC}^f, I_{seB}^f, I_{seC}^f$ são as tensões e correntes observadas pelo relé no nó Se durante a falta, e Z_v é a soma da impedância da linha até o ponto em falta e a resistência de falta.

Uma expressão da distância da falta pode ser determinada isolando de (A. 88) a impedância da linha Z_l e obtendo sua parte imaginária como se mostra em (A. 89).

$$d = \Im \left\{ \frac{U_{seB}^f - U_{seC}^f}{I_{seB}^f - I_{seC}^f} \right\} \cdot \frac{1}{X_l} \quad (\text{A. 89})$$

Com a formulação apresentada anteriormente, o autor faz um análise da influência da variação da carga e a localização da GD na localização da falta. Suas principais conclusões são que um aumento na carga gera um erro negativo na estimação da distância da falta e que a localização da GD perto da subestação principal gera um erro positivo na estimação da distância da falta.

A.3.4. Método do Nunes (2010)

Em (NUNES; BRETAS, 2010a, b) apresenta-se uma extensão do trabalho publicado em (BRETAS; SALIM, 2006). Nesta pesquisa é realizado um método de localização de faltas para sistemas de distribuição com inserção de geração distribuída baseado em componentes de fase. O trabalho completo considera características dos sistemas de distribuição reais como o desequilíbrio nas linhas, a presença de laterais e geração distribuída nos sistemas de distribuição. Uma estratégia para considerar o impacto da geração distribuída na localização de faltas é realizada a partir do modelo aproximado da máquina síncrona.

A.3.4.1. Modelo da GD proposto para a localização de faltas.

O modelo utilizado para considerar o impacto da GD na localização de faltas, é o modelo aproximado do gerador síncrono trifásico em componentes de fase. O modelo assume

que os fluxos concatenados no rotor são constantes no período subtransitório, eliminando assim a equação diferencial associada às características elétricas da máquina, (KUNDUR, 1994). A Figura A. 16 apresenta o modelo da máquina síncrona utilizado no estudo.

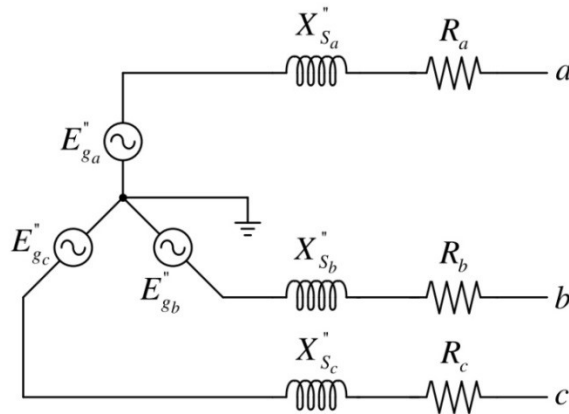


Figura A. 16 Modelo elétrico da geração distribuída para sistemas trifásicos (NUNES; BRETAS, 2010a).

A matriz impedância trifásica e o vetor das tensões internas do gerador síncrono são obtidas por (A. 90) e (A. 91).

$$\mathbf{Z}_{DG} = \begin{bmatrix} R_a + j \cdot X''_{S_a} & 0 & 0 \\ 0 & R_b + j \cdot X''_{S_b} & 0 \\ 0 & 0 & R_c + j \cdot X''_{S_c} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 90})$$

$$\mathbf{E}''_{DG} = [E''_{DG_a} \quad E''_{DG_b} \quad E''_{DG_c}] \quad (\text{A. 91})$$

Onde,

Z_{DG} : Impedância do gerador trifásico

R_w : Resistência da armadura na fase w com $w=\{a,b,c\}$

X''_{S_w} : Reatância subtransitória da máquina síncrona na fase w com $w=\{a,b,c\}$

E''_{DG_w} : Tensão interna da máquina síncrona no período subtransitório na fase w com $w=\{a,b,c\}$

Também, como os fluxos concatenados no rotor não variam instantaneamente, assume-se que o período em falta analisado para a localização de faltas é o suficientemente pequeno para garantir que a tensão interna do gerador se mantém constante, possibilitando a determinação da contribuição da corrente do gerador ao local da falta.

A.3.4.2. Estimação da distância da falta

Este trabalho propõe um equacionamento de localização da falta fundamentado na impedância aparente, estendendo o trabalho apresentado em (BRETAS; SALIM, 2006) para sistemas desequilibrados. Como o objetivo principal desta seção é mostrar como é considerado o impacto da geração distribuída na localização de faltas, não se mostra uma análise detalhada da formulação da estimação da distância da falta para os distintos tipos de falta. Considerando o modelo de falta generalizado da Figura A. 2 defina-se a estimação da distância da falta x e da resistência de falta R_F como:

I. Faltas fase-terra

A distância x para uma falta fase-terra esta dada por (A. 92).

$$x = \frac{V_{ak_r}^f \cdot I_{Fa_i} - V_{ak_i}^f \cdot I_{Fa_r}}{M \cdot I_{Fa_i} - N \cdot I_{Fa_r}} \quad (\text{A. 92})$$

Onde $V_{ak_r}^f$ e $V_{ak_i}^f$ é a parte real e imaginária da tensão no nó k da seção analisada e M , N e I_{Fa} são estimadas por (A. 93), (A. 94) e (A. 95). Mesmo assim, I_{Fa_r} e I_{Fa_i} são obtidas dividendo (A. 95) em sua parte real e imaginária.

$$M = \sum_{w=\{a,b,c\}} (Z_{aw_r} \cdot I_{w_r}^f - Z_{aw_i} \cdot I_{w_i}^f) \quad (\text{A. 93})$$

$$N = \sum_{w=\{a,b,c\}} (Z_{aw_r} \cdot I_{w_i}^f + Z_{aw_i} \cdot I_{w_r}^f) \quad (\text{A. 94})$$

$$I_{Fw} = I_{wk}^f - I_{wk+1}^f \quad \forall w = \{a, b, c\} \quad (\text{A. 95})$$

II. Faltas trifásicas

O sistema de equações definido por (A. 96) determina o valor da distância e da resistência de falta para uma falta trifásica.

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & I_{Fa_r} & 0 & 0 \\ T_2 & I_{Fa_i} & 0 & 0 \\ T_3 & 0 & I_{Fb_r} & 0 \\ T_4 & 0 & 0 & I_{Fc_r} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ak_r}^f \\ V_{ak_i}^f \\ V_{bk_r}^f \\ V_{ck_i}^f \end{bmatrix} \quad (\text{A. 96})$$

Onde,

$$T_1 = \sum_{w=\{a,b,c\}} (Z_{aw_r} \cdot I_{w_r}^f - Z_{aw_i} \cdot I_{w_i}^f) \quad (\text{A. 97})$$

$$T_2 = \sum_{w=\{a,b,c\}} (Z_{aw_r} \cdot I_{w_i}^f + Z_{aw_i} \cdot I_{w_r}^f) \quad (\text{A. 98})$$

$$T_3 = \sum_{w=\{a,b,c\}} (Z_{bw_r} \cdot I_{w_r}^f - Z_{bw_i} \cdot I_{w_i}^f) \quad (\text{A. 99})$$

$$T_4 = \sum_{w=\{a,b,c\}} (Z_{bw_r} \cdot I_{w_i}^f + Z_{bw_i} \cdot I_{w_r}^f) \quad (\text{A. 100})$$

A.3.4.3. Algoritmo para a localização de faltas

A análise apresentado na seção A.3.4.2 permitem estimar a distância ao local em falta. Porém, é necessário realizar um algoritmo que permita aplicar este análise para cada seção do sistema, atualizando todos os parâmetros necessários para estimar esta distância. Nesta seção apresenta-se um algoritmo de localização de faltas baseado na estimação iterativa da corrente de falta I_{Fa} . O algoritmo utiliza os mesmos fundamentos apresentados em (BRETAS; SALIM, 2006), onde é realizada uma análise para faltas a jusante do ponto de conexão da GD a partir de um sistema equivalente como o mostrado na Figura A. 14(a) e uma análise para faltas a montante da GD utilizando um sistema equivalente de Thévenin como se mostra na Figura A. 14(b). O algoritmo proposto inicia considerando a possibilidade da ocorrência da falta no início do alimentador:

I. Assume-se $I_{k+1}^f = I_k^p$ sendo I_k^p a corrente de carga antes da falta.

II. Estima-se a corrente de falta utilizando a equação (A. 95).

III. Estima-se o local da falta,

Fase-terra (A. 92)

Trifásica (A. 96)

IV. Testar a convergência da distância da falta estimada por (A. 101).

$$[x(n) - x(n - 1)] < 0.0001 * L_k \quad (\text{A. 101})$$

Onde n representa o número de iterações do algoritmo e L_k é o comprimento da seção de linha analisada.

V. Determina-se a tensão no ponto da falta utilizando a equação (A. 102). As tensões e as correntes na seção em análise são estimadas a partir das tensões e correntes na subestação e os parâmetros elétricos.

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ak}^f \\ V_{bk}^f \\ V_{ck}^f \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ak}^f \\ I_{bk}^f \\ I_{ck}^f \end{bmatrix} \quad (\text{A. 102})$$

VI. Determina-se a corrente I_{k+1}^f a partir da tensão no ponto da falta e o equivalente de Thévenin do circuito a jusante da falta. Caso o local da falta estimado no passo III esteja a jusante da GD, conforme ilustrado na Figura A. 14(a), o circuito equivalente é simplesmente o paralelo de todas as impedâncias do sistema depois do ponto da falta. Neste caso I_{k+1}^f se estima por (A. 103). No caso contrário, o equivalente de Thévenin é composto por uma impedância e uma fonte conforme a Figura A. 14(b) e a corrente I_{k+1}^f é definida por (A. 104).

$$\begin{bmatrix} I_{k+1a}^f \\ I_{k+1b}^f \\ I_{k+1c}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{thaa} & Y_{thab} & Y_{thac} \\ Y_{thba} & Y_{thbb} & Y_{thbc} \\ Y_{thca} & Y_{thcb} & Y_{thcc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 103})$$

Ou,

$$\begin{bmatrix} I_{k+1a}^f \\ I_{k+1b}^f \\ I_{k+1c}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{thaa} & Y_{thab} & Y_{thac} \\ Y_{thba} & Y_{thbb} & Y_{thbc} \\ Y_{thca} & Y_{thcb} & Y_{thcc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fa} - V_{tha} \\ V_{Fb} - V_{thb} \\ V_{Fc} - V_{thc} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 104})$$

Com,

$$Y_{th} = [(\mathbf{1} - x) \cdot \mathbf{Z}_{Se-R} + \mathbf{Z}_R]^{-1} \quad (\text{A. 105})$$

VII. Retorna-se ao passo II.

Para poder aplicar o algoritmo anteriormente definido é necessário realizar a atualização das tensões e correntes para cada seção de linha analisada. Tomando como referência o circuito apresentado na Figura A. 13, para todas as seções de linha que não

apresentam GD conectadas entre seus nós, a atualização das tensões e correntes é realizada por (A. 106) e (A. 107).

$$V_k^{p,f} = V_{k-1}^{p,f} - Z_{abc_{k-1,k}} \cdot I_{k-1,k}^{p,f} \quad (\text{A. 106})$$

$$I_{k,k+1}^{p,f} = I_{k-1,k}^{p,f} - I_{Lk}^{p,f} \quad (\text{A. 107})$$

Para Seções de linha que apresentam GD conectadas, a atualização das correntes é realizada por (A. 108).

$$I_{k+1,k+2}^{p,f} = I_{k,k+1}^{p,f} - I_{Lk+1}^{p,f} + I_{DG,k+1}^{p,f} \quad (\text{A. 108})$$

A.3.5. Método do Brahma (2011)

Em (BRAHMA, 2011) apresenta-se um método de localização de faltas para sistemas de distribuição com inserção de geração distribuída. O método utiliza uma estratégia para considerar o impacto da GD na localização de faltas baseada nas medidas sincronizadas de tensão e corrente registradas na GD e na subestação. O autor afirma que esta estratégia pode ser utilizada para qualquer tipo de geração distribuída. Porém, considera para sua definição o modelo da máquina síncrona em componentes simétricas, assumindo que a tensão interna do gerador não muda. A metodologia também considera mudanças na topologia do sistema de distribuição, já que utiliza a matriz de admitância nodal no processo de localização de faltas. Além disso, o autor propõe uma estratégia para mitigar o problema das múltiplas estimativas. No entanto, não se apresenta uma validação da metodologia para esta temática.

A.3.5.1. Modelo da GD proposto para a localização de faltas.

A estratégia proposta em (BRAHMA, 2011) para considerar o impacto da GD na localização de faltas utiliza um equivalente de Thévenin para os diferentes tipos de fontes convencionais de geração de energia em componentes de sequência como se mostra na Figura A. 17.

Onde, E denota a tensão interna da GD. $V_{DG_i}^{p,f(0,1,2)}$ denota a tensão em terminais da GD.

Os sobescritos p e f indicam se a medição foi realizada no período de pré-falta (p) ou em falta (f). Os sobescritos (0, 1 e 2) indicam a componente de sequência, com (0) para sequência zero, (1) para sequência positiva e (2) para sequência negativa. O $I_{DG}^{(0,1,2)}$ denota a corrente injetada pela unidade de geração.

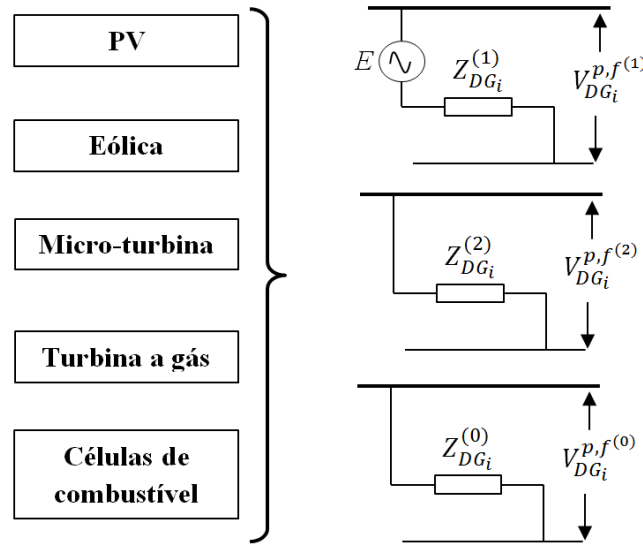


Figura A. 17 Equivalente de Thévenin para uma unidade de GD (BRAHMA, 2011).

Analisando o modelo de sequência positiva da GD no período de pré-falta e falta podem ser determinadas (A. 109) e (A. 110)

$$E = V_{DG_i}^{p(1)} + Z_{DG_i}^{(1)} \cdot I_{DG}^{p(1)} \quad (\text{A. 109})$$

$$E = V_{DG_i}^{f(1)} + Z_{DG_i}^{(1)} \cdot I_{DG}^{f(1)} \quad (\text{A. 110})$$

O autor assume que a tensão interna na GD não varia entre o período que ocorre a falta, por tanto:

$$V_{DG_i}^{p(1)} + Z_{DG_i}^{(1)} \cdot I_{DG}^{p(1)} = V_{DG_i}^{f(1)} + Z_{DG_i}^{(1)} \cdot I_{DG}^{f(1)} \quad (\text{A. 111})$$

De (A. 111) é determinada a impedância de sequência positiva da GD por (A. 112)

$$Z_{DG_i}^{(1)} = \frac{V_{DG_i}^{p(1)} - V_{DG_i}^{f(1)}}{I_{DG}^{f(1)} - I_{DG}^{p(1)}} = \frac{\Delta V_{DG_i}^{(1)}}{\Delta I_{DG_i}^{(1)}} \quad (\text{A. 112})$$

As impedâncias de sequência negativa e zero podem ser determinadas diretamente por:

$$Z_{DG_i}^{(2)} = -\frac{V_{DG_i}^{f(2)}}{I_{DG}^{f(2)}} \quad (\text{A. 113})$$

$$Z_{DG_i}^{(0)} = -\frac{V_{DG_i}^{f(0)}}{I_{DG}^{f(0)}} \quad (\text{A. 114})$$

Os valores de tensão e corrente durante o período de pré-falta e falta são obtidos a partir de medições destes atributos nos terminais das unidades de GD.

A impedância de fase das unidades de GD pode ser determinada pelos valores de sequência utilizando uma matriz de transformação como se mostra em (A. 114).

$$[Z_{DG_i}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{DG_i}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{DG_i}^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{DG_i}^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 115})$$

O autor afirma que este modelo pode representar qualquer tipo de unidade de geração conectado ao sistema (síncrona, assíncrona, PV, etc.). Porém, o modelo considera que a tensão interna da máquina não varia durante o período que ocorre a falta, o qual só é válido para as máquinas síncronas.

A.3.5.2. Estimação da distância da falta

O método para a localização de faltas está baseado na mudança das tensões nas barras do sistema devido à ocorrência de uma falta. O algoritmo de localização está dividido em duas etapas:

I. Etapa I: identificação da seção em falta

Considera-se um sistema de distribuição com n barras e m unidades de GD incluindo a subestação principal. As fontes são denotadas por S_1, S_2, \dots, S_m . As barras do sistema são denotadas por $B(1), B(2), \dots, B(n)$ e as barras com GD por $Bs(1), Bs(2), \dots, Bs(n)$.

Em falta, a variação na tensão da barra I devido a uma falta na barra J está dada por (A. 116) para um modelo trifásico do sistema em estudo.

$$\Delta V_{I-J}^{(abc)} = Z_{bus}^{(abc)}(I, J) \cdot I_F^{(abc)} \quad (\text{A. 116})$$

Onde, $I_F^{(abc)}$ é estimada como a soma das contribuições à corrente de falta desde cada fonte.

Com a variação da tensão de cada barra devido a uma falta estimada por (A. 116), pode ser determinada a variação de tensão para todas as barras em relação às fontes assumindo a localização da falta:

$$\Delta V_{B(J)-B(1)}^{(abc)} = Z_{bus}^{(abc)}(1, J) \cdot I_F^{(abc)} \quad \forall J = 1, 2, \dots, m \quad (\text{A. 117})$$

E,

$$Erro(1) = \sum_{J=1}^m norm \left(\Delta V_{B(J)-B(1)}^{(abc)} - \Delta V_{B(J)-obs}^{(abc)} \right) \quad (\text{A. 118})$$

Para um vetor X de tamanho $k \times 1$ a norma está definida por (A. 119).

$$norm(X) = [|x(1)|^2 + |x(2)|^2 + \dots + |x(k)|^2]^{1/2} \quad (\text{A. 119})$$

Com (A. 118) é estimado o erro para cada barra.

O erro está relacionado com cada seção do sistema conforme:

$$Z(I, J) = \frac{V_{(I)}^f}{I_{(I)}^f} \quad (\text{A. 120})$$

Onde o erro é mínimo na seção onde realmente está localizada a falta. Por exemplo: para uma falta na seção 6-7, os menores erros se apresentaram em Erro(6) e Erro(7).

II. Etapa II: Localização do local em falta

Na etapa II é utilizada a mesma análise do que na etapa I para determinar o local exato onde ocorreu a falta. Este processo assume a injeção de correntes em diferentes pontos da seção de linha identificada como em falta. O ponto que apresenta a menor variação de tensão em relação à variação de tensão observada pelas fontes é o local em falta. Esta análise é mostrada na Figura A. 18.

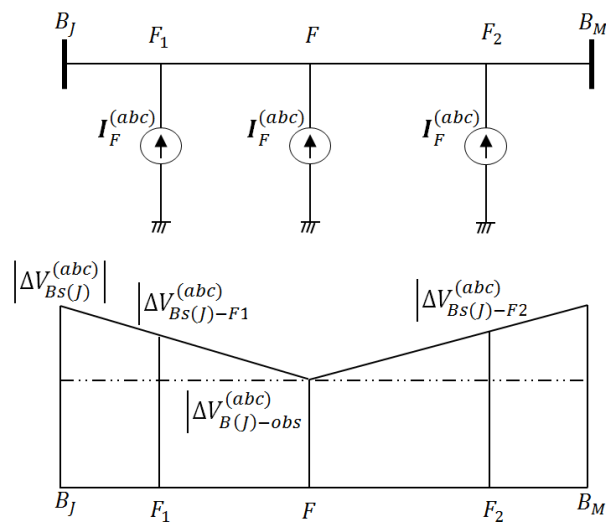


Figura A. 18 Processo realizado para a localização do local em falta (BRAHMA, 2011)

Para realizar este processo dentro do algoritmo localização de faltas, é criada uma barra fictícia dentro da seção em falta a uma distância ΔL , onde é injetada a corrente de falta e estimada a variação de tensão nas barras com unidades de geração para determinar o erro na posição da barra fictícia. Este processo se realiza acrescentando o valor de ΔL até que o erro seja quase zero.

A.3.6. Método do Orozco (2012)

Em (OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012) apresenta-se uma metodologia para a localização de faltas em sistemas de distribuição com

geração distribuída. Esta metodologia utiliza as medidas de tensão e corrente registradas na subestação e nos pontos da GD para considerar seu impacto na localização de faltas, evitando utilizar os modelos elétricos dos diferentes tipos de geração distribuída. O anterior é apresentado pelo autor como uma vantagem, já que na maioria dos casos não se tem um modelo nem os parâmetros necessários para representar de forma adequada a GD. Também, com a utilização das medidas são consideradas as variações no sistema e o autor desenvolve um fator que permite considerar os diferentes modelos de carga. A metodologia é desenvolvida somente para faltas fase-terra e é validada para diferentes cenários de carga. Porém, o problema das múltiplas estimativas e a consideração de mais de uma unidade de GD não são abordadas nesta pesquisa.

A.3.6.1. Modelo da GD proposto para a localização de faltas.

Em (OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012) o impacto da geração distribuída na localização de faltas é considerada a partir das medidas de tensão e corrente registradas na GD. Estas medidas são utilizadas na estimação da corrente de falta. Sua estimação depende da posição da geração distribuída em relação à seção em análise. Consideram-se as seguintes condições de falta:

I. Faltas a montante da geração distribuída

Considera-se uma falta a montante da GD como se mostra na Figura A. 19. A corrente de falta para esta condição está definida por (A. 121).

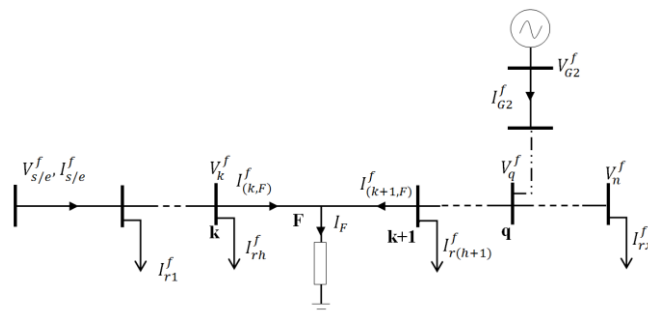


Figura A. 19 Falta a montante da geração distribuída (OROZCO-HENAO, C.; MORA-FLÓREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012)

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_{(k,F)}^f + \mathbf{I}_{(k+1,F)}^f \quad (\text{A. 121})$$

Com os fasores de tensão e corrente em falta obtidos a partir das medições registradas na GD, estima-se a corrente $I_{(k+1,F)}^f$ fazendo uma varredura desde a GD até a seção em análise utilizando as expressões (A. 122) e (A. 123).

$$\left[\mathbf{V}_{(k+1)}^{p,f} \right] = \left[\mathbf{V}_{(k)}^{p,f} \right] - \left[\mathbf{Z}_k \right] \left[\mathbf{I}_{(k,k+1)}^{p,f} \right] \quad (\text{A. 122})$$

$$\left[\mathbf{I}_{(k+1,k+2)}^{p,f} \right] = \left[\mathbf{I}_{(k,k+1)}^{p,f} \right] - \mathbf{Y}_{rh} \cdot \left[\mathbf{V}_{(k+1)}^{p,f} \right] \quad (\text{A. 123})$$

Onde, $V_{(k)}^{p,f}$ é a tensão na barra k e os sobrescritos p e f indicam que são atributos nos períodos de pré-falta e falta respectivamente. O Z_k representa a impedância de linha em parâmetros de fase e Y_{rh} representa a matriz de admitância para qualquer lateral do sistema. O $I_{(k,k+1)}^{p,f}$ é a corrente que atravessa a seção entre a barra k e $k+1$. Para o início do processo de varredura, a tensão $V_{(k)}^{p,f} = V_{G2}^{p,f}$ e a corrente $I_{(k,k+1)}^{p,f} = I_{G2}^{p,f}$ permitindo estimar a corrente e a tensão na seguinte barra. Por ultimo, é assumido que $I_{(k+1,F)}^f = I_{(k+1,k+2)}^{p,f}$.

II. Falta a jusante da geração distribuída

Considera-se uma falta a jusante da GD como se mostra na Figura A. 20. A corrente de falta para esta condição está definida por (A. 121).

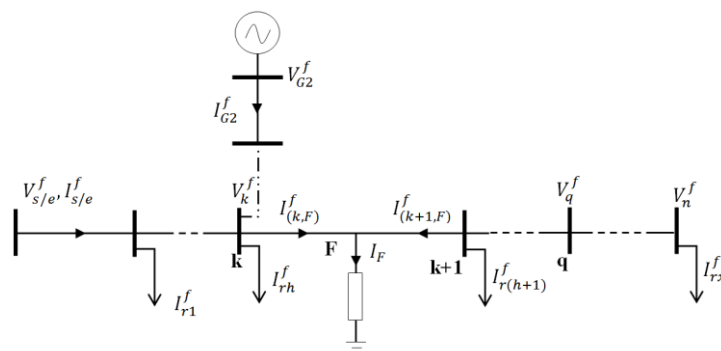


Figura A. 20 Falta a jusante da geração distribuída, (OROZCO-HENAO, C.; MORAFLOREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012)

Para a análise das seções em falta a jusantes da GD, a contribuição à corrente de falta desde a geração distribuída $I_{(g,k)}^{p,f}$ é considerada na estimação da corrente $I_{(k,F)}^f$ como se mostra em (A. 124) e o sistema a jusante é puramente passivo. Portanto uma impedância equivalente do sistema a jusante pode ser obtida pela acumulação das impedâncias das linhas e as cargas, e a corrente $I_{(k+1,F)}^f$ pode ser estimada em função da distância ao local em falta m por (A. 125).

$$\left[I_{(k,k+1)}^{p,f} \right] = \left[I_{(k-1,k)}^{p,f} \right] + \left[I_{(g,k)}^{p,f} \right] - Y_{rh} \cdot \left[V_{(k)}^{p,f} \right] \quad (\text{A. 124})$$

$$\left[I_{(k+1,F)}^f \right] = -[(1 - m)[Z_k] + [Z_{lk}]]^{-1} \left[V_F^f \right] \quad (\text{A. 125})$$

A.3.6.2. Estimação da distância da falta

Para a definição do método proposto, assume-se o sistema de distribuição mostrado na Figura A. 19 o qual tem uma falta entre os nós k e $k+1$. A partir dos registros de tensão e corrente medidos na subestação, estimam-se as tensões e correntes em todas as seções de linha que constituem o sistema de distribuição. Obtidas estes atributos, pode-se reduzir a análise de curto-circuito exclusivamente à seção onde ocorreu a falta como se mostra na Figura A. 21.

Considera-se uma falta fase-terra entre os nós k e $k+1$, modelada como se mostra na Figura A. 21.

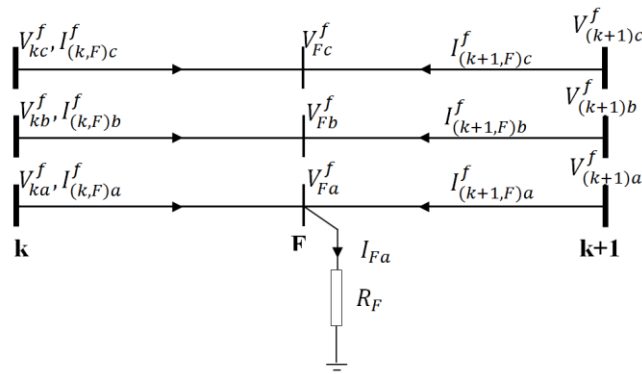


Figura A. 21 Modelo equivalente de uma falta fase-terra, (OROZCO-HENAO, C.; MORAFLOREZ; PÉREZ-LONDOÑO, 2012)

A partir da análise do circuito da Figura A. 21 obtém-se o sistema de equações (A. 126)

$$\begin{bmatrix} V_{ka}^f \\ V_{kb}^f \\ V_{kc}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mZ_{aa} + R_F & mZ_{ab} & mZ_{ac} \\ mZ_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ mZ_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(k,F)a}^f \\ I_{(k,F)b}^f \\ I_{(k,F)c}^f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(k+1,F)a}^f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 126})$$

Onde,

m : Distância ao local em falta em *p.u.*

Z_{ii} : Impedância própria da linha para a fase i com $i=(a, b, c)$ na seção em falta

Z_{ij} : Impedância mutua da linha entre as fases i e j com $i \neq j$ na seção em falta.

Da primeira fila de (A. 126) obtém-se a expressão (A. 127) em função das variáveis de interesse: a distância da falta (m) e a resistência de falta (R_F).

$$V_{ka}^f = m[Z_{aa} \cdot I_{(k,F)a}^f + Z_{ab} \cdot I_{(k,F)b}^f + Z_{ac} \cdot I_{(k,F)c}^f] + R_F [I_{(k,F)a}^f + I_{(k+1,F)a}^f] \quad (\text{A. 127})$$

Fazendo algumas manipulações algébricas em (A. 127) e obtendo a sua parte imaginária é determinada uma expressão para a resistência de falta.

$$R_F = \frac{\text{imag} \left\{ \frac{V_{ka}^f}{\Delta V_a^f} \right\}}{\text{imag} \left\{ \frac{I_{(k,F)a}^f + I_{(k+1,F)a}^f}{\Delta V_a^f} \right\}} \quad (\text{A. 128})$$

Onde,

$$\Delta V_a^f = Z_{aa} \cdot I_{(k,F)a}^f + Z_{ab} \cdot I_{(k,F)b}^f + Z_{ac} \cdot I_{(k,F)c}^f \quad (\text{A. 129})$$

Com a resistência de falta determinada, pode ser estimada a distância da falta por (A. 130).

$$m = \frac{V_{ka}^f - R_F \cdot (I_{(k,F)a}^f + I_{(k+1,F)a}^f)}{Z_{aa} \cdot I_{(k,F)a}^f + Z_{ab} \cdot I_{(k,F)b}^f + Z_{ac} \cdot I_{(k,F)c}^f} \quad (\text{A. 130})$$

APÊNDICE B:

Implementação de um Modelos em Falta de um Inversor no software ATPDraw Usando
MODELS.

B. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO EM FALTA DO INVERSOR NO SOFTWARE ATPDRAW

A resposta natural do inversor conectado à rede no período de falta é incrementar a corrente de saída com o objetivo de acompanhar uma potência de referência. Este comportamento é definido por seu sistema de controle. No entanto, as limitações físicas dos elementos de comutação da ponte do inversor inserem algumas características que faz complexa a modelagem da resposta em falta do inversor. Neste apêndice apresenta-se a programação da resposta de um inversor na ferramenta MODEL do ATPDraw, desde o modelo proposto por em (PLET, 2011). Na seção B.1 apresenta-se o acondicionamento do modelo do inversor para sua programação em ATPDraw. A seguir, na seção B.2 exibe-se sua programação na ferramenta MODEL do ATPDraw e na seção B.3 proporciona-se sua validação.

B.1. ACONDICIONAMENTO DO MODELO EM FALTA DO INVERSOR PARA SUA PROGRAMAÇÃO EM MODEL.

Considere a rede de distribuição mostrada na Figura B. 1. Este sistema tem um inversor de frequência conectado na barra M e apresenta a ocorrência de uma falta na barra N .

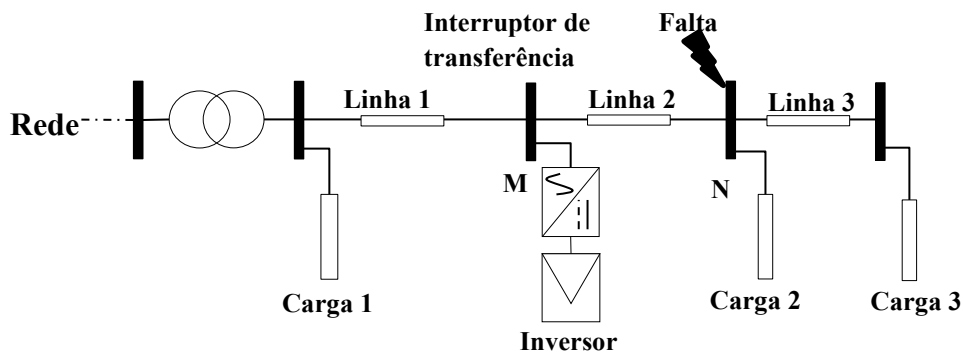


Figura B. 1 Rede de distribuição com inversor operando em modo conectado à rede

Se a falta ocorre em um instante $t = t_f$ e o módulo de tensão na rede em pré-falta e falta são $V_o(0)$ e $V_o(t_f)$ respectivamente, a corrente de referência do indutor em regime permanente definidas por (B. 1) são $I_{L,ref}(0)$ e $I_{L,ref}(t_f)$. A presença de um filtro passa-baixo de primeira ordem com frequência de corte ω_c no sistema de controle de potência, faz com que a corrente no indutor aproxime-se ao novo valor de referência determinado pela estratégia de limitação de corrente de forma exponencial como se define em (B. 2).

$$I_{L,ref} = conj\left(\frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}}\right) + V_o^{(+)} \cdot j\omega C_f \quad (B. 1)$$

$$I_{L,ref}(t) = I_{L,ref}(0) + (I_{L,ref}(t_f) - I_{L,ref}(0)) \cdot (1 - e^{-\omega_c t}) \quad (B. 2)$$

Se um afundamento de tensão na saída do inversor é suficientemente apreciável, a corrente $I_{L,ref}(t)$ ultrapassa o limite $I_{L,thld}$ em um tempo $t = t_d$ e o módulo de limitação de corrente detecta a ocorrência de uma falta, definindo a corrente de referência do inversor em uma predefinida corrente de referência de falta $I_{L,sat}$ como se descreve em (B. 3) (PLET; GREEN, 2014; PLET, 2011).

$$\vec{i}_{L,ref} \begin{cases} t \leq t_f & I_{L,ref}(0) \\ t_f < t \leq t_d & I_{L,ref}(0) + (I_{L,ref}(t_f) - I_{L,ref}(0)) \cdot (1 - e^{-\omega_c t}) \\ t_d < t \leq t_r & I_{L,sat} \\ t > t_r & I_{L,ref}(0) + (I_{L,ref}(t_f) - I_{L,ref}(0)) \cdot e^{-\omega_c t} \\ t \gg t_r & I_{L,ref}(0) \end{cases} \quad (B. 3)$$

Com tudo o anterior, a Figura B. 2 mostra o comportamento típico da tensão de saída e a corrente de referência do indutor de um inversor conectado à rede.

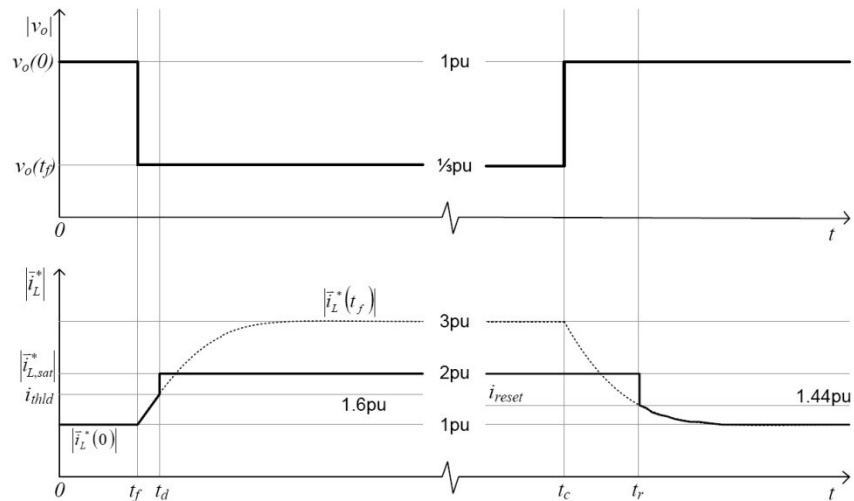


Figura B. 2 Comportamento típico da tensão de saída e a corrente de referência do indutor de um inversor conectado à rede (PLET, 2011)

A resposta completa de um inversor em falta pode ser dividida em cinco períodos, separados por t_f , t_d , t_c e t_r :

t_f , o início de um afundamento de tensão $V_0(0) \rightarrow V_0(t_f)$, provavelmente devido a uma falta na rede externa onde o inversor está conectado.

t_d , tempo de detecção de um afundamento de tensão no inversor e instante que começa a limitação de corrente, $I_{L,ref}(0) \rightarrow I_{L,ref}(t_f) = I_{L,sat}$. Isto ocorre quando $|I_L| > I_{thld}$

t_c , instante quando a falta na rede externa é retirada pelo sistema de proteção e a tensão nos terminais do inversor retorna a seu valor nominal.

t_r , tempo em que a referência de corrente do indutor cai abaixo do limite de reset $|I_L| < I_{reset}$ e o inversor deixa de limitar a corrente, retornando a exportação de potência.

Do comportamento típico do inversor, podem ser observados dois modos de operação: modo de seguimento de potência de referência e modo de limitação de corrente.

Considerando os modos de operação do inversor e sua modelagem dada por (B. 3), onde a corrente de referência $I_{L,ref}$ e a corrente de saída I_o são dadas pelas expressões (B. 4) até (B. 7), a resposta do inversor pode ser programada em MODEL.

Em modos de operação de seguimento de potência referência

$$I_o = I_o^{(+)} + I_o^{(-)} = conj\left(\frac{S_{ref}\angle\theta_s}{3 \cdot V_o^{(+)}\angle\theta_v^{(+)}}\right) - V_o^{(-)}\angle\theta_v^{(-)} \cdot j\omega C_f \quad (B. 4)$$

$$I_{L,ref} = I_o^{(+)} + I_c^{(+)} = conj\left(\frac{S_{ref}\angle\theta_s}{3 \cdot V_o^{(+)}\angle\theta_v^{(+)}}\right) + V_o^{(-)}\angle\theta_v^{(-)} \cdot j\omega C_f \quad (B. 5)$$

Em modo de limitação de corrente:

$$I_o = I_o^{(+)} + I_o^{(-)} = I_{L,sat}\angle\theta_{ref} - V_o^{(-)}\angle\theta_v^{(-)} \cdot j\omega C_f \quad (B. 6)$$

$$I_{L,ref} = I_{L,sat}\angle\theta_{ref} \quad (B. 7)$$

Onde,

θ_s : Ângulo da potência de referência

$\theta_v^{(+)}$: Componente positiva do ângulo da tensão de saída do inversor.

$\theta_v^{(-)}$: Componente negativa do ângulo da tensão de saída do inversor.

$I_{L,sat}$: Módulo da corrente de referência imposta pela estratégia de limitação de corrente.

θ_{ref} : Ângulo da corrente de referência imposta pela estratégia de limitação de corrente.

Porém, o ATP é um software de simulação no domínio do tempo e não permite fazer operações no domínio da frequência. Por esta razão é necessário transformar as expressões (B. 4) até (B. 7) no domínio do tempo como é mostrado a seguir.

Em modos de operação de seguimento de potência de referência

$$i_{o_h} = I_o^{(a,b,c)} \sin(\omega \cdot t + \theta_{o_h}) \quad (\text{B. 8})$$

$$i_{L_h} = I_L^{(a,b,c)} \sin(\omega \cdot t + \theta_{L_h}) \quad (\text{B. 9})$$

Com,

$$I_{o_r} = \frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}} \cdot \cos(\theta_v^{(+)} - \theta_s) - \omega \cdot C_f \cdot V_o^{(-)} \cdot \cos(\theta_v^{(-)} + \pi/2) \quad (\text{B. 10})$$

$$I_{o_i} = \frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}} \cdot \sin(\theta_v^{(+)} - \theta_s) - \omega \cdot C_f \cdot V_o^{(-)} \cdot \sin(\theta_v^{(-)} + \pi/2) \quad (\text{B. 11})$$

$$I_o^{(a,b,c)} = \text{norm}(I_{o_r}, I_{o_i}) \quad (\text{B. 12})$$

$$\theta_{o_{a,b,c}} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{o_i}}{I_{o_r}} \right) + h \cdot \frac{2\pi}{3} \quad \forall h = \{0,1,2\} \quad (\text{B. 13})$$

$$I_{L_r} = \frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}} \cdot \cos(\theta_v^{(+)} - \theta_s) + \omega \cdot C_f \cdot V_o^{(-)} \cdot \cos(\theta_v^{(-)} + \pi/2) \quad (\text{B. 14})$$

$$I_{L_i} = \frac{S_{ref}}{3 \cdot V_o^{(+)}} \cdot \sin(\theta_v^{(+)} - \theta_s) + \omega \cdot C_f \cdot V_o^{(-)} \cdot \sin(\theta_v^{(-)} + \pi/2) \quad (\text{B. 15})$$

$$I_L^{(a,b,c)} = \text{norm}(I_{L_r}, I_{L_i}) \quad (\text{B. 16})$$

$$\theta_{L_{a,b,c}} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{L_i}}{I_{L_r}} \right) + h \cdot \frac{2\pi}{3} \quad \forall h = \{0,1,2\} \quad (\text{B. 17})$$

Em modo de limitação de corrente:

$$i_{o_h} = I_o^{(a,b,c)} \sin(\omega \cdot t + \theta_{o_h}) \quad (\text{B. 18})$$

$$i_{L_{a,b,c}} = I_{L,sat} \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta_{ref}) \quad (\text{B. 19})$$

Com,

$$I_{o_r} = I_{L,sat} \cdot \cos(\theta_{ref}) - \omega \cdot C_f \cdot V_o^{(-)} \cdot \cos(\theta_v^{(-)} + \pi/2) \quad (\text{B. 20})$$

$$I_{o_i} = I_{L,sat} \cdot \sin(\theta_{ref}) - \omega \cdot C_f \cdot V_o^{(-)} \cdot \sin(\theta_v^{(-)} + \pi/2) \quad (\text{B. 21})$$

$$I_o^{(a,b,c)} = \text{norm}(I_{or}, I_{oi}) \quad (\text{B. 22})$$

$$\theta_{o_{a,b,c}} = \tan^{-1}\left(\frac{I_{oi}}{I_{or}}\right) + h \cdot \frac{2\pi}{3} \quad \forall h = \{0,1,2\} \quad (\text{B. 23})$$

Nas expressões anteriormente apresentadas são levadas em conta as características principais cada um dos módulos que constituem o sistema de controle do inversor. Estes módulos são considerados como se apresenta a seguir.

B.1.1. Sincronização

O processo de sincronização é realizado pela estimação do ângulo da tensão da rede. Como o ATPDraw opera no domínio do tempo, o número de amostras de um período do sinal de tensão são armazenadas e utilizando a transformada discreta de Fourier com remoção da componente DC apresentada, determina-se o módulo e o ângulo da tensão V_o (SAHA; ROSOŁOWSKI, 2002). Este processo realiza-se durante todo o tempo da simulação utilizando uma janela móvel que toma o número de amostras correspondente a um período. Assim, para cada passo de tempo executado pelo ATPDraw, a janela adiciona a última amostra do sinal de tensão V_o e elimina a primeira.

B.1.2. Controle de corrente

O controle de corrente garante uma corrente senoidal equilibrada e de boa qualidade quando a tensão da rede é distorcida. Este processo é realizado no modelo do inversor, estimando somente a componente fundamental da tensão V_o e calculando a corrente de referência $I_{L,ref}$ usando sua componente de sequência positiva.

B.1.3. Controle de potência

O controle de potência realiza-se estimando a corrente de referência do indutor em função da potência de referência do inversor (B. 1). Portanto, uma variação na tensão da rede ocasionará um ajuste na corrente de referência do indutor para manter uma determinada potência.

B.1.4. Limitação de corrente

O processo de limitação de corrente é realizado pela imposição de uma corrente predefinida para a corrente de referência do indutor do filtro. Esta corrente é limitada a uma corrente de referência $I_{L,sat}$ se excede um limite $I_{L,thld}$.

$$I_{L,ref}^{(a,b,c)} > I_{L,thld} \rightarrow i_L = i_{L,sat} \quad (\text{B. 24})$$

Onde $I_{L,sat}$ é considerada como duas vezes a corrente nominal do inversor.

B.2. PROGRAMAÇÃO DA RESPOSTA DE UM INVERSOR NA FERRAMENTA MODEL DO ATPDRAW.

A partir da formulação apresentada na seção B.1, pode ser programada o modelo do inversor proposto em (PLET, 2011) na ferramenta MODEL do ATPDraw. Para sua programação são considerados como dados conhecidos e, portanto entradas do MODEL a seguinte informação:

- P_r : Potência ativa de referência do inversor trifásica em kW
- Q_r : Potência reativa de referência do inversor trifásica em kW
- f_{req} : Frequência de operação do sistema em Hz
- V_{nom_s} : Tensão no lado secundário do transformador que conecta o inversor com a rede em volts.
- C_f : Capacitor do filtro do inversor.
- F_{req_c} : Frequência de corte.

t_f : Instante de tempo quando ocorre a falta

Esta informação é inserida no MODEL a partir da sua interface gráfica como apresentada na Figura B. 3.

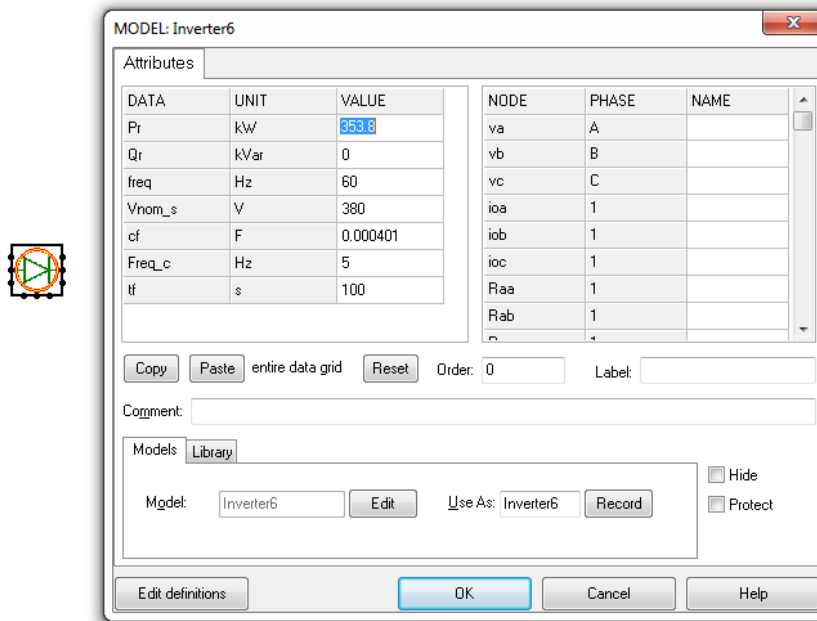


Figura B. 3 MODEL do modelo do inversor e sua interface gráfica

O MODEL é uma ferramenta que permite programar o comportamento de elementos no software de simulação ATPDraw, não entanto, este não é um elemento físico do sistema. O elemento físico do sistema e que pode ser controlado por MODEL são denominados TACS (Transient Analysis of Control Systems). Existem diferentes tipos de TACS (ATP, 1996). Para este caso, foi utilizado um TACS tipo fonte de corrente, já que a saída indicada pelo MODEL é a corrente injetada pelo inversor à rede.

O funcionamento do elemento programado no ATPDraw para modelar a resposta do inversor, consiste basicamente em tomar as medidas de tensão na barra de conexão do inversor utilizando um medidor e estimar para cada instante de tempo, o módulo de tensão e ângulo. Com estes dois valores, é estimada a corrente de saída do inversor no tempo e injetada na rede a partir de uma fonte de corrente tipo TACS, a qual é o elemento que está conectado

diretamente na rede de distribuição simulada. A Figura B. 4 apresenta o diagrama de interação entre o modelo que simula a resposta do inversor e a rede elétrica.

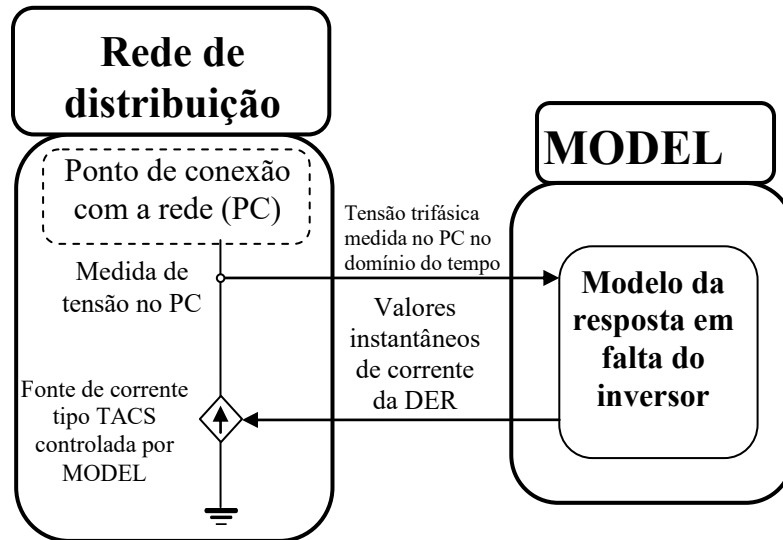


Figura B. 4 Interação entre o modelo estático das DER e a rede de distribuição em ATP/EMTP

O ATP-EMTP utiliza a regra de integração trapezoidal como método numérico para determinar as soluções das equações integro-diferenciais dos modelos utilizados na simulação (ATP, 1996). Este método numérico ocasiona em alguns casos oscilações numéricas quando se apresentam elementos não lineares (geralmente indutâncias) que não se atenuam no tempo. Estas oscilações ocorrem à frequência de Nyquist e modificam-se com a variação do passo do tempo do ATP (Δt). Além disso, podem ser atenuadas colocando uma resistência de amortecimento em paralelo com o elemento que gera a oscilação.

O modelo do inversor programado no MODEL apresenta um comportamento não linear ocasionando oscilação numérica na simulação. Portanto, é necessária a conexão de uma resistência de amortecimento em paralelo para cada uma das fases do inversor. Esta resistência estima-se em função do passo do tempo do ATP e a impedância da rede vista pelo inversor. A equação (B. 25) define o valor da resistência de amortecimento.

$$R_p = \frac{V_{oh}}{5 \cdot \omega \cdot \Delta t \cdot I_{oh}} \quad \forall h = \{a, b, c\} \quad (\text{B. 25})$$

Como a resistência de amortecimento depende da tensão da rede V_o e a corrente de saída do inversor I_o , esta é estimada para cada instante de tempo.

Finalmente, o modelo completo que simula a resposta do inversor programado no ATPDraw apresenta-se na Figura B. 5

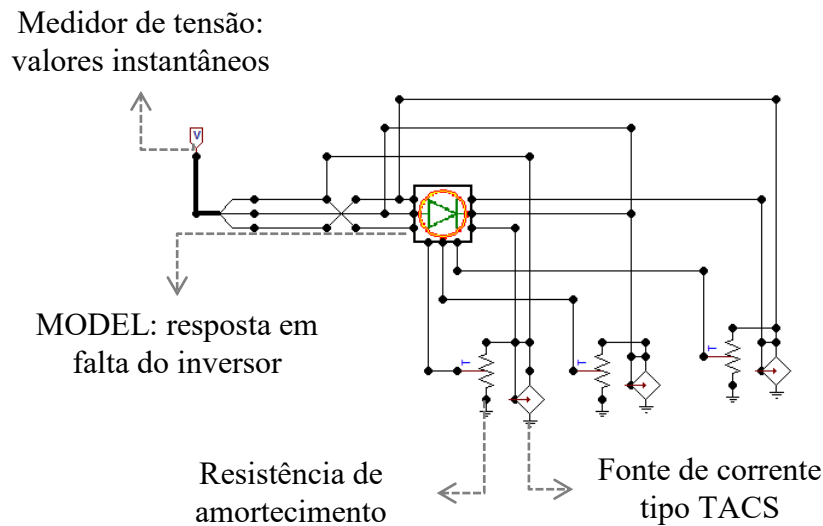


Figura B. 5 Modelo da resposta do inversor programado no ATPDraw usando MODEL

B.3. VALIDAÇÃO E COMPARAÇÃO DO MODELO DA RESPOSTA DO INVERSOR PROGRAMADO NO ATPDRAW

O modelo da resposta do inversor programado no ATPDraw valida-se utilizando os parâmetros e características de operação de um inversor de 10kVA (PLET, 2011). A Figura B. 6 mostra uma imagem do inversor simulado no ATPDraw a partir do modelo programado. Na Tabela B. 1 apresentam-se seus parâmetros.



Figura B. 6 Inversor de 10kVA, (PLET, 2011)

Tabela B. 1 Parâmetros do inversor de 10kVA

Descrição	Parâmetro	Valor	Unidades
Potência complexa do inversor	S_n	10	kVA
Frequência de comutação	f_s	8-16	kHz
Indutor do filtro	L_f	2,3	mH
Indutor de acoplamento	L_c	0,93	mH
Capacitor do filtro	C_f	8,8	μF
Tensão do Link DC	V_{DC}	700	V
Capacitor do Link DC	C_{DC}	680	μF

As condições de operação do inversor são definidas pela Tabela B. 2

Tabela B. 2 Condições de operação do inversor

Descrição	Parâmetro	Valor	Unidades
Potência de referência do inversor trifásica	S_{ref}	(4+j3)	kVA
Corrente de saturação	$I_{L,sat}$	(25+j0)	A
Tensão de fase da rede em <i>rms</i>	V_o	200	V
Limite para ativação de estratégia de limitação de corrente	I_{thld}	19	A

Um afundamento de tensão é simulado a partir de duas fontes de tensão e dois interruptores como se mostra na Figura B. 7.

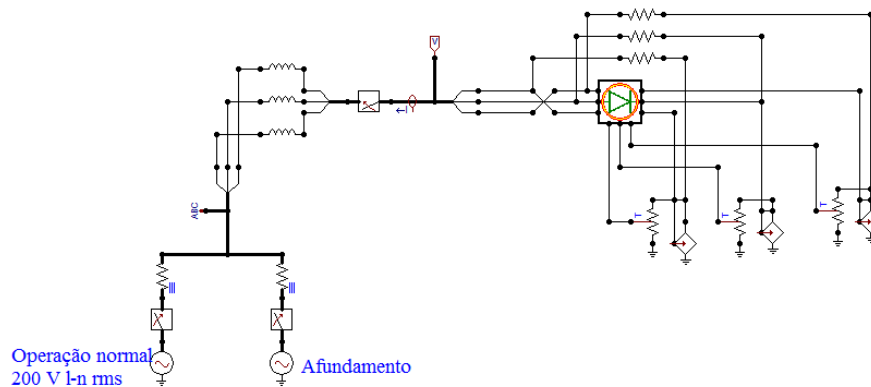


Figura B. 7 Circuito teste 1 para validação do modelo do inversor programado em ATPDraw.

O comportamento em pré-falta está determinado por uma fonte de tensão ideal de 200 V linha-neutro. O comportamento em falta se simula por uma fonte que representa um afundamento de tensão com valores de componente de sequência positiva e negativa de $V_0^{(+)} + V_0^{(-)} = \sqrt{2} \cdot 100\angle 0 + \sqrt{2} \cdot 40\angle 0$.

Os resultados obtidos são comparados com os apresentados por PLET (2011) como se mostra na Tabela B. 3. Estes resultados são dados em valores pico e o erro é estimado por (B. 26).

$$\%erro = \frac{|V_{referencia} - V_{estimado}|}{V_{referencia}} \cdot 100\% \quad (\text{B. 26})$$

Tabela B. 3 Tensões e correntes obtidas com o modelo da resposta em falta do inversor

Em pré-falta												
Inversor	v_{0a}	$\angle\theta_{0a}$	v_{0b}	$\angle\theta_{0b}$	v_{0c}	$\angle\theta_{0c}$	I_{La}	$\angle\theta_{La}$	I_{Lb}	$\angle\theta_{Lb}$	I_{Lc}	$\angle\theta_{Lc}$
(PLET,2011)	292,3	0	292,3	-119,7	292,3	120,3	11,2	-33,2	11	-153,2	11	86,8
Inv_ATP	284,3	1,4	285,4	-118,5	285,3	121,2	11,2	-32,4	11,2	-152,1	11,2	87,8
Erro (%)	2,8	1,4	2,4	1,2	2,4	0,9	0,3	0,8	1,5	1,1	1,9	1,0
Em falta												
(PLET,2011)	206,1	2	128,1	-139	133,5	144,9	25	0	25	-120	25	120
Inv_ATP	198,1	2,8	120,9	-139,5	126,6	146,8	24,9	0,9	25,0	-119,0	25,0	120,8
Erro (%)	3,9	0,8	5,6	0,5	5,2	1,9	0,3	0,9	0,1	1,0	0,1	0,8

Dos resultados obtidos, é possível observar que o erro nos módulos de tensão é menor de 2,8% para condição de operação normal. Em falta este erro aumenta a 5,6% sendo que o

aumento no erro pode ser ocasionado pela presença da resistência de amortecimento no modelo do inversor.

Outras características associadas aos processos de sincronismo e limitação de corrente foram analisadas como segue.

B.3.1. Sincronização

O processo de sincronização do modelo da resposta do inversor foi validado observando o comportamento da estimação do módulo de tensão e ângulo de V_o . A estimação do módulo de tensão foi comparado com o valor RMS estimado por o ATP durante o tempo de simulação como se mostra na Figura B. 8. A figura mostra que a estimação do módulo de tensão se realiza de forma adequada e apresenta o mesmo resultado do que quando se utiliza a RMS do ATP. Também, a figura mostra o comportamento esperado da tensão, onde após da ocorrência da falta seu valor diminui (Figura B. 8).

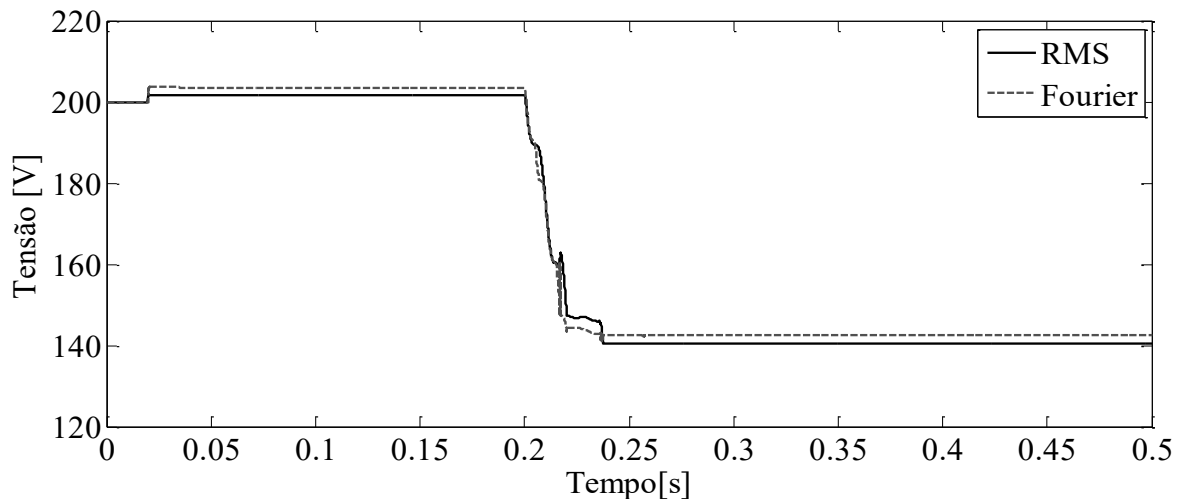


Figura B. 8 Estimação do módulo de tensão V_o por Fourier e a função RMS do ATPDraw.

Os sinais de tensão no tempo para V_o são apresentados na Figura B. 9.

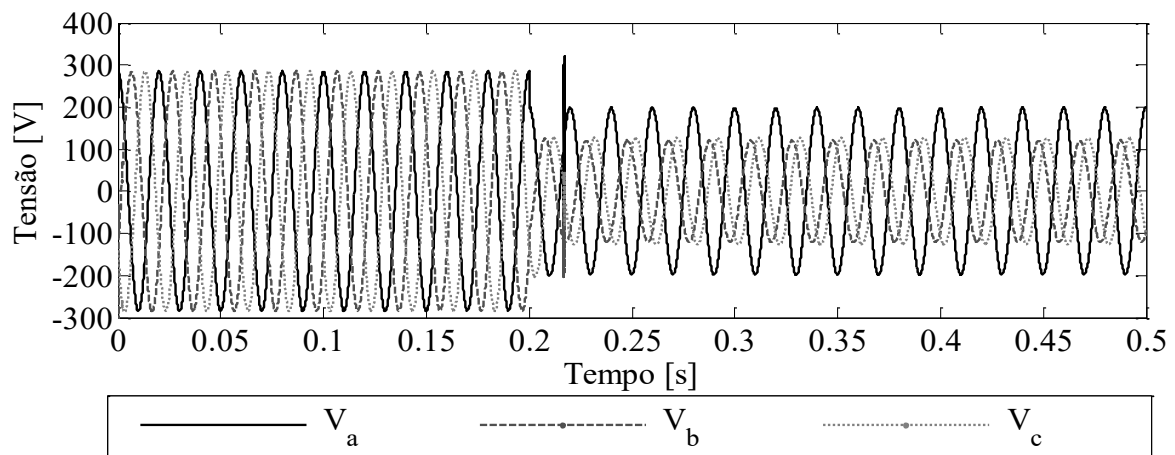


Figura B. 9 Sinais de tensão nos terminais do inversor V_o

O ângulo é estimado com as mesmas componentes reais e imaginárias dos coeficientes de Fourier com que se estima o módulo da tensão. Portanto, considera-se, que se a estimativa do módulo da tensão realizou-se de forma correta, também se estimou corretamente o ângulo.

A Figura B. 10 mostra o comportamento do ângulo estimado pelos coeficientes de Fourier.

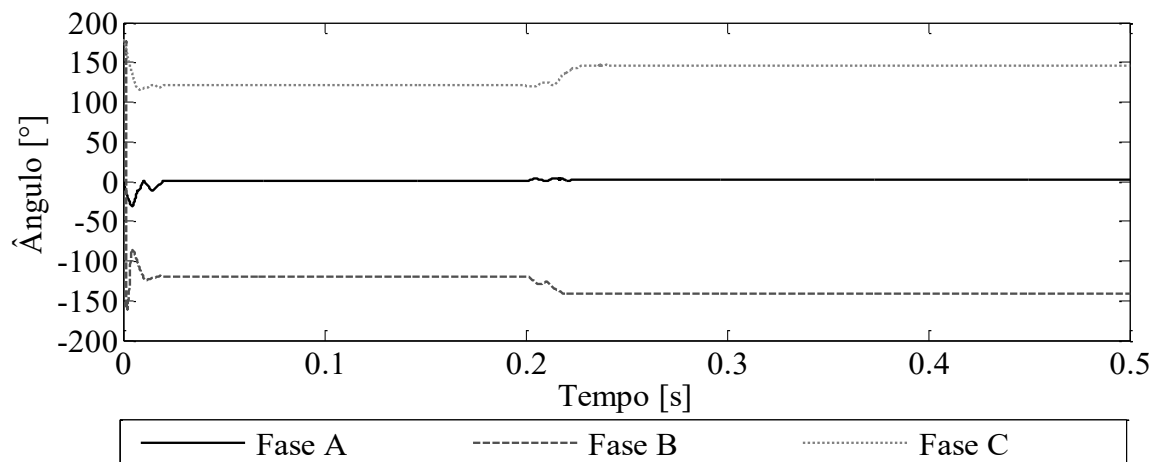


Figura B. 10 Estimativa do ângulo de V_o no tempo

B.3.2. Amortecimento da oscilação numérica

O amortecimento da oscilação numérica é observado no sinal de tensão e no comportamento apresentado na resistência de amortecimento estimada durante o tempo de simulação. Da Figura B. 9 é possível observar que a oscilação numérica apresentada após ocorrência da falta é mínima, mostrando assim a boa atenuação da resistência de

amortecimento. Na Figura B. 11 apresenta-se a estimação da resistência de amortecimento durante o tempo de simulação.

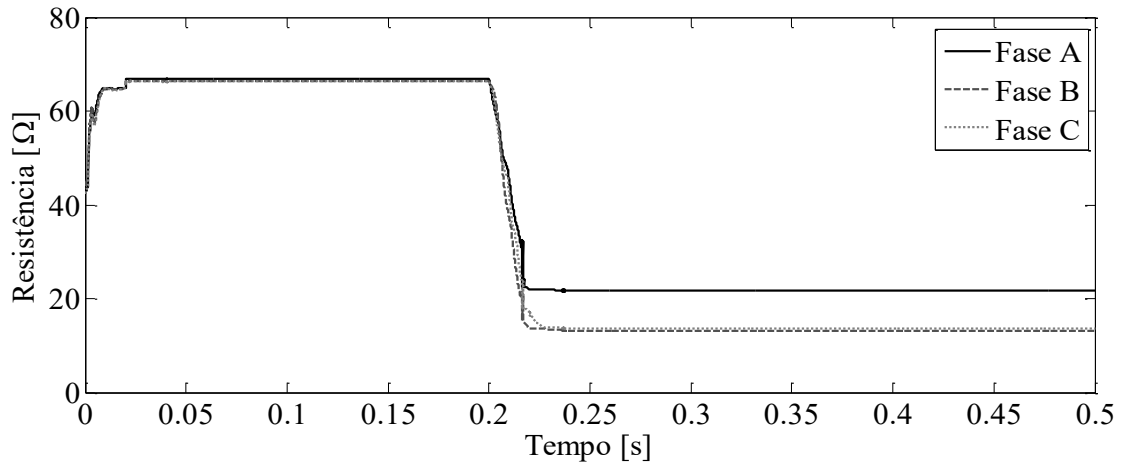


Figura B. 11 Variação da resistência de amortecimento durante a simulação

B.3.3. Limitação da corrente de referência

Uma das características de maior importância do inversor é a limitação da corrente de referência do indutor do filtro quando esta ultrapassa uma corrente de umbral I_{thld} . Para o afundamento de tensão simulado, o modelo do inversor deve entrar em uma condição de limitação de corrente, sendo o umbral e a corrente de saturação, definidas na Tabela B. 2. A Figura B. 12 apresenta a corrente de referência do indutor, mostrando claramente a ativação da estratégia de limitação de corrente, instantes depois de ter ocorrido o afundamento.

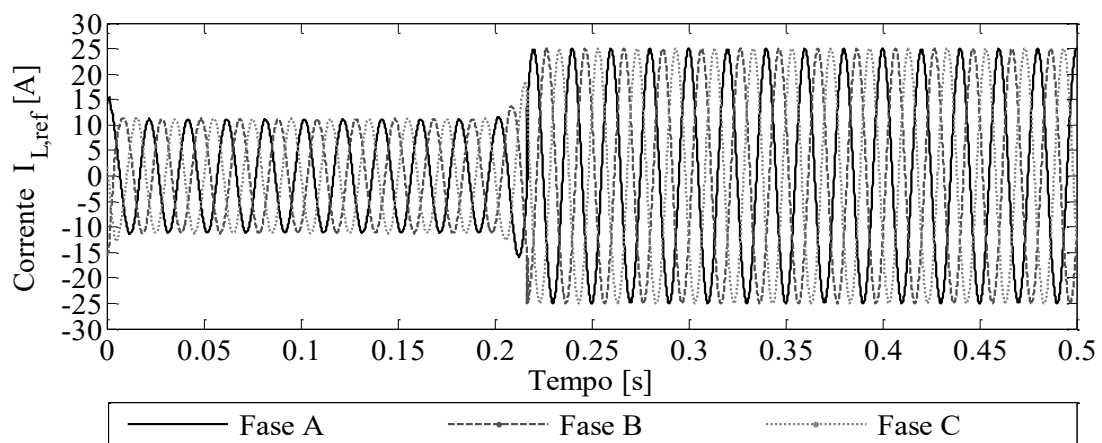


Figura B. 12 Sinais de corrente de referência do indutor do filtro

APÊNDICE C:

Parâmetros Utilizados na Criação dos Cenários para a Análise de Sensibilidade.

C. Parâmetros Utilizados na Criação dos Cenários para a Análise de Sensibilidade.

Neste apêndice são apresentados os parâmetros utilizados para a criação de cada um dos cenários utilizados na validação da metodologia de LF exposta no capítulo 3. Os parâmetros do sistema teste IEEE 34 barras podem ser encontrados em DISTRIBUTION SYSTEM ANALYSIS SUBCOMMITTEE (2001). Os parâmetros de ajuste para a simulação das faltas no ATPDraw são apresentados na Tabela C. 1.

Tabela C. 1 Parâmetros de ajuste do ATPDraw

Descrição	Valor
Tempo total de simulação [s]	0,25
Tempo de ocorrência da falta [s]	0,06
Passo de tempo do ATP/EMTP [S]	8,01E-05
Frequência fundamental [Hz]	60

Na continuação apresentam-se os parâmetros para cada cenário validado.

C.1. EFEITO DA RESISTÊNCIA DA FALTA

C.1.1. Parâmetros das DER

Para este cenário são conectadas 3 DER e seus parâmetros são mostrados nas tabelas C.1, C.2 e C.3.

Tabela C. 2 Parâmetros para DER-IRI

Descrição	Parâmetro	DER-1	DER-3
Barra	--	840	865
Nível de penetração DER	%DG	10%	10%
Tensão nominal rms L-L [V]	V_{nom}	380	380
Potência ativa do inversor (kW)	P_r	176,9	176,9
Potência reativa do inversor (VA)	Q_r	0	0
Capacitor do filtro (μ F)	C_f	199	199
Frequência de corte (Hz)	f_c	5	5

Tabela C. 3 Parâmetros para DER-IRI

DER-2						
%DG	Barra	Tensão (kV)	Xs _{sub} (p.u)	3P(W)	Zbase	Xs _{sub} (Ω)
10	848	24,9	0,12	176900	3504,862	420,5833804

Tabela C. 4 Tensão interna da DER-IDS

Tensão interna E da DER-2		
Fase	Módulo RMS [V]	Ângulo [°]
A	12.870,7	-20,8
B	13.222,6	-142,0
C	13.473,1	98,6

C.1.2. Parâmetros da simulação

Na continuação, são apresentados os valores de resistência de falta para a simulação das faltas para no ATPDraw.

Tabela C. 5 Parâmetros da simulação de faltas

Impedância de terra (faltas fase-terra)[Ω]	Impedância de fase (faltas fase-fase)[Ω]
0,005	0,005
10	5
20	10
30	15
40	20
100	50

C.2. EFEITO DA VARIAÇÃO DA CARGA

C.2.1. Parâmetros das DER

Este cenário é simulado com três DER só as mesmas condições operativas do cenário apresentado na seção C.1. Portanto, os parâmetros das DER são os mesmos apresentados nas tabelas C.2, C.3 e C.4.

C.2.2. Parâmetros da simulação

Para este cenário foram realizadas variações aleatórias de carga. Três casos são analisados: variação aleatória de carga 30-60%, variação aleatória de carga 60-100% e

variação aleatória de carga 100-150%. As tabelas C.6, C.7 e C.8 apresentam as porcentagens de variação de carga realizadas para cada caso avaliado.

Tabela C. 6 Variação aleatória da carga entre 30% e 60% da carga nominal

Nome da carga	Tipo	Fase A	FP fase A	Fase B	FP fase B	Fase C	FP fase C
CY860	Trifásica	36,00	0,82	51,00	0,82	46,00	0,89
CY840	Trifásica	56,00	0,88	42,00	0,91	52,00	0,89
CY844	Trifásica	40,00	0,83	48,00	0,84	31,00	0,93
CD830	Trifásica	37,00	0,88	51,00	0,86	52,00	0,87
CD848	Trifásica	51,00	0,92	43,00	0,80	40,00	0,87
CY802	Trifásica	38,00	0,83	55,00	0,87	57,00	0,87
CY806	Trifásica	53,00	0,87	54,00	0,93	41,00	0,84
C808	Monofásica	54,00	0,96	40,00	0,91	43,00	0,94
C810	Monofásica	53,00	0,83	56,00	0,97	45,00	0,95
C818	Monofásica	48,00	0,83	36,00	0,87	52,00	0,94
C820	Monofásica	54,00	0,85	46,00	0,82	33,00	0,82
C820a	Monofásica	50,00	0,88	36,00	0,88	34,00	0,81
C822	Monofásica	56,00	0,90	58,00	0,92	47,00	0,94
CD836a	Trifásica	56,00	0,97	30,00	0,95	48,00	0,97
CD840	Trifásica	46,00	0,88	54,00	0,84	45,00	0,95
C824a	Monofásica	47,00	0,94	52,00	0,90	37,00	0,91
C826	Monofásica	33,00	0,91	50,00	0,92	57,00	0,97
C824b	Monofásica	53,00	0,90	58,00	0,90	31,00	0,82
C828	Monofásica	56,00	0,88	55,00	0,84	47,00	0,91
C854	Monofásica	31,00	0,90	41,00	0,81	45,00	0,83
C856	Monofásica	34,00	0,83	34,00	0,83	31,00	0,91
CD832	Trifásica	38,00	0,89	51,00	0,88	46,00	0,88
CD858	Trifásica	34,00	0,88	56,00	0,95	38,00	0,84
C864	Monofásica	47,00	0,91	43,00	0,84	58,00	0,81
C858	Monofásica	33,00	0,82	35,00	0,91	47,00	0,81
CD834a	Trifásica	58,00	0,92	52,00	0,81	56,00	0,96
CD860	Trifásica	60,00	0,95	54,00	0,89	35,00	0,87
CD858a	Trifásica	34,00	0,81	58,00	0,85	39,00	0,86
CD834	Trifásica	44,00	0,91	31,00	0,94	47,00	0,95
C842	Monofásica	40,00	0,88	32,00	0,83	50,00	0,86
C844	Monofásica	57,00	0,82	60,00	0,89	51,00	0,97
CD860a	Trifásica	39,00	0,87	44,00	0,93	55,00	0,82
C862	Monofásica	35,00	0,86	32,00	0,89	40,00	0,83
C838	Monofásica	36,00	0,95	50,00	0,88	57,00	0,82
CY844a	Trifásica	52,00	0,93	47,00	0,83	48,00	0,85
CY846a	Trifásica	34,00	0,84	57,00	0,81	37,00	0,81
C846	Monofásica	43,00	0,80	57,00	0,83	33,00	0,85
C848	Monofásica	44,00	0,82	60,00	0,86	39,00	0,81
CD836	Trifásica	39,00	0,81	45,00	0,93	49,00	0,82
CD816	Trifásica	32,00	0,93	57,00	0,89	33,00	0,94
CD824	Trifásica	40,00	0,85	52,00	0,80	31,00	0,91

Tabela C. 7 Variação aleatória da carga entre 60% e 100% da carga nominal

Nome da carga	Tipo	Fase A	FP fase A	Fase B	FP fase B	Fase C	FP fase C
CY860	Trifásica	96,00	0,94	89,00	0,81	63,00	0,82
CY840	Trifásica	92,00	0,96	87,00	0,82	89,00	0,82
CY844	Trifásica	65,00	0,91	73,00	0,91	90,00	0,90
CD830	Trifásica	90,00	0,84	89,00	0,97	95,00	0,81
CD848	Trifásica	75,00	0,86	87,00	0,90	92,00	0,86
CY802	Trifásica	68,00	0,81	91,00	0,84	76,00	0,89
CY806	Trifásica	69,00	0,91	79,00	0,83	91,00	0,82
C808	Monofásica	72,00	0,84	81,00	0,82	76,00	0,82
C810	Monofásica	64,00	0,93	72,00	0,90	99,00	0,87
C818	Monofásica	88,00	0,93	77,00	0,91	64,00	0,96
C820	Monofásica	67,00	0,85	92,00	0,88	91,00	0,87
C820a	Monofásica	71,00	0,81	87,00	0,87	78,00	0,90
C822	Monofásica	62,00	0,85	91,00	0,92	65,00	0,82
CD836a	Trifásica	64,00	0,80	77,00	0,91	89,00	0,89
CD840	Trifásica	64,00	0,91	65,00	0,82	64,00	0,82
C824a	Monofásica	67,00	0,83	73,00	0,85	69,00	0,84
C826	Monofásica	96,00	0,92	82,00	0,83	68,00	0,81
C824b	Monofásica	97,00	0,92	82,00	0,85	67,00	0,91
C828	Monofásica	100,00	0,83	70,00	0,87	63,00	0,92
C854	Monofásica	76,00	0,97	76,00	0,91	66,00	0,86
C856	Monofásica	66,00	0,93	95,00	0,86	87,00	0,85
CD832	Trifásica	81,00	0,94	84,00	0,86	72,00	0,88
CD858	Trifásica	77,00	0,86	82,00	0,93	77,00	0,87
C864	Monofásica	65,00	0,80	72,00	0,85	86,00	0,96
C858	Monofásica	97,00	0,88	70,00	0,93	90,00	0,93
CD834a	Trifásica	90,00	0,82	87,00	0,88	68,00	0,82
CD860	Trifásica	93,00	0,83	67,00	0,91	96,00	0,89
CD858a	Trifásica	88,00	0,83	98,00	0,89	87,00	0,81
CD834	Trifásica	92,00	0,93	65,00	0,89	73,00	0,89
C842	Monofásica	76,00	0,87	67,00	0,84	61,00	0,96
C844	Monofásica	86,00	0,96	67,00	0,96	92,00	0,90
CD860a	Trifásica	78,00	0,84	90,00	0,84	63,00	0,93
C862	Monofásica	87,00	0,92	86,00	0,87	76,00	0,94
C838	Monofásica	73,00	0,94	92,00	0,94	80,00	0,91
CY844a	Trifásica	98,00	0,88	62,00	0,95	85,00	0,86
CY846a	Trifásica	100,00	0,84	86,00	0,90	75,00	0,82
C846	Monofásica	61,00	0,87	67,00	0,92	75,00	0,94
C848	Monofásica	89,00	0,90	67,00	0,96	71,00	0,96
CD836	Trifásica	69,00	0,86	64,00	0,91	67,00	0,81
CD816	Trifásica	89,00	0,86	86,00	0,87	85,00	0,80
CD824	Trifásica	96,00	0,94	90,00	0,94	75,00	0,90
CY832	Trifásica	83,00	0,89	71,00	0,84	78,00	0,84
C828a	Monofásica	92,00	0,97	61,00	0,89	63,00	0,94
C830	Monofásica	100,00	0,81	98,00	0,80	87,00	0,93

Tabela C. 8 Variação aleatória da carga entre 100% e 150% da carga nominal

Nome da carga	Tipo	Fase A	FP fase A	Fase B	FP fase B	Fase C	FP fase C
CY860	Trifásica	123	0,84	145	0,93	144	0,85
CY840	Trifásica	134	0,91	106	0,87	114	0,92
CY844	Trifásica	114	0,95	141	0,87	125	0,92
CD830	Trifásica	142	0,90	129	0,86	123	0,92
CD848	Trifásica	144	0,92	101	0,91	122	0,87
CY802	Trifásica	106	0,94	116	0,84	117	0,86
CY806	Trifásica	127	0,90	120	0,87	126	0,91
C808	Monofásica	148	0,92	120	0,94	107	0,81
C810	Monofásica	104	0,83	116	0,85	101	0,89
C818	Monofásica	105	0,82	132	0,95	149	0,90
C820	Monofásica	150	0,89	126	0,86	122	0,88
C820a	Monofásica	104	0,95	103	0,87	141	0,87
C822	Monofásica	131	0,94	144	0,96	110	0,84
CD836a	Trifásica	145	0,90	125	0,90	141	0,89
CD840	Trifásica	110	0,88	121	0,96	131	0,92
C824a	Monofásica	136	0,86	126	0,89	108	0,90
C826	Monofásica	135	0,87	142	0,92	118	0,88
C824b	Monofásica	119	0,93	137	0,87	135	0,96
C828	Monofásica	139	0,92	105	0,87	130	0,88
C854	Monofásica	103	0,84	142	0,80	143	0,81
C856	Monofásica	133	0,89	111	0,90	106	0,91
CD832	Trifásica	130	0,81	103	0,83	101	0,87
CD858	Trifásica	142	0,91	126	0,95	105	0,95
C864	Monofásica	105	0,89	107	0,90	100	0,93
C858	Monofásica	142	0,96	149	0,89	114	0,82
CD834a	Trifásica	125	0,90	138	0,81	133	0,89
CD860	Trifásica	109	0,96	130	0,87	147	0,91
CD858a	Trifásica	123	0,94	127	0,89	134	0,86
CD834	Trifásica	112	0,90	143	0,87	106	0,88
C842	Monofásica	115	0,87	142	0,87	120	0,86
C844	Monofásica	107	0,84	104	0,87	113	0,85
CD860a	Trifásica	121	0,82	125	0,92	112	0,93
C862	Monofásica	104	0,87	100	0,84	100	0,83
C838	Monofásica	107	0,85	109	0,82	130	0,95
CY844a	Trifásica	147	0,84	124	0,86	126	0,85
CY846a	Trifásica	103	0,87	109	0,80	148	0,87
C846	Monofásica	148	0,93	100	0,92	135	0,91
C848	Monofásica	128	0,84	139	0,84	119	0,95
CD836	Trifásica	143	0,87	116	0,90	146	0,95
CD816	Trifásica	130	0,86	143	0,88	145	0,81
CD824	Trifásica	127	0,92	109	0,86	109	0,85
CY832	Trifásica	120	0,89	102	0,89	114	0,84
C828a	Monofásica	112	0,83	148	0,96	141	0,92
C830	Monofásica	109	0,86	109	0,80	116	0,92

Um sumário da Tabela C. 6, C.7 e C.8 exibem-se nas figuras C.1, C.2 e C.3. Os gráficos de barras permitem observar uma variação desbalanceada para cada uma das fases das cargas e a máxima porcentagem estabelecida para cada variação de carga.

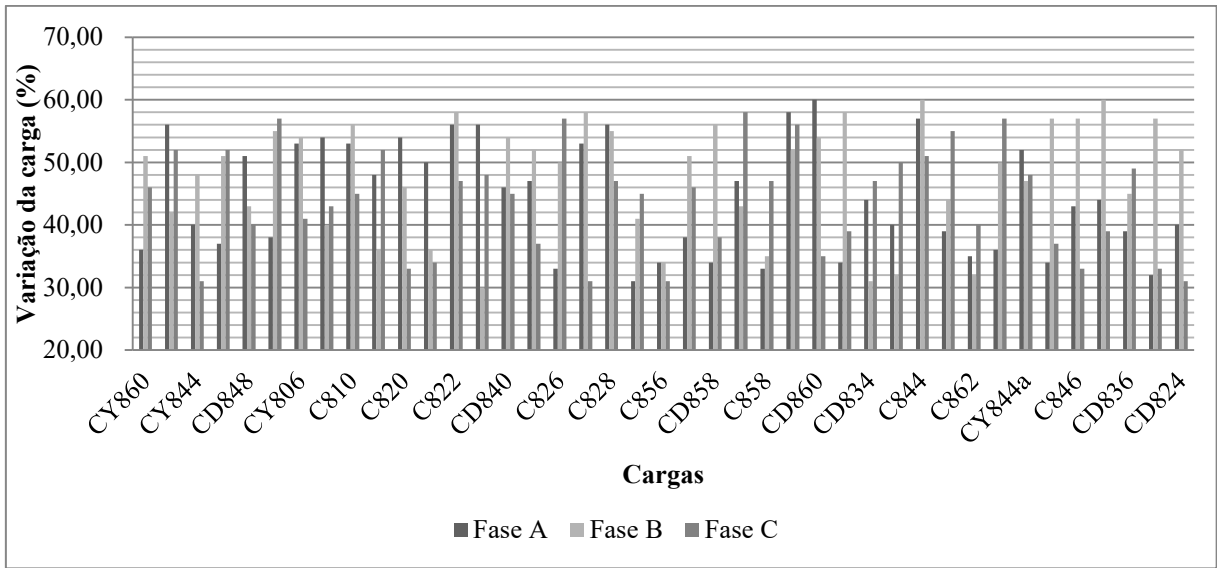


Figura C. 1 Variação aleatória da carga entre 30% e 60% da carga nominal

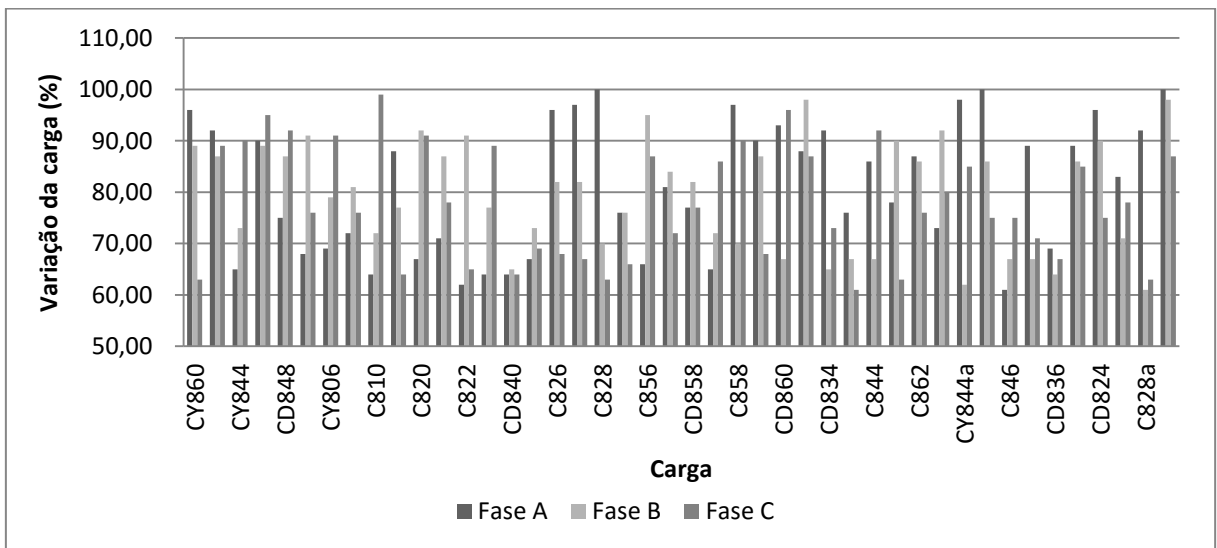


Figura C. 2 Variação aleatória da carga entre 60% e 100% da carga nominal

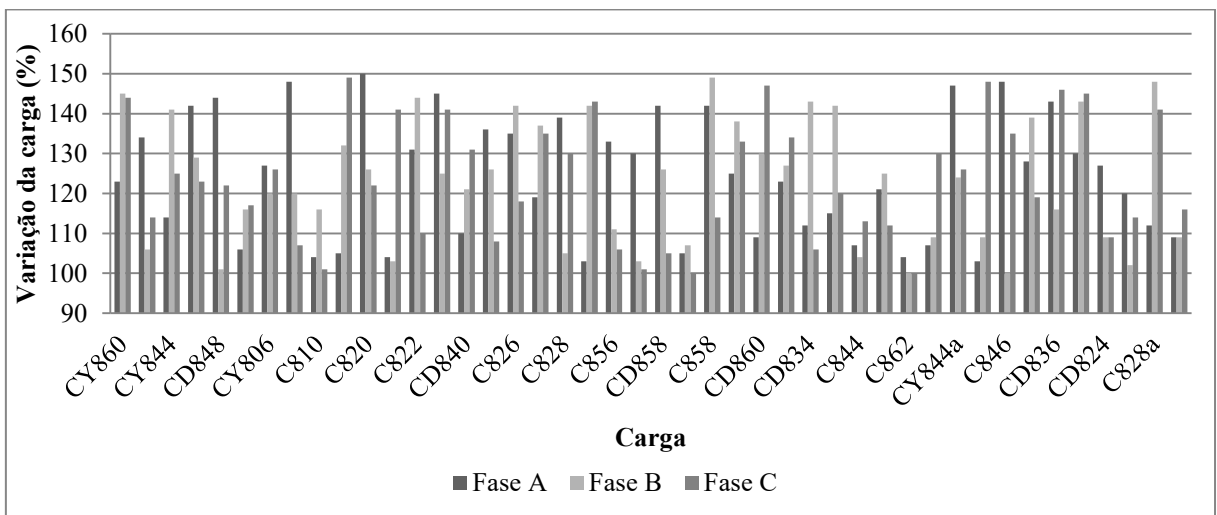


Figura C. 3 Variação aleatória da carga entre 100% e 150% da carga nominal

C.3. EFEITO DAS TECNOLOGIAS DER

Para este cenário foram validados vários casos que avaliam de forma independente diferentes efeitos ocasionados pela inserção de DER. Os parâmetros para a criação dos estudos de caso são apresentados como segue.

C.3.1. Efeito do nível de penetração de DER

Para este estudo de caso avaliam-se três níveis de penetração (%DER): 10%, 20% e 30%. Estes níveis de penetração são avaliados considerando DER-IDS e DER-IRI. As tabelas C.9 e C.10 exibem os parâmetros das DER-IDS e DER-IRI para os diferentes níveis de penetração de DER.

Tabela C. 9 Parâmetros das DER-IRI para os níveis de penetração de 10%, 20% e 30%

Descrição	Parâmetro	%DER		
		10%	20%	30%
Barra	--	840	840	840
Tensão nominal rms L-L [V]	V_{nom}	380	380	380
Potência ativa do inversor (kW)	P_r	176,9	353,8	530,7
Potência reativa do inversor (VA)	Q_r	0	0	0
Capacitor do filtro (μ F)	C_f	199	299,899	400,732
Frequência de corte (Hz)	f_c	5	5	5

Tabela C. 10 Parâmetros das DER-IDS para os níveis de penetração de 10%, 20% e 30%

DER-IDS						
%DG	Barra	Tensão (kV)	$Xs_{sub}(p.u)$	3P(W)	Zbase	$Xs_{sub}(\Omega)$
10	848	24,9	0,12	176900	3504,86	420,58
20	848	24,9	0,12	353800	1752,43	210,29
30	848	24,9	0,12	530700	1168,29	140,19

Também, a Tabela C. 11 apresenta os módulos e os ângulos da tensão interna das DER-IDS para os diferentes níveis de penetração de DER.

Tabela C. 11 Tensão interna das DER-IDS para os níveis de penetração de 10%, 20% e 30%.

Fase	%DER-IDS					
	10%		20%		30%	
	Módulo RMS [V]	Ângulo [°]	Módulo RMS [V]	Ângulo [°]	Módulo RMS [V]	Ângulo [°]
A	12.870,70	-20,8	12.755,83	-21,18	12.919,76	-20,61
B	13.222,60	-142	13.121,89	-142,43	13.247,83	-141,82
C	13.473,10	98,6	13.354,52	-261,80	13.498,22	-261,19

C.3.2. Efeito de erro nos parâmetros das DER

Para este estudo de caso foram inseridos erros fixos de -10 e +10 na potência de referência para as DER-IRI e erros fixos de -10 e +10 na reatância subtransitória das DER-IDS para avaliar seu efeito no desempenho da metodologia de LF proposta. Os parâmetros das DER para este caso de estudo são apresentados nas tabelas C.12 e C.13.

Tabela C. 12 Parâmetros das DER-IRI considerando erros de -10% e 10% na potência de referência.

Descrição	Parâmetro	Erro [%]		
		-10	0	10
Barra	--	840	840	840
Tensão nominal rms L-L [V]	V_{nom}	380	380	380
Potência ativa do inversor (kW)	P_r	159,21	176,9	194,59
Potência reativa do inversor (VA)	Q_r	0	0	0
Capacitor do filtro (μ F)	C_f	199	199	199
Frequência de corte (Hz)	f_c	5	5	5

Tabela C. 13 Parâmetros das DER-IDS considerando erros de -10% e 10% na reatância subtransitória

DER-IDS								
%DG	Barra	Tensão (kV)	$Xs_{sub}(p.u)$	3P(W)	Zbase	$Xs_{sub}(\Omega)$		
						-10	0	10
30	848	24,9	0,12	530700	1168,29	126,18	140,19	154,21

C.3.3. Efeito do número de DER conectadas

Para este estudo de caso, foram consideradas três situações de operação nas quais varia o número de DER conectadas. Nas tabelas C.14 e C.15 apresentam-se estas situações quanto os parâmetros das DER.

Tabela C. 14 Parâmetros das DER-IRI considerando uma, duas e três DER conectadas

Descrição	Parâmetro	Número de DER conectadas		
		1	2	3
Barra	--	840	840, 848	840, 848, 865
Nível de penetração para cada DER	%DER	30	15	10
Tensão nominal rms L-L [V]	V_{nom}	380	380	380
Potência ativa do inversor (kW)	P_r	530,7	265,4	176,9
Potência reativa do inversor (VA)	Q_r	0	0	0
Capacitor do filtro (μ F)	C_f	400,732	265,35	199
Frequência de corte (Hz)	f_c	5	5	5

Tabela C. 15 Parâmetros das DER-IDS considerando uma, duas e três DER conectadas

DER-IDS							
Número de DER	%DG	Barra	Tensão (kV)	$Xs_sub(p.u)$	3P(W)	Zbase	$Xs_sub(\Omega)$
3	10	840	24,9	0,12	176900	3504,86	420,58
2	15	840, 848	24,9	0,12	265350	2336,57	280,39
1	30	840, 848, 865	24,9	0,12	530700	1168,29	140,19

Tabela C. 16 Medidas de tensão e corrente na subestação para o calculo do desequilibrio do sistema

	variação 30-60%			variação 60-100%			variação 100-150%			Nominal		
	Fase	Modulo	ângulo	Fase	Modulo	ângulo	Fase	Modulo	ângulo	Fase	Modulo	ângulo
V	a	14184	60,619	a	14087	60,01	a	13957	58,735	a	13974	59,566
	b	14223	-59,094	b	14141	-59,762	b	13965	-60,688	b	14044	-60,014
	c	14337	-179	c	14221	-179,78	c	14153	179,38	c	14171	-179,89
I	a	9,2149	-3,372	a	17,18	15,065	a	33,075	29,31	a	25,061	16,888
	b	7,1059	-123,06	b	15,14	-97,937	b	29,378	-94,505	b	20,756	-101,28
	c	3,6401	93,291	c	13,329	142,93	c	23,74	154,69	c	16,033	139,99
	Seqüência	Modulo	ângulo	Fase	Modulo	ângulo	Fase	Modulo	ângulo	Fase	Modulo	ângulo
V	+	14247,94	60,8	+	14149,64	60,156	+	14024,82	59,143	+	14062,88	59,889
	-	65,57	-51,8	-	52,45	-68,279	-	107,99	-46,477	-	83,91	-55,243
	0	39,21	-126,9	0	30,52	-129,482	0	39,36	-127,426	0	53,54	-117,226
I	+	6,571	-7,454	+	15,186	19,684	+	28,675	29,491	+	20,612	18,307
	-	1,599	52,263	-	1,019	10,281	-	3,761	54,379	-	2,543	42,819
	0	1,954	-29,247	0	1,533	-32,853	0	1,955	-30,154	0	2,709	-19,908

APÊNDICE D:

Definição de Matrizes para Componentes Séries e Shunt em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica.

D. Definição de Matrizes para Componentes Séries e Shunt em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

D.1. COMPONENTES SÉRIES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Este apêndice apresenta as matrizes de impedância para as componentes séries dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Estas matrizes são utilizadas para os cálculos dos fasores de tensão e corrente na técnica *Ladder*.

Para a definição das matrizes de impedância dos componentes série, considere o modelo generalizado apresentado na Figura D. 1 (KERSTING, 2002).

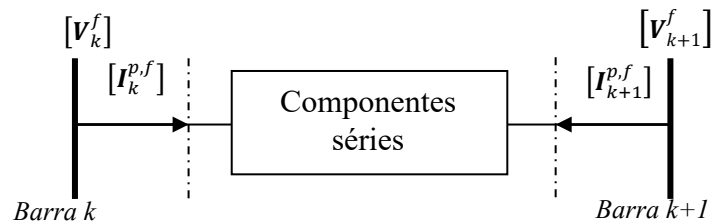


Figura D. 1 Modelo para componentes séries em redes de distribuição

As expressões que relacionam os fasores de tensão e corrente nas barras local (barra k) e remota (barra $k+1$) utilizadas na técnica *Ladder* são dadas por (D. 1), (D. 2) e (D. 3) (KERSTING, 2002).

$$[\mathbf{V}_k^f] = [\mathbf{a}] \cdot [\mathbf{V}_{k+1}^f] + [\mathbf{b}] \cdot [\mathbf{I}_{k+1}^f] \quad (\text{D. 1})$$

$$[\mathbf{I}_k^f] = [\mathbf{c}] \cdot [\mathbf{V}_{k+1}^f] + [\mathbf{d}] \cdot [\mathbf{I}_{k+1}^f] \quad (\text{D. 2})$$

$$\mathbf{V}_{k+1}^f = [\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{V}_k^f] - [\mathbf{B}] \cdot [\mathbf{I}_{k+1}^f] \quad (\text{D. 3})$$

A partir do anterior, definam-se as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{c} e \mathbf{d} para cada componente série utilizado na técnica *Ladder* proposta nesta tese.

D.1.1. Linhas de distribuição

Considera-se o modelo exato de uma linha de distribuição apresentado na Figura D. 2.

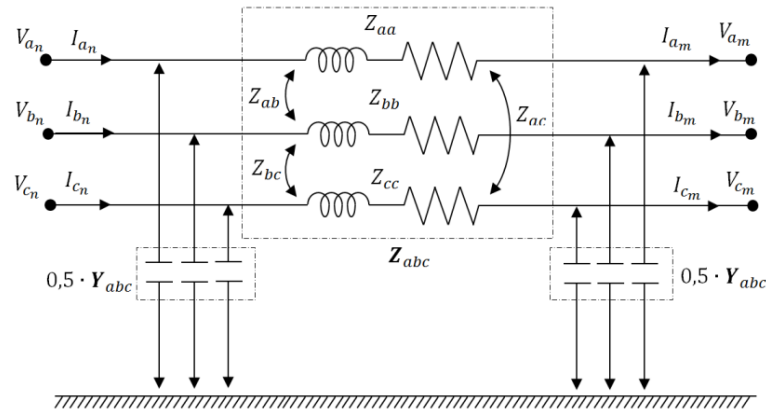


Figura D. 2 Modelo exato de uma linha de distribuição de energia elétrica, (KERSTING, 2002)

As matrizes de impedância $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}$ e \mathbf{A} e \mathbf{B} para o modelo generalizado de componentes séries são definidas pelas expressões (D. 4) até (D. 9).

$$[\mathbf{a}] = [\mathbf{U}] + \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{Z}_{abc}] \cdot [\mathbf{Y}_{abc}] \quad (\text{D. 4})$$

$$[\mathbf{b}] = [\mathbf{Z}_{abc}] \quad (\text{D. 5})$$

$$[\mathbf{c}] = [\mathbf{Y}_{abc}] + \frac{1}{4} \cdot [\mathbf{Y}_{abc}] \cdot [\mathbf{Z}_{abc}] \cdot [\mathbf{Y}_{abc}] \quad (\text{D. 6})$$

$$[\mathbf{d}] = [\mathbf{U}] + \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{Z}_{abc}] \cdot [\mathbf{Y}_{abc}] \quad (\text{D. 7})$$

$$[\mathbf{A}] = [\mathbf{a}]^{-1} \quad (\text{D. 8})$$

$$[\mathbf{B}] = [\mathbf{a}]^{-1} \cdot [\mathbf{b}] \quad (\text{D. 9})$$

Onde,

$$[\mathbf{U}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 10})$$

E, \mathbf{Z}_{abc} é a matriz de impedância da linha e \mathbf{Y}_{abc} a matriz de admitância shunt da linha de distribuição.

D.1.2. Transformadores

Diferentes tipos de transformadores são utilizados em sistemas de distribuição. Nesta seção é apresentado o modelo generalizado de um transformador com conexão delta estrela-aterrada. Considera-se o modelo generalizado apresentado na Figura D. 3(KERSTING, 2002).

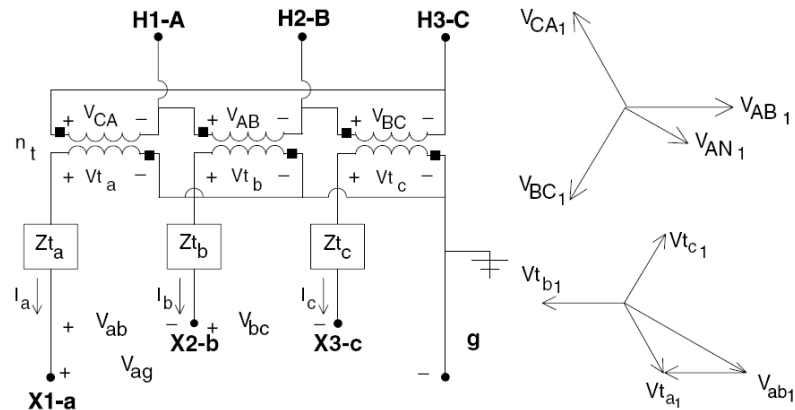


Figura D. 3 Modelo generalizado de um transformador com conexão delta estrela-aterrada (KERSTING, 2002)

As matrizes de impedância \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , \mathbf{d} e \mathbf{A} e \mathbf{B} para o modelo generalizado de componentes série, são definidas pelas expressões (D. 11) até (D. 16).

$$[\mathbf{a}] = \frac{-n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 11})$$

$$[\mathbf{b}] = \frac{-n_t}{3} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 2 \cdot Z_{t_b} & Z_{t_c} \\ Z_{t_a} & 0 & 2 \cdot Z_{t_c} \\ 2 \cdot Z_{t_a} & Z_{t_b} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 12})$$

$$[\mathbf{d}] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 13})$$

$$[\mathbf{c}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 14})$$

$$[\mathbf{A}] = \frac{1}{n_t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D. 15})$$

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix} \quad (\text{D. 16})$$

Onde,

$$n_t = \frac{V_{LL\text{lado primário}}}{V_{LN\text{lado secundário}}} \quad (\text{D. 17})$$

E, n_t é a relação de transformação do transformador, $V_{LL\text{lado primário}}$ a tensão linha-linha no lado primário e $V_{LN\text{lado secundário}}$ é a tensão de fase no lado secundário do transformador. Do mesmo modo, Zt_i é definida como a impedância da fase i no lado secundário do transformador (KERSTING, 2002).

D.2. COMPONENTES SHUNTS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Esta seção apresenta as matrizes de admitância para os componentes shunts dos sistemas de distribuição utilizados pela técnica *Ladder*. Estes componentes são definidos principalmente por cargas e bancos de capacitores. Uma análise generalizada para estes componentes pode ser feito se são consideradas suas diferentes tipos de conexão: delta e estrela.

D.2.1. Conexão estrela

Considere um componente shunt conectado em estrela como se apresenta na Figura D.

4.

Usando a lei tensões e de correntes de Kirchhoff, uma expressão que define as correntes de fase em função das suas tensões pode ser obtida como se apresenta em (D. 18)

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & 0 & 0 \\ 0 & Y_B & 0 \\ 0 & 0 & Y_C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (\text{D. 18})$$

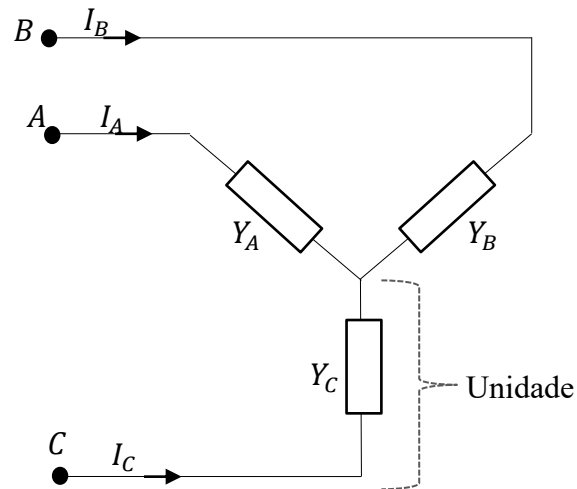


Figura D. 4 Componente shunt conectado em estrela

D.2.2. Conexão delta

Considere um componente shunt conectado em delta como se apresenta na Figura D. 5.

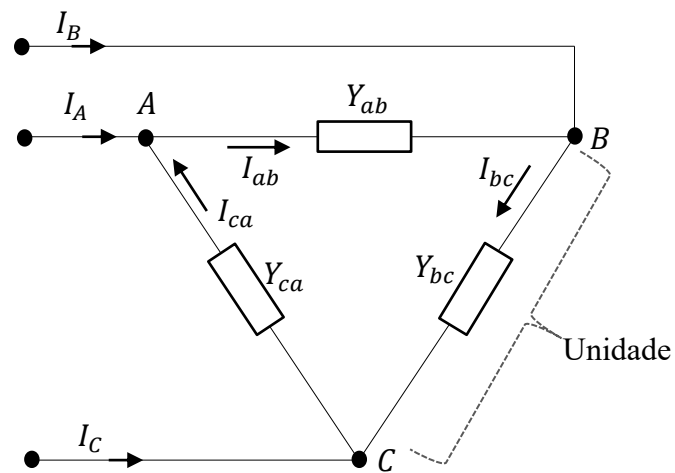


Figura D. 5 Componente shunt conectado em delta

Utilizando a lei de correntes de Kirchhoff podem ser obtidas expressões que definem as correntes I_A, I_B e I_C em função das tensões de fase como se mostra de (D. 19) a (D. 21)

$$I_A = I_{ab} - I_{ca} = Y_{ab} \cdot (V_a - V_b) - Y_{ca} \cdot (V_c - V_a) \quad (\text{D. 19})$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab} = Y_{bc} \cdot (V_b - V_c) - Y_{ab} \cdot (V_a - V_b) \quad (\text{D. 20})$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc} = Y_{ca} \cdot (V_c - V_a) - Y_{bc} \cdot (V_b - V_c) \quad (\text{D. 21})$$

Fazendo manipulações algébricas, as expressões (D. 19) até (D. 21) podem ser expressadas de forma matricial como em (D. 22).

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ab} + Y_{ca} & -Y_{ab} & -Y_{ca} \\ -Y_{ab} & Y_{bc} + Y_{ab} & -Y_{bc} \\ -Y_{ca} & -Y_{bc} & Y_{ca} + Y_{bc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (\text{D. 22})$$

Assim, as expressões (D. 18) e (D. 22) representam uma relação direta entre as correntes de fase dos componentes shunts e suas tensões. A única mudança apresentada nestas duas equações com relação aos diferentes componentes shunts é no cálculo das admitâncias. Na continuação apresenta-se o cálculo das admitâncias para alguns componentes shunts como bancos de capacitores e cargas (KERSTING, 2002).

D.2.3. Bancos de capacitores

A estimação da admitância (neste caso, susceptância) do capacitor, é realizada em função da potência reativa de cada unidade e sua tensão como é dado em (D. 23)

$$Y_{C_i} = \frac{Q_i}{V_i^2 \cdot 1000} \quad (\text{D. 23})$$

Onde Q_i é a potência reativa da unidade em kVAR e V_i é a tensão da unidade em kV, sendo uma tensão linha-linha para bancos de capacitores conectados em delta e uma tensão de fase para bancos conectados em estrela.

D.2.4. Cargas

A estimação da admitância da carga é realizada em função da potência aparente de cada unidade e sua tensão como é dado em (D. 24)

$$Y_{L_i} = \frac{S_i^*}{V_i^2} \quad (\text{D. 24})$$

Onde, S_i^* é o conjugado da potência aparente da unidade em VA e V_i é o módulo de tensão da unidade em V, sendo uma tensão linha-linha para cargas conectadas em delta e uma tensão de fase para cargas conectadas em estrela (KERSTING, 2002).