

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

JOSÉ UBIRAJARA NÚÑEZ DE NUNES

**LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM ALIMENTADORES
PRIMÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA COM A PRESENÇA DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Porto Alegre

2010

JOSÉ UBIRAJARA NÚÑEZ DE NUNES

**LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM ALIMENTADORES
PRIMÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA COM A PRESENÇA DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2010

JOSÉ UBIRAJARA NÚÑEZ DE NUNES

**LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM ALIMENTADORES
PRIMÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA COM A PRESENÇA DA
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

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

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virgínia Polytechnic Institute and State University – EUA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Telló, PUCRS

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

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Novembro de 2010.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida filha, Mariana da Rosa Nunes, que, ofereceu-me carinho, amor e sorrisos, encorajando-me a superar todos os desafios.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Paulo Nunes e Jarisa Nunes, pelo carinho, apoio e incentivo oferecidos ao longo de toda a minha vida. Sem os seus ensinamentos e exemplos tenho a absoluta certeza que não seria o que sou hoje.

À minha esposa e companheira, Janícia da Rosa Nunes, que sempre me incentivou a seguir em frente, compartilhando alegrias e frustrações, apoiando-me incondicionalmente diante das dificuldades.

Ao meu irmão, Rodrigo Nunes, pela amizade de todos esses anos, pelo exemplo de caráter e perseverança.

Em especial, à minha avó “Gija” (*In memoriam*), com quem compartilhei muitos momentos alegres da minha vida.

Aos meus tios, Valdir e Elbinha, pelo apoio, incentivo e amizade para comigo e, pelo suporte oferecido nos últimos anos.

Ao Prof. Arturo Suman Bretas pela excelente orientação, pelo grande apoio ao longo do deste projeto, pela amizade e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos colegas do LASEP, por todo o auxílio, incentivo e compreensão durante a execução deste trabalho: Renato Ferraz, Roberto José Cabral, Martin Cruz Paz, Diogo de Oliveira, Mário Orlando Oliveira, Felipe Hernandez, Roberto Chouhy Leborgne, Mariana Resener e Denize Marzec. Ao colega Rodrigo Salim, um agradecimento especial pelas dicas e sugestões que contribuíram valiosamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS, pela oportunidade e suporte fornecidos, bem como professores que foram responsáveis por grande parte do conhecimento adquirido ao longo do curso, em especial ao Prof. Roberto Petry Homrich.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que através de seus inestimáveis esforços viabilizam a realização de trabalhos de pesquisa, em especial o funcionário José Roberto Farias e a secretária Miriam de Oliveira Rosek.

Aos colegas do Instituto Federal Sul-rio-grandense: Ulisses Lyra, Vitor Paniz, Rogério Guimarães, Jonathas Quincoses, Eliane Lamas, Raul Amaral, Pedro Marques, Edson Cunha, pela amizade e incentivo na etapa inicial deste curso de mestrado. Aos colegas Lúcio Hecktheuer, Mário Boéssio e Mauro Cunha, por viabilizarem a realização deste projeto.

A todos os amigos e familiares que não foram citados, mas que de certa forma me incentivaram ou torceram para que eu atingisse os meus objetivos.

Finalmente, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido, sem o qual seria impossível realizar este trabalho.

RESUMO

A automatização dos sistemas de distribuição de energia e a integração de energias renováveis são duas importantes iniciativas atuais em sistemas elétricos de potência. A redução no impacto ambiental e o baixo custo comparado às grandes plantas convencionais são fatores que motivam a conexão da geração distribuída nos sistemas de distribuição. Apesar dos benefícios ambientais e econômicos obtidos com esta nova tecnologia, esta pode influenciar na operação do sistema, conduzindo a impactos técnicos que devem ser identificados. O impacto mais visível encontra-se na alteração do fluxo de potência. O alto nível de geração distribuída altera a natureza das redes de distribuição, de redes passivas, com um único sentido de fluxo de potência, para redes ativas, onde a potência flui em vários sentidos. Por consequência, a magnitude e a direção das correntes de falta no sistema também são modificadas. Este fato requer um ajuste dos sistemas de proteção, os quais são geralmente concebidos para operar em uma rede puramente passiva. Diversas abordagens sobre localização de faltas fundamentadas na impedância para sistemas radiais foram apresentadas em anos recentes na literatura. Estas técnicas apresentam limitações quando aplicadas a sistemas de distribuição com a presença da geração distribuída. Algumas técnicas de localização de faltas fundamentadas na impedância de seqüência positiva foram recentemente desenvolvidas a fim de incluir a presença da geração distribuída. No entanto, os sistemas de distribuição são inerentemente desequilibrados e esta característica diminui a exatidão das técnicas baseadas nas componentes modais ou de seqüência. Motivado por estes fatos, o presente trabalho ilustra os desenvolvimentos propostos em uma metodologia de localização de faltas baseada na impedância aparente utilizando a representação do sistema por coordenadas de fase. O algoritmo propõe um modelo ativo do sistema caso a falta ocorra a montante da geração distribuída, estimando a contribuição de corrente da extremidade remota da seção faltosa. Além disso, este trabalho fundamenta-se na análise pré-falta do sistema, utilizada para a determinação das impedâncias equivalentes e para a estimativa da tensão interna da máquina. O método considera a tensão interna da máquina constante entre os períodos pré-falta e durante a falta, a fim de estimar a corrente de falta do gerador, possibilitando a atualização correta das tensões e correntes faltosas do sistema. A análise numérica é realizada através de simulações computacionais em um alimentador teste sem a presença de ramificações laterais sob diferentes níveis de geração distribuída. Os resultados são comparados com técnicas atuais que compõem o estado da arte de localização de faltas a fim de avaliar o impacto da geração distribuída nas referidas metodologias. Com base nesses resultados é possível apresentar algumas melhorias obtidas através das extensões propostas.

Palavras-chaves: Localização de faltas, impedância aparente, geração distribuída, sistemas de distribuição de energia, sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

The automation for power distribution systems and integration of renewable energy are two important current initiatives on electric power systems. The reduction in environmental impact and low cost compared to large conventional plants are factors that motivate the connection of distributed generation in distribution systems. Despite the environmental and economic benefits obtained with this new technology, this can affect the system operation, leading to technical impacts to be identified. The most visible impact is the change in the power flow. The high level of distributed generation changes the nature of distribution networks, from passive networks with a single direction of power flow, for active networks, where power flows in various directions. Consequently, the magnitude and direction of fault currents in the system are also modified. This requires an adjustment of the protection systems, which are generally designed to operate in a purely passive network. Several approaches to fault location based on impedance to radial systems were reported in the literature. These techniques have limitations when applied to distributed generation systems. Some recent positive-sequence impedance based fault location algorithms have been developed to consider the presence of distributed generation. However, the distribution systems are inherently unbalanced and this reduces the accuracy of modal or sequence components based techniques. Motivated by these, this presents proposed developments on a apparent impedance-based fault location methodology using the system representation by phase coordinates. The algorithm proposes an active system model if the failure occurs forward to the distributed generation, estimating the contribution of current from the remote end section of the fault. Moreover, this work is based on analysis of the pre-fault system, used to determine the equivalent impedances and to estimate the machine internal voltage. The method treats the machine internal voltage as constant between the pre and the fault period, in order to estimate the fault current infeed by generator. Numerical analysis is carried out through computer simulations on a test feeder without the presence of ramifications at different levels of distributed generation. The results are compared with current techniques that make up the state of the art of fault location in order to assess the impact of distributed generation in these methodologies. Based on these results it is possible to make some improvements resulting from the proposed extensions.

Keywords: Fault location, apparent impedance, distributed generation, power distribution systems, electric power systems.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.2 PROPOSTA.....	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	17
2.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS	18
2.1.1 Método de Lee <i>et al.</i> (2004)	19
2.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	22
2.2.1 Método de Penkov <i>et al.</i> (2005).....	23
2.2.2 Método de Bretas <i>et al.</i> (2006)	26
2.2.3 Método de El-Fouly <i>et al.</i> (2009).....	30
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
3 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	
PROPOSTA	33
3.1 MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	34
3.1.1 Modelo das Linhas de Distribuição.....	34
3.1.2 Modelo das Cargas.....	35
3.1.3 Modelo da Geração Distribuída	36
3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	37
3.2.1 Falta Fase-Terra	38
3.2.2 Falta Trifásica	40
3.2.3 Algoritmo Iterativo Proposto	41
3.2.4 Atualização das Tensões e das Correntes Trifásicas.....	43
3.3 ANÁLISE PRÉ-FALTA	45
3.3.1 Sistema Equivalente de Thévenin	45
3.3.2 Estimativa da Tensão Interna da Máquina Síncrona.....	49
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
4 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	52
4.1 ESTUDO DE CASO.....	52
4.1.1 Sistema Teste	52
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	57
4.3 RESULTADOS DO MÉTODO DE LEE <i>ET AL.</i> (2004)	57
4.3.1 Influência da Potência da Geração Distribuída.....	58
4.3.2 Influência da Distância da Falta.....	58
4.3.3 Influência da Resistência de Falta.....	58

4.3.4	Influência do Tipo de Falta.....	59
4.3.5	Análise Geral	59
4.4	RESULTADOS DO MÉTODO DE BRETAS <i>ET AL.</i> (2006)	62
4.4.1	Influência da Potência da Geração Distribuída.....	62
4.4.2	Influência da Distância da Falta.....	62
4.4.3	Influência da Resistência da Falta.....	62
4.4.4	Análise Geral	63
4.5	RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO.....	65
4.5.1	Influência da Potência da Geração Distribuída.....	65
4.5.2	Influência da Distância da Falta.....	65
4.5.3	Influência da Resistência da Falta.....	65
4.5.4	Influência do Tipo de Falta.....	66
4.5.5	Análise Geral	66
4.6	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	68
5	CONCLUSÕES.....	72
5.1	TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	ANEXO A – ESTIMAÇÃO FASORIAL.....	79

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Exemplo de um sistema de potência (SERRA et al., 2005).	13
Figura 2.1: Sistema de distribuição convencional (HOROWITZ; PHADKE, 2008).....	18
Figura 2.2: Alimentador de distribuição simplificado (LEE et al., 2004).....	19
Figura 2.3: Atualização das tensões e correntes no terminal local (LEE et al., 2004). ..	22
Figura 2.4: Representação das componentes simétricas de um gerador síncrono ideal (PENKOV et al., 2005).	23
Figura 2.5: Estrutura real de geradores distribuídos (PENKOV et al., 2005).....	23
Figura 2.6: Sistema de distribuição com a geração distribuída representado por sua rede de seqüência positiva (PENKOV et al., 2005).....	24
Figura 2.7: Sistema de distribuição com a geração distribuída (BRETAS et al., 2006). 27	
Figura 2.8: Circuitos equivalentes de um sistema faltoso com a presença da geração distribuída.	27
Figura 2.9: Modelo elétrico da geração distribuída (KUNDUR, 1994).....	29
Figura 2.10: Sistema de distribuição de energia em falta.	31
Figura 3.1: Diagrama em blocos do método de localização de faltas proposto.	33
Figura 3.2: Modelo de linha RL.	34
Figura 3.3: Condutores e suas imagens.....	35
Figura 3.4: Modelo elétrico da geração distribuída para sistemas trifásicos.	36
Figura 3.5: Falta fase-terra na fase <i>a</i>	39
Figura 3.6: Falta trifásica.	41
Figura 3.7: Sistema de distribuição com a presença da geração distribuída.	41
Figura 3.8: Circuitos equivalentes de Thévenin para o sistema da Figura 3.7.....	41
Figura 3.9: Diagrama de fluxo do algoritmo para atualização da corrente de falta.	43
Figura 3.10: Algoritmo de atualização das tensões e das correntes trifásicas.....	44
Figura 3.11: Exemplo de sistema de distribuição de energia com a presença da geração distribuída.	46
Figura 3.12: Sistema equivalente Thévenin.	46
Figura 3.13: Determinação da impedância equivalente de Thévenin.	47
Figura 3.14: Determinação da tensão equivalente de Thévenin.....	48
Figura 3.15: Algoritmo simplificado para determinação do sistema equivalente de Thévenin.	48
Figura 3.16: Sistema de distribuição com a presença da geração distribuída no período pré-falta.....	49
Figura 3.17: Correntes trifásicas na barra do gerador.....	50
Figura 4.1: Alimentador de distribuição teste.	52
Figura 4.2: Configuração das linhas de distribuição.....	53
Figura 4.3: Resultados do Método de Lee <i>et al.</i> (2004) para faltas A-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição I.	61
Figura 4.4: Resultados do Método de Lee <i>et al.</i> (2004) para faltas A-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição II.	61

Figura 4.5: Resultados do Método de Bretas <i>et al.</i> (2006) para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição I.....	64
Figura 4.6: Resultados do Método de Bretas <i>et al.</i> (2006) para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição II.....	64
Figura 4.7: Resultados do Método Proposto para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição I.....	68
Figura 4.8: Resultados do Método Proposto para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição II.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Espaçamentos dos condutores.....	53
Tabela 4.2: Comprimento das seções de linha e tipo de condutor.	53
Tabela 4.3: Especificações do condutor 447,000 26/7 ACSR.	54
Tabela 4.4: Dados das cargas do alimentador teste.	54
Tabela 4.5: Resultados do fluxo de potência baseado no método ladder.	55
Tabela 4.6: Tensões de seqüência positiva no terminal da geração distribuída.	56
Tabela 4.7: Parâmetros da máquina síncrona.	56
Tabela 4.8: Condições de Simulação para Análise de Dados.	57
Tabela 4.9: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o Método de Lee <i>et al.</i> (2004) – Condição I.....	59
Tabela 4.10: Erros percentuais em função da distância da falta com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o Método de Lee <i>et al.</i> (2004) – Condição I.	60
Tabela 4.11: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o Método de Lee <i>et al.</i> (2004) – Condição II.	60
Tabela 4.12: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o Método de Lee <i>et al.</i> (2004) – Condição II.	60
Tabela 4.13: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método de Bretas <i>et al.</i> (2006) – Condição I.....	63
Tabela 4.14: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método de Bretas <i>et al.</i> (2006) – Condição I.....	63
Tabela 4.15: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método de Bretas <i>et al.</i> (2006) – Condição II.....	63
Tabela 4.16: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método de Bretas <i>et al.</i> (2006) – Condição II.	64
Tabela 4.17: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método Proposto – Condição I.....	66
Tabela 4.18: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método Proposto – Condição I.....	66
Tabela 4.19: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método Proposto – Condição II.	67
Tabela 4.20: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método Proposto – Condição II.	67
Tabela 4.21: Análise comparativa dos resultados obtidos com as três metodologias – Condição I.....	69
Tabela 4.22: Análise comparativa dos resultados obtidos com as três metodologias – Condição II.	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ABC-g	falta entre as fases A, B, C e a terra
A-g	falta entre a fase A e a terra
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
B-g	falta entre a fase B e a terra
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
CC	corrente contínua
C-g	falta entre a fase C e a terra
DFT	transformada discreta de Fourier
EDFT	transformada discreta de Fourier estendida
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
GD	geração distribuída
GTDE	geração, transmissão e distribuição de energia
LDF	localização de faltas
RNA	rede neural artificial
SDE	sistema(s) de distribuição de energia
SEP	sistema(s) elétrico(s) de potência

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) operados de forma centralizada são constituídos basicamente por três componentes: a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica (GTDE), seguindo a estrutura da Figura 1.1, obtida de (SERRA; FURTADO; SOARES; NETO, 2005). Neste modelo, as grandes centrais elétricas responsáveis por gerar uma grande quantidade de energia são conectadas às subestações elevadoras, capazes de elevar os níveis de tensão para que a energia seja transmitida. A transmissão por sua vez, é responsável pelo transporte da energia por grandes distâncias até chegar aos centros consumidores, onde esta é rebaixada por meio de subestações rebaixadoras à níveis de tensão adequados a distribuição. Nesse modelo, o fluxo de potência num sistema de distribuição de energia (SDE) é unidirecional, fluindo sempre da subestação em direção as cargas do sistema. Por esse motivo os SDE tradicionais são considerados radiais, em contraposição aos sistemas de transmissão, em que o fluxo de potência flui em vários sentidos.

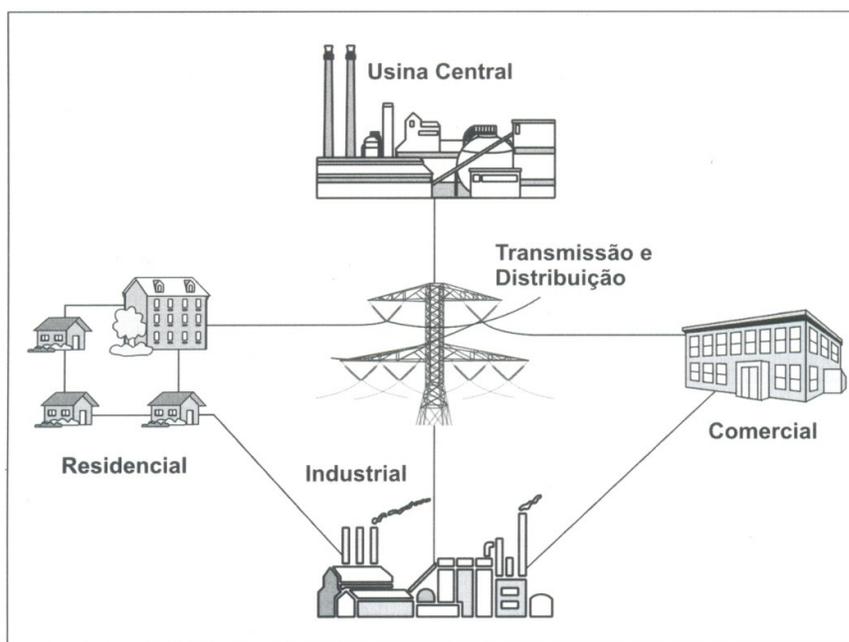


Figura 1.1: Exemplo de um sistema de potência (SERRA et al., 2005).

Com as modificações ocorridas nos mercados regulatórios de GTDE, tem surgido nos últimos anos um considerável interesse em conectar a geração diretamente à rede de distribuição (ACKERMAN; ANDERSSON; SÖDER, 2001; SERRA; FURTADO; SOARES; NETO, 2005). Esta nova forma de gerar energia é chamada de geração distribuída (GD), termo utilizado para distingui-la da geração centralizada (ACKERMAN; ANDERSSON; SÖDER, 2001). Este interesse depende da necessidade de energia em cada país e tende a aumentar na medida em que cresce a busca por: eficiência energética; redução da emissão de gases poluentes e; diversificação de fontes energéticas.

Na literatura são encontradas várias definições para a geração distribuída (ACKERMAN et al., 2001; CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2008; ELECTRICAL POWER RESEARCH INSTITUTE, 1999), as quais, de um modo geral estão vinculadas aos níveis de

energia que a unidade geradora pode fornecer ou quanto à sua forma de conexão na rede, entretanto não existe uma definição padronizada para tal.

No Brasil, a geração distribuída é definida como a geração de energia elétrica conectada diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, conforme a ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2009). Esta será a definição adotada no presente trabalho.

Devido à reestruturação e a desregulamentação do setor elétrico, a indústria da energia está passando por mudanças tecnológicas e regulatórias que podem influenciar na operação e na prestação de serviços para os consumidores entre outros (BRETAS et al., 2006; LONDERO; AFFONSO; NUNES, 2009).

Sistemas elétricos de potência estão constantemente expostos a faltas, que afetam a confiabilidade, a segurança e a capacidade de fornecer energia elétrica. Esquemas de proteção são importantes para manter a estabilidade do sistema e minimizar os danos às redes e aos consumidores (SALIM et al., 2009).

No Brasil, as concessionárias de energia são penalizadas caso apresentem baixos índices de continuidade no fornecimento de energia elétrica para os consumidores. Esses indicadores são mensurados através da frequência e da duração das interrupções, e são regulamentados pela ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000). Dentro desse contexto, a localização da falta (LDF) representa um aspecto importante, auxiliando no restabelecimento rápido e seguro dos sistemas elétricos de potência em geral (LEE et al., 2004; SALIM et al., 2009).

Durante anos, equipes de manutenção realizaram o procedimento de localização de faltas (LDF) em linhas aéreas de distribuição através de inspeção visual ao longo de todo o comprimento da linha (SALIM, 2008). Outras técnicas utilizadas são baseadas no método da força bruta, que inclui: restauração através de chaveamento, telefonemas de consumidores e odor de queimado dos condutores (SALIM, 2008). Com o avanço da pesquisa e da utilização da tecnologia digital nas subestações, tornou-se possível desenvolver métodos automatizados de localização de faltas em SDE para auxiliar as equipes de manutenção.

A GD nos últimos anos mostrou ser para a indústria, uma eficiente e econômica ferramenta de ampliação da potência disponível, sem os elevados custos de ampliação dos SDE. Tendo principalmente uma grande flexibilidade de combustível e baixo impacto ambiental (KHUSHALANI; SOLANKI; SCHULZ, 2007). Entretanto, a grande penetração da GD fez com que a natureza dos SDE mudasse de redes passivas (Tradicionais), com um único sentido do fluxo da potência, para redes ativas, onde a potência pode ter mais de um sentido de fluxo (MOGHADDAS-TAFRESHI; MASHHOUR, 2009).

Uma grande variedade de métodos de localização de faltas têm sido estudada pela comunidade científica, visando à aplicação em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Entre as diferentes técnicas propostas, destacam-se as metodologias baseadas no cálculo da impedância aparente, ondas viajantes e da aplicação de técnicas de inteligência artificial, como Redes Neurais Artificiais (RNA) (FILOMENA, 2008).

Os métodos fundamentados na impedância aparente são especialmente atrativos pelo baixo custo de construção, especialmente as técnicas que utilizam medições em apenas um único terminal do sistema (SAHA et al., 2002). Nestes métodos são analisadas medidas de tensão e corrente somente na frequência fundamental e em um ponto do sistema, não exigindo complexos sistemas de comunicação para a agregação de medições remotas, equipamentos de medição em altas frequências ou ainda computadores digitais com alta capacidade de processamento (SALIM, 2008). Não obstante, os métodos que compõem o estado da arte de LDF baseados na impedância desenvolvidos para SDE consideram os sistemas radiais, não levando em consideração o efeito que a GD pode introduzir na exatidão dos resultados (ZHU et al.,

1997; LEE et al., 2004; CHOI et al., 2004; 2007; SALIM et al., 2009). A automatização avançada dos SDE e a integração da GD são duas importantes iniciativas atuais dos SEP. Para tanto, o estudo e o desenvolvimento de novas técnicas de LDF é uma etapa fundamental para a compatibilização destas duas importantes iniciativas.

1.1 OBJETIVOS

Diante da problemática da LDF para SDE com a presença da GD exposta anteriormente, o presente trabalho propõe o estudo e o desenvolvimento de uma nova formulação matemática, apresentando os seguintes objetivos:

- Desenvolver analiticamente e construir numericamente uma nova formulação de LDF para SDE desbalanceados com a presença da geração distribuída no ambiente Matlab (MATLAB, 2007);
- Avaliar o desempenho da metodologia proposta através de comparações frente a metodologias que constituem o estado da arte, a partir de simulações realizadas em um sistema de potência no software ATP/EMTP (Bonneville Power Administration);
- Analisar detalhadamente os impactos causados pela presença da geração distribuída em cada um dos algoritmos de LDF testados.

1.2 PROPOSTA

Esta dissertação tem como foco central o estudo sobre LDF em SDE com a presença da GD. A formulação proposta baseia-se no cálculo da impedância aparente através das componentes fundamentais de tensão e de corrente medidas em um terminal de dados, a subestação. O método de LDF proposto é inspirado no trabalho apresentado por Bretas *et al.* (2006). Este trabalho utiliza um algoritmo iterativo, semelhante ao apresentado em Lee *et al.* (2004), para a atualização da corrente de falta. Entretanto, alguns aspectos diferem as referidas técnicas. O primeiro aspecto está relacionado a representação do sistema. Embora o trabalho de Bretas *et al.* (2006) tenha sido apresentado para sistemas de distribuição, este apresenta a limitação de ser fundamentado na impedância aparente de seqüência positiva. O método das componentes de seqüência é comumente empregado para a análise de sistemas de transmissão de energia, que operam de forma equilibrada. Entretanto, a utilização desta técnica para a modelagem de SDE pode aumentar a imprecisão das metodologias de LDF, em virtude da configuração assimétrica inerente a este tipo de sistema. O outro aspecto, diz respeito a determinação do sistema equivalente a jusante da falta. Neste caso, o trabalho de Bretas *et al.* (2006) sugere a modelagem dos sistemas a jusante da falta de forma ativa. Este desenvolvimento representa um avanço em relação ao método de Lee *et al.* (2004) e as demais técnicas que compõe o estado da arte sobre assunto, que consideram os SDE tipicamente radiais. Motivado por estes fatos, a formulação proposta estende o trabalho de Bretas *et al.* (2006) para sistemas trifásicos desbalanceados, utilizando para tanto a representação destes por coordenadas de fase. O método de LDF proposto é baseado na análise pré-falta do sistema, a fim de obter os circuitos equivalentes vistos de cada nó do alimentador.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado está estruturada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as metodologias que compõe os estado da arte de LDF baseadas na impedância para SDE;

- No Capítulo 3 são apresentados todos os aspectos referentes à formulação matemática desenvolvida para LDF em SDE considerando a presença da GD;
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com a metodologia proposta, bem como, os resultados obtidos através das metodologias que compõem o estado da arte de LDF para SDE. A avaliação do desempenho é realizada através de uma análise comparativa entre as referidas técnicas, sob diferentes níveis de geração distribuída;
- No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e as sugestões de trabalhos futuros.

2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

As linhas aéreas de transmissão e de distribuição de energia são essenciais para a continuidade no fornecimento de energia elétrica desde as unidades geradoras até os grandes centros consumidores. A constante exposição ao meio ambiente e as suas condições climáticas aumenta a vulnerabilidade das linhas a eventuais falhas, podendo interromper o processo de fornecimento de energia. Dentre os eventos que podem ocasionar algum tipo de distúrbio nos sistemas estão: as variações bruscas de carga, as manobras na rede, os contatos indevidos de seres, objetos ou vegetações nas linhas energizadas entre outros (ZHU et al., 1997; LEE et al., 2004; SALIM et al., 2009). Entretanto, as principais causas de falhas em SEP são as descargas atmosféricas (FILOMENA, 2008). Considerando que falhas em SEP são eventos estocásticos, é necessário adotar medidas corretivas para que o defeito não se propague para outros pontos do sistema.

Com o objetivo de proteger os SEP, os equipamentos de proteção (relés e disjuntores) são instalados nas extremidades das linhas para detectar faltas através da identificação de condições anormais de operação. Sendo assim, os relés devem ser capazes de avaliar uma infinidade de parâmetros para estabelecer que ação corretiva é necessária (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Os parâmetros mais comuns que refletem a presença de uma falta num SEP são as tensões e as correntes obtidas de um ou mais terminais de uma linha de transmissão ou de distribuição de energia. A partir destes parâmetros, o relé digital deve eliminar o defeito do sistema quando for necessário, abrindo o disjuntor no terminal da linha afetada, isolando-a do restante do sistema. Tal ação impede que o incidente tome proporções maiores.

Todavia, a adoção de medidas corretivas nos alimentadores implica na interrupção do fornecimento de energia elétrica a um grupo de consumidores. Tendo em vista este inconveniente, os relés digitais são projetados para incluir outras funções, que vão além da proteção do sistema frente a possíveis falhas, dentre elas: o religamento automático e a localização de faltas nos sistemas (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Em caso de faltas temporárias, a função de religamento, incluída na lógica do relé permite o restabelecimento da energia no sistema após a ocorrência de um distúrbio. Entretanto, em caso de faltas permanentes, não é possível realizar o restabelecimento automático. Neste caso, o relé digital através de sua função de localização de faltas deve estimar a posição de ocorrência da falta, possibilitando que as equipes de manutenção possam fazer o reparo com maior rapidez.

Diversas metodologias utilizando a tecnologia digital foram propostas para a LDF em linhas de transmissão e distribuição de energia (SALIM, 2008). Estas técnicas são em geral, baseadas na impedância aparente, estimada através de medições das tensões e das correntes trifásicas provenientes da subestação de energia, dos parâmetros das linhas e dos dados das cargas do sistema. A partir destes dados, é possível estimar uma impedância entre a extremidade local anterior a falta até o ponto de ocorrência desta, a qual serve de indicativo do local da falta. Contudo, as correntes provenientes dos alimentadores remotos e as resistências de falta podem ser fontes de erro nos algoritmos de localização de faltas baseados na impedância. Dentro deste contexto, uma metodologia baseada na impedância desenvolvida por (TAKAGI et al., 1981) para linhas de transmissão teve grande destaque entre as demais metodologias, pelo fato de ter sido uma das primeiras a utilizar o teorema da superposição para um sistema faltoso, decompondo-o em um sistema pré-falta e um sistema puramente faltoso. Nesta formulação, a impedância de falta é eliminada do equacionamento. Para tanto, o método considerou que as faltas eram puramente resistivas e que as linhas de transmissão eram puramente indutivas, desconsiderando as perdas de energia. Tal método foi apresentado inicialmente para

um sistema monofásico e em seguida generalizado para um sistema trifásico com as equações correspondentes para cada tipo de falta. Os referidos equacionamentos foram desenvolvidos baseados na técnica das componentes simétricas. Para a execução da metodologia de (TAKAGI et al., 1981) são necessários dados de tensão e de corrente na extremidade local, obtidos nos períodos pré e durante a falta. A formulação proposta faz o uso das equações de quadripolos das linhas. Com o propósito de desenvolver uma metodologia de localização de faltas para linhas curtas, (TAKAGI et al., 1982) realizaram algumas extensões em seu trabalho anterior. Dentre os trabalhos desenvolvidos até então, este trabalho pode ser considerado pioneiro no equacionamento de LDF para linhas com comprimento inferior a 100 km, assemelhando-se a um sistema de distribuição de energia. Os trabalhos de (TAKAGI et al., 1981; 1982) serviram de inspiração para a implementação de novas técnicas de localização de faltas para linhas de transmissão e de distribuição de energia. Vários autores basearam-se em seus trabalhos, tomando-os como referência para o desenvolvimento de novas técnicas e utilizando-os como um instrumento de comparação para a validação destas. Neste capítulo, serão abordados aspectos referentes à LDF em sistemas de distribuição com e sem a presença da geração distribuída.

2.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

Um sistema de distribuição de energia tradicional é constituído basicamente por uma fonte de energia com múltiplas cargas a jusante, conforme o esquema ilustrado na Figura 2.1, obtida de (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Esta estrutura compreende a parte do sistema de potência que começa a partir da subestação de energia e se estende até os consumidores finais. Cada subestação poderá suprir um ou mais alimentadores, sendo estes, constituídos na maioria dos casos por cargas intermediárias e ramificações laterais. Neste modelo, os alimentadores são radiais, havendo somente uma trajetória para o fluxo de potência, da subestação em direção ao usuário (KERSTING, 2007).

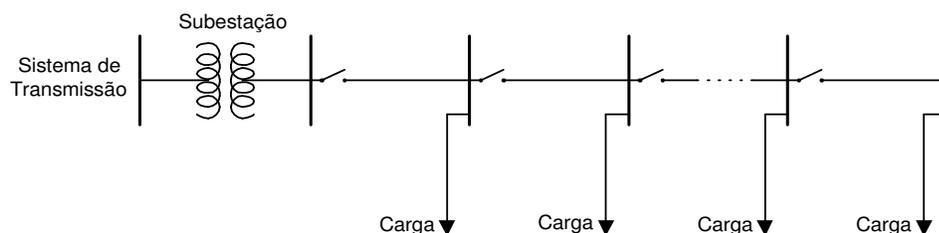


Figura 2.1: Sistema de distribuição convencional (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

As redes de distribuição são susceptíveis a faltas causadas por uma variedade de eventos, tais como: condições climáticas adversas, contatos de animais, falhas em equipamentos, acidentes entre outros (ZHU et al., 1997). Os esquemas de proteção são extremamente importantes para manter a estabilidade do sistema e minimizar os danos a rede e aos consumidores, assim como as perdas econômicas (SALIM et al., 2009). Deste modo, as técnicas de localização automática de faltas têm um papel importante na rapidez e na confiabilidade do processo de restabelecimento dos SEP. Entretanto, a LDF em SDE, devido às suas características construtivas e operacionais específicas apresenta alguns desafios (LEE et al., 2004). Muitas técnicas de LDF fundamentadas na impedância aparente para SDE foram desenvolvidas baseadas no método das componentes simétricas (TAKAGI et al., 1982; SRINIVASAN et al., 1989; NOVOSEL et al., 1995). A modelagem dos sistemas pelo método das componentes simétricas gera três redes de seqüência independentes entre si, no caso dos sistemas equilibrados, consis-

tindo numa poderosa ferramenta para a análise de circuitos. Contudo, esta não pode ser aplicada ao caso dos sistemas de distribuição, tendo em vista que a maioria destes são inerentemente desequilibrados, devido a topologia assimétrica de seus alimentadores e à presença das ramificações laterais e cargas intermediárias (CHOI et al., 2004). Devido às deficiências das metodologias de LDF mencionadas, novas pesquisas nesta área, baseadas na análise do circuito por coordenadas de fase foram realizadas. A metodologia publicada por (ZHU et al., 1997) destaca-se por ser uma das pioneiras no desenvolvimento da equação do local da falta e da modelagem das linhas através das coordenadas de fase. Neste trabalho é apresentado um processo iterativo para a estimativa da distância de faltas do tipo fase-terra. O equacionamento do local da falta tem como entrada de dados a corrente de falta, que é atualizada através de um algoritmo de fluxo de potência. Como o método considera as medições durante a falta disponíveis na extremidade local da seção faltosa e, estas estão disponíveis somente na subestação do sistema, uma análise direta de circuitos é realizada para determinar as tensões e as correntes na extremidade local de cada seção de linha potencialmente faltosa. Além disso, o método considera que o SDE é um sistema radial com muitas ramificações laterais conectadas no alimentador principal, de modo que podem ser obtidas múltiplas estimativas para o local da falta. Nesse caso, a redução de múltiplas estimativas a uma, é feita através do uso de um algoritmo de diagnóstico de faltas baseado nos dados obtidos dos dispositivos de proteção.

No método proposto por (LEE et al., 2004) para faltas fase-terra, é desenvolvido um algoritmo iterativo para a LDF semelhante ao apresentado por (ZHU et al. 1997), também utilizando a análise por coordenadas de fase. A principal diferença entre as duas metodologias encontra-se na atualização da corrente de falta, que neste caso, é feita através de associações série-paralelo entre as impedâncias das linhas e das cargas ao invés da análise através de um fluxo de potência.

Em (CHOI et al., 2004; 2007) é proposto um algoritmo com base na análise direta de circuitos para a localização de faltas do tipo fase-terra e fase-fase, respectivamente. Os referidos equacionamentos necessitam exclusivamente dos parâmetros de linha, das impedâncias das cargas e das tensões e correntes medidas no terminal local. Assim como nos métodos de (ZHU et al. 1997; LEE et al., 2004), este também é baseado nas coordenadas de fase, utilizando o mesmo procedimento de atualização das tensões e das correntes para cada seção de linha potencialmente faltosa.

A metodologia proposta por (LEE et al., 2004) será detalhada a seguir, tendo em vista que esta constitui a base para o estudo e proposição de uma metodologia estendida e será utilizada como instrumento de comparação com a formulação proposta no Capítulo 4.

2.1.1 Método de Lee et al. (2004)

A formulação matemática apresentada por (LEE et al., 2004) para a faltas fase-terra baseia-se no alimentador de distribuição ilustrado na Figura 2.2, onde todas as cargas a jusante da falta são representadas por uma carga equivalente Z_R , e a corrente total despachada por elas é I_{L_a} .

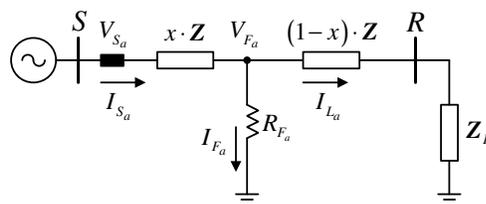


Figura 2.2: Alimentador de distribuição simplificado (LEE et al., 2004).

onde:

- V_{S_a} Tensão na fase a no terminal S ;
- I_{S_a} Corrente na fase a no terminal S ;
- V_{F_a} Tensão na fase a no ponto da falta;
- I_{F_a} Corrente de falta na fase a ;
- R_{F_a} Resistência de falta na fase a ;
- z_{aa} Impedância própria da fase a por unidade de comprimento;
- $z_{a(b,c)}$ Impedância mútua entre fases a e $b(c)$ por unidade de comprimento;
- \mathbf{Z}_r Matriz impedância equivalente de carga;
- \mathbf{Z} Matriz impedância de linha por unidade de comprimento;
- x Distância de falta em relação ao terminal S .

A tensão na fase a medida no terminal S pode ser obtida por (2.1):

$$V_{S_a} = x \cdot (z_{aa} \cdot I_{S_a} + z_{ab} \cdot I_{S_b} + z_{ac} \cdot I_{S_c}) + I_{F_a} \cdot R_{F_a} \quad (2.1)$$

A partir da decomposição da equação (2.1) em componentes reais e imaginárias, resulta num sistema de duas equações e duas incógnitas, sendo as incógnitas a distância e a resistência de falta, conforme (2.2)-(2.3):

$$V_{S_{a_r}} = x \cdot M + R_{F_a} \cdot I_{F_{a_r}} \quad (2.2)$$

$$V_{S_{a_i}} = x \cdot N + R_{F_a} \cdot I_{F_{a_i}} \quad (2.3)$$

As duas equações são colocadas sob a forma matricial conforme expresso em (2.4):

$$\begin{bmatrix} V_{S_{a_r}} \\ V_{S_{a_i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & I_{F_{a_r}} \\ N & I_{F_{a_i}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_{F_a} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

As estimativas da distância e da resistência de falta podem ser obtidas a partir das tensões e das correntes no terminal local S e dos parâmetros de linha conforme (2.5):

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{F_a} \end{bmatrix} = \frac{1}{M \cdot I_{F_{a_i}} - N \cdot I_{F_{a_r}}} \cdot \begin{bmatrix} I_{F_{a_i}} & -I_{F_{a_r}} \\ -N & M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{S_{a_r}} \\ V_{S_{a_i}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Como a variável de interesse é a distância da falta, esta pode ser obtida a partir de (2.5) conforme a equação (2.6):

$$x = \frac{V_{S_{a_r}} \cdot I_{F_{a_i}} - V_{S_{a_i}} \cdot I_{F_{a_r}}}{M \cdot I_{F_{a_i}} - N \cdot I_{F_{a_r}}} \quad (2.6)$$

onde os subscritos r e i representam respectivamente as componentes real e imaginária dos fasores tensão e corrente, e M e N representam as componentes real e imaginária dos parâmetros de linha, respectivamente, os quais são obtidos por (2.7)-(2.8):

$$M = z_{aa_r} \cdot I_{S_{a_r}} - z_{aa_i} \cdot I_{S_{a_i}} + z_{ab_i} \cdot I_{S_{b_r}} - z_{ab_r} \cdot I_{S_{b_i}} + z_{ac_r} \cdot I_{S_{a_r}} - z_{ac_i} \cdot I_{S_{c_i}} \quad (2.7)$$

$$N = z_{aa_r} \cdot I_{S_{a_i}} - z_{aa_i} \cdot I_{S_{a_r}} + z_{ab_r} \cdot I_{S_{b_i}} - z_{ab_i} \cdot I_{S_{b_r}} + z_{ac_r} \cdot I_{S_{c_i}} - z_{ac_i} \cdot I_{S_{c_r}} \quad (2.8)$$

A corrente de falta pode ser obtida através da diferença entre a corrente na fase a no terminal S e a corrente de carga, conforme (2.9):

$$I_{F_a} = I_{S_a} - I_{L_a} \quad (2.9)$$

A estimativa do local da falta é obtida a partir de um processo iterativo baseado na atualização da corrente de carga, descrito a seguir:

- I. Considera-se I_{L_a} a mesma corrente de carga pré-falta;
- II. A corrente de falta é determinada através da expressão (2.9);
- III. A distância de falta é estimada através de (2.6);
- IV. Calcula-se a tensão no ponto da falta usando (2.10):

$$\begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

- V. A partir da tensão no ponto da falta, calculada no passo anterior, estima-se a corrente de carga (I_{L_a}).
- VI. Com a corrente de carga atualizada, retorna-se ao passo II.

O método de (LEE et al., 2004) depende da estimativa da corrente de carga, conforme descrito no item V do algoritmo de localização de faltas. Para tanto, o autor considera a carga modelada como impedância constante caso a carga seja conhecida e a corrente de carga pode ser obtida por (2.11):

$$I_{L_a} = [Y_{L_{11}} \quad Y_{L_{12}} \quad Y_{L_{13}}] \cdot [V_{F_a} \quad V_{F_b} \quad V_{F_c}]^T \quad (2.11)$$

onde Y_L representa a matriz admitância combinada da seção de linha após a falta e da carga na Figura 2.2, sendo esta obtida por (2.12):

$$Y_L = [(1 - x) \cdot Z + Z_r]^{-1} \quad (2.12)$$

onde Z é a matriz impedância de linha, em ohm por unidade de comprimento.

Caso a impedância da carga seja desconhecida, o autor desconsidera o acoplamento mútuo entre as fases e a corrente de carga pode ser determinada de forma aproximada por (2.13):

$$I_{L_a} = \left(\frac{I'_{L_a}}{V'_{F_a}} \right) \cdot V_{F_a} \quad (2.13)$$

onde V'_{F_a} e I'_{L_a} são a tensão e a corrente no ponto da falta no período pré-falta.

Após este algoritmo ter convergido, a falta é estimada. 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 a jusante da primeira seção do sistema, os valores de tensão e de corrente são atualizados para a barra seguinte através da análise de circuitos, de acordo com a Figura 2.3 e com as equações (2.14), (2.15) e (2.16):

$$V_{k+1} = V_k - Z_{abc_k} \cdot I_k \quad (2.14)$$

$$I_{L_k} = Z_{L_k}^{-1} \cdot V_k \quad (2.15)$$

$$I_{k+1} = I_k - I_{L_{k+1}} \quad (2.16)$$

onde

V_k	vetor das tensões trifásicas na barra k durante a falta;
I_k	vetor das correntes trifásicas na barra k durante a falta;
I_{L_k}	vetor das correntes trifásicas de carga na barra k durante a falta;
V_{k+1}	vetor das tensões trifásicas na barra $k + 1$ durante a falta;
I_{k+1}	vetor correntes trifásicas na barra $k + 1$ durante a falta;
$I_{L_{k+1}}$	vetor das correntes trifásicas de carga na barra $k + 1$ durante a falta;

Z_{L_k} matriz impedância de carga referente à barra k ;
 Z_{abc_k} matriz impedância da seção de linha a jusante da barra k .

Após a atualização destes valores o algoritmo é executado novamente. Este processo de atualização só é finalizado quando a falta é localizada dentro da seção correspondente aos valores de tensão e de corrente atualizados ou caso a barra seja a barra final do alimentador.

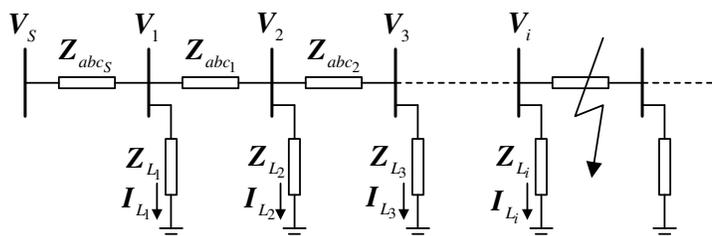


Figura 2.3: Atualização das tensões e correntes no terminal local (LEE et al., 2004).

A determinação dos sistemas equivalentes é feita através de associações série-paralelo entre as impedâncias das linhas e das cargas, de modo que toda a carga a jusante da falta é transformada em uma impedância equivalente (Z_R). Como o trabalho foi desenvolvido para sistemas radiais com a presença das ramificações laterais e cargas intermediárias, múltiplas estimativas de locais de falta podem ser obtidas a partir das medições das tensões e das correntes medidas na subestação. Neste caso, a redução de múltiplas estimativas a uma é feita através de um algoritmo de diagnóstico de faltas que consiste em duas etapas: a primeira identifica a localização entre as múltiplas estimativas encontradas usando informações especificadas pela operação dos dispositivos de proteção. Caso a primeira etapa seja finalizada com múltiplas estimativas do local da falta, a segunda etapa tenta diagnosticar o local mais provável por meio de comparação da carga interrompida com a carga real, gerando uma decisão final.

2.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O aumento do interesse mundial na produção de energia limpa e a liberalização do mercado de energia elétrica são fatores que impulsionam o desenvolvimento e a conexão de múltiplas unidades de geração pequenas nas redes de distribuição. Estas fontes alternativas de energia, tais como hidro-geradores, pequenas turbinas, turbinas a gás entre outros causam impactos nos sistemas de distribuição, os quais são concebidos para serem eficientes com uma única fonte de energia (LONDERO; AFFONSO; NUNES, 2009).

As redes de distribuição de energia são frequentemente sujeitas a faltas, ocasionando interrupções no fornecimento de energia aos consumidores.

As metodologias atuais de LDF são muito eficientes quando aplicadas aos sistemas radiais, entretanto, estas apresentam limitações quando aplicadas a sistemas com geradores distribuídos (SAHA et al., 2002). Estudos recentes analisaram o impacto destes geradores nas correntes de falta e nos esquemas de proteção da rede (DUGAN; RIZY, 1984; BRAHMA; GIRGIS, 2004). A introdução da GD nos SDE afeta a precisão dos métodos de localização de faltas baseados na estimativa da corrente de falta. Portanto, a verificação da precisão destes métodos de localização de faltas neste novo contexto é necessária, assim como o estudo e a proposição de novas metodologias que contemplem a presença de geradores nos sistemas.

A metodologia de localização de faltas do tipo trifásica publicada por (PENKOV et al., 2005) foi um dos primeiros trabalhos analíticos desenvolvidos para SDE com a presença da geração distribuída. Para o cálculo da distância da falta, o autor sugere uma equação direta

baseada na impedância de seqüência positiva, considerando dois modelos de geração distribuída: um modelo real e; um modelo ideal de máquina síncrona. Este trabalho foi desenvolvido para múltiplos geradores no sistema, entretanto, a representação do sistema de forma geral é feita por componentes simétricas. O trabalho discute duas abordagens sobre o método: uma considerando as medições disponíveis somente na subestação do sistema e; a outra considerando as medições em todas as barras dos geradores incluindo a barra da subestação.

No método proposto por (BRETAS et al., 2006) para faltas do tipo trifásicas é utilizado um algoritmo iterativo para a estimativa da distância da falta baseado na impedância de seqüência positiva. No entanto, esta metodologia é apresentada como uma extensão do método de (LEE et al., 2004), sugerindo modificações na atualização da corrente de falta a fim de levar em conta a presença da geração distribuída. Neste trabalho, os autores utilizaram um modelo simplificado de máquina síncrona para a representação do gerador síncrono.

Em (EL-FOULY et al., 2009) foi proposto um algoritmo para localização de faltas do tipo trifásicas com base na análise direta de circuitos. Este trabalho utiliza uma técnica bastante rudimentar para estimar o provável local da falta, entretanto, esta ilustra os resultados obtidos para diferentes tipos de geração conectados no sistema.

2.2.1 Método de Penkov et al. (2005)

O trabalho de Penkov et al. (2005) foi um dos primeiros trabalhos analíticos para localização de faltas com a presença da geração distribuída. Tal metodologia, baseada na impedância aparente de seqüência positiva utiliza dois modelos de geração distribuída: um modelo ideal e um modelo um real de gerador síncrono. O modelo ideal considera a máquina síncrona como uma fonte de tensão ideal atrás de uma impedância, conforme é mostrado na Figura 2.4.

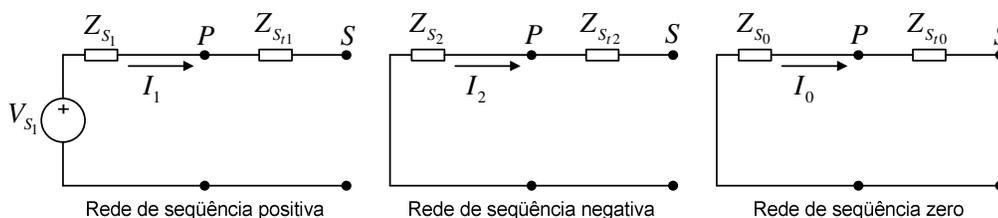


Figura 2.4: Representação das componentes simétricas de um gerador síncrono ideal (PENKOV et al., 2005).

Neste modelo, a geração distribuída é conectada ao sistema através de um transformador de potência, o qual está representado neste esquema, onde o nó “P” representa o lado primário do transformador e o nó “S” representa o lado secundário deste.

A estrutura real de geração distribuída utilizada pelo autor apresenta uma máquina síncrona com reguladores de tensão e de velocidade, conforme é ilustrado na Figura 2.5.

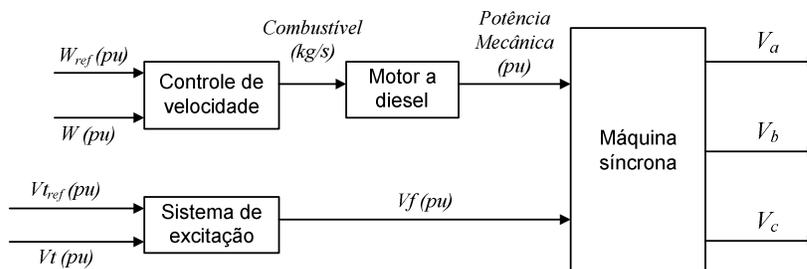


Figura 2.5: Estrutura real de geradores distribuídos (PENKOV et al., 2005).

Nesta estrutura, o controle de tensão nos terminais da máquina é feito através da excitação do campo e o controle de velocidade, por um regulador que controla a abertura ou o fechamento de uma válvula de combustível.

Para a localização de faltas trifásicas, a expressão genérica da impedância da máquina síncrona é dada por (2.17):

$$X_d(t) = \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right]^{-1} \quad (2.17)$$

onde X'_d e X''_d são as reatâncias da máquina síncrona nos períodos transitório e subtransitório, respectivamente e; T'_d e T''_d são as constantes de tempo de curto-circuito da máquina síncrona nos períodos transitório e subtransitório, respectivamente.

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

$$X_d(t) = X'_d \quad (2.18)$$

O método de localização de faltas utilizado para avaliação do impacto da geração distribuída neste trabalho é baseado no cálculo das componentes simétricas. Para a demonstração da metodologia será considerado um sistema de distribuição representado por sua rede de seqüência positiva, conforme ilustrado na Figura 2.6.

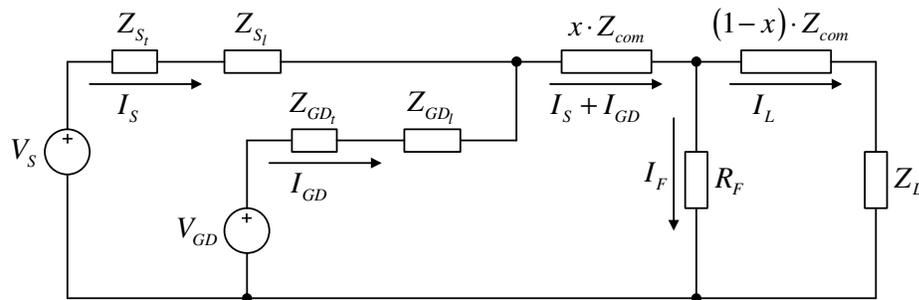


Figura 2.6: Sistema de distribuição com a geração distribuída representado por sua rede de seqüência positiva (PENKOV et al., 2005).

O modelo da geração distribuída utilizado para esta análise é o modelo ideal, descrito anteriormente. Para a demonstração desta metodologia, será utilizada a seguinte notação:

- V_S Tensão de seqüência positiva no terminal da subestação;
- V_{GD} Tensão de seqüência positiva no terminal do gerador;
- I_S Corrente de seqüência positiva no terminal da subestação;
- I_{GD} Corrente de seqüência positiva no terminal do gerador;
- Z_{S_t} Impedância de seqüência positiva do transformador da subestação;
- Z_{GD_t} Impedância de seqüência positiva do transformador do gerador;
- Z_{S_l} Impedância de seqüência positiva do alimentador da subestação;
- Z_{GD_l} Impedância de seqüência positiva do alimentador do gerador;
- Z_{com} Impedância de seqüência positiva em comum;
- I_F Corrente de falta;
- R_F Resistência de falta;
- Z_L Impedância da carga;
- x Distância da subestação até o ponto da falta.

A equação da tensão no alimentador é obtida por:

$$V_S = I_S \cdot (Z_{S_t} + Z_{S_l}) + (I_S + I_{GD}) \cdot Z_{com} \cdot x + I_F \cdot R_F \quad (2.19)$$

Considerando a ocorrência de um curto-circuito trifásico no alimentador, a resistência de falta é desprezada ($R_F = 0$) e a tensão no alimentador pode ser reescrita por:

$$V_S = I_S \cdot (Z_{S_t} + Z_{S_l}) + (I_S + I_{GD}) \cdot Z_{com} \cdot x \quad (2.20)$$

Considerando a tensão no ponto de conexão do circuito da subestação e do circuito do gerador, e fazendo a hipótese $V_S = V_{GD}$, a corrente do gerador pode ser escrita por:

$$I_{GD} = I_S \cdot \frac{(Z_{S_t} + Z_{S_l})}{Z_{GD_t} + Z_{GD_l}} \quad (2.21)$$

Substituindo a equação (2.21) na equação (2.20), obtém-se a impedância de seqüência positiva da subestação até o ponto da falta:

$$Z_f = \frac{V_S}{I_S} = (Z_{S_t} + Z_{S_l}) + \left(1 + \frac{Z_{S_t} + Z_{S_l}}{Z_{GD_t} + Z_{GD_l}}\right) \cdot Z_{com} \cdot x \quad (2.22)$$

Isolando o x na equação (2.22), obtém-se a distância da subestação até o ponto da falta:

$$x = \frac{Z_f - (Z_{S_t} + Z_{S_l})}{Z_{com} \cdot \left(1 + \frac{Z_{S_t} + Z_{S_l}}{Z_{GD_t} + Z_{GD_l}}\right)} \quad (2.23)$$

Generalizando a equação (2.23) para múltiplos geradores distribuídos conectados a montante da falta, a equação do local da falta é obtida por:

$$x = \frac{Z_f - (Z_{S_t} + Z_{S_l})}{Z_{com} \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{Z_{S_t} + Z_{S_l}}{Z_{GD_t_k} + Z_{GD_l_k}}\right)} \quad (2.24)$$

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

Para a validação da técnica proposta foram feitas simulações em uma rede de distribuição com geradores, sujeita a faltas trifásicas ao longo de toda a extensão do alimentador. Os resultados obtidos pela equação (2.24) foram comparados com os resultados de um método tradicional baseado na impedância de seqüência positiva.

A análise feita pelo autor mostrou que o impacto da GD nos dois métodos aumenta consideravelmente com o aumento do nível da potência das unidades geradoras e também com a quantidade de unidades geradoras a montante da falta. Entretanto, a formulação sugerida pelos autores se mostrou bastante eficiente, apresentando erros inferiores a 0,6% para o modelo ideal de gerador síncrono e de 8% para o modelo real de gerador síncrono. No último caso, os erros encontrados são justificados pelo fato da impedância transitória do gerador ser variável no tempo, conforme a equação (2.17), afetando a precisão do método. Uma abordagem para o método foi discutida considerando a presença de gravadores de falta nos terminais das GDs. Os resultados para estes casos mostram que as GDs que apresentam uma trajetória comum para a falta vista da subestação calculam uma distância irreal comparada àquela calculada a partir da subestação. Entretanto, a GD que apresenta uma trajetória particular para o ponto da falta calculam uma distância mais precisa, embora esta também sofra um impacto dos geradores vizinhos.

Embora a formulação de LDF proposta pelos autores para SDE com a presença de geradores distribuídos represente um avanço em relação às técnicas analíticas de localização de falta até então propostas, o desenvolvimento desta e a representação do SDE foi feita por componentes simétricas. Neste caso, a eficiência do método não foi comprovada para sistemas com desequilíbrio nas linhas e nas cargas, que é o caso mais comum nos SDE.

Ainda, a representação das cargas é feita considerando a carga total concentrada na extremidade remota ou então considerando a carga distribuída uniformemente ao longo do alimentador, caracterizando um sistema bem comportado. Entretanto, um SDE real apresenta diferentes níveis de carregamento ao longo do alimentador.

Para o equacionamento do local da falta, os autores consideram a tensão nos terminais das unidades geradoras igual à tensão da subestação. Esta seria uma boa aproximação para o caso em que o sistema apresente um baixo nível de carregamento, caso contrário, as tensões nas barras dos geradores seriam menores do que a tensão da subestação devido às elevadas quedas de tensão nas linhas.

2.2.2 Método de Bretas *et al.* (2006)

O método de Bretas *et al.* (2006) baseia-se na idéia de LDF aplicada a SDE com a presença da geração distribuída utilizando componentes simétricos. Embora este tenha sido publicado com o mesmo propósito do método de Penkov *et al.* (2005), cada um dos trabalhos foi fundamentado de uma forma diferente. Bretas *et al.* (2006) propuseram um algoritmo iterativo para localizar a falta, ao invés de uma equação direta sugerida por Penkov *et al.* (2005).

O algoritmo iterativo proposto por Bretas *et al.* (2006) é semelhante ao algoritmo apresentado no trabalho de Lee *et al.* (2004), podendo inclusive ser considerado como uma extensão deste. No entanto, existem alguns aspectos que diferem as duas metodologias. O primeiro deles é com relação à representação do sistema e a formulação matemática. O trabalho de Bretas *et al.* (2006) foi desenvolvido através do uso das componentes simétricas, enquanto que o trabalho proposto por Lee *et al.* (2004) foi baseado nas coordenadas de fase. O segundo, diz respeito à atualização da corrente de falta. No trabalho de Lee *et al.* (2004), toda a carga a jusante da falta é agregada como somente uma e então, é calculada a corrente despachada por esta. No entanto, Bretas *et al.* (2006) propuseram uma forma alternativa de calcular a corrente despachada pela carga, baseada na posição de ocorrência da falta. Caso a estimativa inicial do local da falta seja a jusante do ponto onde é conectada a geração distribuída, o procedimento de atualização da corrente de carga é feito de forma idêntica ao método de Lee *et al.* (2004). Entretanto, se a falta for estimada inicialmente em um ponto a montante da unidade geradora, o sistema equivalente a jusante da falta é representado por uma impedância e tensão equivalentes vista da extremidade remota da seção faltosa. Esta extensão, realizada na metodologia de Lee *et al.* (2004), serve para computar a corrente proveniente da extremidade remota quando da presença da geração distribuída no sistema.

Comparando as metodologias analíticas para SDE com a presença de GD, apresentados por Bretas *et al.* (2006) e por Penkov *et al.* (2005), observamos que as diferenças entre estas não estão somente no algoritmo proposto. O método proposto por Penkov *et al.* (2005) foi desenvolvido para múltiplas unidades geradoras no sistema, enquanto que o método sugerido por Bretas *et al.* (2006) foi desenvolvido considerando somente uma unidade geradora. Entretanto, no trabalho de Penkov *et al.* (2005) foi feita a consideração de que a tensão nos pontos onde estão conectadas as GDs é igual a tensão da subestação. A partir desta consideração é determinada a corrente oriunda de cada unidade geradora para a falta. Esta é uma aproximação válida somente para os casos em que o sistema apresenta um baixo nível de carregamento, caso contrário, as tensões nos terminais das GDs devem ser diferentes da tensão na barra da subestação. No método apresentado por Bretas *et al.* (2006), é realizada uma análise pré-falta

do sistema, a fim de determinar as tensões e correntes em todas as barras. Posteriormente, é estimada a corrente do gerador para a falta, com base apenas nos dados do relé, do sistema (linhas e cargas) e do gerador. Assim, pode-se dizer que, embora o método seja aplicável a sistemas com somente uma unidade geradora, este reproduz as características de um SDE de forma mais precisa, levando em conta as quedas de tensão nas linhas.

Considere o sistema ilustrado na Figura 2.7, representando um SDE com a presença da geração distribuída.

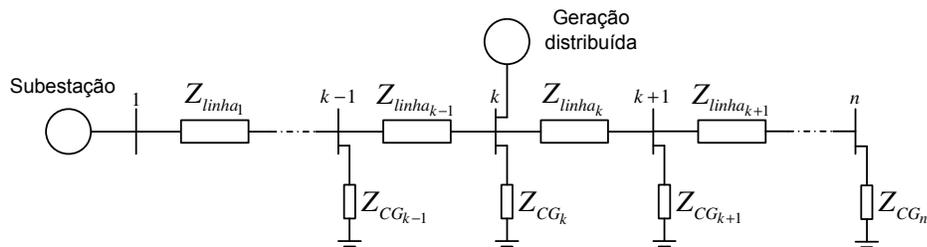
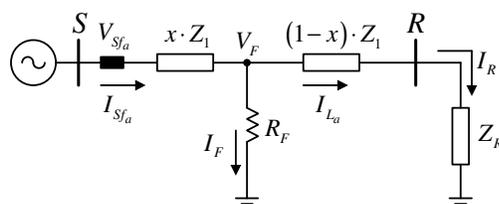
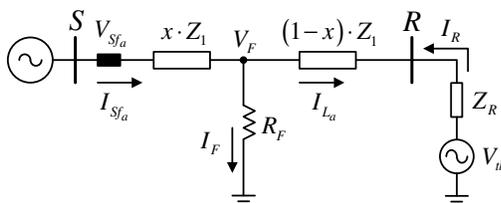


Figura 2.7: Sistema de distribuição com a geração distribuída (BRETAS et al., 2006).

Analisando o seguinte sistema, verificamos que este pode estar sujeito a faltas a jusante ou a montante da unidade geradora. Caso a falta ocorra a jusante do gerador, o sistema faltoso é representado por uma carga equivalente Z_{th} , na extremidade remota da falta, conforme ilustrado na Figura 2.8 (a). Entretanto, se a falta ocorre a montante do gerador, possivelmente haverá uma contribuição de corrente da extremidade remota para a falta. Nesse caso, o sistema faltoso é representado por uma carga equivalente Z_{th} e uma fonte V_{th} , ambas localizadas na extremidade remota da falta, conforme ilustrado na Figura 2.8 (b). Em ambos os casos, a carga equivalente Z_{th} é a resultante de todas as cargas agregadas a jusante da falta.



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



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

Figura 2.8: Circuitos equivalentes de um sistema faltoso com a presença da geração distribuída.

Supondo que ocorra uma falta trifásica sólida em um ponto aleatório do sistema, ilustrado na Figura 2.7, a estimativa da distância da falta pode ser obtida a partir da componente faltosa da tensão em uma única fase (a , b ou c) extraída do relé da subestação. Tal consideração pode ser feita porque o equacionamento parte dos seguintes pressupostos: o sistema apresenta as linhas equilibradas, de modo que as impedâncias mútuas não interferem no equacio-

namento do local da falta e; a corrente de falta será igual nas três fases, tendo em vista que a falta trifásica é simétrica. Sendo assim, a equação utilizada para localização de faltas trifásicas pode ser a mesma utilizada para faltas do tipo fase-terra na fase a , por exemplo.

Observando os circuitos equivalentes das Figuras 2.8 (a) e 2.8 (b), a tensão na extremidade local anterior a falta é obtida por (2.25):

$$V_{Sfa} = x \cdot (Z_1 \cdot I_{Sfa}) + R_F \cdot I_F \quad (2.25)$$

onde a análise da referida metodologia é baseada na seguinte notação:

V_{Sfa}	Tensão faltosa na fase a na da extremidade S ;
I_{Sfa}	Corrente faltosa na fase a na da extremidade S ;
I_{Sa}	Corrente pré-falta na fase a na da extremidade S ;
Z_1	Impedância de seqüência positiva por unidade de comprimento;
x	Distância da falta;
V_F	Tensão no ponto da falta;
I_F	Corrente de falta;
R_F	Resistência de falta;
I_R	Corrente na extremidade remota
Z_R	Impedância equivalente vista da extremidade R ;
Z_{th}	Impedância equivalente de Thévenin;
V_{th}	Tensão equivalente de Thévenin;
I_{La}	Corrente de carga na fase a .

Multiplicando ambos os lados da Equação (2.24) por I_F^* (conjugado da corrente de falta), e sabendo que o termo $I_F \cdot I_F^* \cdot R_F$ resulta em um número real, obtém-se a expressão (2.26):

$$x = \frac{\text{Im}(V_{Sfa} \cdot I_F^*)}{\text{Im}(Z_1 \cdot I_{Sfa} \cdot I_F^*)} \quad (2.26)$$

A corrente de carga é considerada igual a corrente pré-falta na extremidade S , conforme a equação (2.27):

$$I_{La} = I_{Sa} \quad (2.27)$$

A estimativa inicial da corrente de falta é obtida pela diferença entre a corrente durante a falta no terminal S e a corrente de carga através de (2.28):

$$I_F = I_{Sfa} - I_{La} \quad (2.28)$$

Com estas equações, pode-se utilizar o algoritmo a seguir para estimar o local da falta:

- I. Assume-se I_{La} como sendo a corrente de carga antes da falta, conforme (2.27).
- II. Calcula-se a corrente de falta utilizando a equação (2.28).
- III. Estima-se o local da falta, utilizando a equação (2.26).
- IV. Determina-se a tensão no ponto da falta. Para tanto, é considerada toda a topologia do sistema, incluindo a geração distribuída. As tensões e as correntes que saem das barras do sistema são calculadas até a barra anterior à estimativa da falta e a tensão no ponto da falta é calculada utilizando a equação (2.29):

$$V_F = V_{Sfa} - x \cdot Z_1 \cdot I_{Sfa} \quad (2.29)$$

- V. Utilizando a tensão no ponto da falta calculada no passo anterior, faz-se um circuito equivalente de Thévenin de todo o sistema posterior à falta. Caso o local da falta estimado no passo III esteja a jusante da GD, conforme ilustrado na Figura 2.8 (a), o circuito equivalente é simplesmente o paralelo de todas as impedâncias do sistema (considerando também as impedâncias de linha) depois do ponto da falta, pois não há fontes geradoras após a falta. Após este cálculo, a corrente em direção a extremidade remota é atualizada novamente com a equação (2.30):

$$I_{La} = \frac{V_F}{Z_{th}} \quad (2.30)$$

onde $Z_{th} = (1 - x) \cdot Z_1 + Z_R$. (2.31)

- VI. No caso da falta ser estimada a montante da GD, o equivalente Thévenin terá uma fonte geradora, conforme é mostrado na Figura 2.8 (b). Neste caso a corrente em direção a extremidade remota é obtida utilizando a equação (2.32):

$$I_{La} = \frac{(V_F - V_{th})}{Z_{th}} \quad (2.32)$$

- VII. Com o valor atualizado da corrente de carga, 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 VI são executados novamente. Esta atualização é executada sucessivamente até que a falta seja estimada dentro da seção analisada.

2.2.2.1 Modelo da Geração Distribuída

O modelo elétrico da geração distribuída utilizado neste trabalho é o modelo de um gerador síncrono no período de tempo subtransitório obtido de Kundur (1994). O modelo, mostrado na Figura 2.9, é composto pela reatância subtransitória X_s'' do gerador, por sua resistência de armadura R , e pelo valor da sua tensão interna E_g'' . A tensão interna do gerador no período pré-falta pode ser estimada através de um programa de fluxo de potência baseado na técnica Ladder (KERSTING, 2007), onde se estima ainda a corrente por ele injetada.

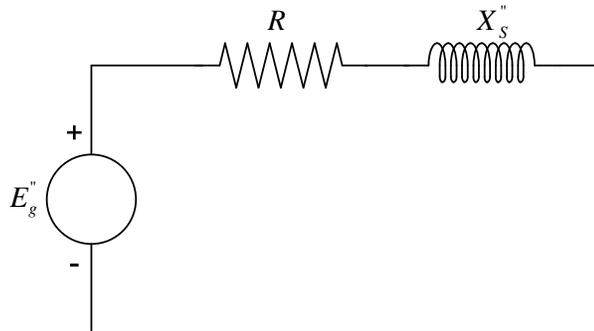


Figura 2.9: Modelo elétrico da geração distribuída (KUNDUR, 1994).

Como o período de tempo estudado é o subtransitório, correspondente aos primeiros ciclos após a ocorrência da falta, considera-se que a tensão interna do gerador se mantém cons-

tante durante a falta. Assim, é possível estimar a contribuição de corrente fornecida pelo gerador durante a falta, conforme (2.33):

$$I_{gf} = \frac{(E_g'' - V_k)}{(R + X_S'')} \quad (2.33)$$

onde a variável k representa a barra na qual o gerador está conectado.

2.2.2.2 Atualização das tensões e correntes nas barras

Considerando o sistema em falta, e supondo as cargas, as impedâncias da linha e dados do relé conhecidos, executa-se o algoritmo de localização de faltas na primeira seção do alimentador. Caso a falta não seja estimada dentro desta seção, inicia-se o processo de atualização de tensão e de corrente para a próxima barra do sistema, conforme as equações (2.34) à (2.36).

$$V_{sf_k} = V_{sf_{k-1}} - L \cdot Z_{linha_{k-1}} \cdot I_{sf_{k-1}} \quad (2.34)$$

$$I_{CG_k} = \frac{V_{sf_k}}{Z_{CG_k}} \quad (2.35)$$

$$I_{sf_k} = I_{sf_{k-1}} - I_{CG_k} \quad (2.36)$$

onde:

V_{sf_k}	tensão na barra k durante a falta;
I_{sf_k}	corrente na barra k durante a falta;
I_{CG_k}	corrente de carga na barra k durante a falta;
$V_{sf_{k-1}}$	corrente na barra $k - 1$ durante a falta;
$I_{sf_{k-1}}$	corrente na barra $k - 1$ durante a falta;
$I_{CG_{k-1}}$	corrente de carga na barra $k - 1$ durante a falta;
Z_{CG_k}	impedância da carga referente à barra k ;
$Z_{linha_{k-1}}$	impedância da linha entre as barras $k - 1$ e k .

Se a seção de linha em análise antecede a barra do gerador, a corrente durante a falta na barra do gerador deve ser atualizada conforme a equação (2.37):

$$I_{sf_k} = I_{sf_{k-1}} - I_{CG_k} + I_{gf} \quad (2.37)$$

Através da equação (2.37) verifica-se que a presença do gerador influi diretamente no processo de atualização das correntes e conseqüentemente, na estimativa do local da falta.

Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da técnica apresentada, com erros tendendo à praticamente a zero em quase todos os pontos do sistema e, com um erro máximo de 0,2% do comprimento total do alimentador. Entretanto, a análise foi feita para um SDE representado por sua rede de seqüência positiva, de modo que, a sua eficiência não foi comprovada para um sistema desequilibrado.

2.2.3 Método de El-Fouly *et al.* (2009)

O método de El-Fouly *et al.* (2009) apresenta um esquema de LDF do tipo trifásica baseado na impedância aparente. Neste trabalho não foi apresentado nenhum desenvolvimento no algoritmo a fim de considerar a presença da geração distribuída. Segundo os autores, o principal objetivo do método é demonstrar o impacto da geração distribuída na estimativa do

local da falta, utilizando para tanto, dois modelos de geração distribuída: o modelo do gerador de indução de gaiola de esquilo e o modelo do gerador síncrono.

Para a compreensão do método, considere o SDE em falta, ilustrado na Figura 2.10.

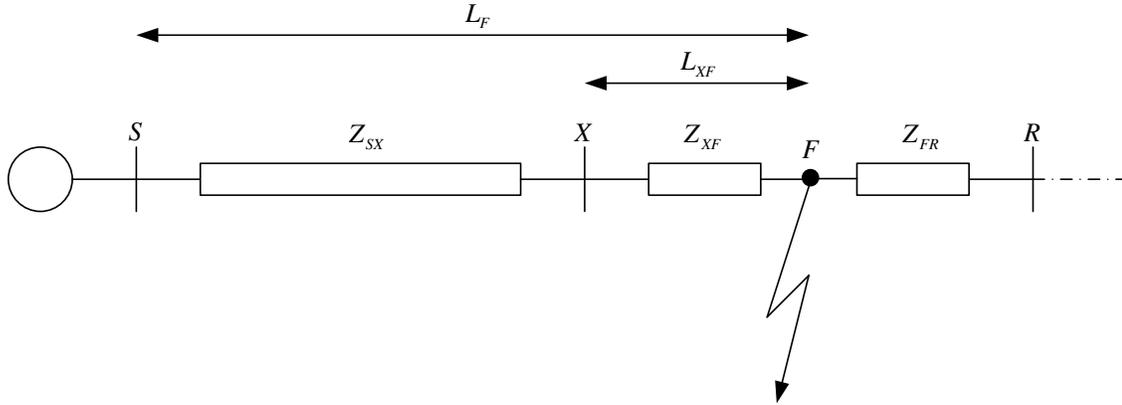


Figura 2.10: Sistema de distribuição de energia em falta.

A distância entre a subestação e o ponto da falta (L_F) é obtida por:

$$L_F = L_{SX} + L_{XF} \quad (2.38)$$

onde L_{SX} é o comprimento entre a barra da subestação e a barra local X e; L_{XF} é a distância entre a barra local X e o ponto da falta.

Supondo a situação de curto-circuito no ponto F , a impedância de seqüência positiva vista da subestação (Z_S) pode ser calculada de forma aproximada por:

$$Z_S = Z_{SX} + Z_{XF} \quad (2.39)$$

onde Z_{SX} é a impedância de seqüência positiva série entre a subestação e a barra local X e; Z_{XF} é a impedância de seqüência positiva série entre barra local X e o ponto da falta.

A distância entre a barra local da seção faltosa X e o ponto da falta (L_{XF}) é obtida através da seguinte relação:

$$L_{XF} = \frac{Z_{XF}}{z_l} \quad (2.40)$$

onde z_l é a impedância de seqüência positiva da linha por unidade de comprimento.

Substituindo a equação (2.40) na equação de localização (2.38), obtém-se:

$$L_F = L_{SX} + \frac{Z_{XF}}{z_l} \quad (2.41)$$

Isolando a impedância de seqüência positiva do trecho de linha compreendido entre a barra local e o ponto da falta (Z_{XF}) descrita em (2.39) e, substituindo esta na equação (2.41), é obtida a expressão a seguir:

$$L_F = L_{SX} + \frac{Z_S - Z_{SX}}{z_l} \quad (2.42)$$

O método calcula o local da falta através da comparação entre a impedância vista da subestação e da impedância série entre a subestação e a barra local da seção faltosa, conforme a equação (2.42).

Esta metodologia considera a presença de ramificações laterais e utiliza em seu algoritmo um cálculo de erro para determinar qual a verdadeira seção faltosa, caso o método estime mais de uma possível localização.

Os resultados apresentados mostraram que o método tem a sua exatidão mais afetada para os casos em que a falta ocorre a jusante da geração distribuída.

Os resultados dos testes apresentados demonstraram ainda que é observado um impacto maior na LDF proposta para o caso das máquinas síncronas em comparação as máquinas de indução. Este resultado é explicado em função das características da máquina síncrona que mantém uma tensão interna constante independentemente do ponto de acoplamento comum entre o terminal da GD e a rede de distribuição.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A continuidade dos serviços é um dos interesses maiores para as companhias de energia elétrica, entretanto, a ocorrência de perturbações na maioria dos casos resulta na interrupção de fornecimento da energia. Neste contexto, a LDF ocupa um papel importante na segurança e na rapidez do restabelecimento do sistema elétrico.

Metodologias para a LDF em sistemas elétricos de potência foram extensivamente estudadas na literatura, destacando-se entre estas, as metodologias baseadas na medição da impedância pelo baixo custo que estas apresentam. As metodologias de localização de faltas desenvolvidas especificamente para os sistemas de distribuição consideram as redes passivas, assumindo o sistema como sendo radial.

Nos últimos anos, o aumento no interesse mundial na produção de energia limpa e a liberalização do mercado energético impulsionaram a utilização da geração distribuída. No entanto, apesar dos benefícios oferecidos pela geração distribuída, a implantação desta também causa impactos nas redes de distribuição. O impacto mais visível é na alteração do fluxo de potência do sistema. A penetração da geração distribuída faz com que a natureza dos sistemas de distribuição de energia modificasse de redes passivas, com um fluxo de potência unidirecional, para redes não-passivas, com um fluxo de potência multi-direcional.

Recentes técnicas de localização de faltas para redes de distribuição não-passivas foram desenvolvidas, porém, a maioria destas apresenta a limitação técnica de ser desenvolvida através do uso das componentes simétricas. Neste contexto, destaca-se a metodologia publicada por Bretas *et al.* (2006) por estimar o local da falta baseando-se na análise pré-falta e durante a falta do sistema, embora, esta também tenha sido desenvolvida para redes equilibradas.

No próximo capítulo, são apresentadas extensões à metodologia fundamentada na impedância aparente de seqüência positiva para redes não-passivas publicada em (BRETAS *et al.*, 2006), considerando o desbalanceamento do sistema de distribuição.

3 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTA

A revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 mostrou que nos últimos anos foram apresentados diversos métodos de LDF em redes de distribuição radiais. No entanto, são raras as técnicas de localização para SDE fundamentadas na impedância considerando a presença da geração distribuída. Este capítulo apresenta a extensão de uma formulação de LDF baseada na impedância para sistemas de distribuição desbalanceados com a presença da geração distribuída. De acordo com os estudos realizados sobre a modelagem dos sistemas de distribuição verificou-se que estes sistemas caracterizam-se pela topologia assimétrica de seus alimentadores, pela presença das ramificações laterais e das cargas intermediárias (KERSTING, 2007). A presença das ramificações laterais implica na possibilidade de obtenção de múltiplas localizações do ponto da falta. Algumas metodologias fazem a redução de múltiplas estimativas através de dados obtidos dos equipamentos de proteção da rede (ZHU et al., 1997; LEE et al., 2004) enquanto outras, utilizam o método das ondas viajantes (ZANETTA, 2003) a fim de determinar a verdadeira seção faltosa.

O estudo da identificação da seção faltosa foge do escopo deste trabalho. Tendo em vista esta questão, optou-se pela representação dos sistemas sem a presença das ramificações laterais tanto para a implementação, quanto para a validação da metodologia proposta. Os alimentadores de distribuição são inerentemente desbalanceados, afetando a exatidão da estimativa da distância da falta das metodologias atuais para SDE com a presença da GD baseadas em componentes de seqüência (PENKOV et al., 2005; BRETAS et al., 2006; EL-FOULY et al., 2009).

Sendo assim, o método proposto é apresentado como uma extensão do trabalho de (BRETAS et al., 2006), adequando-o a sistemas desbalanceados através da representação dos alimentadores por coordenadas de fase. Este trabalho é baseado na análise pré-falta do sistema a fim de estimar local da falta, conforme é ilustrado no diagrama em blocos simplificado da metodologia proposta apresentado na Figura 3.1.

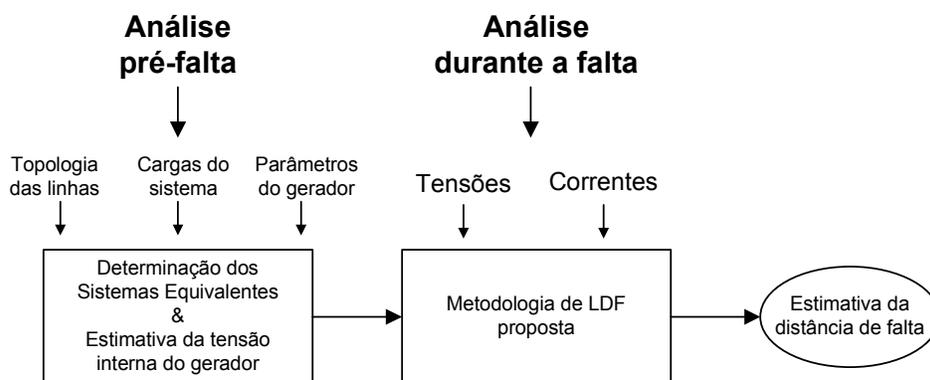


Figura 3.1: Diagrama em blocos do método de localização de faltas proposto.

A técnica proposta sugere uma análise pré-falta do sistema, baseando-se na topologia das linhas, nos dados das cargas e nos parâmetros do gerador, a fim de determinar os sistemas equivalentes e a estimar a tensão interna do gerador. A partir destes parâmetros e das componentes fundamentais de tensão e de corrente medidas na subestação, é possível estimar a distância da subestação até o ponto da falta.

3.1 MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Nesta seção, são apresentados os modelos trifásicos utilizados para a representação dos alimentadores, das cargas e da geração distribuída utilizados na implementação do método de LDF proposto e na validação dos resultados.

3.1.1 Modelo das Linhas de Distribuição

As redes de distribuição são tipicamente desbalanceadas devido a não-transposição das linhas e aos espaçamentos desiguais entre os condutores. Esses fatores implicam na obtenção de impedâncias mútuas desiguais entre as fases, impossibilitando o uso das componentes simétricas para a representação destes sistemas (CHOI et al., 2004). A fim de representar de forma precisa as características reais de um alimentador de distribuição de energia, o presente trabalho faz o uso das coordenadas de fase. O modelo RL, cuja representação trifásica é mostrada na Figura 3.2, representa o modelo simplificado de um SDE onde o efeito capacitivo da linha é ignorado. Este modelo é considerado adequado para linhas aéreas cujo comprimento é inferior a 80 km (KERSTING, 2007; SAADAT, 2002).

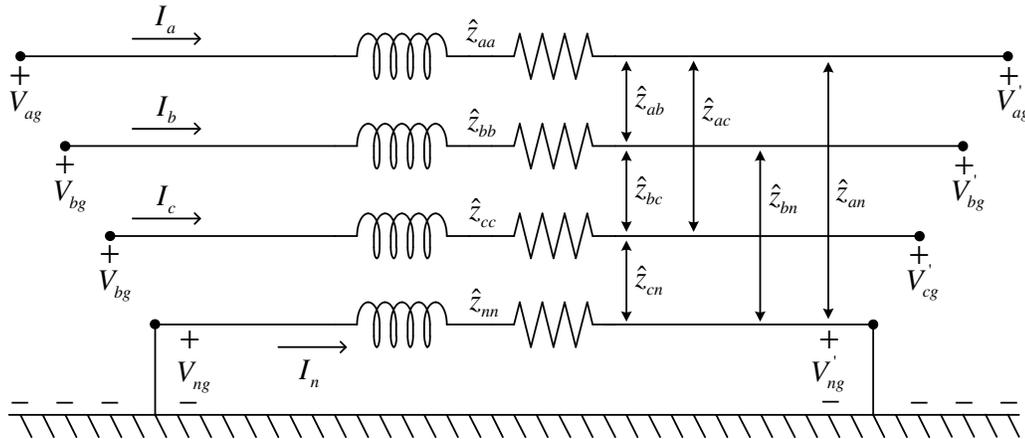


Figura 3.2: Modelo de linha RL.

Devido ao desequilíbrio das linhas de distribuição, o cálculo das impedâncias próprias e mútuas é realizado através do método dos condutores e suas imagens (KERSTING, 2007). Este método supõe que para cada condutor disposto acima da terra exista um condutor imagem a uma mesma distância abaixo da terra, conforme ilustrado na Figura 3.3. No entanto, neste trabalho foram utilizadas as equações de Carson modificadas para o cálculo das impedâncias próprias e mútuas (ANDERSON, 1973; KERSTING, 2007). Estas consideram que a frequência nominal do sistema é de 60 Hz e que a resistividade elétrica média do solo é igual 100 Ω .metro, e podem ser calculadas por (3.1) e (3.2):

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0,05923 + j \cdot 0,07541 \cdot \left(\ln \frac{0,3048}{GMR_i} + 7,93402 \right) \quad (3.1)$$

$$\hat{z}_{ij} = 0,05923 + j \cdot 0,07541 \cdot \left(\ln \frac{0,3048}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \quad (3.2)$$

onde

- \hat{z}_{ii} impedância própria do condutor i (Ω /km);
- \hat{z}_{ij} impedância mútua entre os condutores i e j (Ω /km);

- r_i resistência do condutor i por unidade de comprimento (Ω/km);
 GMR_i raio médio geométrico do condutor i (m);
 D_{ij} distância entre os condutores i e j (m).

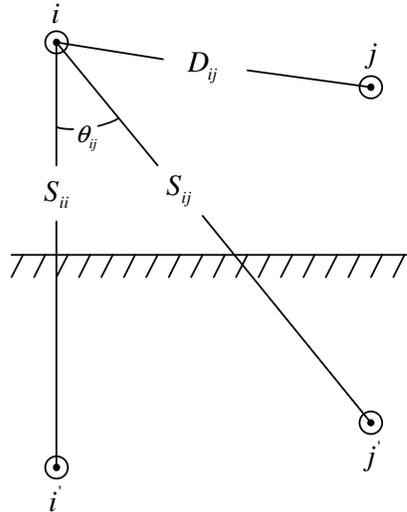


Figura 3.3: Condutores e suas imagens.

As equações (3.1) e (3.2) são usadas para o cálculo dos elementos que compõe uma matriz impedância primitiva de n condutores \times n condutores. Assim, a aplicação destas equações para um linha de distribuição aérea a quatro fios (três fases e um neutro), resulta numa matriz impedância primitiva de ordem quatro, conforme (3.3):

$$\hat{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{an} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bn} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cn} \\ \hat{Z}_{na} & \hat{Z}_{nb} & \hat{Z}_{nc} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A matriz impedância de linha obtida por (3.3) pode ser reescrita na forma de submatrizes, conforme (3.4):

$$\hat{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{z}}_{ij} & \hat{\mathbf{z}}_{in} \\ \hat{\mathbf{z}}_{nj} & \hat{\mathbf{z}}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

A utilização da matriz (3.3) não é viável para aplicações em sistemas trifásicos em função de sua dimensão. Para tanto, a redução da matriz impedância para uma matriz de dimensão 3×3 , é feito através do método da redução de Kron, calculada por (3.5):

$$\mathbf{Z} = \hat{\mathbf{z}}_{ij} - \hat{\mathbf{z}}_{in} \cdot \hat{\mathbf{z}}_{nn}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{z}}_{nj} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A partir da redução das equações de Carson modificadas e da redução de Kron obtém-se a matriz impedância de acordo com (3.5) para linhas aéreas de distribuição de energia.

3.1.2 Modelo das Cargas

As cargas num SDE são geralmente especificadas em função de sua potência complexa consumida e podem ser conectadas à rede em estrela ou delta. Quanto à modelagem, as cargas podem ser representadas por impedância constante, corrente constante, potência constante ou

pela combinação destes modelos (KERSTING, 2007). No presente trabalho, todas as cargas foram consideradas trifásicas, modeladas por impedância constante e conectadas em estrela. A modelagem foi feita a partir da potência complexa especificada e das tensões de fase (KERSTING, 2007), conforme (3.6) a (3.8):

$$Z_{L_a} = \frac{|V_a|^2}{S_a^*} = \frac{|V_a|^2}{|S_a|} \angle \theta_a = |Z_{L_a}| \angle \theta_a \quad (3.6)$$

$$Z_{L_b} = \frac{|V_b|^2}{S_b^*} = \frac{|V_b|^2}{|S_b|} \angle \theta_b = |Z_{L_b}| \angle \theta_b \quad (3.7)$$

$$Z_{L_c} = \frac{|V_c|^2}{S_c^*} = \frac{|V_c|^2}{|S_c|} \angle \theta_c = |Z_{L_c}| \angle \theta_c \quad (3.8)$$

A partir das impedâncias das cargas nas três fases, obtém-se a matriz impedância da carga é de acordo com (3.9):

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{L_b} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{L_c} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Considerando a carga trifásica, a matriz impedância de cargas (3.9) em cada nó do sistema é formada na sua diagonal principal por impedâncias nas fases a , b e c obtidas das equações (3.6) a (3.8), sendo os elementos fora da diagonal principal considerados nulos.

3.1.3 Modelo da Geração Distribuída

O modelo elétrico da GD utilizado no algoritmo de localização de faltas é o circuito de um gerador síncrono trifásico, conectado em Y e com neutro solidamente aterrado. O modelo de cada fase assume que os fluxos concatenados no rotor são constantes no período subtransitório, eliminando somente a equação diferencial associada às características elétricas da máquina (KUNDUR, 1994). Sendo assim, cada fase pode ser representada simplesmente pela reatância subtransitória do gerador X_s'' , por sua resistência de armadura R e por sua tensão interna no período subtransitório E_g'' , conforme ilustrado na Figura 3.4. O modelo utilizado é adequado para programas de curto-circuito nos quais se deseja computar o valor da componente de frequência fundamental das correntes de curto-circuito (KUNDUR, 1994). Como os fluxos concatenados no rotor não variam instantaneamente, a tensão interna do gerador se mantém constante durante a falta, possibilitando a determinação da contribuição da corrente do gerador para a falta, como será visto adiante.

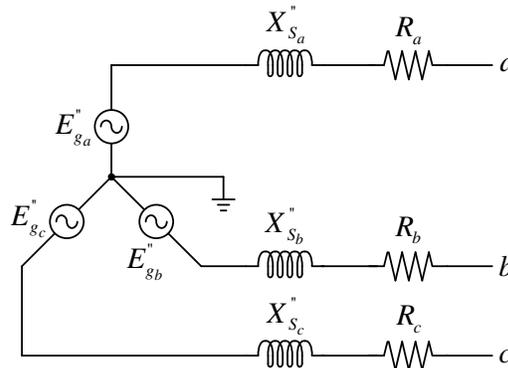


Figura 3.4: Modelo elétrico da geração distribuída para sistemas trifásicos.

A matriz impedância trifásica e o vetor das tensões internas do gerador síncrono são obtidas por (3.10) e (3.11), respectivamente:

$$\mathbf{Z}_g = \begin{bmatrix} R_a + jX_{S_a}'' & 0 & 0 \\ 0 & R_b + jX_{S_b}'' & 0 \\ 0 & 0 & R_c + jX_{S_c}'' \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{E}_g'' = [E_{g_a}'' \quad E_{g_b}'' \quad E_{g_c}'']^T \quad (3.11)$$

onde

- $R_{a(b,c)}$ Resistência da armadura na fase $a(b, c)$;
- $X_{S_{a(b,c)}}''$ Reatância subtransitória da máquina síncrona na fase $a(b, c)$;
- $E_{g_{a(b,c)}}''$ Tensão interna da máquina síncrona no período subtransitório na fase $a(b, c)$.

O modelo da máquina síncrona apresentado nesta seção é utilizado para a estimativa da corrente de falta do gerador, que será apresentado em detalhes nas próximas seções.

3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O presente trabalho propõe um equacionamento de localização da falta fundamentado na impedância aparente, estendendo trabalho de Bretas *et al.* (2006) para sistemas desequilibrados. O método de Bretas *et al.* (2006) baseia-se na impedância aparente de seqüência positiva, desconsiderando o desequilíbrio das linhas, além de contemplar apenas as faltas do tipo trifásicas. Nesta seção, é apresentada a formulação matemática de LDF para sistemas de distribuição desbalanceados, sendo toda a representação do sistema realizada por coordenadas de fase. O método apresentado, ainda estende o trabalho de Bretas *et al.* (2006) para faltas do tipo fase-terra. Os desenvolvimentos matemáticos são baseados no modelo de linha RL, visto na subseção 3.1.1. A apresentação dos equacionamentos é feita com base na seguinte notação:

- V_{Sf_m} tensão na fase m no terminal S durante a falta;
- I_{Sf_m} corrente na fase m no terminal S durante a falta;
- V_{S_m} tensão na fase m no terminal S no período pré-falta;
- I_{S_m} corrente na fase m no terminal S no período pré-falta;
- z_{mm} impedância própria na fase m (Ω/m);
- z_{mn} impedâncias mútuas entre as fases m e n (Ω/m);
- R_{F_m} resistência da falta na fase m ;
- I_{F_m} corrente de falta na fase m ;
- V_{F_m} tensão no ponto da falta na fase m ;
- x distância da falta (m);
- L comprimento da seção de linha (m);
- m, n fases a, b ou c ;
- \mathbf{V}_S vetor das tensões no terminal S no período pré-falta;
- \mathbf{I}_S vetor das correntes no terminal S no período pré-falta;
- \mathbf{V}_{Sf} vetor das tensões no terminal S durante a falta;
- \mathbf{I}_{Sf} vetor das correntes no terminal S durante a falta;
- \mathbf{Z} matriz de impedâncias de linha por unidade de comprimento (Ω/m);
- \mathbf{Z}_L matriz de impedâncias de carga (Ω);
- \mathbf{Y}_L matriz de admitâncias de carga (Ω^{-1});

I_g	vetor das correntes da geração distribuída no período pré-falta;
I_{gf}	vetor das correntes da geração distribuída durante a falta;
Z_{eq}	matriz de impedâncias equivalente da carga (Ω);
Z_{abc}	matriz de impedâncias de linha (Ω);
Z_g	matriz de impedâncias da geração distribuída (Ω);
Z_{th}	matriz de impedâncias equivalente vista do ponto da falta (Ω);
Y_{th}	matriz de admitâncias equivalente vista do ponto da falta (Ω^{-1});
V_{th}	vetor das tensões equivalentes visto do ponto da falta;
V'_F	vetor das tensões no do ponto da falta no período pré-falta;
E_g	vetor das tensões internas da máquina síncrona no período pré-falta;
E''_g	vetor das tensões internas da máquina síncrona no durante a falta;
Z_{eqg}	matriz de impedâncias equivalente a jusante da geração distribuída (Ω).

Os equacionamentos a seguir são feitos com base na análise de uma seção de linha. A aplicação destas equações para alimentadores contendo vários segmentos de linha será apresentada na seção 3.4.

3.2.1 Falta Fase-Terra

Considere uma falta fase-terra na fase a , no segmento de linha SR ilustrado na Figura 3.5. De acordo com a Figura 3.5, as tensões trifásicas no terminal local S no momento da falta, são expressas por (3.12):

$$\begin{bmatrix} V_{Sfa} \\ V_{Sfb} \\ V_{Sfc} \end{bmatrix} = x \cdot \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Sfa} \\ I_{Sfb} \\ I_{Sfc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

A equação da tensão na extremidade local S para a fase faltosa é obtida por (3.13):

$$V_{Sfa} = x \cdot (z_{aa} \cdot I_{Sfa} + z_{ab} \cdot I_{Sfb} + z_{ac} \cdot I_{Sfc}) + I_{Fa} \cdot R_{Fa}. \quad (3.13)$$

A corrente de falta é calculada pela diferença entre as correntes durante a falta e pré-falta, conforme a equação (3.14). Supondo que a corrente de carga seja igual a corrente da extremidade S no período pré-falta (3.15), a corrente de falta pode ser expressa por (3.16):

$$I_{Fa} = I_{Sfa} - I_{Sa} \quad (3.14)$$

$$I_{La} = I_{Sa} \quad (3.15)$$

$$I_{Fa} = I_{Sfa} - I_{La}. \quad (3.16)$$

Uma vez que a corrente de falta é calculada, o valor inicial da distância da falta pode ser estimado. Decompondo (3.13) em componentes real e imaginária, obtemos um sistema de duas equações e duas incógnitas, sendo as incógnitas a distância e a resistência de falta, conforme (3.17)-(3.18):

$$V_{Sfa_r} = x \cdot M + R_{Fa} \cdot I_{Fa_r} \quad (3.17)$$

$$V_{Sfa_i} = x \cdot N + R_{Fa} \cdot I_{Fa_i}. \quad (3.18)$$

As duas equações são colocadas sob a forma matricial, conforme (3.19):

$$\begin{bmatrix} V_{Sfa_r} \\ V_{Sfa_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & I_{Fa_r} \\ N & I_{Fa_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

e a distância da falta é obtida por (3.20):

$$x = \frac{V_{Sf_{a_r}} \cdot I_{F_{a_i}} - V_{Sf_{a_i}} \cdot I_{F_{a_r}}}{M \cdot I_{F_{a_i}} - N \cdot I_{F_{a_r}}}. \quad (3.20)$$

onde as componentes r e i representam, respectivamente, as componentes reais e imaginárias dos fasores tensão e corrente e, M e N representam, respectivamente as componentes real e imaginária dos parâmetros da linha, os quais são obtidos por (3.21) e (3.22):

$$M = \sum_{k=\{a,b,c\}} \left[z_{ak_r} \cdot I_{Sf_{k_r}} - z_{ak_i} \cdot I_{Sf_{k_i}} \right] \quad (3.21)$$

$$N = \sum_{k=\{a,b,c\}} \left[z_{ak_r} \cdot I_{Sf_{k_i}} + z_{ak_i} \cdot I_{Sf_{k_r}} \right] \quad (3.22)$$

As equações desenvolvidas até então são referentes à faltas do tipo fase-terra na fase a . Entretanto, estas são válidas para todas as fases, para tanto, estas devem ser expressas de forma genérica.

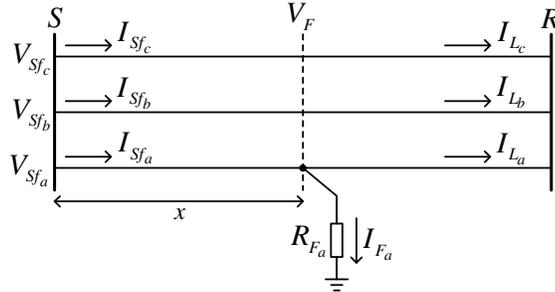


Figura 3.5: Falta fase-terra na fase a .

As equações (3.16), (3.20), (3.21) e (3.22) utilizadas para o cálculo da corrente de falta, da distância da falta e dos parâmetros de linha desenvolvidas para faltas fase-terra na fase a podem ser expressas de forma genérica para a fase m , através das equações (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26), respectivamente:

$$I_{F_m} = I_{Sf_m} - I_{S_m} \quad (3.23)$$

$$x = \frac{V_{Sf_{m_r}} \cdot I_{F_{m_i}} - V_{Sf_{m_i}} \cdot I_{F_{m_r}}}{M \cdot I_{F_{m_i}} - N \cdot I_{F_{m_r}}} \quad (3.24)$$

$$M = \sum_{k=\{a,b,c\}} \left[z_{mk_r} \cdot I_{Sf_{k_r}} - z_{mk_i} \cdot I_{Sf_{k_i}} \right] \quad (3.25)$$

$$N = \sum_{k=\{a,b,c\}} \left[z_{mk_r} \cdot I_{Sf_{k_i}} + z_{mk_i} \cdot I_{Sf_{k_r}} \right] \quad (3.26)$$

Observa-se que a equação da distância da falta (3.24) é função da corrente de falta. A corrente de falta é dependente da corrente de carga, sendo esta atualizada através de um algoritmo iterativo e apresentado em detalhes na seção 3.2.3.

3.2.2 Falta Trifásica

Considere uma falta trifásica, no segmento de linha ilustrado na Figura 3.6. De acordo com a Figura 3.6, as tensões trifásicas no terminal local S no momento da falta, são expressas por (3.27):

$$\begin{bmatrix} V_{Sf_a} \\ V_{Sf_b} \\ V_{Sf_c} \end{bmatrix} = x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Sf_a} \\ I_{Sf_b} \\ I_{Sf_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

A expressão da equação (3.27) através de suas componentes reais e imaginárias resulta no conjunto de expressões:

$$V_{Sf_{ar}} = x \cdot T_1 + R_{F_a} \cdot I_{F_{ar}} \quad (3.28)$$

$$V_{Sf_{ai}} = x \cdot T_2 + R_{F_a} \cdot I_{F_{ai}} \quad (3.29)$$

$$V_{Sf_{br}} = x \cdot T_3 + R_{F_b} \cdot I_{F_{br}} \quad (3.30)$$

$$V_{Sf_{bi}} = x \cdot T_4 + R_{F_b} \cdot I_{F_{bi}} \quad (3.31)$$

$$V_{Sf_{cr}} = x \cdot T_5 + R_{F_c} \cdot I_{F_{cr}} \quad (3.32)$$

$$V_{Sf_{ci}} = x \cdot T_6 + R_{F_c} \cdot I_{F_{ci}} \quad (3.33)$$

onde os parâmetros de linhas são obtidos por:

$$T_1 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{ak_r} \cdot I_{Sf_{k_r}} - Z_{ak_i} \cdot I_{Sf_{k_i}}] \quad (3.34)$$

$$T_2 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{ak_r} \cdot I_{Sf_{k_i}} + Z_{ak_i} \cdot I_{Sf_{k_r}}] \quad (3.35)$$

$$T_3 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{bk_r} \cdot I_{Sf_{k_r}} - Z_{bk_i} \cdot I_{Sf_{k_i}}] \quad (3.36)$$

$$T_4 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{bk_r} \cdot I_{Sf_{k_i}} + Z_{bk_i} \cdot I_{Sf_{k_r}}] \quad (3.37)$$

$$T_5 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{ck_r} \cdot I_{Sf_{k_r}} - Z_{ck_i} \cdot I_{Sf_{k_i}}] \quad (3.38)$$

$$T_6 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{ck_r} \cdot I_{Sf_{k_i}} + Z_{ck_i} \cdot I_{Sf_{k_r}}] \quad (3.39)$$

Das equações (3.28)-(3.33) verifica-se a presença de 6 equações e 4 incógnitas, que são a distância de falta e as resistências nas três fases. Para a solução deste sistema é suficiente a escolha de apenas 4 equações conforme mostrado em (3.40):

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{F_a} \\ R_{F_b} \\ R_{F_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & I_{F_{ar}} & 0 & 0 \\ T_2 & I_{F_{ai}} & 0 & 0 \\ T_3 & 0 & I_{F_{br}} & 0 \\ T_4 & 0 & 0 & I_{F_{cr}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Sf_{ar}} \\ V_{Sf_{ai}} \\ V_{Sf_{br}} \\ V_{Sf_{ci}} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

A solução da equação (3.40) resulta na estimativa da distância de falta.

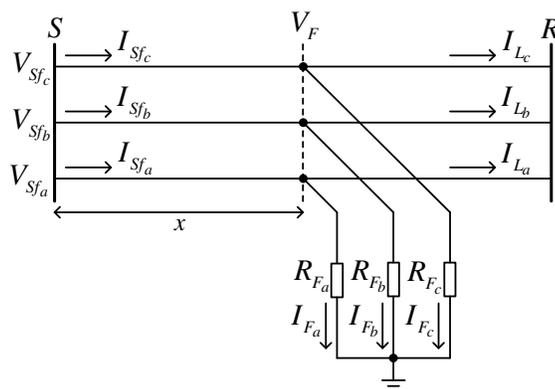


Figura 3.6: Falta trifásica.

De forma semelhante ao equacionamento para as faltas fase-terra, a equação da distância da falta (3.40) é função da corrente de falta e da corrente de carga, as quais, são obtidas através de um algoritmo iterativo a ser apresentado na subseção 3.2.3.

3.2.3 Algoritmo Iterativo Proposto

O método de LDF proposto é baseado num algoritmo iterativo semelhante ao proposto no trabalho de Bretas *et al.* (2006). A idéia do tratamento dos sistemas equivalentes de forma passiva, para faltas a jusante da geração distribuída e, de forma não-passiva para faltas a montante da geração distribuída é a mesma do referido trabalho (BRETAS et al., 2006). No entanto, a representação do sistema é feita por coordenadas de fase, como será visto ao longo desta seção. A Figura 3.7 representa um SDE com a presença da geração distribuída, semelhante ao sistema apresentado por Bretas *et al.* (2006). Para faltas a jusante da geração distribuída, o sistema equivalente de Thévenin é representado por uma matriz impedância equivalente Z_{th} , conforme a Figura 3.8(a) e, para faltas a montante da geração distribuída este é representado por uma matriz impedância equivalente Z_{th} e por um vetor de tensões equivalente V_{th} , conforme mostrado na Figura 3.8(b).

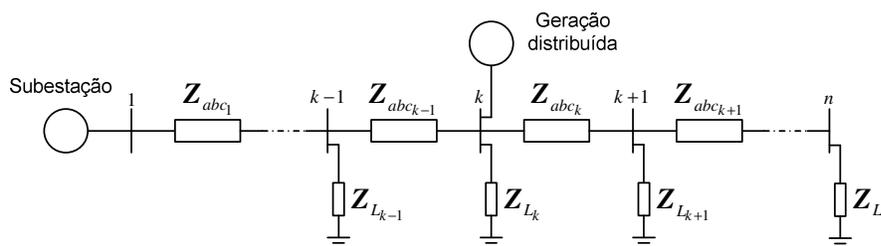
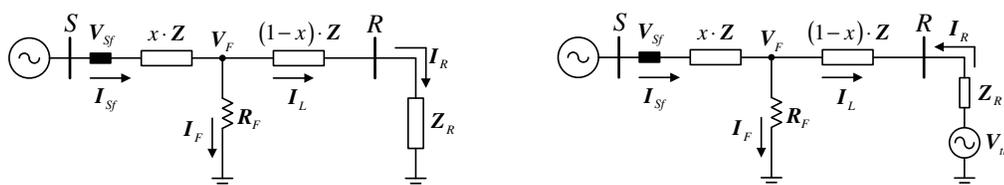


Figura 3.7: Sistema de distribuição com a presença da geração distribuída.



(a) Circuito equivalente para falta a jusante do gerador. (b) Circuito equivalente para falta a montante do gerador.

Figura 3.8: Circuitos equivalentes de Thévenin para o sistema da Figura 3.7.

O algoritmo proposto inicia considerando a possibilidade de ocorrência da falta no início do alimentador, na primeira seção de linha após a barra da subestação, conforme segue:

- I. Assume-se que o vetor das correntes trifásicas de carga é igual ao vetor das correntes trifásicas na extremidade S , no período pré-falta, conforme (3.41):

$$\mathbf{I}_L = \mathbf{I}_S \quad (3.41)$$

- II. Estima-se inicialmente a corrente de falta utilizando a equação (3.42):

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_{sf} - \mathbf{I}_L \quad (3.42)$$

- III. Calcula-se a estimativa inicial da distância de falta, utilizando a equação específica para cada tipo de falta:

- a. Fase-terra (3.24)
b. Trifásica (3.40)

- IV. Uma vez estimada a distância, é feita a análise de convergência do algoritmo, pela equação (3.43):

$$[x(n) - x(n - 1)] < 0.0001 * L \quad (3.43)$$

onde n representa o número de iterações do algoritmo e L é o comprimento da seção de linha analisada.

- V. As tensões trifásicas no ponto da falta são determinadas pela equação (3.44):

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sfa} \\ V_{Sfb} \\ V_{Sfc} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Sfa} \\ I_{Sfb} \\ I_{Sfc} \end{bmatrix}. \quad (3.44)$$

- VI. Com as tensões trifásicas no ponto da falta, obtidas no passo V, é necessário determinar um circuito equivalente de todo o sistema a jusante da falta. A partir dos dados desse circuito equivalente e das tensões trifásicas no local da falta são calculadas as correntes trifásicas de carga. O circuito equivalente a jusante da falta é obtido observando-se o local da primeira estimativa da distância da falta. Caso o local da falta, estimado no passo III, esteja a montante da GD, uma matriz impedância equivalente e um vetor das tensões trifásicas equivalente, vistos da extremidade remota da seção faltosa devem ser determinados. A partir destes, estima-se as correntes trifásicas de carga, conforme (3.44):

$$\begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{thaa} & y_{thab} & y_{thac} \\ y_{thba} & y_{thbb} & y_{thbc} \\ y_{thca} & y_{thcb} & y_{thcc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fa} - V_{tha} \\ V_{Fb} - V_{thb} \\ V_{Fc} - V_{thc} \end{bmatrix}. \quad (3.44)$$

Caso o local estimado no passo III esteja a jusante da GD, significa que o circuito a jusante da falta é puramente passivo, nesse caso as correntes trifásicas de carga, são obtidas por (3.45):

$$\begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{thaa} & y_{thab} & y_{thac} \\ y_{thba} & y_{thbb} & y_{thbc} \\ y_{thca} & y_{thcb} & y_{thcc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix}. \quad (3.45)$$

- VII. Com o valor atualizado do vetor corrente de carga \mathbf{I}_L , retorna-se ao passo II.

Este algoritmo é executado até a convergência, onde então obtém-se uma estimativa do local da falta. Caso a falta seja localizada na primeira seção do alimentador, o método é finalizado e temos uma estimativa final para o local da falta. Se a falta for estimada após a primeira seção, é necessário atualizar os vetores tensão e corrente para a próxima barra do sistema e o algoritmo proposto é executado novamente. Este processo repete-se enquanto a estimativa da distância de falta não for localizada dentro da seção correspondente aos vetores da tensão e da corrente atualizados. O algoritmo iterativo descrito nesta seção é apresentado através do diagrama de fluxo ilustrado na Figura 3.9.

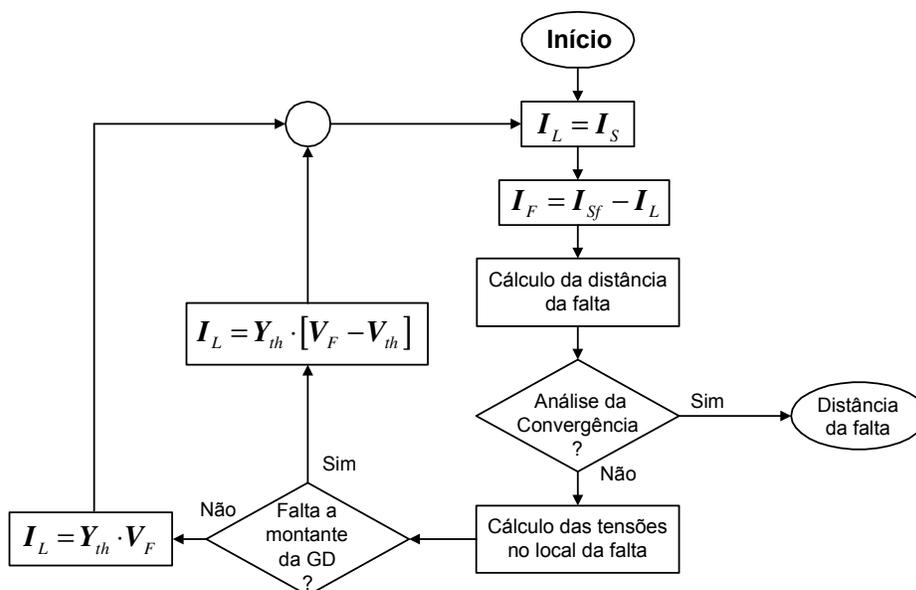


Figura 3.9: Diagrama de fluxo do algoritmo para atualização da corrente de falta.

Conforme descrito nesta seção, o sistema equivalente de Thévenin a jusante da falta é fundamental para a atualização da corrente de carga, sendo a determinação deste obtida a partir dos dados de regime permanente do sistema faltoso, a qual é descrita com detalhes na seção 3.3.

3.2.4 Atualização das Tensões e das Correntes Trifásicas

Considere o SDE com a presença da GD, ilustrado na Figura 3.7. Verifica-se que o sistema pode ser dividido em duas partes: o circuito a montante e o circuito a jusante do gerador. Como pode ser visto na Figura 3.7, o circuito a montante do gerador corresponde às barras 1 até $k - 1$, e o circuito a jusante do gerador corresponde às barras $k + 1$ até n . Caso o local da falta estimado não se encontre dentro da primeira seção do alimentador referente aos vetores tensão e corrente da subestação, é necessário atualizar os vetores das tensões e das correntes para a barra seguinte do sistema, de acordo com as seguintes equações (3.46) e (3.47), respectivamente:

$$V_{Sf_k} = V_{Sf_{k-1}} - L \cdot Z_{k-1} \cdot I_{Sf_{k-1}} \quad (3.46)$$

$$I_{Sf_k} = I_{Sf_{k-1}} - Y_{Lk} \cdot V_{Sf_k} \quad (3.47)$$

Logo, o algoritmo de localização de faltas é executado novamente até que uma nova distância entre a barra local e o ponto da falta seja encontrada. Esta atualização é executada sucessivamente até que a falta seja estimada dentro da seção analisada.

A equação (3.47) é empregada para atualização das correntes faltosas nas barras do sistema, exceto para a barra onde há conexão da GD. As correntes que saem da barra da GD são estimadas de acordo com a equação (3.48):

$$I_{sf_k} = I_{sf_{k-1}} - Y_{Lk} \cdot V_{sf_k} + I_{gf} \quad (3.48)$$

A atualização dos vetores V_{sf} e I_{sf} é descrita através do algoritmo simplificado mostrado no fluxograma da Figura 3.10. Através deste fica evidente a contribuição da geração distribuída para o cálculo das correntes faltosas do sistema, tendo influência direta na estimativa do local de falta.

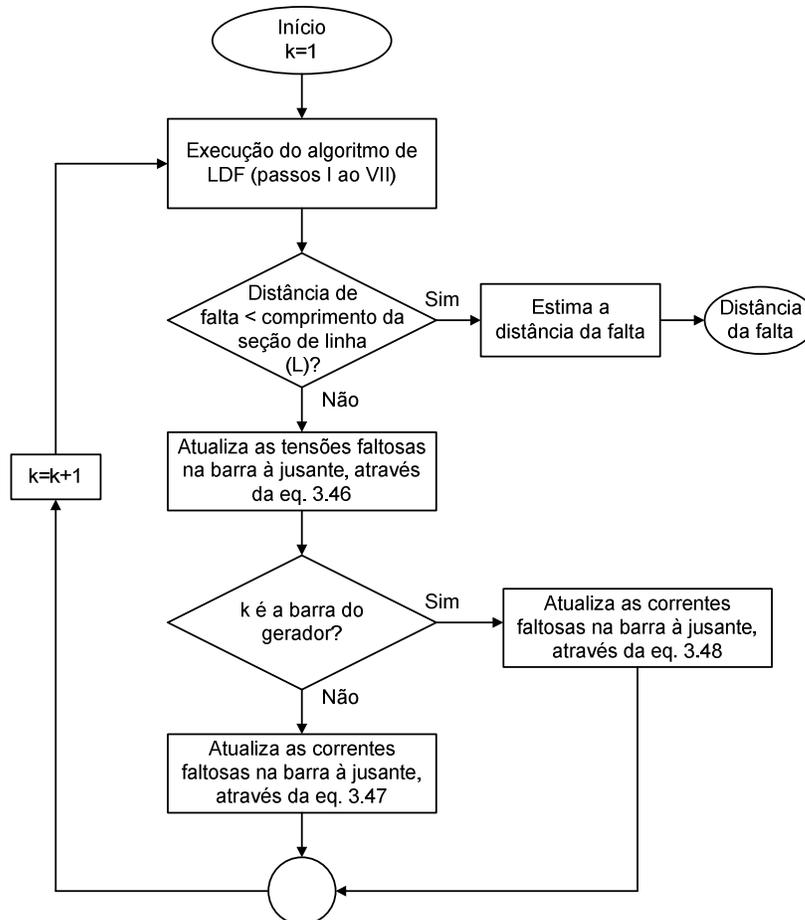


Figura 3.10: Algoritmo de atualização das tensões e das correntes trifásicas.

A estimativa da corrente do gerador I_{gf} é feita com base no modelo de máquina síncrona descrito na subseção 3.1.3. Este modelo assume que a tensão interna da máquina se mantém constante no momento da falta (KUNDUR, 1994), conforme (3.49).

$$\begin{bmatrix} E_{ga}'' \\ E_{gb}'' \\ E_{gc}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ga} \\ E_{gb} \\ E_{gc} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Com a ocorrência de uma falta no sistema, modifica-se a tensão na barra do gerador no momento da falta, entretanto, a tensão interna da máquina será considerada constante (KUN-

DUR, 1994), possibilitando o cálculo da contribuição de corrente faltosa do gerador para o sistema, conforme a equação (3.50):

$$\begin{bmatrix} I_{gfa} \\ I_{gfb} \\ I_{gfc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + jX_{S_a}'' & 0 & 0 \\ 0 & R_b + jX_{S_b}'' & 0 \\ 0 & 0 & R_c + jX_{S_c}'' \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} E_{g_a}'' - V_{kfa} \\ E_{g_b}'' - V_{kfc} \\ E_{g_c}'' - V_{kfc} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

onde o sub-índice k representa a barra na qual a GD está conectada.

De acordo com o fluxograma da Figura 3.10, verifica-se que enquanto a falta não for localizada dentro da seção de linha analisada, o processo de atualização das tensões e das correntes trifásicas para a próxima barra do sistema é necessária. O algoritmo de LDF deve ser executado sempre que for realizada uma nova atualização, até que a falta seja localizada dentro da seção de linha analisada. Considerando que a falta ocorra dentro da seção correspondente aos fasores tensão e corrente atualizados, o local da falta estimado é obtido por (3.51):

$$local\ estimado = x + x_{sk} \quad (3.51)$$

onde x representa a distância entre a barra local k e o ponto da falta e; x_{sk} representa a distância entre a subestação S e a barra local k .

Verifica-se pela equação (3.50) que, a estimativa da tensão interna da máquina no período pré-falta é fundamental para o cálculo das correntes faltosas do gerador. O método usado para a determinação desta será descrito em detalhes na subseção 3.3.2.

3.3 ANÁLISE PRÉ-FALTA

A análise pré-falta do sistema constitui uma das etapas mais importantes do método de LDF proposto. A determinação prévia dos sistemas equivalentes é imprescindível para que seja calculada a corrente que flui para a extremidade remota da seção faltosa. Sem isso, seria impossível fazer a correção da corrente de falta no algoritmo iterativo de LDF conforme foi descrito na seção anterior. Assim, uma análise pré-falta também é necessária para que seja estimada a tensão interna da máquina síncrona. A estimativa desta é fundamental para o processo de atualização das tensões e das correntes trifásicas para as barras a jusante da geração distribuída. Sendo assim, verifica-se que a análise pré-falta utilizada neste algoritmo subdivide-se em duas etapas distintas. A primeira etapa consiste na determinação dos sistemas equivalentes por meio pela aplicação do teorema de Thévenin, considerando a presença da geração distribuída no sistema. Na segunda etapa, a determinação da tensão interna da máquina síncrona é feita através da análise de circuitos no sistema de distribuição.

3.3.1 Sistema Equivalente de Thévenin

O estudo sobre o algoritmo de LDF realizado na seção anterior mostrou que a técnica iterativa utilizada para a estimativa da corrente de falta depende da diferença entre a corrente no terminal local da seção faltosa e a corrente de carga. Para a estimativa da corrente de carga, o presente trabalho utiliza o teorema de Thévenin, o qual é aplicável a circuitos lineares (STEVENSON, 1974). Como o modelo utilizado para a máquina síncrona apresenta uma impedância constante, supõe-se que haja linearidade. Neste trabalho, impedâncias equivalentes são obtidas na condição de regime permanente para todas as barras do sistema.

A fim de explicar o método, considere o exemplo de um alimentador de distribuição faltoso com a presença da geração distribuída, ilustrado na Figura 3.11. Suponha ainda que uma falta ocorra entre a subestação e a geração distribuída.

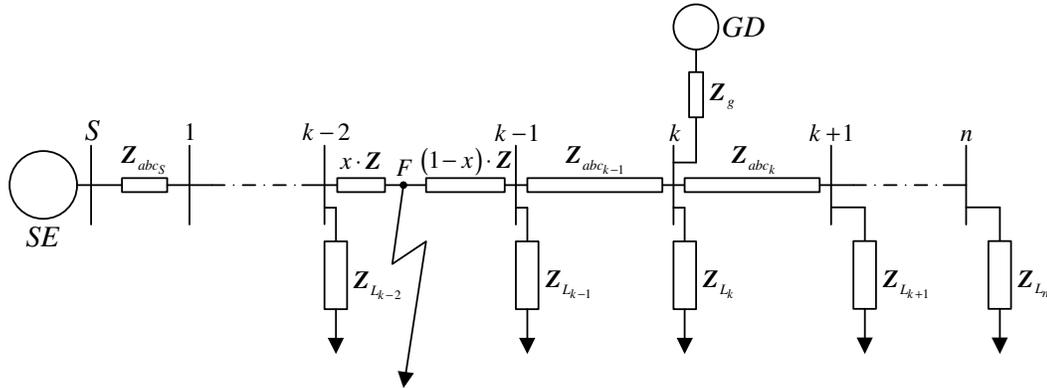


Figura 3.11: Exemplo de sistema de distribuição de energia com a presença da geração distribuída.

Para a determinação de um sistema equivalente de Thévenin, desconecta-se todo o circuito a jusante da falta, conforme é mostrado na Figura 3.12(a) e calcula-se uma matriz impedância equivalente Z_{th} e um vetor tensão equivalente V_{th} que represente o circuito desconectado, conforme é mostrado na Figura 3.12(b). Evidentemente, para que o equivalente Thévenin seja calculado é necessário que seja feita uma estimativa inicial do local da falta, conforme o algoritmo iterativo descrito na seção anterior.

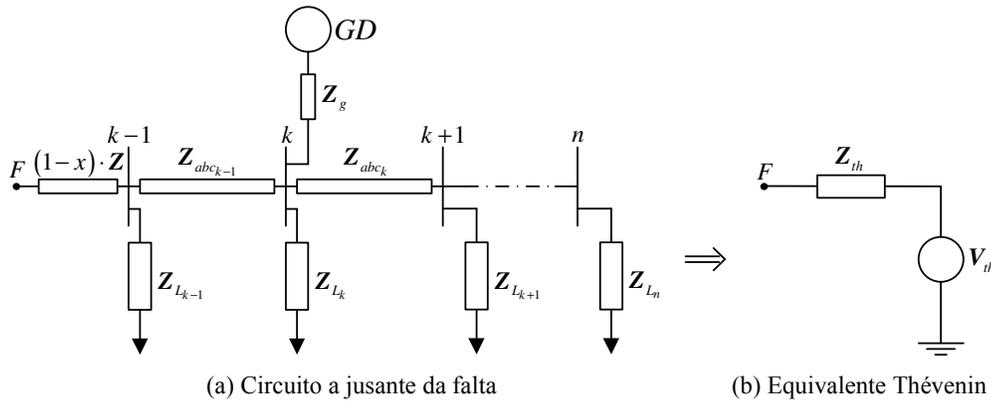


Figura 3.12: Sistema equivalente Thévenin.

O procedimento utilizado para o cálculo do sistema equivalente de Thévenin será dividido em duas etapas, tomando como referência as Figuras 3.11 e 3.12:

Cálculo da Impedância Equivalente de Thévenin (Z_{th}) Para o cálculo da impedância equivalente de Thévenin considera-se todas as fontes de tensão curto-circuitadas e calcula-se uma impedância equivalente a jusante da falta. Associações série-paralelo são efetuadas de forma sistemática, a partir do final do alimentador até a extremidade remota da seção faltosa. Assim, obtém-se a matriz impedância equivalente para todas as barras do sistema, conforme as equações (3.52) a (3.54):

$$Z_{eqR} = Z_{L_n} \quad (3.52)$$

$$Z_{eqR} = \left[(Z_{eqR+1} + Z_{abcR})^{-1} + (Z_{LR})^{-1} \right]^{-1} \quad (3.53)$$

$$\mathbf{Z}_{eqR} = \left[(\mathbf{Z}_{eqR+1} + \mathbf{Z}_{abcR})^{-1} + (\mathbf{Z}_{LR})^{-1} + (\mathbf{Z}_g)^{-1} \right]^{-1} \quad (3.54)$$

A equação (3.52) é utilizada para o cálculo da impedância equivalente na última barra do sistema; a equação (3.53) é utilizada para o cálculo da impedância equivalente para todas as barras do sistema, exceto a barra em que está conectada a geração distribuída e; a equação (3.54) é aplicada para o cálculo da impedância equivalente na(s) barra(s) que contém gerador.

Analisando a Figura 3.12, verifica-se que a impedância equivalente de Thévenin para este circuito é obtida através da soma da matriz impedância equivalente vista da barra $k - 1$ (terminal R) com a matriz impedância do trecho de linha entre o ponto da falta e a barra $k - 1$ (terminal R), conforme (3.55):

$$\mathbf{Z}_{th} = (1 - x) \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{eqR} \quad (3.55)$$

Aplicando o teorema de Thévenin ao circuito da Figura 3.12(a), a fonte geradora conectada na barra k é curto-circuitada de acordo com o circuito ilustrado na Figura 3.13, restando somente as impedâncias do circuito a jusante da falta. A impedância equivalente vista da barra $k - 1$ (terminal R) é obtida através das equações (3.52) a (3.54). Logo após, a impedância equivalente de Thévenin vista do ponto da falta é obtida pela equação (3.55).

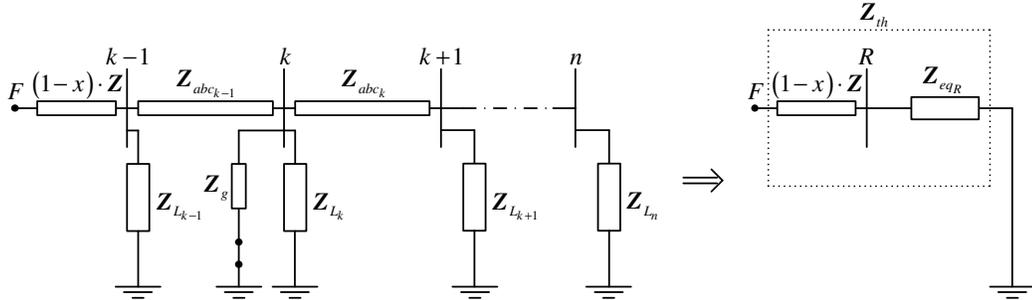


Figura 3.13: Determinação da impedância equivalente de Thévenin.

Cálculo da Tensão equivalente de Thévenin (V_{th}) As tensões equivalentes de Thévenin são obtidas com base no cálculo da tensão no ponto da falta, no período pré-falta. A partir de uma estimativa inicial da distância e dos dados do relé no período pré-falta calcula-se a tensão no ponto da falta no período pré-falta, conforme (3.56):

$$\begin{bmatrix} V'_{Fa} \\ V'_{Fb} \\ V'_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

A tensão equivalente de Thévenin será igual a tensão no ponto da falta no período pré-falta conforme (3.57):

$$\begin{bmatrix} V_{th_a} \\ V_{th_b} \\ V_{th_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{Fa} \\ V'_{Fb} \\ V'_{Fc} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

No caso do circuito ilustrado na Figura 3.11, a tensão no ponto da falta sob condições de regime permanente é obtida por (3.56) com base nos dados da extremidade local no período pré-falta e a partir da distância inicial estimada, como ilustra a Figura 3.14.

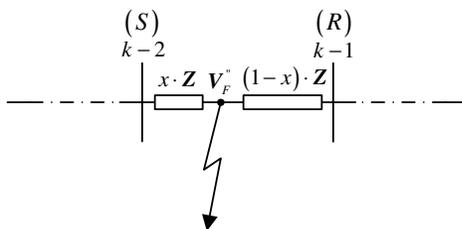


Figura 3.14: Determinação da tensão equivalente de Thévenin.

O cálculo do sistema equivalente de Thévenin para faltas a jusante da geração distribuída é mais simples, visto que todo o sistema a jusante da falta é passivo. Assim, o circuito equivalente será composto somente por uma matriz impedância equivalente e o método usado para o cálculo deste é o método de associação série-paralelo descrito nesta seção.

A matriz admitância equivalente de Thévenin é obtida por:

$$\mathbf{Y}_{th} = \mathbf{Z}_{th}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{th_{aa}} & Z_{th_{ab}} & Z_{th_{ac}} \\ Z_{th_{ba}} & Z_{th_{bb}} & Z_{th_{bc}} \\ Z_{th_{ca}} & Z_{th_{cb}} & Z_{th_{cc}} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} y_{th_{aa}} & y_{th_{ab}} & y_{th_{ac}} \\ y_{th_{ba}} & y_{th_{bb}} & y_{th_{bc}} \\ y_{th_{ca}} & y_{th_{cb}} & y_{th_{cc}} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Na Figura 3.15 é ilustrado de forma resumida, o esquema utilizado para o cálculo do sistema equivalente.

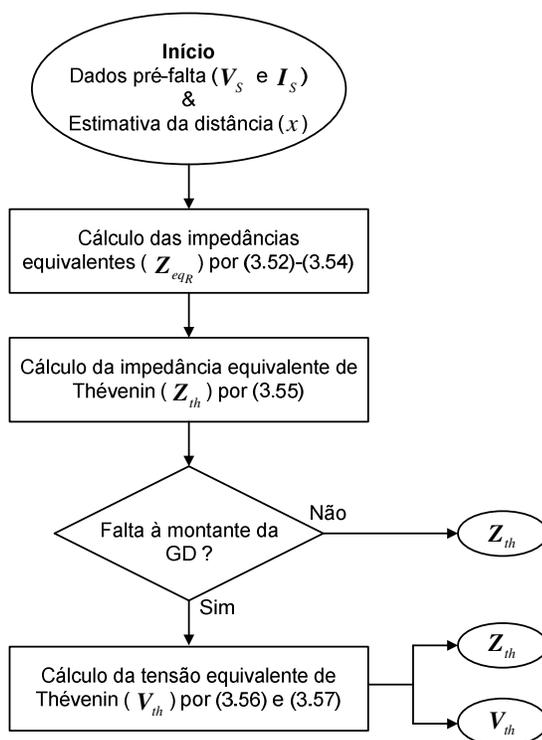


Figura 3.15: Algoritmo simplificado para determinação do sistema equivalente de Thévenin.

O esquema simplificado da Figura 3.15 descreve a determinação do sistema equivalente de Thévenin, utilizado para a atualização da corrente de carga no algoritmo de LDF, descrito na seção anterior.

3.3.2 Estimativa da Tensão Interna da Máquina Síncrona

A estimativa da tensão interna da máquina síncrona no algoritmo proposto é uma etapa crucial para a atualização das correntes trifásicas a jusante da geração distribuída. A presença da geração distribuída num SDE modifica as magnitudes e as direções das correntes faltosas (BRAHMA; GIRGIS, 2004). A precisão das metodologias de localização de faltas baseadas na impedância aparente, em especial, para a localização de faltas a jusante da unidade geradora é também afetada de forma significativa (BRETAS et al., 2006). Tendo em vista este problema, o presente trabalho propõe a atualização das correntes trifásicas a jusante da unidade geradora com base na estimativa da tensão interna do gerador. Considerando que o modelo de gerador utilizado é o modelo de uma máquina síncrona, os fluxos concatenados no rotor não variam instantaneamente, de modo que a tensão interna da máquina se mantém constante entre os períodos pré-falta e durante a falta (KUNDUR, 1994). O esquema usado para a estimativa da tensão interna do gerador é executado no período pré-falta em regime permanente do sistema, através da análise direta de circuitos e baseia-se nas medições na subestação do sistema. Uma rede de distribuição com a presença da GD é ilustrada na Figura 3.16.

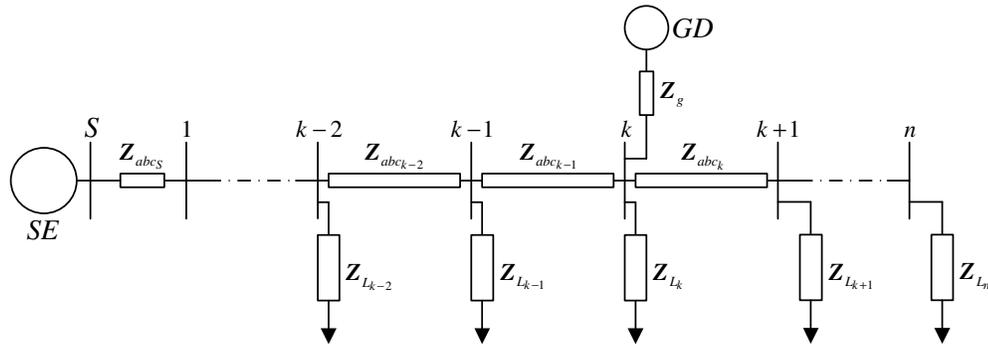


Figura 3.16: Sistema de distribuição com a presença da geração distribuída no período pré-falta.

A partir das medições na subestação do sistema no período pré-falta e dos parâmetros das linhas desprezando o efeito capacitivo (KERSTING, 2007), são efetuados cálculos de tensões e correntes até a barra do gerador (k), conforme (3.59):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{S_k} \\ \mathbf{I}_{S_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d} & -\mathbf{b} \\ -\mathbf{c} & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{S_{k-1}} \\ \mathbf{I}_{S_{k-1}} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

onde

$$\mathbf{a} = \mathbf{d} = \mathbf{I} \quad (3.60)$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{Z}_{abc_{k-1}} \quad (3.61)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{0}, \quad (3.62)$$

sendo

\mathbf{V}_{S_k}	vetor das tensões trifásicas na barra k ;
\mathbf{I}_{S_k}	vetor correntes trifásicas na barra k ;
$\mathbf{V}_{S_{k-1}}$	vetor das tensões trifásicas na barra $k - 1$;
$\mathbf{I}_{S_{k-1}}$	vetor correntes trifásicas na barra $k - 1$;
\mathbf{I}	matriz identidade de ordem três;
$\mathbf{Z}_{abc_{k-1}}$	matriz impedância de linha entre as barras $k - 1$ e k .

A Figura 3.16 mostra as correntes na barra onde está conectado o gerador. A tensão interna da máquina síncrona no período pré-falta é obtida pelas equações (3.63) a (3.65):

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{I}_{S_k} + \mathbf{I}_{L_k} - \mathbf{I}_{S_{k-1}} \quad (3.63)$$

$$\mathbf{I}_{L_k} = \mathbf{Z}_{L_k}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{S_k} \quad (3.64)$$

$$\mathbf{E}_g = \mathbf{V}_{S_k} + \mathbf{Z}_g \cdot \mathbf{I}_g \quad (3.65)$$

Considerando que todo o sistema é passivo a jusante do gerador, as correntes trifásicas que saem da barra do gerador são obtidas agregando todas as impedâncias a jusante em uma única, por meio de associações série-paralelo entre as linhas e as cargas do sistema. Este procedimento é semelhante ao descrito na subseção anterior, exceto pelo fato que neste caso não foi considerada a carga conectada à barra do gerador no cálculo desta impedância equivalente. Deste modo, a corrente a jusante da unidade geradora pode ser obtida por (3.66):

$$\mathbf{I}_{S_k} = \mathbf{Z}_{eqg}^{-1} \cdot \mathbf{V}_{S_k} \quad (3.66)$$

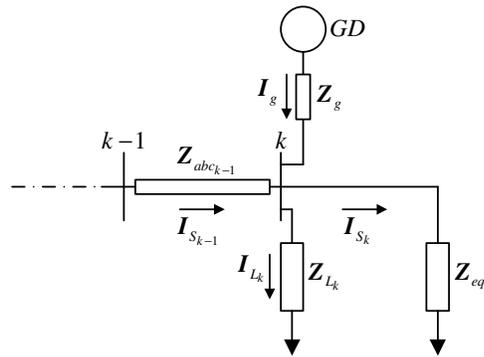


Figura 3.17: Correntes trifásicas na barra do gerador.

A partir da tensão interna da máquina, obtida pela equação (3.65), é possível atualizar as tensões e as correntes trifásicas a jusante da geração distribuída, conforme descrito na subseção 3.2.4.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado um método de localização de faltas em sistemas de distribuição considerando a presença da geração distribuída. O equacionamento foi desenvolvido para faltas do tipo fase-terra e trifásicas e fundamenta-se no cálculo da impedância aparente a partir de medições de tensão e de corrente na subestação.

O uso das coordenadas de fase no desenvolvimento da formulação permite uma representação mais precisa das características reais de um alimentador de distribuição, o qual é tipicamente desbalanceado em função da topologia assimétrica e da não-transposição de seus condutores. No entanto, o método desconsidera a presença das ramificações laterais, tendo em vista que a presença desta implica no surgimento de outros problemas que fogem do escopo deste trabalho.

O presente método baseia-se na análise de regime permanente do sistema, sendo uma etapa fundamental para a atualização das tensões e das correntes a jusante da falta, bem como, para a determinação do sistema equivalente a jusante da falta. Para o modelo de gerador foi

considerado o modelo simplificado de uma máquina síncrona, adequado para a estimativa das correntes do gerador no período de falta.

No próximo capítulo será feita a validação da metodologia proposta através da análise comparativa com técnicas que compõem o estado da arte de localização de faltas em sistemas de distribuição de energia.

4 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o sistema teste utilizado para o estudo de caso, bem como os resultados obtidos na estimativa do local da falta utilizando a formulação proposta e duas metodologias previamente apresentadas no Capítulo 2.

4.1 ESTUDO DE CASO

Conforme apresentado no Capítulo 3, o método de localização de faltas proposto utiliza as medições nos primeiros ciclos da falta, obtidas do relé digital instalado na subestação. Como o relé fornece a saída no domínio tempo e a localização de faltas baseia-se na análise fasorial, é necessário realizar o processamento dos sinais. Para tanto, o presente trabalho utiliza um filtro de Fourier modificado (LIN; LIU, 2002), responsável pela extração dos componentes fundamentais dos sinais de tensão e de corrente, eliminando a componente DC que afeta a periodicidade dos sinais nos filtros de Fourier convencionais (PHADKE; THORP, 1988). A validação da metodologia proposta é feita através de simulações de faltas em diversos pontos de um sistema teste, executados no software ATP/EMTP (BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007). As simulações são realizadas de forma automática e para diferentes níveis de geração distribuída com o auxílio da ferramenta F-Sim versão 1.0.1 (SALIM, 2008). As rotinas computacionais que compõe a metodologia proposta foram construídas no Matlab (MATLAB, 2007).

4.1.1 Sistema Teste

O desempenho da técnica de localização de faltas proposta foi analisado a partir de simulações de faltas em um alimentador de distribuição obtido da literatura (WAKILEH; PAHWA, 1997). O presente sistema é composto por 11 seções de linha de comprimentos distintos, 11 barras de carga e um gerador interconectado na metade do sistema, conforme ilustrado na Figura 4.1. As ramificações laterais presentes no sistema original foram eliminadas através da sua redução em cargas equivalentes e a geração distribuída foi inserida no km 11,86 do alimentador. A tensão nominal do sistema teste é de 13,8 kV e a potência total trifásica das cargas conectadas à rede de $(7,33 + j3,27)$ MVA.

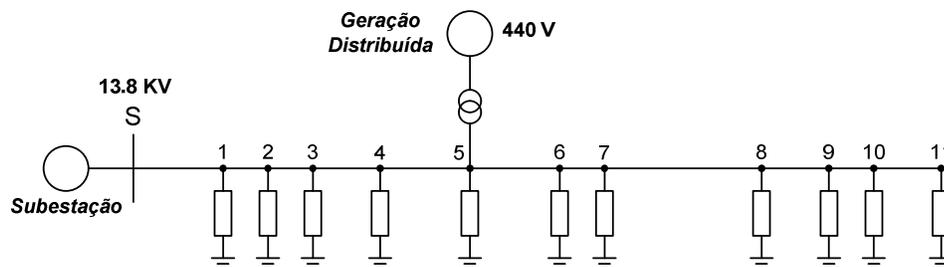


Figura 4.1: Alimentador de distribuição teste.

O gerador apresenta uma tensão de saída de 440 V, sendo conectado à rede de distribuição através de um transformador Y-Y de 440 V/13,8 kV, cujo neutro é aterrado no lado de alta e no lado de baixa tensão. O alimentador é composto por linhas aéreas de distribuição de energia cuja representação é a de um modelo RL a quatro fios com neutro aterrado. A configuração das linhas apresenta um espaçamento desigual entre as fases e as linhas não-

transpostas, conforme é ilustrado na Figura 4.2, cujas distâncias são representadas em metros (m).

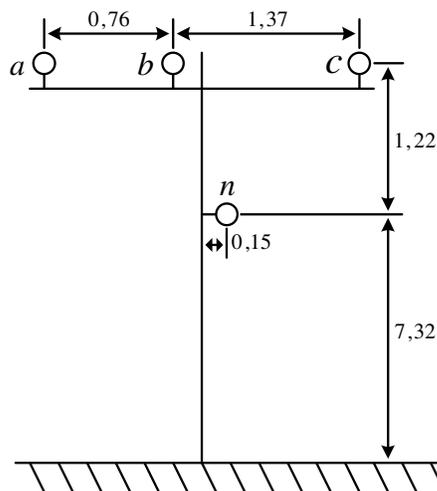


Figura 4.2: Configuração das linhas de distribuição.

Os espaçamentos horizontais, entre as fases e o centro do poste e, os espaçamentos verticais, entre as fases e o solo, são ilustrados na Tabela 4.1 (KERSTING, 2001).

Tabela 4.1: Espaçamentos dos condutores.

Espaçamentos	Condutores			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>n</i>
Horizontal (m)	-1,07	-0,30	1,07	0,15
Vertical (m)	8,53	8,53	8,53	7,32

O sistema teste é composto por 11 seções de linha de comprimentos diferentes, sem a presença das ramificações laterais, cujas especificações são ilustradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comprimento das seções de linha e tipo de condutor.

Barra Inicial	Barra Final	Comprimento (m)	Tipo de Condutor
S	1	4184	447,000 26/7 ACSR
1	2	1263	447,000 26/7 ACSR
2	3	1263	447,000 26/7 ACSR
3	4	2189	447,000 26/7 ACSR
4	5	2961	447,000 26/7 ACSR
5	6	3164	447,000 26/7 ACSR
6	7	1553	447,000 26/7 ACSR
7	8	6204	447,000 26/7 ACSR
8	9	2173	447,000 26/7 ACSR
9	10	885	447,000 26/7 ACSR
10	11	1802	447,000 26/7 ACSR

O condutor 447,000 26/7 ACSR (KERSTING, 2007) é empregado em todos os segmentos de linha e as suas especificações são mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Especificações do condutor 447,000 26/7 ACSR.

Raio Médio Geométrico	0,8839 cm
Resistência	0,1342 Ω /km
Diâmetro	2,1793 cm

A matriz impedância de linha é gerada através de uma rotina computacional construída no Matlab utilizando as equações de Carson modificadas, descritas no Capítulo 3. Esta rotina apresenta como entrada de dados os espaçamentos dos condutores (Tabela 4.1) e, o tipo de condutor utilizado em cada segmento de linha (Tabela 4.3), fornecendo na saída uma matriz impedância de linha 3x3, conforme:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0.0356 + j0.6077 & 0.0172 + j0.2612 & 0.0176 + j0.1940 \\ 0.0172 + j0.2612 & 0.0349 + j0.5863 & 0.0172 + j0.2169 \\ 0.0176 + j0.1940 & 0.0172 + j0.2169 & 0.0356 + j0.6077 \end{bmatrix} \Omega/km \quad (4.1)$$

As cargas do sistema são todas trifásicas equilibradas, conectadas em Y com o neutro solidamente aterrado. As fases são modeladas por impedâncias constantes, conforme descrito no Capítulo 3, e seus valores são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Dados das cargas do alimentador teste.

Barra	Impedância da carga (Ω)
	$R_L + jX_L$
1	64,8 + j21,6
2	328,3 + j109,4
3	538,8 + j109,4
4	183,0 + j61,0
5	906,9 + j302,3
6	646,5 + j131,3
7	114,0 + j38,0
8	605,8 + j210,5
9	194,9 + j31,6
10	708,0 + j460,0
11	740,7 + j279,8

A geração distribuída é conectada à rede de distribuição, por intermédio de um transformador trifásico Y-Y com os neutros solidamente aterrados. O gerador apresenta uma tensão nominal de 440 V. No entanto, numa rede de distribuição convencional as tensões nas barras a jusante da subestação são reduzidas em função das quedas de tensão no alimentador, de modo que a tensão no terminal do gerador também será inferior a nominal. Sendo assim, utiliza-se um método de fluxo de potência a fim de determinar as condições de operação do gerador (tensão e ângulo) considerando diferentes níveis de geração distribuída.

No cálculo de fluxo de potência em sistemas de transmissão de energia, as barras onde há geradores síncronos são representadas por injeções de potência ativa sob uma tensão especificada e por isso são denominadas de barras PV. Nos sistemas de distribuição, a presença da geração distribuída também poderia ser considerada como uma barra PV. Entretanto, estudos realizados (CHEN et al., 1991) mostram que os co-geradores síncronos em redes de distribuição são controlados para manter a potência e o fator de potência constantes e não a tensão terminal como ocorre nos sistemas de transmissão. Assim, os geradores síncronos podem ser representados por injeções constantes de potência ativa e reativa, características de uma barra

PQ. Deste modo, o presente trabalho utiliza o método iterativo ladder para rodar o fluxo de carga (KERSTING, 2007). Este método envolve duas varreduras para o cálculo das tensões e das correntes trifásicas nas barras do sistema. Na *varredura direta*, as tensões no final do alimentador são inicializadas para a primeira iteração e as correntes são calculadas começando nas barras a partir desta até a subestação, através do método de soma das correntes. A *varredura reversa* começa na barra da subestação e calcula as tensões usando as correntes obtidas através da varredura direta até o final do alimentador. As tensões da varredura reversa são utilizadas para a próxima iteração nos cálculos da varredura direta. A convergência ocorre quando a tensão da subestação calculada na varredura reversa corresponde à tensão nominal da subestação. Neste algoritmo, a unidade geradora foi considerada como uma barra PQ negativa, ou seja, uma barra PQ injetando corrente na rede, de forma semelhante aos desenvolvimentos propostos por (KHUSHALANI; SOLANKI; SCHULZ, 2007; MOGHADDAS-TAFRESHI; MASHHOUR, 2009). Entretanto, neste caso não foi considerada a regulação de tensão na barra do gerador, conforme sugerido nos referidos trabalhos.

Considerando que os produtores independentes e os auto-produtores têm interesse somente em gerar potência ativa (ACKERMAN; ANDERSSON; SÖDER, 2001) e que, não existe uma regulamentação específica que os obrigue a realizar o controle de reativos na rede, a barra do gerador síncrono é considerada como uma barra PQ cujo fator de potência é unitário. Nesse caso, o algoritmo de fluxo de potência descrito foi executado considerando o ramo do gerador como uma fonte de potência ativa conectada à rede. Este algoritmo foi executado para três diferentes níveis de geração distribuída, calculados em função do carregamento total do sistema conforme proposto em (KHUSHALANI; SOLANKI; SCHULZ, 2007) e definido por (4.2):

$$\text{Nível de GD [\%]} = \frac{P_{GD}}{P_{Total}} \times 100 \quad (4.2)$$

onde P_{GD} é a potência ativa da geração distribuída e, P_{Total} é a potência ativa total do sistema. A potência ativa total do sistema é definida por (4.3):

$$P_{Total} = P_{GD} + P_{Subestação} \quad (4.3)$$

onde $P_{Subestação}$ é a potência ativa da subestação de energia.

Os resultados obtidos para cada nível de geração distribuída, de acordo com a equação (4.2), são ilustrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Resultados do fluxo de potência baseado no método ladder.

Nível de GD (%)	Potência trifásica (MW)	Fase	Condições de Operação	
			$ V_{fase} $ [volt]	$\angle V_{fase}$ [graus]
10	0,733	A	7505	-5,457
		B	7655	-126,848
		C	7487	113,440
20	1,466	A	7532	-4,485
		B	7654	-125,793
		C	7514	114,588
30	2,199	A	7557	-3,535
		B	7652	-124,724
		C	7536	115,733

Observa-se pela Tabela 4.5, que as tensões nas fases A, B e C são desequilibradas em função das características assimétricas do alimentador de distribuição de energia. Como o modelo de gerador adotado considera uma fonte de tensão trifásica em série com a impedância trifásica da máquina, é necessário fornecer como entrada de dados na fonte de tensão, somente a impedância de seqüência positiva. Assim, as tensões trifásicas mostradas na Tabela 4.5 devem ser transformadas para tensão de seqüência positiva, conforme ilustra a Tabela 4.6, utilizando o teorema de transformação das redes de seqüência (STEVENSON, 1974; SAA-DAT, 2002). Evidentemente, como as tensões nas fases estão em desequilíbrio, serão obtidas tensões de seqüência negativa e zero, no entanto estas são desprezadas e, somente a tensão de seqüência positiva é considerada.

Tabela 4.6: Tensões de seqüência positiva no terminal da geração distribuída.

Nível de GD (%)	Potência trifásica (MW)	Tensão de seqüência positiva no lado de A.T.		Tensão de seqüência positiva no lado de B.T.	
		$ V_{1AT} $ [volt]	$\angle V_{1AT}$ [graus]	$ V_{1BT} $ [volt]	$\angle V_{1BT}$ [graus]
10	0,733	7549	-6,292	240,66	-6,292
20	1,466	7566	-5,233	241,23	-5,233
30	2,199	7581	-4,178	241,71	-4,178

Os parâmetros da máquina síncrona para cada nível de geração distribuída são obtidos de acordo com a equação (4.4):

$$Z_g = (R_{(pu)} + jX_{S(pu)}'') \cdot \left[\frac{(V_{base_g})^2}{S_{base_g}} \right] \quad (4.4)$$

onde

$R_{(pu)}$	resistência de armadura do gerador (em pu);
$X_{S(pu)}''$	reatância subtransitória do gerador (em pu);
V_{base_g}	tensão de base do gerador (em V);
S_{base_g}	potência de base do gerador (em VA).

Neste trabalho, a resistência e a reatância adotadas são de 0,02 pu e de 0,35 pu respectivamente, parâmetros típicos de uma geração hídrica (KUNDUR, 1994). Assim, os parâmetros das máquinas em ohms, para os diferentes níveis de geração distribuída, calculados conforme (4.4) são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros da máquina síncrona.

Nível de GD (%)	Potência nominal (MW)	Tensão nominal (V)	Impedância da M.S.	
			R [Ω]	X_S'' [Ω]
10	0,733	440	0,005	0,092
20	1,466	440	0,003	0,046
30	2,199	440	0,002	0,031

O sistema teste apresentado na Figura 4.2 foi modelado no software ATP/EMTP de acordo com as considerações descritas nesta seção. O gerador foi representado por uma fonte

de tensão ideal trifásica equilibrada em série com uma impedância trifásica equilibrada, adotando os valores apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7 para cada nível de geração de energia.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes ao estudo de caso apresentado na seção anterior. A localização de faltas em redes de distribuição não-passivas é ainda um tema bastante incipiente, havendo poucas técnicas desenvolvidas especificamente para esta situação. Deste modo, foram escolhidas as seguintes metodologias para a validação de dados: uma metodologia clássica de localização de faltas (LEE, et al. 2004) e uma metodologia para sistemas não-passivos desenvolvida recentemente (BRETAS et al., 2006). O uso destas duas técnicas como ferramenta de comparação se faz necessário, levando em conta que a primeira apresenta os dois tipos de faltas necessários para análise, enquanto a segunda, embora tenha sido desenvolvida somente para faltas trifásicas, contempla a presença da geração distribuída no sistema. Os resultados serão analisados para as condições de curto-circuito e para faltas resistivas de 10 Ohms, considerando três níveis distintos de geração distribuída, conforme é mostrado na Tabela 4.8.

As faltas foram aplicadas em 65 pontos distintos do sistema teste e os erros percentuais da distância estimada em função do comprimento total do alimentador é calculado por (4.5) (EL-FOULY; ABBEY, 2009):

$$erro[\%] = \left| \frac{x_{real}[km] - x_{estimada}[km]}{L_{alimentador}[km]} \right| \cdot 100 \quad (4.5)$$

onde x_{real} , $x_{estimada}$ e $L_{alimentador}$ representam a distância real, a distância estimada e o comprimento total do alimentador, respectivamente.

As seções a seguir apresentam os resultados obtidos pelas metodologias analisadas, bem como a análise de dados referente a cada uma destas.

Tabela 4.8: Condições de Simulação para Análise de Dados.

	Condição I	Condição II
Resistência de falta	0 Ω	10 Ω
Potência da GD	10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema	
Tipos de falta	<ul style="list-style-type: none"> • 4 tipos (A-g, B-g, C-g e ABC-g) para o método de Lee <i>et al.</i> (2004); • 4 tipos (A-g, B-g, C-g e ABC-g) para o método proposto; • 1 tipo (ABC-g) para o método de Bretas <i>et al.</i> (2006). 	
Carregamento	trifásico equilibrado	

4.3 RESULTADOS DO MÉTODO DE LEE *et al.* (2004)

A seguir serão apresentados os resultados para a localização de faltas obtidas pelo método de Lee *et al.* (2004). A análise dos resultados foi realizada para um sistema de distribui-

ção não-passivo, situação diferente da qual o método foi proposto. Tal análise é feita a fim de verificar o impacto da geração distribuída causado nas estimativas de localização de faltas do método em questão. Deste modo, o seu desempenho foi analisado considerando três níveis distintos de geração distribuída interconectada ao sistema de acordo com as Condições I e II.

Os resultados foram obtidos para quatro tipos de faltas (A-g, B-g, C-g e ABC-g) e são expressos em função dos valores médio e máximo dos erros, os quais são apresentados nas Tabelas 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12. Os erros em função da potência da geração distribuída e da distância da falta para a Condição I, são apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente. De forma similar, as Tabelas 4.11 e 4.12 ilustram os erros em função da potência da geração distribuída e da distância da falta para a Condição II.

4.3.1 Influência da Potência da Geração Distribuída

Analisando a Tabela 4.9, é possível verificar a influência da potência da geração distribuída no desempenho do método de Lee *et al.* (2004) para a Condição I. Com base nestes resultados, verifica-se que os valores médio e máximo dos erros tendem a aumentar proporcionalmente ao nível de potência fornecida ao sistema pela unidade geradora. De forma similar, os resultados obtidos na Tabela 4.12 indicam que os erros nas estimativas do local da falta são proporcionais a potência da geração distribuída para a Condição II. No entanto, comparando os resultados das Tabelas 4.9 e 4.11, percebe-se que os erros obtidos para esta última são ligeiramente inferiores. Em casos de curto-circuito (Condição I) a contribuição da corrente do gerador é maior do que para faltas resistivas de 10 Ohms (Condição II). Como o método de Lee *et al.* (2004) não considera a estimativa da corrente faltosa do gerador em seu equacionamento, esta apresenta erros um pouco maiores para a Condição I do que para a Condição II, embora a presença da resistência de falta também seja uma fonte de erro para os métodos de localização baseados na impedância.

4.3.2 Influência da Distância da Falta

A influência da distância da falta no método em questão pode ser avaliada com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.12, para as Condições I e II, respectivamente. Através destes resultados, fica evidente que o erro tende a aumentar com o aumento da distância, fato que pode ser melhor visualizado através das Figuras¹ 4.3 e 4.4. Percebe-se ainda que os erros médio e máximo em função da distância acentuam-se de forma mais significativa a jusante da geração distribuída (NUNES *et al.*, 2010a), que encontra-se localizada no km 11,86 do alimentador. Tal fato já era esperado tendo em vista que o método em questão não contempla a presença da geração distribuída.

4.3.3 Influência da Resistência de Falta

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.12, para as Condições I e II respectivamente, percebe-se que a resistência de falta tende a aumentar os erros a montante da unidade geradora e, sofrem uma pequena redução a jusante desta. Tanto a resistência de falta quanto a presença da geração distribuída são fontes de erro nos algoritmos de localização de faltas. No entanto, a presença de uma resistência de falta limita um pouco a corrente faltosa do gerador, atenuando o erro de localização associado a presença da geração distribuída. Este fato pode ser visualizado através da análise das Figuras 4.3 e 4.4. Considere que as Figuras 4.3 e 4.4, apresentam os resultados para as simulações de faltas A-g nas Condições I e II, res-

¹ Nos gráficos de erro versus distância, os níveis de geração distribuída são expressos em percentual da potência nominal (P.N.) ativa do sistema.

pectivamente, em 65 pontos distintos ao longo do alimentador. Comparando estas, percebe-se que o primeiro gráfico apresenta um comportamento linear, apresentando erros próximos a zero para faltas a montante da geração distribuída (km 11,86) e, apresentando uma curva ascendente para faltas localizadas a jusante desta, enquanto o segundo gráfico apresenta um comportamento não-linear em todos os trechos do alimentador. O comportamento linear apresentado na Figura 4.3 é justificado pelo fato das simulações serem realizadas para faltas sólidas, de modo que o erro do algoritmo de localização está praticamente associado às correntes faltosas do gerador. A explicação para o comportamento não-linear do gráfico apresentado na Figura 4.4 está no fato que as simulações foram feitas para faltas resistivas de 10 Ohms. Nesse caso, o algoritmo apresenta a resistência de falta e a contribuição das correntes faltosas do gerador como fontes de erro, gerando uma curva de aspecto não-linear. Contudo, é importante ressaltar que tal análise não foi realizada para faltas de alta impedância, onde possivelmente o erro associado a resistência tende a aumentar em relação ao erro produzido pela corrente do gerador, influenciando de forma mais significativa no erro de localização da falta.

4.3.4 Influência do Tipo de Falta

A influência do tipo de falta pode ser analisada com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.11, para as Condições I e II, respectivamente. Analisando inicialmente as faltas do tipo fase-terra para as três fases (A-g, B-g e C-g), é possível verificar que para o tipo de falta em questão, a fase exerce pouca influência nos resultados. As diferenças entre os erros médio e máximo obtidos para as três fases são justificadas pelo desequilíbrio das linhas. Embora as cargas sejam trifásicas e equilibradas, o desbalanceamento das linhas faz com que as quedas de tensão calculadas entre a subestação e o ponto da falta sejam um pouco diferentes para cada fase, justificando a pequena diferença nos resultados para as faltas do tipo fase-terra.

Analisando os resultados obtidos através das Tabelas 4.9 e 4.11, verifica-se que o tipo de falta exerce uma pequena influência sobre os resultados, independentemente da condição analisada. Neste caso, os erros médio e máximo estimados para as faltas do tipo trifásica são consideravelmente menores em relação as estimativas obtidas para as faltas do tipo fase-terra.

4.3.5 Análise Geral

A partir dos resultados obtidos é possível avaliar o desempenho da metodologia de Lee *et al.* (2004) para o caso de um sistema de distribuição com a inclusão da geração distribuída. Verifica-se que a presença da geração distribuída afeta as estimativas de localização de faltas especialmente para faltas a jusante do gerador, gerando erros que tendem a aumentar em relação à distância. Percebe-se ainda que estes erros são potencializados em função do aumento do nível de geração fornecida ao sistema. A presença da resistência de falta e a parcela de corrente proveniente da geração distribuída são as duas principais fontes de erro neste algoritmo de localização de faltas. Entretanto, o erro de localização da falta associado a contribuição de corrente do gerador para a falta é atenuado pela presença da resistência da falta.

Tabela 4.9: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o Método de Lee *et al.* (2004) – Condição I.

P _{GD} [%]	Erro Médio [%]				Erro Máximo [%]			
	A-g	B-g	C-g	ABC-g	A-g	B-g	C-g	ABC-g
10	1,418	1,356	1,326	0,768	4,852	4,532	4,477	2,654
20	2,849	2,696	2,653	1,545	9,818	9,051	8,996	5,346
30	4,245	3,977	3,932	2,303	14,715	13,392	13,380	7,973

Tabela 4.10: Erros percentuais em função da distância da falta com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o Método de Lee *et al.* (2004) – Condição I.

Falta	d [km]	Erro Médio [%]			Erro Máximo [%]		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
A-g	0-7	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
	7-13,5	0,083	0,165	0,242	0,522	1,040	1,537
	13,5-21	1,723	3,452	5,126	2,773	5,567	8,278
	21-27,6	3,843	7,739	11,555	4,852	9,818	14,715
B-g	0-7	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	7-13,5	0,082	0,162	0,238	0,517	1,025	1,508
	13,5-21	1,677	3,334	4,914	2,678	5,330	7,861
	21-27,6	3,644	7,250	10,697	4,532	9,051	13,392
C-g	0-7,0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	7-13,5	0,079	0,156	0,230	0,496	0,989	1,460
	13,5-21	1,628	3,252	4,814	2,608	5,217	7,731
	21-27,6	3,578	7,165	10,629	4,477	8,996	13,380
ABC-g	0-7	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	7-13,5	0,044	0,086	0,128	0,271	0,544	0,809
	13,5-21	0,922	1,854	2,763	1,491	2,999	4,471
	21-27,6	2,095	4,219	6,292	2,654	5,346	7,973

Tabela 4.11: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o Método de Lee *et al.* (2004) – Condição II.

P _{GD} [%]	Erro Médio [%]				Erro Máximo [%]			
	A-g	B-g	C-g	ABC-g	A-g	B-g	C-g	ABC-g
10	1,132	1,136	1,151	0,689	4,013	4,080	4,150	2,531
20	2,465	2,469	2,528	1,613	8,938	8,920	9,180	5,932
30	3,982	3,970	4,104	2,741	14,640	14,359	14,930	10,044

Tabela 4.12: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o Método de Lee *et al.* (2004) – Condição II.

Falta	d [km]	Erro Médio [%]			Erro Máximo [%]		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
A-g	0-7	0,334	0,600	0,823	0,542	0,944	1,261
	7-13,5	0,606	1,002	1,281	0,707	1,181	1,542
	13,5-21	0,769	1,871	3,240	1,675	3,857	6,400
	21-27,6	2,842	6,425	10,630	4,013	8,938	14,640
B-g	0-7	0,189	0,322	0,427	0,358	0,583	0,733
	7-13,5	0,386	0,575	0,696	0,474	0,721	0,866
	13,5-21	0,977	2,333	3,941	1,906	4,277	6,972
	21-27,6	3,004	6,654	10,819	4,080	8,920	14,359

C-g	0-7	0,224	0,395	0,539	0,379	0,634	0,821
	7-13,5	0,392	0,596	0,738	0,473	0,746	0,929
	13,5-21	0,967	2,335	3,974	1,898	4,308	7,082
	21-27,6	3,030	6,797	11,172	4,150	9,180	14,930
ABC-g	0-7	0,157	0,291	0,421	0,243	0,405	0,536
	7-13,5	0,239	0,336	0,413	0,285	0,432	0,543
	13,5-21	0,555	1,489	2,681	1,104	2,712	4,689
	21-27,6	1,815	4,342	7,453	2,531	5,932	10,044

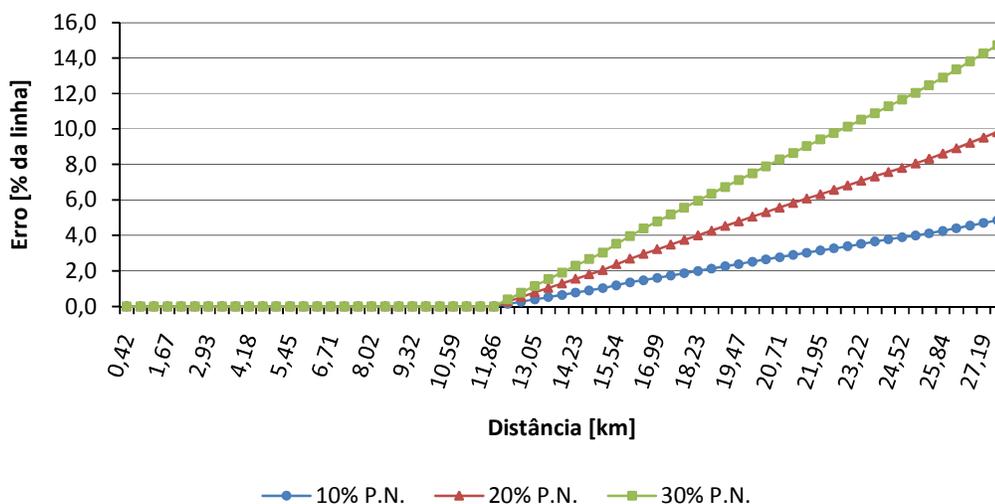


Figura 4.3: Resultados do Método de Lee *et al.* (2004) para faltas A-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição I.

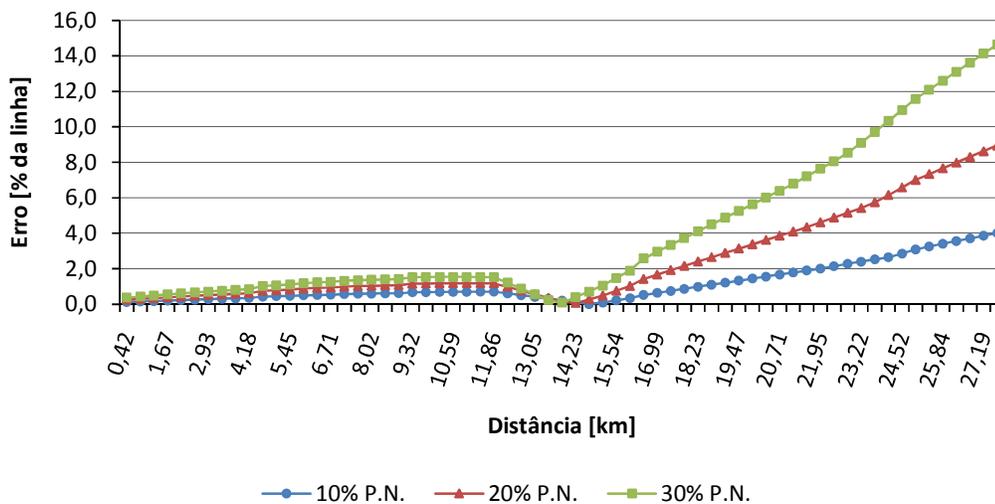


Figura 4.4: Resultados do Método de Lee *et al.* (2004) para faltas A-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição II.

4.4 RESULTADOS DO MÉTODO DE BRETAS *et al.* (2006)

A avaliação do desempenho do método de Bretas *et al.* (2006) foi analisada sob três níveis distintos de geração distribuída de acordo com as Condições I e II. No entanto, como esta metodologia foi desenvolvida somente para faltas trifásicas, os resultados foram obtidos somente para este tipo de falta. Os valores dos erros médio e máximos em função da potência da geração distribuída e da distância da falta são ilustrados nas Tabelas 4.13 e 4.14, respectivamente, para a Condição I. Analogamente, as Tabelas 4.15 e 4.16 ilustram os resultados obtidos para a Condição II.

4.4.1 Influência da Potência da Geração Distribuída

Para analisar a influência da potência da geração distribuída, considere inicialmente os resultados obtidos para a Condição I, ilustrados na Tabela 4.13. Em contrapartida à metodologia de Lee *et al.* (2004), verifica-se que o nível da geração distribuída exerce pouca influência nas estimativas do local da falta. Os valores médio e máximo dos erros não variam muito, demonstrando que a metodologia em análise apresenta uma boa precisão na estimativa da distância da falta. Tal fato pode ser comprovado através da visualização da Figura 4.5, onde as curvas para os três níveis de potência do gerador estão praticamente sobrepostas. A superioridade no desempenho em relação ao método de Lee *et al.* (2004) já era prevista, considerando que o método analisado foi desenvolvido com o propósito específico de incluir a geração distribuída. Entretanto, o uso das componentes simétricas para a modelagem do sistema é um aspecto que afeta a exatidão deste algoritmo. A topologia assimétrica do alimentador teste resulta em impedâncias mútuas distintas, de modo que o uso das redes de seqüência não representa o sistema com tamanha fidelidade. Considere agora os resultados obtidos para a Condição II, ilustrados na Tabela 4.15. Através destes resultados, verifica-se que o aumento no nível da geração distribuída para esta condição exerce uma pequena influência nos resultados, podendo esta ser desprezada.

4.4.2 Influência da Distância da Falta

A influência da distância da falta pode ser analisada considerando inicialmente os resultados obtidos para a Condição I, apresentados na Tabela 4.14. Verifica-se que o erro tende a aumentar com o aumento da distância da falta, ocorrendo um sensível aumento do erro para faltas a jusante da geração distribuída (NUNES *et al.*, 2010b), fato que pode ser visualizado pela Figura 4.5. Para a Condição II, apresentada na Tabela 4.15, é possível observar que o erro não está intimamente relacionado à distância da falta, havendo outros fatores que influem de forma mais efetiva na estimativa do local da falta. Tal fato pode ser observado através da análise da Figura 4.5, onde o verifica-se que o erro é maior no início do alimentador, fato que não é comum nos algoritmos de localização baseados na impedância, onde o erro tende a ser maior no final do alimentador. Verifica-se ainda que o erro tende a diminuir na medida em que o local da falta aproxima-se do ponto onde está conectada a geração distribuída.

4.4.3 Influência da Resistência da Falta

Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.15, para as Condições I e II respectivamente, percebe-se que, os erros médio e máximo obtidos para uma resistência de falta de 10 Ohms aumentaram em torno de 1,9% e 4,5%, respectivamente, para um nível de geração distribuída correspondente a 10% da potência nominal do sistema. Com estes resultados, verifica-se que a resistência de falta afeta significativamente o método em questão. Deste

modo, a superioridade desta metodologia em relação ao método de Lee *et al.* (2004) antes apresentada para a condição de curto-circuito não é válida para faltas resistivas.

4.4.4 Análise Geral

Com base nos resultados obtidos é possível avaliar o desempenho da metodologia de Bretas *et al.* (2006) para um sistema de distribuição com a presença da geração distribuída. Para faltas sólidas trifásicas, a superioridade no desempenho em relação a metodologia de Lee *et al.* (2004) é justificada através de seu equacionamento, desenvolvido para redes de distribuição não-passivas. Entretanto, a presença da resistência de falta, apesar de pequena (apenas 10 Ohms) afeta consideravelmente o seu desempenho. Deste modo fica comprovado que os erros de localização obtidos neste caso são inerentes ao equacionamento proposto, o qual não é adequado para faltas resistivas. A precisão do método sofre pouca influência com o aumento do nível de geração no sistema, independente da falta ser sólida ou resistiva. Contudo, é importante ressaltar que tal análise não foi realizada para faltas de alta impedância, dadas as limitações deste método.

Tabela 4.13: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método de Bretas *et al.* (2006) – Condição I.

P_{GD} [%]	Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]
	ABC-g	ABC-g
10	0,851	1,965
20	0,862	2,055
30	0,893	2,207

Tabela 4.14: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método de Bretas *et al.* (2006) – Condição I.

Falta	d [km]	Erro Médio [%]			Erro Máximo [%]		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
ABC-g	0-7	0,177	0,177	0,177	0,346	0,346	0,346
	7-13,5	0,544	0,537	0,533	0,715	0,693	0,680
	13,5-21	1,022	1,020	1,044	1,311	1,331	1,390
	21-27,6	1,652	1,705	1,809	1,965	2,055	2,207

Tabela 4.15: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método de Bretas *et al.* (2006) – Condição II.

P_{GD} [%]	Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]
	ABC-g	ABC-g
10	2,731	6,459
20	2,556	6,478
30	2,402	6,495

Tabela 4.16: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método de Bretas *et al.* (2006) – Condição II.

Falta	d [km]	Erro Médio [%]			Erro Máximo [%]		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
ABC-g	0-7	3,839	3,928	3,935	6,459	6,478	6,495
	7-13,5	0,719	0,676	0,724	1,514	1,696	1,900
	13,5-21	2,494	2,084	1,806	3,278	2,942	2,700
	21-27,6	3,886	3,567	3,180	5,268	4,951	4,436

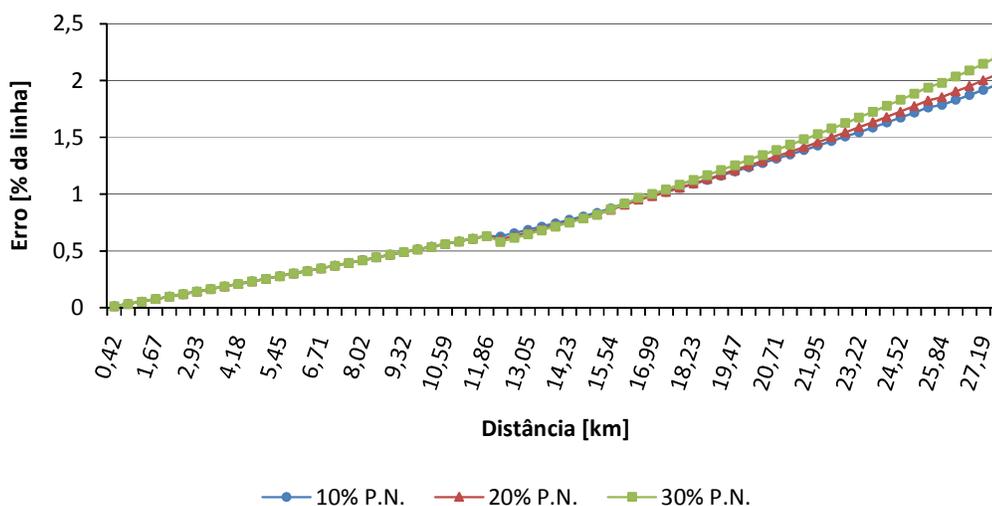


Figura 4.5: Resultados do Método de Bretas *et al.* (2006) para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição I.

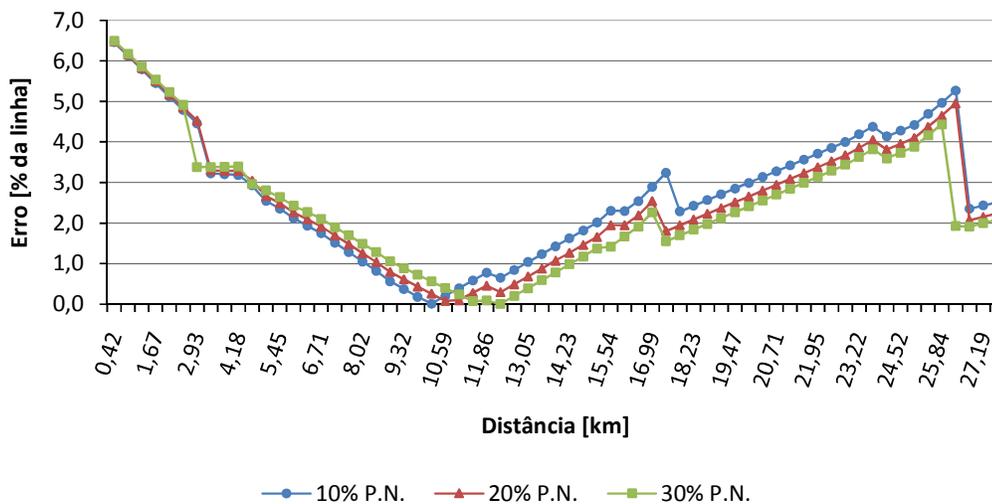


Figura 4.6: Resultados do Método de Bretas *et al.* (2006) para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição II.

4.5 RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO

A avaliação do desempenho do Método Proposto foi analisada para três níveis distintos de geração distribuída considerando as situações de curto-circuito e de faltas resistivas, representadas através das Condições I e II, respectivamente. Os valores médio e máximo dos erros são apresentados nas Tabelas 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 para os quatro tipos de faltas desenvolvidos (A-g, B-g, C-g e ABC-g). As estimativas da distância da falta são analisadas através dos erros obtidos em função da potência da geração distribuída e da distância da falta, de acordo com as Tabelas 4.17 e 4.18 para a Condição I. De forma análoga, as Tabelas 4.19 e 4.20 expressam os erros em função da potência da geração distribuída e da distância da falta, para a Condição II.

4.5.1 Influência da Potência da Geração Distribuída

Através da análise das Tabelas 4.17 e 4.19 é possível avaliar a influência da potência da geração distribuída no desempenho do método proposto para as Condições I e II, respectivamente. De forma similar ao método de Bretas *et al.* (2006), verifica-se que o aumento no nível da geração distribuída exerce pouca influência nos erros de localização de faltas, fato que pode ser visualizado através das Figuras 4.7 e 4.8.

4.5.2 Influência da Distância da Falta

A influência da distância da falta pode ser analisada considerando inicialmente os resultados obtidos para a Condição I, apresentados na Tabela 4.18. Assim como no método de Bretas *et al.* (2006) percebe-se que os valores dos erros aumentam em função da distância da falta, conforme mostrado na Figura 4.7. Entretanto, o desempenho do método em questão se mostrou superior aos métodos de Lee *et al.* (2004) e de Bretas *et al.* (2006), especialmente para faltas a jusante da geração distribuída (a jusante do km 11,86). Através da Tabela 4.18, verifica-se que no trecho final do alimentador entre os quilômetros 21 e 27,6, onde o erro tende a ser maior, os erros médio e máximo obtidos considerando a geração distribuída equivalente a 20% da potência total do sistema são de 0,026% e de 0,032%, respectivamente para faltas trifásicas sólidas. Estes erros correspondem a distâncias inferiores a 9 metros, sendo desprezíveis em comparação ao comprimento total do alimentador que mede 27640 metros aproximadamente.

Para a Condição II, apresentada na Tabela 4.20, é possível observar que o erro não está diretamente relacionado à distância da falta, de forma similar aos resultados obtidos com a metodologia de Bretas *et al.* (2006), apresentados na Tabela 4.16. Comparando estes aos resultados obtidos através da metodologia proposta, percebe-se que o desempenho destas é muito semelhante. O comportamento da curva do erro em função da distância apresenta o mesmo aspecto, com erros elevados no início do alimentador e tendendo a diminuir próximo ao local onde está conectada a unidade geradora, conforme mostrado na Figura 4.8.

4.5.3 Influência da Resistência da Falta

Para analisar a presença da resistência de falta considere os resultados obtidos para as Condições I e II, apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.19, respectivamente. Verifica-se que as discrepâncias maiores ocorrem para faltas trifásicas com nível de geração distribuída de 30% da potência nominal do sistema, onde os erros médio e máximo obtidos na Condição II aumentaram em torno de 2,2% e 6,5% respectivamente, em relação a Condição I. Com estes

resultados, é possível observar que a resistência de falta afeta consideravelmente o método em questão, tendo em vista que a resistência de falta usada para teste é de apenas 10 ohms.

4.5.4 Influência do Tipo de Falta

A influência do tipo de falta para as Condições I e II pode ser analisada com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.19, respectivamente. Analisando inicialmente as faltas do tipo fase-terra sólidas (Condição I) e resistivas (Condição II), verifica-se que os valores dos erros médio e máximo são praticamente iguais para as três fases, indicando que a fase tem pouca influência nos resultados.

De forma similar, a comparação realizada entre diferentes os tipos de falta para a condição de curto-circuito (Condição I) mostram que os valores dos erros são praticamente iguais, independentemente da falta ser fase-terra ou trifásica.

Entretanto, esta mesma análise feita agora para faltas resistivas (Condição II), mostra que os erros máximos para faltas trifásicas aumentam aproximadamente em 2% em relação às faltas do tipo fase-terra, considerando os três níveis de geração apresentados.

4.5.5 Análise Geral

A partir dos resultados obtidos é possível avaliar o desempenho da metodologia proposta para um sistema de distribuição com a presença da geração distribuída. Embora os testes para faltas resistivas tenham sido realizados para uma pequena resistência de falta, apenas 10 ohms, verifica-se que esta afeta consideravelmente o desempenho da metodologia proposta. Assim como no método de Bretas *et al.* (2004), os erros de localização obtidos neste caso são inerentes ao equacionamento proposto, o qual não é adequado para faltas resistivas. O aumento do nível da geração distribuída exerce pouca influência sobre o método em questão, independentemente da falta ser sólida ou resistiva.

Tabela 4.17: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método Proposto – Condição I.

P_{GD} [%]	Erro Médio [%]				Erro Máximo [%]			
	A-g	B-g	C-g	ABC-g	A-g	B-g	C-g	ABC-g
10	0,007	0,007	0,007	0,006	0,020	0,023	0,021	0,016
20	0,019	0,020	0,019	0,010	0,059	0,062	0,059	0,032
30	0,011	0,010	0,010	0,009	0,041	0,037	0,039	0,031

Tabela 4.18: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método Proposto – Condição I.

Falta	d [km]	Erro Médio [%]			Erro Máximo [%]		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
A-g	0-7	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
	7-13,5	0,002	0,003	0,002	0,004	0,008	0,003
	13,5-21	0,008	0,023	0,012	0,012	0,036	0,020
	21-27,6	0,016	0,049	0,029	0,020	0,059	0,041
B-g	0-7	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
	7-13,5	0,002	0,002	0,001	0,004	0,008	0,003
	13,5-21	0,008	0,024	0,012	0,013	0,038	0,019
	21-27,6	0,018	0,051	0,027	0,023	0,062	0,037

C-g	0-7	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	7-13,5	0,002	0,002	0,001	0,004	0,008	0,003
	13,5-21	0,008	0,023	0,012	0,012	0,036	0,019
	21-27,6	0,017	0,049	0,028	0,021	0,059	0,039
ABC-g	0-7	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
	7-13,5	0,002	0,002	0,001	0,003	0,005	0,002
	13,5-21	0,007	0,013	0,009	0,010	0,019	0,016
	21-27,6	0,013	0,026	0,023	0,016	0,032	0,031

Tabela 4.19: Erros percentuais em função da potência da geração distribuída para o método Proposto – Condição II.

P _{GD} [%]	Erro Médio [%]				Erro Máximo [%]			
	A-g	B-g	C-g	ABC-g	A-g	B-g	C-g	ABC-g
10	2,076	2,100	2,101	2,252	4,275	4,634	4,473	6,468
20	1,935	1,978	1,972	2,170	4,267	4,703	4,511	6,488
30	1,859	1,920	1,915	2,216	4,258	4,760	4,539	6,506

Tabela 4.20: Erros percentuais em função da distância com níveis de geração distribuída de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema para o método Proposto – Condição II.

Falta	d [km]	Erro Médio [%]			Erro Máximo [%]		
		10%	20%	30%	10%	20%	30%
A-g	0-7	2,028	2,069	2,122	4,275	4,267	4,258
	7-13,5	1,121	0,921	0,734	2,038	1,753	1,540
	13,5-21	2,592	2,362	2,223	3,404	3,156	2,997
	21-27,6	2,530	2,363	2,336	3,552	3,337	3,349
B-g	0-7	2,345	2,490	2,629	4,634	4,703	4,760
	7-13,5	0,941	0,711	0,590	1,985	1,699	1,484
	13,5-21	2,564	2,335	2,122	3,364	3,116	2,699
	21-27,6	2,523	2,355	2,328	3,529	3,353	3,325
C-g	0-7	2,217	2,330	2,444	4,473	4,511	4,539
	7-13,5	0,989	0,756	0,591	2,031	1,753	1,543
	13,5-21	2,610	2,385	2,246	3,441	3,197	3,037
	21-27,6	2,554	2,389	2,359	3,584	3,410	3,378
ABC-g	0-7	3,887	3,895	4,085	6,468	6,488	6,506
	7-13,5	0,736	0,783	0,951	1,632	1,831	2,049
	13,5-21	2,001	1,798	1,680	2,540	2,332	2,244
	21-27,6	2,400	2,226	2,182	3,552	3,394	3,343

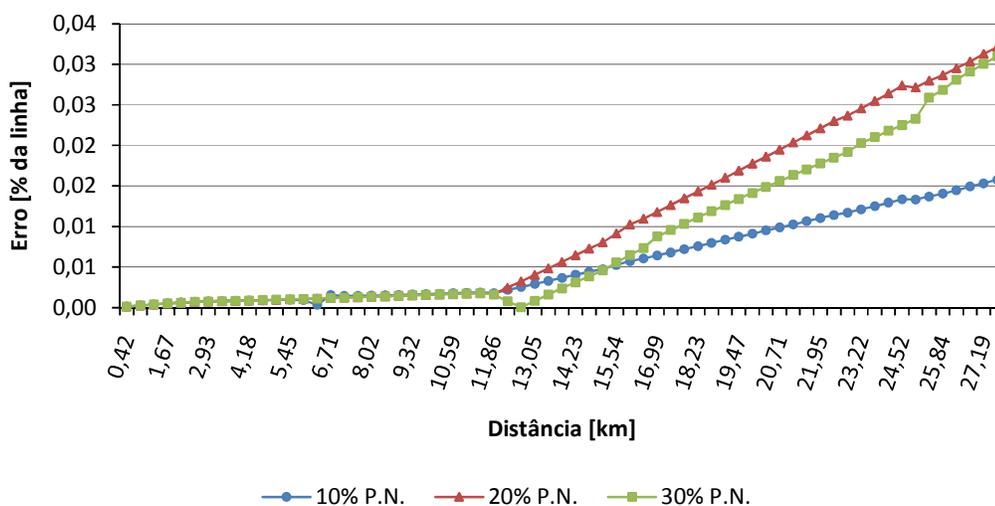


Figura 4.7: Resultados do Método Proposto para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição I.

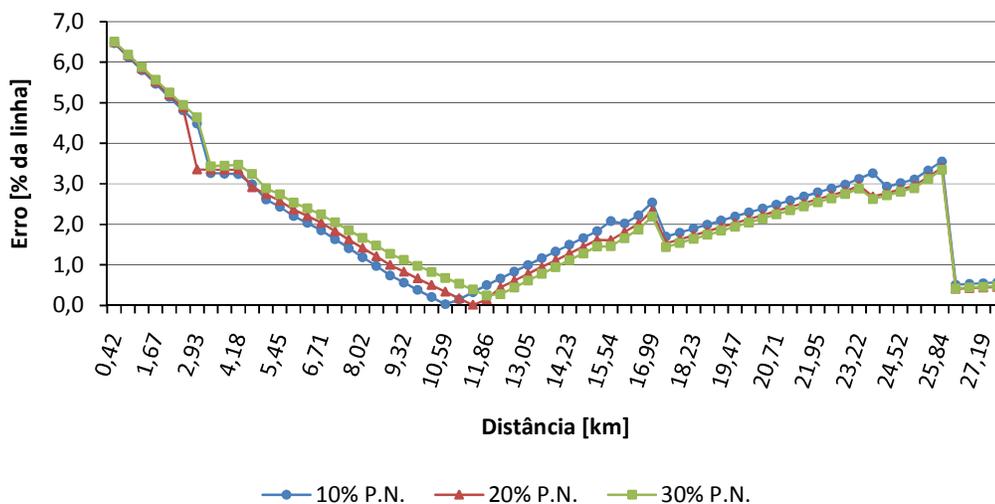


Figura 4.8: Resultados do Método Proposto para faltas ABC-g em função da distância da falta sob níveis de geração de 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema – Condição II.

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação das extensões propostas para localização de faltas em redes de distribuição com a inclusão da geração distribuída será realizada através da comparação dos métodos de Lee *et al.* (2004) e de Bretas *et al.* (2006) com os resultados obtidos através da metodologia proposta. Os resultados das três metodologias sob três níveis distintos de geração distribuída são apresentados nas Tabelas 4.21 e 4.22, para as Condições I e II, respectivamente, a fim de verificar o desempenho do método proposto em relação aos demais.

Tabela 4.21: Análise comparativa dos resultados obtidos com as três metodologias – Condição I.

Tipo de Falta	Nível de GD [%]	Método de Lee <i>et al.</i> (2004)		Método de Bretas <i>et al.</i> (2006)		Método Proposto	
		Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]	Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]	Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]
A-g	10	1,418	4,852	-	-	0,007	0,020
	20	2,849	9,818	-	-	0,019	0,059
	30	4,245	14,715	-	-	0,011	0,041
B-g	10	1,356	4,532	-	-	0,007	0,023
	20	2,696	9,051	-	-	0,020	0,062
	30	3,977	13,392	-	-	0,010	0,037
C-g	10	1,326	4,477	-	-	0,007	0,021
	20	2,653	8,996	-	-	0,019	0,059
	30	3,932	13,380	-	-	0,010	0,039
ABC-g	10	0,768	2,654	0,851	1,965	0,006	0,016
	20	1,545	5,346	0,862	2,055	0,010	0,032
	30	2,303	7,973	0,893	2,207	0,009	0,031

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.21 é possível verificar que os resultados obtidos através da metodologia proposta apresentam uma redução significativa nos valores médio e máximo dos erros de localização. Em relação ao método de Lee *et al.* (2004), para um nível de geração distribuída correspondente à 10% da potência nominal do sistema, a redução no erro médio chegou a aproximadamente 0,8% no caso de faltas trifásicas sólidas. Para o mesmo tipo de falta, considerando agora os níveis de geração distribuída correspondentes à 20% e 30%, a redução chegou a aproximadamente 1,5% e 2,3%, respectivamente. Da mesma forma, os erros máximos sofreram reduções em torno de 2,6%, 5,3% e de 8,0% para os níveis de geração distribuída correspondentes a 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema. Tal fato comprova que o desempenho do método de Lee *et al.* (2004) tende a reduzir em relação à metodologia proposta na medida em que é aumentada a potência da geração distribuída. Em comparação ao método de Bretas *et al.* (2006), os erros médio e máximos são atenuados em 0,9% e 2,0%, respectivamente, independentemente da potência da geração distribuída. Analisando detalhadamente estes resultados, percebe-se que tanto o método de Bretas *et al.* (2006) quanto o método proposto são pouco suscetíveis ao aumento do nível da geração distribuída, apresentando erros que se mantém praticamente constantes para os três níveis de potência testados. Tendo em vista que ambas as metodologias baseiam-se no mesmo princípio de estimação da corrente de falta do gerador, o aumento na exatidão do método proposto é atribuído ao uso das coordenadas de fase como forma de representação do sistema. Entretanto, a redução no erro em relação ao método de Bretas *et al.* (2004) é um pouco menor do que em relação ao método de Lee *et al.* (2004), fato que já era esperado em virtude deste último não contemplar a presença da geração distribuída.

Analizando os resultados apresentados na Tabela 4.21 para as faltas sólidas fase-terra, percebe-se que, para a metodologia de Lee *et al.* (2004), a fase exerce uma certa influência nos resultados, enquanto que para a metodologia proposta essa influência é desprezível. A fim de facilitar a comparação dos resultados entre as duas metodologias considere somente os resultados obtidos para as faltas C-g, caso em que a diferença nos resultados é menor. Deste modo, a partir os resultados apresentados na Tabela 4.21 para faltas sólidas C-g, percebe-se

que o erro médio na metodologia proposta é reduzido em aproximadamente 1,4%, 2,7% e 3,9% em relação ao método de Lee *et al.* (2004) para os níveis de geração distribuída correspondentes a 10%, 20% e 30% da potência nominal do sistema, respectivamente. De forma análoga, os erros máximos foram reduzidos em aproximadamente 4,5%, 9,0% e 13,4% em relação ao método de Lee *et al.* (2004), considerando as mesmas condições.

Para as faltas do tipo fase-terra, a avaliação do método proposto foi realizada somente através da comparação de resultados com o método de Lee *et al.* (2004), considerando que o método de Bretas *et al.* (2006) não apresenta desenvolvimentos para este tipo de falta.

Analisando a Tabela 4.22 é possível avaliar o desempenho do método proposto sob os três diferentes níveis de geração distribuída para uma resistência de falta de 10 ohms. Em comparação aos resultados obtidos através do método de Lee *et al.* (2004) para faltas ABC-g, é possível observar que o desempenho deste último é superior para os níveis de geração distribuída correspondentes 10% e 20% da potência nominal do sistema. Os erros médio e máximo obtidos com a metodologia proposta aumentaram em torno de 1,6% e 3,9%, respectivamente, para o nível de operação do gerador de 10% do potência nominal do sistema. De forma análoga, para o nível de operação de 20%, os erros médio e máximo aumentaram em torno de 0,6% e 0,6%, respectivamente. No entanto, ao compararmos estas metodologias para o mesmo tipo de falta, considerando um nível de geração equivalente a 30% do carregamento total do sistema, verifica-se que o método proposto apresenta um desempenho superior ao método de Lee *et al.* (2004), onde os erros médio e máximos são reduzidos em torno de 0,5% e 3,5%, respectivamente. Estes resultados apresentados para faltas resistivas mostram que, com o aumento da potência fornecida pela geração distribuída, a superioridade do método de Lee *et al.* (2004) em relação ao método proposto é reduzida.

Tabela 4.22: Análise comparativa dos resultados obtidos com as três metodologias – Condição II.

Tipo de Falta	Nível de GD [%]	Método de Lee <i>et al.</i> (2004)		Método de Bretas <i>et al.</i> (2006)		Método Proposto	
		Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]	Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]	Erro Médio [%]	Erro Máximo [%]
A-g	10	1,132	4,013	-	-	2,076	4,275
	20	2,465	8,938	-	-	1,935	4,267
	30	3,982	14,640	-	-	1,859	4,258
B-g	10	1,136	4,080	-	-	2,100	4,634
	20	2,469	8,920	-	-	1,978	4,703
	30	3,970	14,359	-	-	1,920	4,760
C-g	10	1,151	4,150	-	-	2,101	4,473
	20	2,528	9,180	-	-	1,972	4,511
	30	4,104	14,930	-	-	1,915	4,539
ABC-g	10	0,689	2,531	2,731	6,459	2,252	6,468
	20	1,613	5,932	2,556	6,478	2,170	6,488
	30	2,741	10,044	2,402	6,495	2,216	6,506

Avaliando agora o desempenho do método proposto em relação ao método de Bretas *et al.* (2006) para faltas ABC-g, supondo os três níveis de geração testados, observa-se que estes apresentam um desempenho muito semelhante, sendo difícil apontar qual destes obteve uma melhor performance para estas condições de análise.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.22 para as faltas resistivas fase-terra, percebe-se que, tanto para a metodologia de Lee *et al.* (2004) quanto para a metodologia proposta, a fase exerce uma pequena influência nos resultados, fato que pode ser justificado em função do desbalanceamento do alimentador. Desprezando esta influência e assumindo que a análise a seguir é válida para as três fases, considere somente os resultados obtidos para as faltas A-g, para os três níveis de geração distribuída. Analisando estes resultados, é possível observar que quando o gerador estiver operando com uma potência de 10% do carregamento total do sistema, os erros médio e máximo obtidos com o método de Lee *et al.* (2004) são aproximadamente 0,9% e 0,3% menores em relação a metodologia proposta. Entretanto, esta situação é invertida para níveis de geração distribuída mais elevados. Para o gerador operando com 20% da potência nominal do sistema, os erros médio e máximo obtidos para a metodologia proposta reduziram em torno de 0,5% e 4,7%, respectivamente, em relação ao método de Lee *et al.* (2004). Para o nível de 30% esta diferença aumenta para 2,1% e 10,4% para os erros médio e máximo, respectivamente.

As análises comparativas realizadas nesta seção mostraram o impacto da geração distribuída em cada um dos referidos algoritmos de localização de faltas. Estas análises comprovam que o desempenho do método proposto é superior em relação às metodologias analisadas para faltas sólidas do tipo fase-terra e do tipo trifásicas. No entanto, a redução no desempenho deste para faltas resistivas é atribuída ao equacionamento utilizado para a atualização das correntes a jusante da falta. Como consequência, em alguns casos onde o nível de geração distribuída não é elevado em comparação ao carregamento total do sistema, a metodologia clássica analisada apresenta um desempenho maior em relação à metodologia proposta para faltas resistivas. Através das análises realizadas, verifica-se que este quadro pode ser modificado, na medida em que aumenta a potência fornecida pela geração distribuída.

5 CONCLUSÕES

Nos últimos anos, a localização de faltas em redes de distribuição tem sido estudada extensivamente com o intuito de melhorar a confiabilidade do serviço e a qualidade de energia fornecida aos consumidores. Diversas metodologias foram desenvolvidas para este fim, levando em consideração as particularidades de um sistema de distribuição radial. A implantação de novas tecnologias de geração conectadas diretamente às redes de distribuição modifica a natureza radial destes sistemas. Neste novo contexto, a demanda de energia que era suprida por uma única fonte de energia, a subestação, apresenta agora a geração distribuída como uma forma alternativa de geração. Esta reestruturação no setor elétrico oferece muitos benefícios tais como a possibilidade de produção da energia limpa e de diversificação das fontes energéticas entre outros. Apesar disso, esta também impõe uma série de desafios relacionados à automatização dos sistemas de distribuição de energia. Estes desafios são decorrentes da modificação no sentido do fluxo de potência e principalmente, da alteração nas correntes de falta, comumente utilizadas como entrada de dados nos algoritmos de proteção dos sistemas de potência.

Motivado por estes fatos e tendo em vista que este ainda é um tema pouco explorado por pesquisadores da área, o presente trabalho teve como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de localização de faltas baseada na impedância através da inclusão da geração distribuída nas redes de distribuição. O algoritmo proposto é uma extensão do trabalho publicado por Bretas *et al.* (2006), o qual é baseado na impedância aparente de seqüência positiva. Para tanto, foi adicionado à metodologia a representação do sistema por coordenadas de fase, modelagem mais adequada à realidade dos sistemas de distribuição de energia. O desenvolvimento matemático para faltas assimétricas do tipo fase-terra também foi uma extensão apresentada neste trabalho. O processo de atualização da corrente de falta é realizado através de um algoritmo iterativo. Esta atualização depende da determinação de um sistema equivalente visto do ponto da falta, o qual é baseado na estimativa do local da falta e nos dados pré-falta do sistema. A determinação destes sistemas é feita da seguinte forma: para faltas a jusante da geração distribuída, o sistema equivalente é composto somente por uma matriz impedância equivalente vista do ponto da falta; para faltas a montante da geração distribuída, o sistema equivalente é composto por uma matriz impedância e por um vetor das tensões equivalentes, vistos do ponto da falta. Esta forma de determinação do sistema equivalente permite modelar a rede de forma ativa, considerando a contribuição de corrente da extremidade remota da falta. Tal consideração diferencia o método apresentado da maioria das técnicas que compõe o estado da arte de localização de faltas que consideram o sistema de distribuição como uma rede puramente passiva. Considerando que o presente trabalho tem como foco observar os impactos causados pela presença da geração distribuída no algoritmo de localização proposto, a possibilidade de obtenção de múltiplas estimativas pode interferir na validação deste método. Deste modo, a presença das ramificações laterais foi desprezada, havendo somente a presença de cargas intermediárias ao longo do alimentador.

Com base nas referências apresentadas neste trabalho sobre localização de faltas em sistemas de distribuição não-passivos, é possível observar que este é ainda um tema bastante incipiente, havendo poucas técnicas desenvolvidas especificamente para este fim. Além disso, estas técnicas são desenvolvidas através do uso das componentes simétricas, fato que restringe a sua aplicação para sistemas equilibrados. Sendo assim, para a avaliação do desempenho do método proposto foram utilizadas duas técnicas de localização de faltas, o método de Lee *et al.* (2004), desenvolvido especificamente para sistemas passivos e desbalanceados e o método

de Bretas *et al.* (2006), desenvolvido para sistemas ativos e equilibrados. A partir das análises comparativas entre as referidas metodologias, foram observadas as seguintes conclusões:

- O desempenho do método de Lee *et al.* (2004) para faltas sólidas sofre uma grande influência da geração distribuída. O impacto é visivelmente maior para faltas a jusante da geração distribuída e tende a aumentar com o nível de geração e com a distância da falta;
- Comparando-se os resultados obtidos entre as metodologias de Lee *et al.* (2004) e de Bretas *et al.* (2004) testadas para a mesma condição, observa-se que esta última apresenta uma grande melhoria no desempenho. O impacto é visivelmente maior a jusante da geração distribuída, no entanto, o erro permanece praticamente constante para os diferentes níveis de geração testados;
- Com base na análise comparativa dos resultados obtidos entre as três técnicas testadas para a condição de faltas sólidas, observou-se uma melhora significativa no desempenho da metodologia proposta em relação às metodologias que compõem o estado da arte de localização de faltas;
- A presença da resistência de falta no método de Lee *et al.* (2004) introduz um comportamento não-linear na curva do erro percentual em função da distância. Em alguns casos, a resistência de falta tende a reduzir a parcela de erro associada a corrente faltosa do gerador;
- Tanto a metodologia proposta quanto o método proposto por Bretas *et al.* (2006) apresentam um baixo desempenho quando testados para faltas resistivas. O comportamento similar apresentado nas curvas de erro em função da distância indica que os erros produzidos são inerentes à formulação utilizada nas duas metodologias.

Analisando o desempenho obtido com a metodologia proposta em relação aos métodos que constituem o estado da arte de localização de faltas, conclui-se que as extensões realizadas são adequadas para sistemas de distribuição sob a condição de curto-circuito. A superioridade no desempenho em relação ao método de Lee *et al.* (2004) é justificada pelo fato deste não considerar a presença da geração distribuída. Já a superioridade em relação ao método de Bretas *et al.* (2006) é visivelmente atribuída à forma de representação utilizada no referido trabalho, baseado fundamentalmente no uso das componentes simétricas.

O baixo desempenho para faltas resistivas apresentado pela metodologia proposta é atribuído ao equacionamento utilizado, o qual não pressupõe a condição de uma resistência de falta. Em decorrência deste fato, o presente trabalho baseou-se no modelo simplificado de uma linha de distribuição, tendo em vista que para baixos valores de resistência de falta, entre 0 e 10 Ω , o efeito capacitivo exerce pouca influência nos resultados das técnicas de localização de faltas baseadas na impedância (SALIM, 2008).

A consideração da geração distribuída nos sistemas de distribuição realizada neste trabalho mostrou que é necessário o estudo e aprimoramento das técnicas de localização de faltas tradicionais a fim de obter metodologias mais adequadas à reestruturação do setor elétrico.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Apesar do bom desempenho obtido para faltas sólidas, as extensões propostas neste trabalho mostram apenas um estudo inicial sobre localização de faltas para redes de distribuição ativas. Contudo, existe a necessidade de aprofundar estes estudos e estender esta metodologia para condições de análise mais abrangentes. Para tanto, são sugeridos os assuntos a seguir:

- Adaptação do equacionamento proposto para faltas de alta impedância e análise dos resultados para esta condição e para diferentes níveis de geração distribuída;
- Expansão do método para sistemas de distribuição com a presença de ramificações laterais ao longo do alimentador;
- Extensão da formulação proposta para faltas do tipo fase-fase e dupla fase-terra;
- Desenvolvimento do método para múltiplas unidades geradoras conectadas em pontos distintos do sistema;
- Adição do efeito capacitivo através da representação das linhas pelo modelo π no alimentador;
- Modelagem das cargas através de um modelo híbrido a fim de avaliar o desempenho do método sob uma condição mais adversa;
- Inclusão da geração assíncrona interligada ao sistema de distribuição.

REFERÊNCIAS

ACKERMAN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v.57, n.3, p.195–204, Apr. 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 fev. 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução n 24, de 27 de janeiro de 2000**. Brasília, DF, 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20 mar. 2009.

ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. Ames: The Iowa State University Press, 1973. 540 p.

BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative transients program: ATP/EMTP**. Portland, OR, 2007.

BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.19, n.1, p.56–63, Jan. 2004.

BRETAS, A. S.; SALIM, R. H. Fault location in unbalanced DG systems using the positive sequence apparent impedance. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2006, Caracas. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE/PES, 2006 p.1–6.

CALIFORNIA ENERGY COMISSION. **California distributed energy resources guide**. Sacramento, Jul. 2008. Disponível em: <<http://www.energy.ca.gov/distgen/index.html>>. Acesso em: 18 set. 2009.

CHEN, T. H. et al. Distribution systems power flow analysis: a rigid approach, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.6, n.3, p.1146–1152, July. 1991.

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, NJ, v.22, n.4, p.2541–2547, Oct. 2007.

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

DUGAN, R. C.; RIZY, D. T. Electric distribution protection problems associated with the interconnection of small, dispersed generation devices. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway. v.PAS-103, n.6, June. 1984.

ELECTRICAL POWER RESEARCH INSTITUTE. **Technical assessment guide: distributed resources: draft report**. Palo Alto, California, EUA, Sept. 1999.

EI-FOULY, T. H. M.; ABBEY, M. On the compatibility of fault location approaches and distributed generation. In: CIGRE/IEEE PES SYMPOSIUM INTEGRATION OF ON WIDE SCALE RENEWABLE RESOURCES INTO POWER DELIVERY SYSTEMS, 2009, Calgary. **Proceedings...** [S.l.]: Calgary, 2009. p.1–5.

FILOMENA, A. D. **Localização de defeitos em alimentadores primários subterrâneos: formulação estendida baseada na impedância aparente**. 2008. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power system relaying**. Baldock: Research Studies Press Limited, 2008. 331 p.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC, 2007. 421p.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001. v.2, p.908-912.

KHUSHALANI, S.; SOLANKI, J. M.; SCHULZ, N. N. Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, NJ, v.22, n.3, p.1019–1025, Aug. 2007.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York, NY: McGraw-Hill, 1994. 1207p.

LEE, S.-J. et al. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.19, n.2, p.524–532, Apr. 2004.

LIN, Y.-H; LIU, C.-W. A new DFT-based phasor computation algorithm for transmission line digital protection. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION, 2002, Yokohama. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, 2002. v.3, p.1733–1737.

LONDERO, R. R.; AFFONSO, C. M.; NUNES, M. V. A. Impact of distributed generation in steady state, voltage and transient stability – real case. In: IEEE BUCHAREST POWER TECH, 2009, Bucharest. **Proceedings...** Bucharest: IEEE/PES, 2009. p. 1–6.

MATLAB. **The language of technical computing**. [S.l.]: The Mathworks, 2007.

MOGHADDAS-TAFRESHI S. M.; MASHHOUR, E. Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v.79, n.3, p.680–686, 2009.

NOVOSEL, D. et al. Fault location using digital relay data. **IEEE Computer Application in Power**, New York, NY, v.8, n.3, p.45–50, July. 1995.

NUNES, J. U. N.; BRETAS, A. S. An extended fault location formulation for unbalanced distribution feeders with distributed generation. In: MODERN ELECTRIC POWER SYSTEMS, 2010, Wroclaw. **Proceedings...** Wroclaw: IEEE, Sept. 2010a.

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...** Hangzhou: IEEE/PES, Oct. 2010b.

PENKOV, D. et al. DG impact on three phase fault location. DG use for fault location purposes? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE POWER SYSTEMS, 2005, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: IEEE, Nov. 2005.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying for power systems**. Baldock, Hertfordshire: Research Studies Press, 1988. 289p.

SAADAT, H. **Power system analysis**. 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2002. 712p.

SAHA, M. M. et al. Review of fault location techniques for distribution systems. In: POWER SYSTEMS AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURES FOR THE FUTURE, 2002, Beijing. **Proceedings...** [S.l.], Beijing, Sept. 2002.

SALIM, R. H. et al. Extended fault-location formulation for power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.24, n.2, p.508–516, Apr. 2009.

SALIM, R. H. **Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica fundamentada na impedância**. 2008. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SERRA, E. T. et al. **Células a Combustível: Uma Alternativa para Geração de Energia e sua Inserção no Mercado Brasileiro**. Rio de Janeiro, RJ: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2005.

SRINIVASAN, K.; ST.-JAQUES, A. A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.4, n.3, p.1676–1682, 1989.

STEVENSON JR., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2nd ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 1974. 347p.

TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for EHV/UHV transmission lines: part 1 – fourier transformation method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-100, n.3 p.1316–1323, 1981.

TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using one-terminal voltage and current data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, NJ, v.PAS-101, n.8, p.2892–2898, Aug. 1982.

WAKILEH, J. J.; PAHWA, A. Optimization of distribution system design to accomadate cold load pickup. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, NJ, v.12, n.1, p.339–345, Jan. 1997.

ZANETTA JR., L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo, SP: Edusp, 2003. 712p.

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

ANEXO A – ESTIMAÇÃO FASORIAL

A estimação fasorial dos sinais de tensão e de corrente no presente trabalho é realizada através da Transformada Discreta de Fourier Estendida (EDFT) (LIN; LIU, 2002), eliminando a componente CC que afeta a periodicidade dos sinais amostrados. O algoritmo é baseado no cálculo de três fasores consecutivos obtidos através da Transformada Discreta de Fourier (DFT). A partir desses é então estimada uma constante de tempo de decaimento CC dos sinais faltosos. Esta constante é utilizada no algoritmo proposto em (LIN; LIU, 2002) a fim de compensar o decaimento CC dos sinais faltosos inerente à DFT, eliminando completamente o erro causado na estimação dos fasores.

Considere um sinal no tempo discreto $y[k]$. A DFT deste sinal é calculada por (A.1):

$$Y_{r,n} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} y(k+r) \cdot e^{-\frac{2\pi nk}{N}} \quad (\text{A.1})$$

onde

- $Y_{r,n}$ fasor estimado na n -ésima harmônica;
- r amostra inicial do sinal;
- n ordem da harmônica;
- N número de amostras por ciclo;
- k número da amostra.

A partir de manipulações algébricas realizadas em (A.1) pode-se provar que o fasor estimado com compensação da componente de decaimento CC é obtido por (LIN; LIU, 2002):

$$A_{r,n} = \frac{d \cdot Y_{r,n} - Y_{r+1,n}}{d - a_n} \quad (\text{A.2})$$

onde

$$A_{r,n} = \frac{d \cdot Y_{r,n} - Y_{r+1,n}}{d - a_n} \quad (\text{A.3})$$

$$d = \frac{a_1 \cdot Y_{r+1,1} - Y_{r+2,1}}{a_1 \cdot Y_{r,1} - Y_{r+1,1}} \quad (\text{A.4})$$

Através da EDFT é possível estimar com exatidão os fasores de frequência fundamental e das componentes harmônicas a partir de (A.2), eliminando o efeito introduzido pelo decaimento CC.