

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

HERNAN SEBASTIAN OVIEDO TEJADA

**FORMULAÇÃO ESTENDIDA BASEADA NA
IMPEDÂNCIA APARENTE PARA LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS:
UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FALTAS DE ALTA
IMPEDÂNCIA**

Porto Alegre

2012

HERNAN SEBASTIAN OVIEDO TEJADA

**FORMULAÇÃO ESTENDIDA BASEADA NA
IMPEDÂNCIA APARENTE PARA LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS:
UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FALTAS DE ALTA
IMPEDÂNCIA**

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

Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Dr. Prof. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2012

HERNAN SEBASTIAN OVIEDO TEJADA

**FORMULAÇÃO ESTENDIDA BASEADA NA
IMPEDÂNCIA APARENTE PARA LOCALIZAÇÃO DE
FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS:
UMA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FALTAS DE ALTA
IMPEDÂNCIA**

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

Orientador: _____

Prof. Dr. Prof. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University
– Blacksburg, EUA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arlan Luiz Bettiol, SATC – SC

Doutor pela Université de l'Etat a Liège – Liege, Bélgica

Prof. Dr. André Arthur Perlerberg Lerm, IFSul

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Janeiro de 2012.

DEDICATÓRIA

Este trabalho vai dedicado com muito carinho a Verena e a minha querida filha Líá, pelo amor e carinho que me dão e por serem a razão de superar os obstáculos da vida, aos meus pais e irmãos, pela força e apoio nestes anos e a minha avó Nina, que em Paz descanse.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a DEUS e à MATER, que são o apoio e a fortaleza espiritual em cada momento da vida. Obrigado DEUS.

À Verena, minha noiva e futura esposa, pelo amor, compreensão e apoio brindado para que possa alcançar os objetivos e êxitos nas decisões assumidas.

Aos meus pais Hernán e Berta, por brindarem-me seus esforços e terem-me educado da forma correta. Estar-lhes-ei sempre agradecido por todo o que me ofereceram e indicaram para alcançar a satisfação pessoal e profissional.

Aos meus irmãos Viviana, Andrea e Renato, pelo apoio de sempre e pelos momentos compartilhados durante nossos anos de vida. Um agradecimento aos meus tios, tias, primos e primas pela força e carinho de todos.

Ao Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, por me aceitar como orientando, permitindo-me pertencer ao excelente grupo do LASEP. Agradeço a sua contínua disponibilidade, ajuda e conselhos prestados durante estes anos e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Mário, por ter me recebido com amabilidade e hospedado nos primeiros meses em Porto Alegre.

Ao Robert, uma excelente pessoa, pela ajuda prestada e conversas nos momentos difíceis e momentos de descontração.

Ao Felipe, pela ajuda e tempo dedicado nestes últimos meses para a correção e revisão desta dissertação.

A todos os colegas do LASEP, Roberto, Renato, Daniel, Martin, Gustavo, Leonardo, Diomar; com os que tenho compartilhado estes anos, pela ajuda e apoio nas tarefas realizadas durante o curso.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado e aprimorar minha formação acadêmica.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela ajuda financeira por meio da bolsa de mestrado, sem a qual seria difícil a realização desta pesquisa e permanência no Brasil.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar inicialmente uma extensão da formulação existente para localização de faltas fundamentada na impedância aparente para sistemas de distribuição rurais. Posteriormente, o trabalho apresenta uma análise da influência das faltas da alta impedância na formulação desenvolvida e existente. Os sistemas rurais caracterizam-se pela presença de laterais com uma, duas ou três fases que derivam do alimentador principal. A metodologia fornece a distância elétrica da subestação de monitoramento até o local do defeito. Neste trabalho, a seção em falta é considerada conhecida. Faltas de alta impedância são defeitos que ocorrem em sistemas elétricos por motivos como rompimento dos cabos ou por contato com superfícies com propriedades de alta impedância, provocando uma corrente de magnitude muito baixa. Este tipo de falta apresenta características particulares de forma, assim foi empregado no estudo um modelo proposto na literatura especialmente concebido para essa finalidade. A metodologia estendida utiliza os sinais de tensão e corrente que são adquiridos pelo relé de proteção no período pré-falta e durante a falta, sendo analisados na frequência fundamental. Os dados das faltas foram obtidos através de simulações numéricas de um modelo de alimentador de distribuição com ramificação trifásica e monofásica.

Palavras-chave: Sistemas de Distribuição, Ramais monofásicos, Localização de faltas, Influência de Falta de Alta Impedância.

ABSTRACT

This work presents an extension of an existing state-of-the-art impedance-based fault location formulation for rural distribution systems. An analysis of the high impedance fault effects in the developed and existing formulation is also presented. Rural distribution systems are characterized by the presence of laterals tapped-off from the main feeder with one, two or three phases. The extended formulation provides the electric distance from the monitoring substation up to the fault location. In this work, the fault section is considered known. High impedance faults are faults that occur in electrical system for reasons such a rupture of conductors or by contact of these with surfaces with high impedance properties, resulting in a very low magnitude current. This kind of fault presents specific features. In this work a model proposed in literature specifically for this purpose is used. The extended methodology uses voltage and current signals acquired by the protection relay in the pre-fault and during fault period, which are analyzed at fundamental frequency. The proposed extended method was tested through numerical simulations of a distribution feeder model with three-phase and single-phase branches.

Keywords: Rural Distribution Systems, Fault Location, One-phase Lateral, High Impedance Fault

SUMÁRIO

SUMÁRIO	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	12
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Motivação do Trabalho	15
1.2 Objetivos	15
1.3 Estrutura do Trabalho.....	15
2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADO NA IMPEDÂNCIA APARENTE – ESTADO DA ARTE	17
2.1 Considerações Iniciais.....	17
2.2 Método de Lee et al. (2004)	18
2.3 Método de Salim et al. (2009).....	21
2.4 Método de Filomena et al. (2009).....	23
2.5 Método de Salim et al. (2010).....	26
2.6 Considerações Finais.....	29
3 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	30
3.1 Considerações Iniciais.....	30
3.2 Definição e Caracterização das Faltas de Alta Impedância	30
3.2.1 Definição das Faltas de Alta Impedância	30
3.2.2 Caracterização das Faltas de Alta Impedância	32
3.3 Representação de Modelos Teóricos de Faltas de Alta Impedância	37
3.3.1 Modelo de Resistência de falta não-linear	37
3.3.2 Modelo de Falta de Alta Impedância por Diodos	39
3.4 Considerações Finais.....	40
4 METODOLOGIA PROPOSTA	41
4.1 Considerações Iniciais.....	41
4.2 Determinação dos Sistemas Equivalentes	41
4.3 Extração das Componentes Fundamentais e Harmônicos.....	43
4.4 Atualização das Tensões e Correntes nas Seções Posteriores	44
4.5 Equacionamento Proposto para Localização de Faltas nas Laterais.....	46
4.5.1 Equacionamento para Localização de Falta Fase-Terra em Ramal Monofásico.....	46
4.5.2 Equacionamento para Localização de Falta Fase-Fase em Ramal Bifásico	48

4.5.3	Equacionamento para Localização de Falta Fase-Fase-Terra em Circuito Bifásico	50
4.5.4	Equacionamento para Localização de Falta Fase-terra em Circuito Bifásico	52
4.6	Considerações Finais.....	55
5	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS.....	56
5.1	Considerações Iniciais.....	56
5.2	Estudo de Caso	56
5.3	Sistema Teste	56
5.4	Condições de Testes	58
5.5	Análise de resultados	59
5.6	Resultados Obtidos	60
5.6.1	Influência do ângulo de incidência da falta.....	60
5.6.2	Influência da Lateral Monofásica.....	64
5.6.3	Influência da variação do carregamento.....	66
5.6.3.1	Condição de carregamento 2	67
5.6.3.2	Condição de carregamento 3	68
5.7	Análise Geral da Influência da FAI na Metodologia	69
6	CONCLUSÕES.....	70
6.1	Trabalhos Futuros.....	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	APÊNDICE A SISTEMA TESTE	76

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Topologia de um Sistema Elétrico de Potência (SEP)	13
Figura 2.1: Modelo de alimentador de distribuição simplificado (Lee et al. 2004)...	18
Figura 2.2: Linha de SDEE sujeito a falta –fase-terra (FILOMENA et al. 2009)	24
Figura 2.3: Modelo trifásico exato de linha (SALIM et al. 2010)	27
Figura 3.1: Princípio de incêndio produzido por Arco elétrico	31
Figura 3.2: Esquema do dispositivo em teste laboratorial	34
Figura 3.3: Diagrama do teste de FAI.....	34
Figura 3.4: Característica $V-I$ da arco da FAI.....	35
Figura 3.5: Sinal da corrente da FAI.....	35
Figura 3.6: Esquema para análise do arco	36
Figura 3.7: Circuito simulado no ATP/EMTP para FAI	37
Figura 3.8: Modelo de FAI (NAM et al. 2001)	37
Figura 3.9: Curva característica $V-I$ (NAM et al., 2001)	38
Figura 3.10: Corrente da FAI.....	38
Figura 3.11: Modelo para FAI (EMMANUEL et al. 1990).....	39
Figura 3.12: Corrente harmônica vs ângulo de fase $\text{tg}(\theta)$ e tensão ΔV :	40
Figura 3.13: Corrente de falta simulada.....	40
Figura 4.1: Alimentador com ramificações laterais (KERSTING, 2002)	42
Figura 4.2: Sistema equivalente com cargas nas barras 4 e 5.....	43
Figura 4.3: Sistema radial com cargas intermediárias (FILOMENA, 2008).....	45
Figura 4.4: Falta Fase-terra (A-t) ramal monofásico	46
Figura 4.5: Falta Fase-Fase (BC) ramal bifásico	48
Figura 4.6: Falta Fase-Fase-terra (BC-t) lateral bifásico	50
Figura 4.7: Falta Fase-terra (B-t) ramal bifásico	53
Figura 4.8: Diagrama de bloco do algoritmo proposto.....	55
Figura 5.1: Diagrama Unifilar do alimentador para teste	57
Figura 5.2: Curva do resultado para falta A-t	62
Figura 5.3: Curva do resultado para falta B-t	63
Figura 5.4: Curva do resultado para falta C-t	63
Figura 5.5: Curva do resultado para faltas fase-terra para FAI	64
Figura 5.6: Curva do resultado para falta Trifásica-terra para FAI	64
Figura 5.7: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 0Ω	65
Figura 5.8: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 10Ω	65
Figura 5.9: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 20Ω	66
Figura 5.10: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 50Ω	66
Figura A.1: Configuração das estruturas, espaçamento em [m]	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Correntes de FAI.....	32
Tabela 3.2: Descrição das características das FAI.....	38
Tabela 5.1: Dados do comprimento das seções e sub-seções do alimentador.....	57
Tabela 5.2: Distâncias das faltas aplicadas [m].....	58
Tabela 5.3: Cargas do alimentador.....	58
Tabela 5.4: Condições do sistema para estudo de caso.....	59
Tabela 5.5: Influência do ângulo de incidência da falta – Faltas Fase-terra.....	61
Tabela 5.6: Influência do ângulo de incidência da falta – Faltas Trifásica-terra.....	61
Tabela 5.7: Condição 2 do carregamento – Falta Fase-terra.....	67
Tabela 5.8: Condição 2 do carregamento – Falta Trifásica-terra.....	68
Tabela 5.9: Condição 3 do carregamento – Falta Fase-terra.....	68
Tabela 5.10: Condição 3 do carregamento – Falta Trifásica-terra.....	69
Tabela A.1: Dados do sistema teste.....	77
Tabela A.2: Parâmetros do Transformador.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
FAI	Falta de Alta Impedância
LF	Localização de Falta
LT	Linhas de Transmissão
R_f	Resistência de falta
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TDFE	Transformada Discreta de Fourier Estendida

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) constituem uma parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP) que têm como função principal o fornecimento da energia elétrica aos consumidores finais. Os SDEE estão compostos por equipamentos que têm sua origem na subestação de distribuição, aos quais chegam às linhas de transmissão (LT) de alta tensão ou de sub-transmissão, dependendo das companhias elétricas. A tensão gerada em usinas geradoras está usualmente numa faixa dentre 18-24 kV, e é transformada a níveis maiores de tensão na subestação elevadora. Nestes níveis maiores de tensão, a energia elétrica é transportada pelas LTs de alta tensão aos centros de consumo, localizados geralmente distantes do centro de geração. As subestações de distribuição têm por objetivo a redução das altas tensões por meio dos transformadores rebaixadores a níveis de tensão adequados para serem distribuídos aos consumidores industriais, comerciais e residenciais.

Da subestação de distribuição partem um ou vários alimentadores ou linhas de distribuição primária, comumente em níveis de tensões entre 4 a 34,5 kV que fornecem energia aos consumidores numa área geográfica definida (SAADAT, 2002). Na Figura 1.1 é apresentado um SEP genérico.

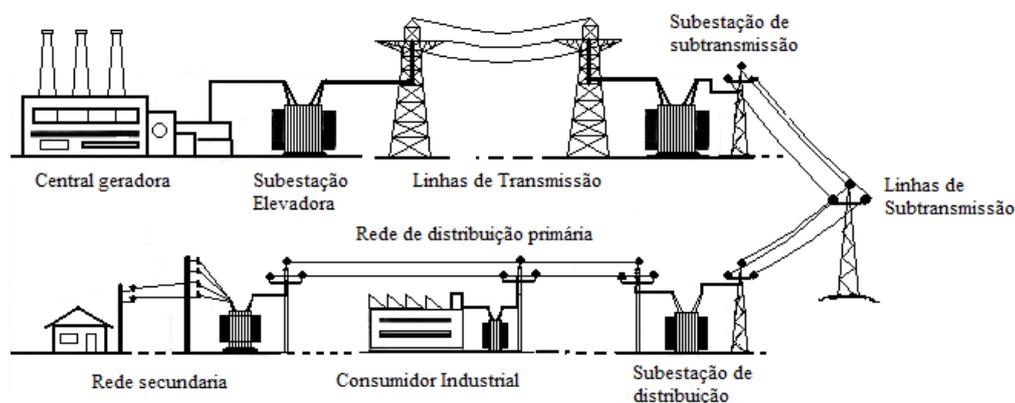


Figura 1.1: Topologia de um Sistema Elétrico de Potência (SEP)

A construção física dos alimentadores primários pode ser realizada de forma aérea, onde os condutores empregados podem ser nus ou isolados e sustentados por meio de postes. Outro tipo de construção é a subterrânea, em que são utilizados cabos isolados e enterrados diretamente no solo, ou instalados por meio de banco de dutos (FILOMENA, 2008) ou uma combinação dos dois tipos de construções. O primeiro tipo é o mais difundido devido ao menor custo, facilidade de manutenção e de construção. Além do mais, representam grande parte da rede elétrica que compõe o sistema de distribuição construída no Brasil (NASCIMENTO, 2006; FILOMENA, 2008). O segundo tipo pode ser encontrado nas áreas de maior densidade populacional, isto é, nas regiões de grandes metrópoles, ou onde existem restrições paisagísticas.

Os SEP estão sujeitos a faltas, que podem afetar a confiabilidade, a segurança e a capacidade de fornecimento de energia elétrica. Para isto, os esquemas de proteção são importantes de forma a manter a estabilidade do sistema e a minimizar os danos às redes e aos consumidores (SALIM et al. 2009). A atuação incorreta dos esquemas de proteção apresenta consequência no sistema como (RAMÍREZ, 2005):

- Desbalanço ocasionado pela operação indevida de equipamentos;
- Flutuações de potência;
- Instabilidade do SEP;
- Danos graves aos equipamentos e às pessoas;
- Prolongados cortes de energia gerando desconforto até grandes perdas econômicas aos usuários;
- Redução dos indicadores de qualidade, entre outros.

Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica também estão expostos a faltas devido a sua alta ramificação nas regiões urbanas, somado à proximidade de estruturas como edifícios, árvores e pessoas (SALIM, 2008). A ocorrência de falta de alta impedância, que pode ser ocasionado pelo rompimento do condutor ou contato com as estruturas mencionadas, é um fator importante a ser considerado para a detecção e eliminação destes defeitos, objetivando manter um nível de segurança para as pessoas e animais próximos.

Nas áreas rurais o problema da detecção da falta de alta impedância é mais acentuado, pela existência de poucos consumidores, separados por grandes distâncias

e com cargas de baixa potência. Isso gera baixos valores de corrente, que se confundem muitas vezes com as correntes dessas faltas (NASCIMENTO, 2006).

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A localização de faltas nos SDEE é um aspecto importante para as concessionárias de energia de modo a realizar uma rápida intervenção na interrupção do fornecimento da energia elétrica e restituí-los num tempo curto. Os SDEE abrangem grandes regiões tanto na área urbana quanto rural, sendo que estes últimos se estendem por vários quilômetros alimentando consumidores de baixa potência. A motivação principal desta dissertação é a extensão matemática da formulação estado-da-arte existente para localização de faltas em alimentadores de distribuição rurais que possuem a particularidade de estarem compostas de laterais com uma, duas e três fases que se derivam do alimentador principal. Leva-se em conta que é necessário a obtenção de sistemas equivalentes radiais considerando esta topologia de rede. Outro aspecto motivador é o interesse de analisar os efeitos de faltas de alta impedância na extensão da localização de falta proposta, utilizando para isto um modelo desenvolvido para caracterizar este tipo de falta.

1.2 OBJETIVOS

A seguir apresentam-se os objetivos desta dissertação:

- Estender a formulação de localização de faltas existente baseada na impedância aparente para sistemas de distribuição rurais, considerando a presença de laterais bifásica e monofásica.
- Analisar a influência de uma falta de alta impedância na metodologia de localização de faltas estendida e existente, levando em consideração que estas faltas têm um comportamento e modelo particular.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. Neste capítulo fez-se uma contextualização do trabalho, seguindo com a apresentação da motivação e objetivos específicos do mesmo. A seguir:

- No Capítulo 2, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o estado-da-arte na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica baseadas na impedância aparente.

- No Capítulo 3 será apresentada uma revisão sobre um tipo de falta denominado “falta de alta impedância”. Neste capítulo são expostos vários tópicos como os estudos realizados para a caracterização deste fenômeno e modelos desenvolvidos para a simulação das características encontradas. Também são citadas as causas e consequências deste tipo de falta.
- O Capítulo 4 apresenta a metodologia estendida para a localização de faltas baseada na impedância aparente. Nesta, a falta é caracterizada como uma resistência constante durante o período de análise.
- O Capítulo 5 é dedicado ao estudo de caso em que é descrito o sistema de distribuição de energia elétrica utilizado para as simulações, a topologia da rede, carregamento e aos resultados obtidos referentes à análise da influência de faltas de alta impedância na formulação existente e estendida.
- No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do presente trabalho, assim como a proposta para trabalhos futuros visando à detecção e localização de faltas de alta impedância nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO BASEADO NA IMPEDÂNCIA APARENTE – ESTADO DA ARTE

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os primeiros estudos realizados na localização de faltas foram aplicados nos sistemas de transmissão. As linhas de transmissão (LT) possuem comprimento longo, que se originam na estação geradora de energia elétrica (usina hidrelétrica, térmica, nuclear) e se estendem até os centros de distribuição que correspondem às subestações redutoras de tensão, constituindo-se um elo importante no fornecimento de energia elétrica aos grandes centros consumidores.

De forma a realizar uma rápida LF e posterior restauração do fornecimento da energia elétrica, foram desenvolvidos algoritmos para estimar o ponto de ocorrência do defeito.

Após a desregulamentação do mercado elétrico no nível da distribuição, as concessionárias se encontraram com a necessidade de melhorar o nível da qualidade e a continuidade no fornecimento da energia elétrica aos consumidores. Para isto, precisaram diminuir o tempo para que as equipes de campo pudessem localizar o lugar da falta. Os algoritmos desenvolvidos para sistemas de transmissão não são aplicáveis aos sistemas de distribuição devido às características diferentes entre estes dois sistemas.

Portanto, as principais características que diferenciam o problema de localização de faltas nos sistemas de distribuição, daquele em linhas de transmissão, são as seguintes:

- Sistema inerentemente radial;
- Carregamento desequilibrado entre as fases;
- Cargas alocadas ao longo do alimentador, não somente no seu extremo;
- Derivações laterais de uma, duas, ou três fases;
- Monitoramento apenas na subestação;

- Alimentadores não-homogêneos, sua construção geralmente utiliza diferentes bitolas de condutores e configurações dos mesmos nos postes;

Neste capítulo se descrevem os principais métodos aplicados na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

2.2 MÉTODO DE LEE ET AL. (2004)

Uma formulação importante e similar à localização de faltas fase-terra apresentada em (ZHU et al. 1997), foi desenvolvida por (LEE et al. 2004). Esta metodologia, considerada pioneira na área, foi baseada na utilização de componentes de fase, onde o alimentador principal foi dividido em seções, e a distância da falta analisada em cada uma das seções, até que a distância correta fosse estimada. Para o cálculo da estimativa da corrente de falta, variável necessária na formulação, foi proposto um processo iterativo em lugar de um algoritmo de fluxo de carga, sendo esta uma das diferenças com a proposta realizada por (ZHU et al. 1997).

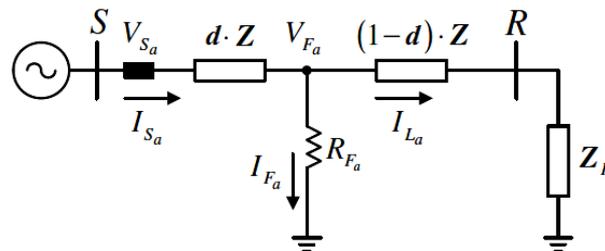


Figura 2.1: Modelo de alimentador de distribuição simplificado (Lee et al. 2004)

Neste trabalho, ainda, as cargas a jusante da falta são consideradas como cargas equivalentes Z_R , obtidas a partir de uma combinação série-paralelo entre as impedâncias da linha e das cargas. Na Figura 2.1, se apresenta um alimentador de distribuição simplificado, no qual se observa a carga equivalente Z_R no terminal remoto R a jusante da falta.

Com as medições das tensões e correntes feitas nos terminais da subestação, analisando o circuito e considerando uma falta fase-terra, no terminal S da subestação, segundo os autores, a tensão da fase a é dada por:

$$V_{S_a} = d \cdot Z \cdot I_{S_a} + I_{F_a} \cdot R_F \quad (2.1)$$

em que

- | | |
|-----------|---|
| d | Distância da falta |
| I_{S_a} | Corrente medida na subestação da fase a |

I_{Fa}	Corrente de falta da fase a
I_{La}	Corrente de carga da fase a
R_F	Resistência de falta
Z	Impedância da linha

sendo que

$$Z = z_{aa} + z_{ab} + z_{ac} \quad (2.2)$$

e

z_{aa}	Impedância própria da fase a por unidade de comprimento
$z_{a(b,c)}$	Impedância mutua entre fase a e fases b, c por unidade de comprimento

Decompondo (2.1) em suas componentes reais e imaginárias, e eliminando a resistência de falta R_F , a equação resultante para a distância da falta é expressa por:

$$d = \frac{V_{Sa}^r \cdot I_{Fa}^i - V_{Sa}^i \cdot I_{Fa}^r}{A \cdot I_{Fa}^i - B \cdot I_{Fa}^r} \quad (2.3)$$

onde

$$A = z_{aa}^r \cdot I_{Sa}^r - z_{aa}^i \cdot I_{Sa}^i + z_{ab}^r \cdot I_{Sb}^r - z_{ab}^i \cdot I_{Sb}^i + z_{ac}^r \cdot I_{Sc}^r - z_{ac}^i \cdot I_{Sc}^i \quad (2.4)$$

$$B = z_{aa}^r \cdot I_{Sa}^i + z_{aa}^i \cdot I_{Sa}^r + z_{ab}^r \cdot I_{Sb}^i + z_{ab}^i \cdot I_{Sb}^r + z_{ac}^r \cdot I_{Sc}^i + z_{ac}^i \cdot I_{Sc}^r \quad (2.5)$$

sendo que r e i representam as componentes real e imaginária, respectivamente.

Dado que a distância da falta em (2.3) está em função da corrente de falta, da diferença entre a corrente medida no terminal S e a corrente de carga, a corrente de falta pode ser calculada por:

$$I_{Fa} = I_{Sa} - I_{La} \quad (2.6)$$

Uma técnica iterativa para a estimativa da corrente da carga foi desenvolvida em (LEE et al. 2004) durante o período de falta, também descrito em (FILOMENA, 2008; UBIRAJARA, 2010). A impedância da carga é modelada como uma impedância constante com valor conhecido. Desta forma, a corrente de carga é calculada por (2.7)

$$I_{La} = [Y_{L11} \quad Y_{L12} \quad Y_{L13}] \cdot [V_{Fa} \quad V_{Fb} \quad V_{Fc}]^T \quad (2.7)$$

onde V_F é a tensão no ponto da falta, a qual é calculada no processo iterativo, e Y_L representa a matriz de admitância combinada da seção da linha a jusante da falta e da carga, obtida por

$$Y_L = [(1-d) \cdot Z + Z_R]^{-1} \quad (2.8)$$

O processo iterativo para estimativa da distância da falta converge quando a distância d em (2.3) for menor que L , ou seja, menor que o comprimento da seção em análise. Isto quer dizer que a falta foi encontrada na seção analisada. Caso contrário, a análise deverá ser realizada na seguinte seção aplicando um novo processo de LF utilizando os valores de tensões e correntes da seção subsequente.

Como estas medidas de tensões e correntes estão disponíveis somente nos terminais da subestação, pode ser aplicada uma análise de circuitos elétricos e dessa forma atualizar os valores necessários de tensão e corrente utilizados no procedimento explicado anteriormente. Assim, a tensão na barra $k+1$ é calculada por meio da seguinte expressão:

$$V_{k+1} = V_k - Z_k \cdot I_k \quad (2.9)$$

onde:

- V_k Tensão na barra k ;
- I_k Corrente da linha na seção k ;
- Z_k Impedância da linha na seção k .

Considerando um modelo de carga de impedância constante, a corrente é dada por (2.10):

$$I_{Lk} = V_k + Y_{Lk} \quad (2.10)$$

onde:

- I_{Lk} Corrente da carga na barra k ;
- Y_{Lk} Admitância da carga alocada na barra k .

Por último, a corrente da linha na seção $k+1$ determina-se por meio de:

$$I_{k+1} = I_k - I_{Lk} \quad (2.11)$$

Dado que neste trabalho foi proposto um algoritmo de localização de falta desenvolvido para sistemas de distribuição, existe a possibilidade de se obter como solução múltiplas estimativas dos locais de faltas. Para contornar esta desvantagem, um esquema de diagnóstico de falta para a eliminação dos vários possíveis locais é proposto, consistente em duas etapas:

- A primeira é baseada na atuação dos equipamentos de proteção instalados na rede de distribuição. A forma de onda da corrente resultante da atuação de cada um dos equipamentos de proteção na ocorrência de uma falta é registrada e armazenada numa base de dados. Logo, num novo evento de uma falta, a correta atuação das proteções é comparada aos padrões das correntes de forma a eliminar ou reduzir as possíveis múltiplas estimativas de locais de faltas;
- Caso não seja possível a eliminação das múltiplas estimativas, a segunda etapa se baseia no fato da carga interrompida no momento de atuação dos equipamentos de proteção. Da mesma forma que descrito anteriormente, o registro previamente armazenado das formas de onda da corrente é comparado com o registro de um novo evento de falta no sistema e é feita uma análise da corrente da carga interrompida com a corrente da carga do sistema.

2.3 MÉTODO DE SALIM ET AL. (2009)

Baseado nos equacionamentos das metodologias desenvolvido por (ZHU et al. 1997) e (LEE et al. 2004), no ano de 2009, (SALIM et al. 2009) apresentaram uma continuação destes trabalhos incorporando três melhorias para o cálculo da estimativa da distância da falta. Estas melhorias consistem em:

1. Desenvolvimento de equacionamentos para todos os tipos de falta;
2. Nova formulação para formação dos sistemas equivalentes;
3. Variação do perfil da carga no sistema de distribuição.

Nas metodologias anteriores nas quais está baseado este trabalho, a LF foi desenvolvida somente para faltas fase-terra, o que constitui uma desvantagem visto que um SDEE real está sujeita a diferentes tipos de falta. Sendo assim, foram propostas novos equacionamentos de LF para todos os tipos de faltas (fase-fase, fase-

fase-terra, trifásica-terra), complementando os métodos de ZHU et al. (1997) e de LEE et al. (2004).

Em (ZHU et al. 1997), os sistemas equivalentes são obtidos por meio de um algoritmo de fluxo de carga, que precisa ser calculado a cada iteração do algoritmo de LF. A obtenção do sistema equivalente em (LEE et al. 2004) é realizada através de associações série-paralelo entre as impedâncias da linha e da carga. Isto pode ser considerado como inadequado quando aplicado a sistemas altamente ramificados e de vasta extensão (SALIM, 2008).

A proposta desenvolvida em (SALIM et al. 2009) consiste na utilização de um algoritmo de fluxo de potência trifásico baseada na técnica *ladder* ou de varredura como sugerido em (KERSTING, 2002) para SDEE. O algoritmo é aplicado ao sistema na condição de pré-falta, de onde, os valores de tensão e corrente obtidas em cada nó, a impedância equivalente é calculada de acordo com:

$$Z_{eq_{p-q}} = \frac{V_p}{I_{p-q}} \quad (2.12)$$

onde

V_p Tensão no nó p [V];

I_{p-q} Corrente de linha entre nós p e q [A].

A variação do perfil da carga do sistema de distribuição corresponde à terceira melhoria proposta pelos autores. Baseada nas medidas adquiridas nos terminais da subestação é obtida primeiramente uma impedância aparente padrão para cada fase a partir da relação entre a tensão e corrente do sistema operando em regime permanente determinada por:

$$Z_{carga1-k} = \frac{V_{Sk}}{I_{Sk}} \quad (2.13)$$

onde

$Z_{carga1-k}$ Impedância de carga equivalente na condição de carga padrão;

V_{Sk} Tensão no terminal S na condição de carga padrão;

I_{Sk}	Corrente do terminal S na condição de carga padrão;
k	Fases a, b, c

Quando os sinais de tensão e corrente no momento da falta são adquiridos, uma nova impedância aparente é calculada no período de pré-falta dada por (2.14) que representa o estado de operação atual do sistema:

$$Z_{carga2-k} = \frac{V'_{Sk}}{I'_{Sk}} \quad (2.14)$$

Após o cálculo das expressões (2.13) e (2.14), é obtido um índice de variação do carregamento para cada fase expressada por (2.15), sendo utilizada para a atualização do carregamento do sistema:

$$\Delta Carga_k = \frac{Z_{carga2-k} - Z_{carga1-k}}{Z_{carga1-k}} \quad (2.15)$$

2.4 MÉTODO DE FILOMENA ET AL. (2009)

Nas metodologias apresentadas acima, as características em comum são a não consideração do efeito capacitivo das linhas e a utilização de um modelo de linha RL . No trabalho desenvolvido em (Filomena et al. 2009), é apresentada uma extensão na formulação para a localização de falta baseada na impedância aparente para sistemas de distribuição subterrâneos. Esta extensão consiste na consideração da capacitância dos cabos da rede subterrânea e da corrente capacitiva na formulação do equacionamento, efeito que na modelagem de cabos subterrâneos deve ser levado em conta (KERSTING, 2002). Para a modelagem da linha, os autores fazem uso de um circuito π , com o qual se pode representar o efeito capacitivo através da admitância *shunt*. Ainda, para a aquisição dos dados das tensões e correntes, a metodologia baseia-se em dados de apenas um terminal, com o equacionamento desenvolvido em componentes de fase.

Partindo da análise da Figura 2.2, onde é representado um segmento de uma linha trifásica sujeito a uma falta fase-terra, segundo os autores, pode-se estabelecer a tensão no terminal da fase faltosa por meio de (2.16):

$$V_{Sfa} = V_{Fa} + x \cdot (z_{aa} \cdot I_{xa} + z_{ab} \cdot I_{xb} + z_{ac} \cdot I_{xc}) \quad (2.16)$$

onde as variáveis são:

V_{Sfm}	Tensão no terminal local da fase m durante a falta;
I_{Sfm}	Corrente no terminal local da fase m durante a falta;
I_{Lm}	Corrente de carga da fase m ;
I_{cap}	Corrente capacitiva;
I_{Fm}	Corrente de falta na fase m ;
x	Distância da falta;
L	Comprimento da linha;
z_{ii}	Impedância própria da linha;
z_{ij}	Impedância mútua da linha;
Z_{Labc}	Impedância equivalente da carga;
Y_{Sabc}	Admitância da linha no terminal S ;
Y_{Rabc}	Admitância da linha no terminal R ;
Z_f	Impedância da falta.

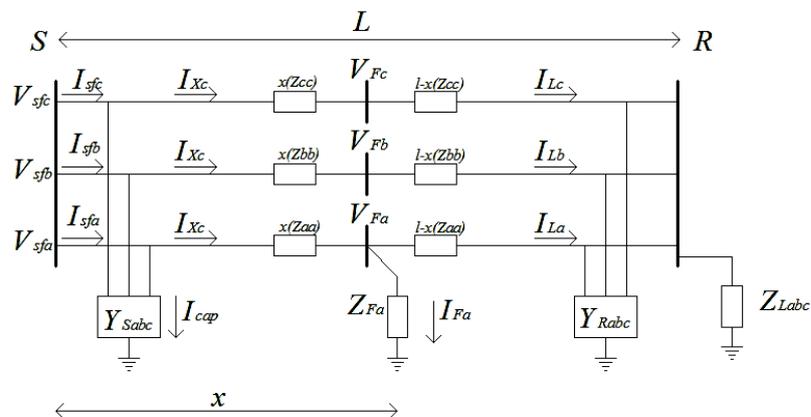


Figura 2.2: Linha de SDEE sujeita a falta –fase-terra (FILOMENA et al. 2009)

Se na expressão (2.16) a impedância da falta for considerada puramente resistiva, e for separada em suas componentes real e imaginária, obtém-se (2.17):

$$\begin{bmatrix} V_{Sfa}^r \\ V_{Sfa}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{1a} & I_{Fa}^r \\ N_{2a} & I_{Fa}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

onde r e i denotam a parte real e imaginária respectivamente, e definindo N_{1a} e N_{2a} por (2.18) e (2.19):

$$N_{1a} = \sum_{k=a,b,c} (z_{ak}^r \cdot I_{Sk}^r - z_{ak}^i \cdot I_{Sk}^i) \quad (2.18)$$

$$N_{2a} = \sum_{k=a,b,c} (z_{ak}^r \cdot I_{Sk}^i - z_{ak}^i \cdot I_{Sk}^r) \quad (2.19)$$

em que k indicam as fases, I_{Sk} é a corrente medida no terminal S da fase correspondente k e z_{ak} as impedâncias próprias e mútuas da linha.

A distância, como também a resistência de falta podem ser calculadas a partir de (2.20) e (2.21), respectivamente, como função das tensões e correntes do terminal local e dos parâmetros da linha (FILOMENA et al. 2009):

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \end{bmatrix} = \frac{1}{N_{1a} \cdot I_{Fa}^i - N_{2a} \cdot I_{Fa}^r} \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa}^i & -I_{Fa}^r \\ -N_{2a} & N_{1a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Sfa}^r \\ V_{Sfa}^i \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

em que:

x Distância da falta;

R_{Fa} Resistência da falta.

$$x = \frac{V_{Sfa}^r \cdot I_{Fa}^i - V_{Sfa}^i \cdot I_{Fa}^r}{N_{1a} \cdot I_{Fa}^i - N_{2a} \cdot I_{Fa}^r} \quad (2.21)$$

De (2.21) pode-se apreciar que a estimativa da distância da falta está dada em função da corrente de falta e, da análise da Figura 2.2 verifica-se esta corrente por meio da expressão (2.22), onde a corrente de carga I_L durante a falta é estimada inicialmente como sendo igual à corrente de carga de pré-falta.

$$[I_F] = [I_{Sf}] - [I_{cap}] - [I_L] \quad (2.22)$$

Através da expressão (2.23), a corrente capacitiva I_{cap} é:

$$[I_{cap}] = [Y_S] \cdot [V_{Sf}] \quad (2.23)$$

onde (2.24) calcula a admitância *shunt* da linha da fase m no terminal S :

$$y_{Sm} = \frac{x}{L} \cdot y_{Lm} \quad (2.24)$$

sendo que:

$$[Y_S] = \begin{bmatrix} y_{Sa} & 0 & 0 \\ 0 & y_{Sb} & 0 \\ 0 & 0 & y_{Sc} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

A tensão no ponto da falta é determinada por (2.26):

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sfa} \\ V_{Sfb} \\ V_{Sfc} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

e utilizada para a atualização da corrente de carga de acordo com (2.28), previamente fazendo um cálculo de uma matriz de admitância equivalente *shunt*:

$$[Y_{l-eq}] = \{(L-x) \cdot [Z] + [Z_L] // j[X_c]\}^{-1} \quad (2.27)$$

$$[I_L]_{abc} = [Y_{l-eq}] \cdot [V_F]_{abc} \quad (2.28)$$

O critério de convergência aplicado no algoritmo está dado por (2.29)

$$|x(n) - x(n-1)| < \varepsilon \quad (2.29)$$

onde

n Número de iterações;

ε Critério de parada.

Uma vez cumprido este critério de convergência o algoritmo é finalizado, caso contrário, volta-se a calcular a corrente de falta e a corrente capacitiva, executando o algoritmo novamente.

2.5 MÉTODO DE SALIM ET AL. (2010)

No trabalho apresentado em (SALIM et al. 2010), os autores propõem uma melhoria na metodologia de LF fundamentada na impedância aparente que consiste na formulação de um novo equacionamento considerando a capacitância da linha para a estimativa da distância da falta. O novo equacionamento parte da consideração do emprego de um modelo exato de linha ou modelo π ilustrado na Figura 2.3. Através da análise de tal modelo, são obtidas duas equações. Uma delas é aplicada

para todos os tipos de faltas a terra, sendo que a outra destinada para faltas entre fases.

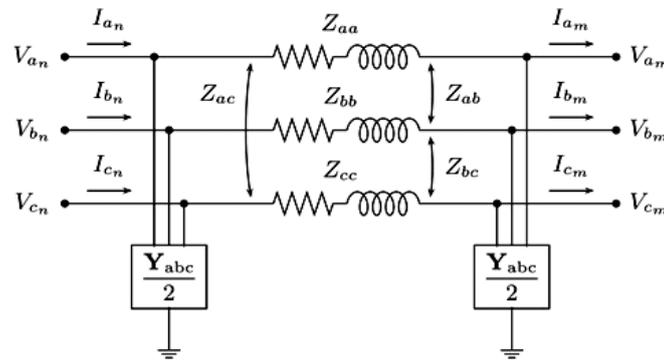


Figura 2.3: Modelo trifásico exato de linha (SALIM et al. 2010)

A partir do equacionamento de um segmento de linha exato sujeito aos diversos tipos de faltas a terra, isto é, faltas fase-terra, fase-fase-terra e trifásica-terra, os autores observaram uma semelhança entre as equações finais para cada um dos tipos de falta, obtendo um polinômio de segunda ordem apresentado em (2.30):

$$x^2 \cdot \left[0.5 \cdot \sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ M_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] - x \cdot \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ N_k \cdot I_{F_k}^* \} \right] + \left[\sum_{k \in \Omega_k} \Im \{ V_{S_k} \cdot I_{F_k}^* \} \right] = 0 \quad (2.30)$$

onde:

- k Fase faltosa;
- Ω_k Conjunto das fases faltosas;
- $\Im \{ \cdot \}$ Parte imaginária dos números complexos;
- $*$ Denota o conjugado;
- I_{F_k} Corrente da falta na fase faltosa k .

e:

$$\begin{aligned} [M_{abc}] &= [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \cdot [V_{S_{abc}}] \\ [N_{abc}] &= [Z_{abc}] \cdot [I_{S_{abc}}] \end{aligned}$$

Da mesma forma em que foi obtida uma equação generalizada para faltas a terra, os autores analisaram um segmento de linha sujeita a uma falta entre fases. Concluíram num equacionamento geral final dado por:

$$x^2 \cdot 0.5 \cdot \Im\{(M_i - M_k) \cdot I_{F_i}^*\} - x \cdot \Im\{(N_i - N_k) \cdot I_{F_i}^*\} + \Im\{(V_{S_i} - V_{S_k}) \cdot I_{F_i}^*\} = 0 \quad (2.31)$$

Através das equações (2.30) e (2.31) é possível estabelecer uma estimativa da distância da ocorrência da falta, tendo como parâmetros de entradas as tensões e correntes medidas na subestação, parâmetros da linha e a corrente de falta, a qual é estimada a partir de um algoritmo iterativo, apresentado com maiores detalhes em (SALIM, 2008; SALIM et al. 2010).

Como a solução para a estimativa da distância da falta parte de um polinômio de segunda ordem, duas soluções serão obtidas, sendo que um resultado é estimativa real e o outro resultado sem nenhum significado físico. Um polinômio quadrático é representado por:

$$\lambda_2 \cdot x^2 + \lambda_1 \cdot x + \lambda_0 = 0 \quad (2.32)$$

sendo a solução da distância da falta

$$x = \begin{cases} \frac{-\lambda_1 + \sqrt{\lambda_1^2 - 4 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_0}}{2 \cdot \lambda_2}, & \text{se } \lambda_1 > 0 \\ \frac{-\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 4 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_0}}{2 \cdot \lambda_2}, & \text{se } \lambda_1 < 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

Uma relação mencionada no trabalho refere-se à desconsideração do efeito capacitivo na formulação das equações gerais apresentadas. No caso do uso de um modelo de linha *RL*, que não leva a consideração da capacitância da linha, a matriz de admitância *shunt* é nula levando a obter um valor $M_k = 0$. Assim, a partir de (2.30) e (2.31) definiram duas relações dadas por (2.34) para faltas a terra e (2.35) para faltas entre fases apresentadas a seguir:

$$x = \frac{\sum_{k \in \Omega_k} \Im\{V_{S_k} \cdot I_{F_k}^*\}}{\sum_{k \in \Omega_k} \Im\{N_k \cdot I_{F_k}^*\}} \quad (2.34)$$

$$x = \frac{\Im\{(V_{S_i} - V_{S_k}) \cdot I_{F_i}^*\}}{\Im\{(N_i - N_k) \cdot I_{F_i}^*\}} \quad (2.35)$$

Segundo (SALIM et al. 2010), as expressões (2.34) e (2.35) resultam nas equações desenvolvidas e utilizadas por (ZHU et al. 1997; LEE et al. 2004) e na extensão do Método de (LEE et al. 2004) proposto por (SALIM et al. 2009).

Além do desenvolvimento dos novos equacionamentos para a estimativa da LF, neste trabalho também se faz uma comparação do efeito capacitivo entre as metodologias consideradas estado da arte na LF baseada na impedância aparente e o equacionamento proposto, concluindo que em linhas aéreas com cargas intermediárias e laterais, quando não considerada a admitância *shunt* da linha, as respostas das metodologias do estado da arte vêm-se afetadas significativamente (SALIM et al. 2010).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo fez-se uma abordagem do estado-da-arte na localização de faltas fundamentadas na impedância aparente focado nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Estas técnicas tratam o problema de LF através de diferentes análises e considerações.

3 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo será abordado um tipo de defeito denominado Falta de Alta Impedância (FAI). Sistemas de distribuição estão expostos a este tipo de falta e no caso de ocorrência, podem acarretar diagnósticos incorretos pela proteção convencional, podendo causar perigo para as pessoas próximas ou às propriedades (VICO et al. 2010). Para entendê-la melhor, far-se-á primeiramente uma descrição geral das FAI, seguida de alguns estudos mais relevantes nos quais se analisarão o comportamento da corrente da falta de alta impedância. Este objetiva especificar as suas características, experimentos e modelos teóricos desenvolvidos, com a finalidade de reproduzir as formas de onda da corrente no momento do evento. Concluindo o capítulo, apresentar-se-á uma síntese dos modelos teóricos de FAI os quais constituem o estado da arte, propícios para serem construídos em simuladores de transitórios eletromagnéticos.

3.2 DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

3.2.1 Definição das Faltas de Alta Impedância

As redes elétricas estão sujeitas à ocorrência de faltas elétricas. A origem destas faltas elétricas são diversas, estando relacionados com descargas atmosféricas, acidentes veiculares, queimas debaixo das redes aéreas, contato com animais, atos de vandalismo, contato com árvores, rompimento dos condutores (SANKARAN, 2002).

Um tipo de falta elétrica é a chamada Falta de Alta Impedância (FAI). Segundo o *PSRC Working Group D15*, este tipo de falta é “aquela que não produz suficiente corrente de falta detectável pelos relés convencionais de sobrecorrente ou fusíveis”. Outra definição dada é “a falta de alta impedância a terra resulta quando um condutor primário faz um contato não desejado com a superfície da estrada, calçada, gramado, galho de árvore, ou com outra superfície, ou objeto que restringe o fluxo da corrente de falta a níveis debaixo do detectável pelos equipamentos convencionais de sobrecorrente” (TENGDIN et al. 1996).

Sendo assim, pode ser dito que as FAI são originadas por duas situações: em redes primárias de distribuição de energia elétrica, a falta de alta impedância ocorre quando há o rompimento de um condutor de um sistema elétrico e este, ainda energizado, entra em contato com uma superfície (árvore, asfalto, solo) (Nakagomi et al. 2005); outra forma relacionada à ocorrência de uma FAI é quando não há rompimento do condutor, mas este entra em contato com um objeto aterrado ou através de uma falha na isolação ou contato inadvertido com algum elemento externo tal como galhos de árvores (VICO et al. 2010).

As redes de Distribuição de Energia Elétrica abrangem grandes áreas, tanto urbanas quanto rurais. No caso da ocorrência do rompimento ou contato dos condutores com algum objeto aterrado, é gerada uma grande preocupação nas companhias distribuidoras de energia elétrica no que respeita à segurança pública, devido à aparição de arcos elétricos, tendo como consequência o início de incêndio sobre a vegetação (DAS, R. BAYOUMI, D., 2007), ilustrado na Figura 3.1.

Como mencionado anteriormente, as FAI produzem correntes com magnitudes de baixo valor, em muitos casos menores aos valores das correntes mínimas de atuação dos equipamentos tradicionais de proteção, tais como fusíveis ou relés de sobrecorrentes, podendo ser confundida como uma variação de corrente normal no carregamento do sistema e, portanto, não levando à atuação destes dispositivos. Quando ocorre o rompimento de um condutor, a falta permanece alimentada pelo sistema até que seja detectada de forma visual ou até que algum equipamento de manobra ou de proteção seja aberto manualmente (SILVA, 1992).



Figura 3.1: Princípio de incêndio produzido por Arco elétrico
(Fonte: HIF WG B5.94)

Segundo (WESTER, 1998, VICO et al. 2010), a queda de condutores não costuma ser levada em conta nos registros de ocorrência. Estima-se que entre 5 a

10% dos eventos das faltas nos sistemas de distribuição se devem à queda de condutores.

A magnitude da corrente das FAI é dependente do tipo de superfície com que o condutor faz contato e do nível de tensão do sistema. Isto pode ser visualizado na Tabela 3.1 (SHORT, 2004), onde são disponibilizados os valores medidos de corrente de FAI para diversos tipos de superfície. Estes valores típicos de correntes foram obtidos para um sistema de distribuição com nível de tensão de 15 kV, e pode ser observado que as correntes possuem valores inferiores a 100 ampéres.

Tabela 3.1: Correntes de FAI

Superfície	Corrente de Falta [A]
Asfalto seco	0
Concreto	0
Areia seca	0
Areia molhada	15
Gramado seco	20
Gramma seca	25
Gramado molhado	40
Gramma molhada	50
Concreto armado	75

Fonte: Short, 2004.

3.2.2 Caracterização das Faltas de Alta Impedância

As FAI possuem características particulares como as mencionadas na seção 3.1. A partir de testes em campo e modelos laboratoriais, tratou-se de chegar a um modelo que levasse em conta tais características. Os estudos mais relevantes para a obtenção de um modelo com o objetivo de ser utilizado em simulações computacionais na representação e caracterização dos arcos elétricos provenientes das FAI, conforme apresentado em (MORETO, 2005), são os trabalhos desenvolvidos por Jeering e Linders (1989; 1990); Emanuel et al. (1990); Sultan et al. (1994) e Nam et al. (2001).

Em (JEERING; LINDERS, 1989) foram analisadas as características das faltas de alta impedância a partir da análise do contato entre o condutor e o solo. Os autores concluíram que o conteúdo harmônico resultante da corrente da falta possui características que podem ser utilizados para identificar este tipo de falta de uma variação normal de carga devido ao baixo valor da corrente resultante.

Em um trabalho posterior, (JEERING; LINDERS, 1990) analisaram os harmônicos presentes na rede gerada por diversas fontes (banco de capacitores,

cargas não-lineares) e as confrontou com aquelas harmônicas geradas pelas faltas de alta impedância. Por meio desta comparação, resultou que as harmônicas geradas pelas FAI possuem particularidades em comum, sem levar em conta o ponto da ocorrência da falta. Segundo os autores, as particularidades das harmônicas produzidas pelas FAI, em contraste com as harmônicas da rede, resumem-se nos aspectos citados a seguir:

- As harmônicas geradas por uma FAI resultam apenas do ponto do sistema onde aconteceu a falta;
- A corrente de falta está em fase com a tensão do sistema. Então, a corrente harmônica resultante terá seu valor máximo no mesmo instante que a componente fundamental;
- Harmônicas produzidas pelas faltas de alta impedância são funções da tensão no ponto da falta, ao contrário das harmônicas do sistema que são funções das correntes das cargas no mesmo.

Como resultados das pesquisas puderam observar que na ocorrência de uma FAI a alteração nos valores da magnitude e do ângulo da 3ª harmônica da corrente constituem parâmetros exequíveis e confiáveis para a detecção da ocorrência de uma FAI.

Outro trabalho relevante no estudo das FAI, foi o desenvolvido por Emanuel et al. (1990). O estudo feito pode ser dividido em quatro etapas:

- *Etapa 1:* medição das correntes de falta de alta impedância. As medições e dados foram obtidos a partir de faltas aplicadas no final de um alimentador real em operação.
- *Etapa 2:* durante uma semana, as correntes harmônicas de fase e neutro do alimentador em condição normal de operação foram monitoradas na subestação.
- *Etapa 3:* realização de testes em laboratório. O comportamento do arco elétrico foi simulado em um solo arenoso, esquematizado na Figura 3.2. Mediu-se a curva $v-i$ do arco elétrico assim como as correntes harmônicas.
- *Etapa 4:* obtenção de um modelo teórico. Após caracterizar o comportamento do arco elétrico, definiram este mediante um modelo teórico adequado.

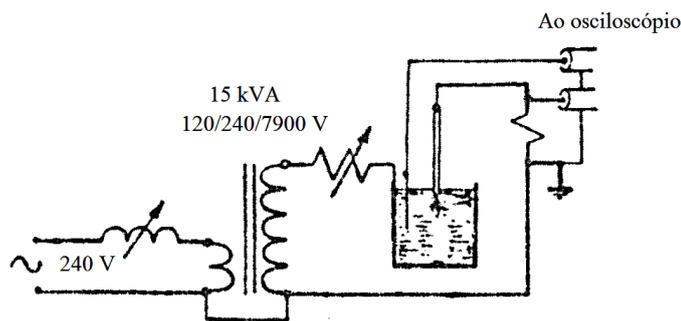


Figura 3.2: Esquema do dispositivo em teste laboratorial

Caracterizando o arco elétrico por meio do conteúdo harmônico, chegaram à conclusão que a presença da 2^a harmônica da corrente do neutro e a 3^a harmônica da corrente de linha podem alertar da ocorrência de FAI. Estas componentes não são significativas em condições de operação normal da rede de energia elétrica.

No trabalho proposto por Sultan et al. (1994), as características do arco elétrico surgido do rompimento do condutor foram investigadas. Para a aquisição dos dados experimentais, em lugar de aplicar uma FAI em alimentadores reais, utilizou-se de uma plataforma experimental, no qual é simulada a queda do condutor numa superfície específica para iniciar a falta. Na Figura 3.3 é apresentado um esboço da plataforma montada para os testes.

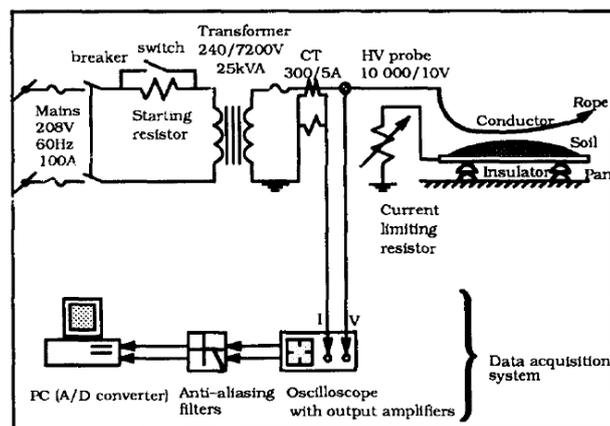


Figura 3.3: Diagrama do teste de FAI

Dos testes feitos, analisaram-se as características da tensão-corrente $V-I$ do arco e o comportamento da corrente de falta. Demonstraram que a curva $V-I$ do arco produzido pela FAI tem um comportamento não-linear, conforme pode ser observado na Figura 3.4. Dependendo do tipo da superfície no qual o condutor cai, o comportamento da corrente da falta vê-se afetado. Na Figura 3.5, pode-se verificar o sinal da corrente da FAI simulada. Nela observa-se a presença de harmônicos na

corrente da falta, a assimetria entre os ciclos positivos e negativos assim como a variação da magnitude da corrente de um ciclo a outro.

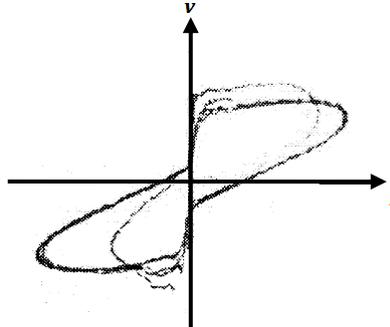


Figura 3.4: Característica V-I da arco da FAI

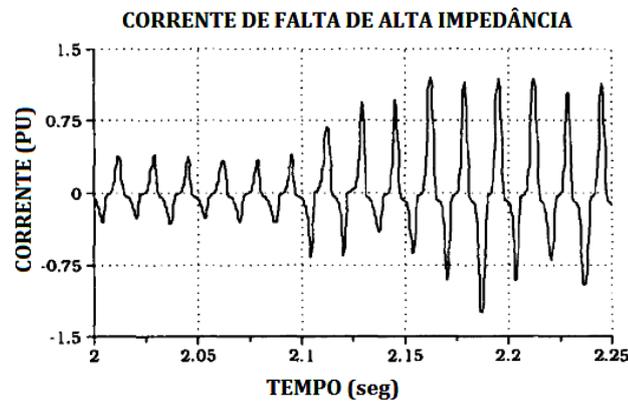


Figura 3.5: Sinal da corrente da FAI

Conforme relatado em NAM et al. (2001), testes experimentais foram realizados em um alimentador de distribuição real de 22,9 kV. O objetivo dos testes era a identificação das características das FAI e a obtenção de um modelo que as representasse. Além das características identificadas em (JEERING; LINDERS, 1989; EMANUEL et al. 1990), NAM et al. 2001 perceberam outras duas características, sendo:

- *Build-up*: período em que a corrente da falta alcança seu máximo valor após algumas dezenas de ciclos;
- *Shoulder*: durante o *build-up*, o aumento da corrente da falta se mantém constante, ou seja, o crescimento do valor da corrente se interrompe. A duração desta interrupção é de 3 a 4 ciclos.

Tendo identificados estas quatro características, o seguinte passo foi desenvolver um modelo físico capaz simular a forma de onda gerada através dos

testes laboratoriais. Para isso, empregaram resistências não-lineares. Estas são conectadas em série, cujas magnitudes são controladas por meio de TACS¹. O funcionamento será detalhado na Seção 3.2.

Em (Elkalashy et al. 2007), os autores investigaram as faltas de alta impedância causadas pelo contato do condutor com árvores. Não se trata da queda de um galho da árvore sob o condutor, mas uma situação em que poderia ocorrer a aproximação suficiente levando ao rompimento do dielétrico do ar e posterior aparição do arco. O arco elétrico associado com a corrente da falta foi modelado e testado experimentalmente.

A configuração utilizada para o estudo e modelagem do arco elétrico é ilustrada na Figura 3.6. A simulação foi realizada no ATP/EMTP, e o modelo do arco foi construído utilizando a “representação universal de arco”, detalhado em (Darwish, Elkalashy, 2005). O valor da resistência do arco é controlado por TACS, o qual é parametrizado por meio de uma equação dinâmica como apresentado em (Kizilcay; Pniok, 2002), sendo que o valor da resistência da árvore foi obtido por meio experimental.

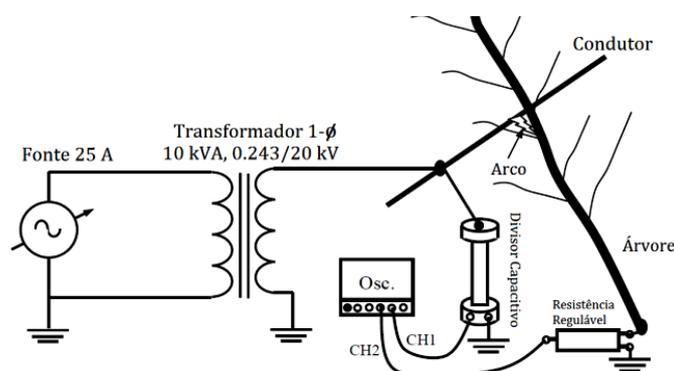


Figura 3.6: Esquema para análise do arco

A rede para a modelagem da falta é mostrado na Figura 3.7, nela pode ser observado que a FAI é simulada através de duas resistências dispostas em série.

¹ *Transient Analysis Control System*, ferramenta do ATP/EMTP que permite controlar componentes a partir de valores em outros pontos do sistema, permitindo modelar componente não-lineares.

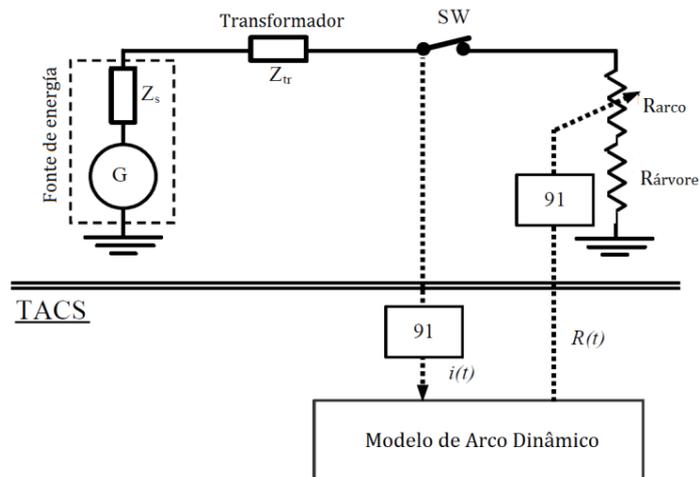


Figura 3.7: Circuito simulado no ATP/EMTP para FAI

3.3 REPRESENTAÇÃO DE MODELOS TEÓRICOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

3.3.1 Modelo de Resistência de falta não-linear

Em NAM *et al.* (2001), apresenta-se o primeiro modelo para o estudo de uma FAI. Na modelagem da FAI, utilizaram-se duas resistências não-lineares (TVR – *Time-Varying Resistances*) conectadas em série. Os valores das duas resistências são controlados por meio da ferramenta disponível denominada TACS. A construção do modelo foi feita no EMTP (ElectroMagnetic Transient Program).

Como ilustrado na Figura 3.8, a primeira resistência $R_1(t)$ tem como função a representação das características de assimetria da FAI. A assimetria está presente em cada ciclo logo da ocorrência da FAI, esta resistência opera em regime permanente. Para a caracterização dos efeitos de *buildup* e *shoulder*, uma segunda resistência $R_2(t)$ é utilizada. Como o *buildup* e *shoulder* são identificados somente antes do regime permanente, esta segunda resistência atua no período do regime transitório.

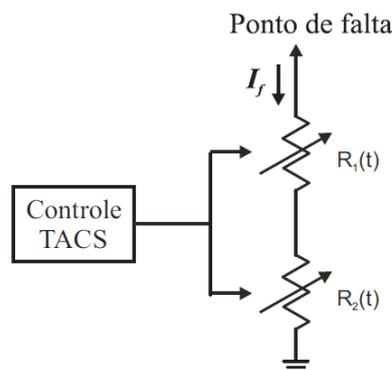


Figura 3.8: Modelo de FAI (NAM et al. 2001)

Na Tabela 3.2 é apresentado um resumo das características da FAI encontrada por meio desta modelagem.

Tabela 3.2: Descrição das características das FAI

Característica	Descrição
Assimetria	Magnitude do semiciclo positivo é maior que o semiciclo negativo, ou vice-versa.
<i>Build-up</i>	Corrente de FAI aumenta progressivamente até alcançar o regime permanente
<i>Shoulder</i>	Corrente de FAI interrompe o aumento durante alguns ciclos
Não-Linear	Devido à presença de harmônicos

O valor de $R_1(t)$ é obtido da curva característica de tensão-corrente (V-I), como ilustrado na Figura 3.9, no período de regime permanente. Enquanto que o valor da resistência $R_2(t)$ é função do tempo e não da tensão da falta. A curva tensão-corrente é utilizada para a configuração do controlador TACS, utilizado para gerar os sinais de controle dos valores das resistências (MORETO, 2005).

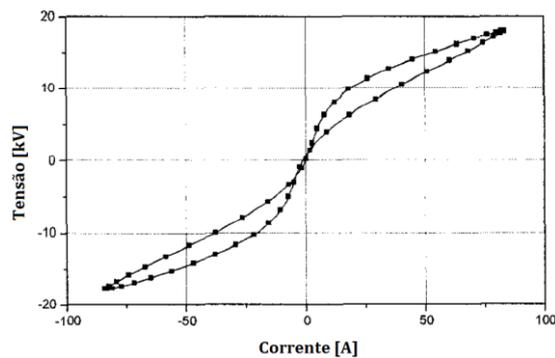


Figura 3.9: Curva característica V-I (NAM et al., 2001)

Segundo (URIARTE, 2003), nem todas as FAI apresentam *shoulder*. Estas condições são ilustradas na Figura 3.10. Esta característica é dada em função do valor da resistência $R_2(t)$, que possui um decaimento exponencial no tempo.

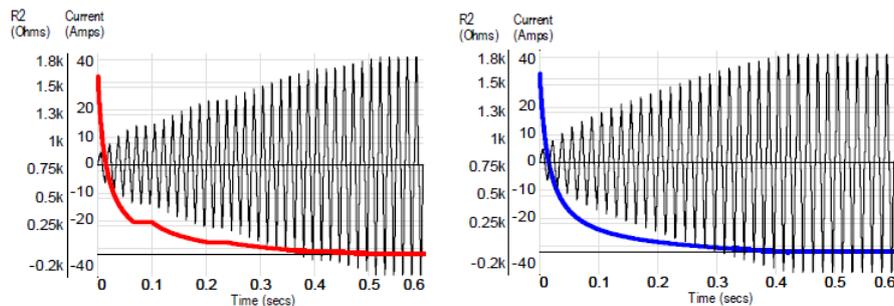


Figura 3.10: Corrente da FAI (Esquerda: com presença de *shoulder*. Direita: sem presença de *shoulder*) (URIARTE, 2003).

3.3.2 Modelo de Falta de Alta Impedância por Diodos

Desenvolvido por Emanuel et al. (1990), após uma série de testes e de medições em campo em que foram estudados os efeitos das harmônicas nos alimentadores do sistema de distribuição causadas pelas FAI, concluíram que um modelo adequado para a representação dos cálculos teóricos obtidos é o ilustrado na Figura 3.11.

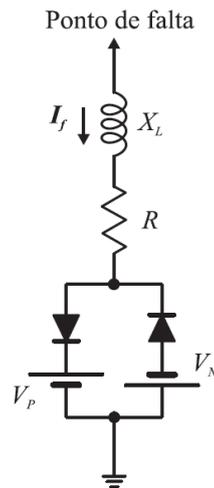


Figura 3.11: Modelo para FAI (EMMANUEL et al. 1990).
Fonte (MORETO, 2005)

Este modelo permite a representação do arco elétrico por meio de duas fontes DC, conectadas por meio de dois diodos em anti-paralelo, estes por sua vez, são conectados a uma resistência e reatância em série. Visualizando a Figura 3.12, nota-se que a segunda harmônica da corrente de falta é dada em função de $\Delta V = V_N - V_p$, entretanto, a terceira harmônica da corrente de falta é dada em função do $tg(\theta) = X_L/R$. Os autores mencionam que estes resultados foram obtidos a partir dos testes experimentais.

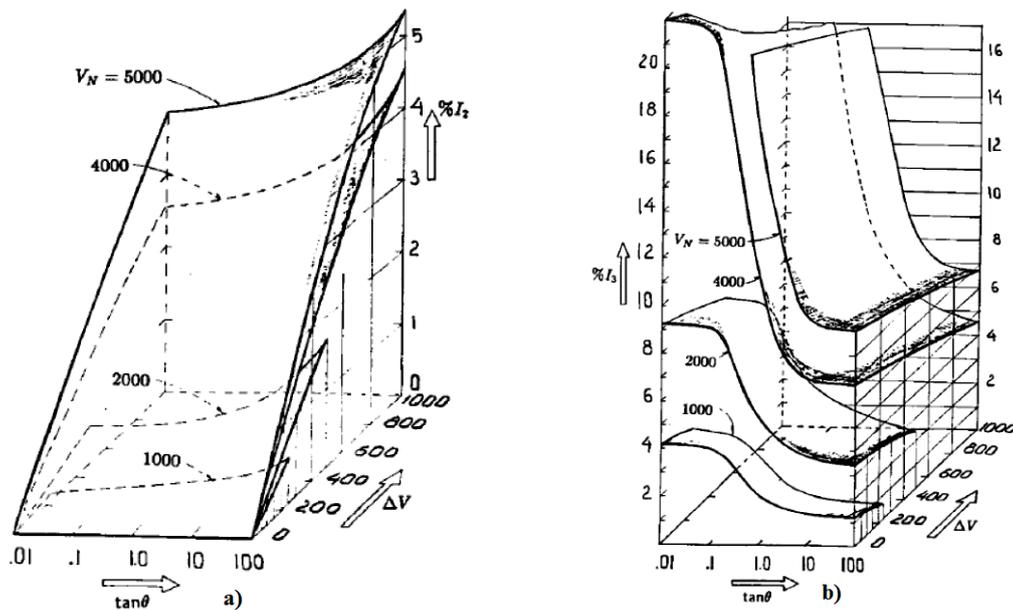


Figura 3.12: Corrente harmônica vs ângulo de fase $\tan(\theta)$ e tensão ΔV :
a) Segunda corrente harmônica; b) Terceira corrente harmônica

Na Figura 3.13 apresenta-se a corrente de falta simulada no sistema de distribuição teste, comprovando dessa forma a representação do arco elétrico produzida pelas FAI.

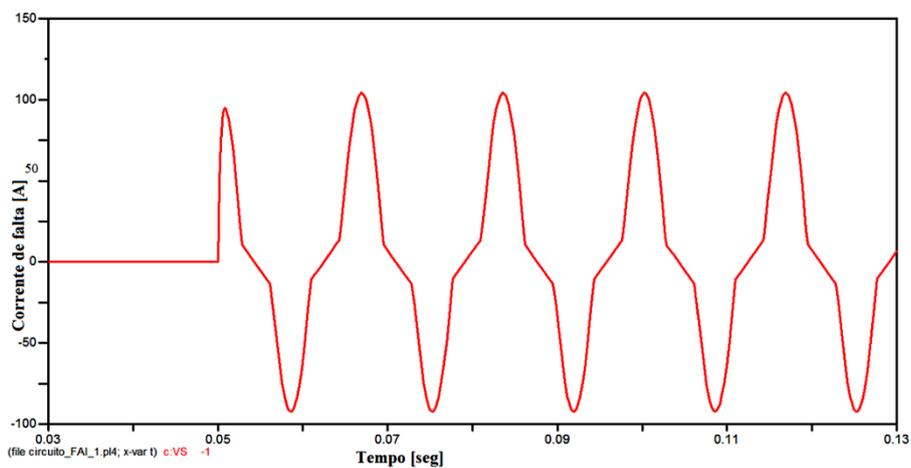


Figura 3.13: Corrente de falta simulada
(Modelo proposto por EMMANUEL et al. 1990)

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentou-se o estado da arte nos modelos para a simulação digital das faltas de alta impedância. No seguinte capítulo, apresentar-se-á a extensão de uma formulação estado da arte baseada em impedância aparente para sistemas de distribuição rurais.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentado o algoritmo aplicado para a LF em um sistema de distribuição de energia elétrica. O algoritmo de LF baseia-se numa metodologia apresentada em (FILOMENA et al. 2009). Essa metodologia foi desenvolvida para sistemas de distribuição subterrâneos, para o qual é preciso levar em consideração o efeito capacitivo dos cabos subterrâneos. Portanto, essa abordagem será trasladada para a aplicação num sistema de distribuição aéreo, urbano e rural. Os alimentadores urbanos são predominantemente trifásicos e de comprimento curto, enquanto que nas regiões rurais, localizadas em áreas remotas da região urbana e devido aos tipos de cargas e potência instalada, as concessionárias optam pelas extensões de linhas bifásicas ou monofásicas.

Inicialmente será apresentada a metodologia proposta para a determinação dos sistemas equivalentes, constituindo-se uma parte importante para a conversão de um sistema de distribuição altamente ramificado em sistemas equivalentes radiais. A seguir será abordado o processo de extração das componentes fundamentais para serem utilizadas no processamento da análise dos sinais dentro do algoritmo. Logo, devido à possibilidade de medição ser somente nos terminais da subestação, e uma vez obtido os sistemas equivalentes radiais, será apresentada uma formulação para a estimativa das tensões e correntes nas barras a jusante à subestação. Por último serão definidas as equações para a estimação da LF nos ramais bifásicos e monofásicos.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS SISTEMAS EQUIVALENTES

Os alimentadores primários das redes de distribuição de energia elétrica são inerentemente radiais, possuindo cargas intermediárias como também derivações laterais² e ramais³, podendo adotar configurações tipo trifásica, bifásica ou monofásica. No presente trabalho assim como o apresentado em (SALIM et al.

² Trecho de alimentador urbano compreendido entre troncos e que permite o remanejamento de carga através dele.

³ Trecho de alimentador urbano que deriva de uma lateral.

2009), a rede de distribuição ramificada é convertida em um conjunto de redes equivalentes em uma configuração radial. Em (SALIM et al. 2009) é proposto o cálculo de sistemas equivalentes a partir da aplicação de fluxo de potência no período de operação pré-falta. A análise do fluxo de potência aplicado consiste num processo iterativo baseado na técnica *ladder*, ou de varredura, apresentado em (KERSTING, 2002) o qual se ajusta aos sistemas de distribuição de energia em função de sua topologia radial.

Considerando a configuração de um alimentador de distribuição de energia com ramificações apresentada na Figura 4.1, são determinados primeiramente os n possíveis caminhos do fluxo de potência dada em função das n ramificações laterais. Segundo (NAGPAL; XU; SAWADA, 1998), aplicando três condições de operação distintas em sistemas trifásicos, pode ser obtida um equivalente da rede a partir da determinação de matrizes de impedância equivalente.

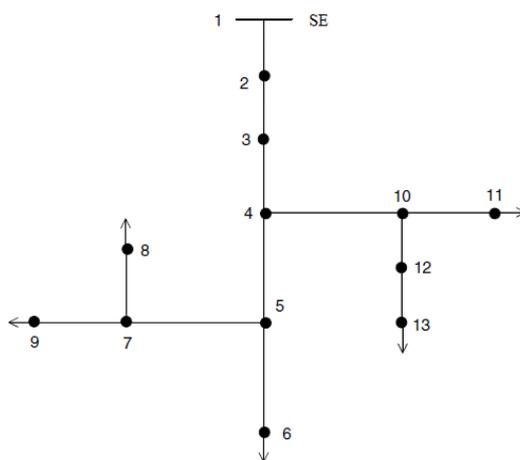


Figura 4.1: Alimentador com ramificações laterais (KERSTING, 2002)

Para isto, como em (FILOMENA et al. 2009; SALIM et al. 2011), as laterais equivalentes são obtidas aplicando três fluxos de potência como sugerido em (NAGPAL; XU; SAWADA, 1998) com diferentes condições operativas. Estas condições operativas diferentes consistem em variar as tensões e ângulos de referência na subestação do sistema para cada um dos fluxos de potência executados. Para evitar resultados linearmente dependentes, os valores das tensões devem ser desbalanceados (NAGPAL; XU; SAWADA, 1998).

Como o SDEE possui seções com duas ou uma fase, a quantidade dos fluxos de potência aplicados nestas seções depende do número de fases presentes (SALIM et al. 2011). Então, os sistemas equivalentes calculados consistem na transformação das impedâncias das linhas e cargas que não estão no caminho principal sendo

analisado em equivalentes ao longo do alimentador radial. Um caminho possível para o fluxo de potência na Figura 4.1 é dada pelas barras (1, 2, 3, 4, 5 e 6), resultando assim em um sistema equivalente com duas “cargas equivalentes”, alocadas nas barras 4 e 5, como apresentada na Figura 4.2.

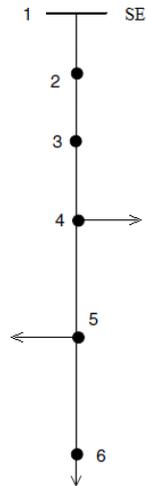


Figura 4.2: Sistema equivalente com cargas nas barras 4 e 5

4.3 EXTRAÇÃO DAS COMPONENTES FUNDAMENTAIS E HARMÔNICOS

Filtros baseados na técnica da Transformada Discreta de Fourier (TDF) são os mais utilizados devido a sua simplicidade e sua capacidade de extração das harmônicas. Porém, o seu desempenho vê-se prejudicado pela presença da componente CC que afeta a periodicidade do sinal amostrado nos filtros de Fourier convencionais (PHADKE; THORP, 1988).

Em vista deste inconveniente mencionado, para a extração da componente fundamental e das harmônicas dos sinais de tensão e corrente gerado pelas faltas, no presente trabalho é utilizado um filtro de Fourier modificado como o apresentado em (LIN; LIU, 2002). O algoritmo digital proposto utiliza três fasores consecutivos que são calculados pela TDF. Logo, a partir destes três fasores, com a Transformada Discreta de Fourier Estendida (TDFE) estima-se uma constante de tempo do decaimento da componente contínua conseguindo uma completa eliminação do erro provocado por este decaimento na estimação dos fasores.

A TDFE é especialmente adequada para os fasores das harmônicas causadas por arcos elétricos, os quais são de magnitude pequena e difíceis de serem calculados quando o sinal amostrado contém considerável decaimento da componente contínua (LIN; LIU, 2002). O filtro de Fourier pode ser descrito pela expressão (4.1)

$$Y_{r,n} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k+r) \cdot e^{-j \frac{2\pi k}{N} n} \quad (4.1)$$

onde

$Y_{r,n}$ fasor calculado da n -ésima harmônica;

r amostra inicial do sinal;

n ordem da harmônica;

N número de amostra por ciclo

k número da amostra.

Após a realização de algumas manipulações algébricas em (4.1), é possível avaliar os fasores da frequência fundamental e das componentes harmônicas sem o efeito da componente contínua decrescente através de (4.2) (LIN; LIU, 2002):

$$A_{r,n} = \frac{d \cdot Y_{r,n} - Y_{r+1,n}}{d - a_n} \quad (4.2)$$

onde

$$a_n = e^{j \frac{2\pi}{N} n} \quad (4.3)$$

$$d = \frac{a_1 \cdot Y_{r+1,1} - Y_{r+2,1}}{a_1 \cdot Y_{r,1} - Y_{r+1,1}} \quad (4.4)$$

Sendo assim, é possível o cálculo dos fasores da frequência fundamental e das componentes harmônicas do sinal amostrado mediante a aplicação da Transformada de Fourier Estendida apresentada em (4.2), eliminando o efeito introduzido pelo decaimento da componente contínua.

4.4 ATUALIZAÇÃO DAS TENSÕES E CORRENTES NAS SEÇÕES POSTERIORES

Tendo em vista uma configuração radial dos sistemas de distribuição com cargas intermediárias alocadas ao longo da sua extensão, e a disponibilidade das medidas das tensões e correntes somente nos terminais da subestação, será necessário estimar os valores dos fasores de tensão e corrente em cada uma das barras do sistema.

Para isto, visualizando a Figura 4.3, o algoritmo de localização de falta baseia-se na análise das seções partindo das medições adquiridas na subestação. O algoritmo inicia-se estimando a distância e a resistência de falta na primeira seção. Verifica-se se o valor da distância estimada for menor ao comprimento da seção analisada, caso contrario, considera-se a falta a jusante desta seção.

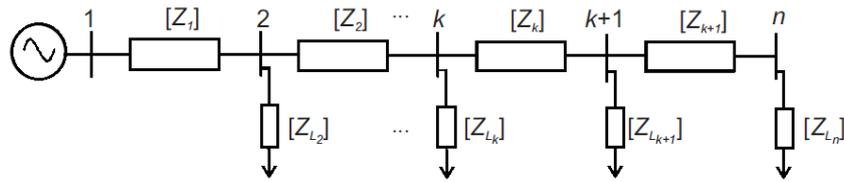


Figura 4.3: Sistema radial com cargas intermediárias (FILOMENA, 2008)

Então, continua-se com a análise na seguinte seção devendo-se estimar os fasores de tensão e corrente durante a falta na seguinte barra. Considerando que para a modelagem da linha foi empregado um modelo *nominal* π , que permite a inclusão da admitância *shunt* (GRAINGER; STEVENSON JR., 1996), não é possível aplicar as atualizações como propostas em (ZHU et al. 1997; LEE et al. 2004). Sendo assim, aplicando as expressões (4.5) – (4.8) obtêm-se os fasores da tensão e corrente na barra a jusante, considerando a admitância *shunt* e a corrente da carga na barra.

$$[V_{S_{k+1}}] = [a] \cdot [V_{S_k}] - [b] \cdot [I_{S_k}] \quad (4.5)$$

$$[I_{S_{k+1}}] = -[c] \cdot [V_{S_k}] + [d] \cdot [I_{S_k}] - [Z_{L_{k+1}}]^{-1} \cdot [V_{S_{k+1}}] \quad (4.6)$$

$$[V_{Sf_{k+1}}] = [a] \cdot [V_{Sf_k}] - [b] \cdot [I_{Sf_k}] \quad (4.7)$$

$$[I_{Sf_{k+1}}] = -[c] \cdot [V_{Sf_k}] + [d] \cdot [I_{Sf_k}] - [Z_{L_{k+1}}]^{-1} \cdot [V_{Sf_{k+1}}] \quad (4.8)$$

onde

- $[V_{S_k}]$ matriz da tensão de pré-falta na barra k
- $[V_{Sf_k}]$ matriz da tensão durante a falta na barra k
- $[V_{S_{k+1}}]$ matriz da tensão de pré-falta na barra $k+1$
- $[V_{Sf_{k+1}}]$ matriz da tensão durante a falta na barra $k+1$
- $[I_{S_{k+1}}]$ matriz da corrente de pré-falta entre as barras k e $k+1$
- $[I_{Sf_{k+1}}]$ matriz da corrente durante a falta entre as barras k e $k+1$
- $[Z_{L_{k+1}}]$ matriz da carga na barra $k+1$

onde as expressões (3)(4.9) – (4.12) são as *matrizes generalizadas da linha* (GRAINGER; STEVENSON JR., 1996; KERSTING, 2002):

$$[a] = [U] + \frac{1}{2} \cdot [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \quad (4.9)$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad (4.10)$$

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4} \cdot [Y_{abc}] \cdot [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \quad (4.11)$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2} \cdot [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \quad (4.12)$$

sendo que

$[U]$ matriz identidade

$[Z_{abc}]$ matriz de impedância de linha da seção

$[Y_{abc}]$ matriz de admitância de linha da seção

As estimativas dos fasores das tensões e correntes prosseguem até que na seção analisada a distância correta da falta seja encontrada, isto é, quando o valor da distância estimada seja menor ao comprimento da seção da linha.

Levando em consideração um alimentador numa região rural, onde estão presentes ramais trifásicos, bifásicos e monofásicos, as matrizes de impedância e admitância da linha passam a constituir matrizes de dimensões $[3 \times 3]$, $[2 \times 2]$ e $[1 \times 1]$ respectivamente.

4.5 EQUACIONAMENTO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NAS LATERAIS

4.5.1 Equacionamento para Localização de Falta Fase-Terra em Ramal Monofásico

A Figura 4.4 apresenta um defeito fase-terra envolvendo a fase a de um ramal monofásico. Com o objetivo de apresentar uma formulação de forma genérica, para a representação de uma falta envolvendo a fase do circuito, esta é identificada por meio do índice m .

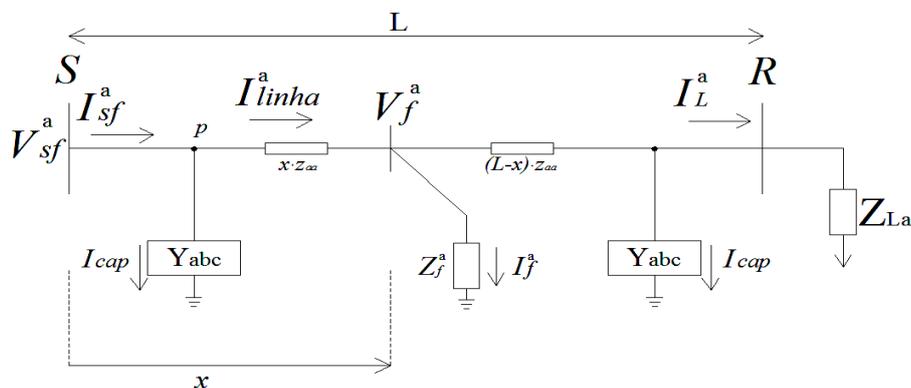


Figura 4.4: Falta Fase-terra (A-t) ramal monofásico

A tensão do terminal S durante a falta pode ser obtida por:

$$\mathbf{V}_{Sf}^m = x \cdot z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + \mathbf{V}_f^m \quad (4.13)$$

e no ponto p , aplicando a lei de corrente de Kirchhoff

$$-\mathbf{I}_{Sf}^m + \mathbf{I}_{cap} + \mathbf{I}_{linha}^m = 0 \quad (4.14)$$

$$\mathbf{I}_{linha}^m = \mathbf{I}_{Sf}^m - \mathbf{I}_{cap} \quad (4.15)$$

A tensão no local da falta pode ser escrita como

$$\mathbf{V}_f^m = \mathbf{Z}_f^m \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.16)$$

o qual pode ser substituído na equação (4.13) obtendo a expressão (4.17)

$$\mathbf{V}_{Sf}^m = x \cdot z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + \mathbf{Z}_f^m \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.17)$$

Fazendo as mesmas considerações, onde a impedância de falta é puramente resistiva e constante, as expressões podem ser separadas em suas componentes reais r e imaginárias i , resultando nas equações (4.18) e (4.19) mostradas a seguir:

$$\mathbf{V}_{Sf(r)}^m = x \cdot \mathbf{A}_1 + \mathbf{R}_f^m \cdot \mathbf{I}_{f(r)}^m \quad (4.18)$$

$$\mathbf{V}_{Sf(i)}^m = x \cdot \mathbf{A}_2 + \mathbf{R}_f^m \cdot \mathbf{I}_{f(i)}^m \quad (4.19)$$

em que

$$\mathbf{A}_1 = z_{mm(r)} \cdot \mathbf{I}_{linha(r)}^m - z_{mm(i)} \cdot \mathbf{I}_{linha(i)}^m \quad (4.20)$$

$$\mathbf{A}_2 = z_{mm(r)} \cdot \mathbf{I}_{linha(i)}^m + z_{mm(i)} \cdot \mathbf{I}_{linha(r)}^m \quad (4.21)$$

Colocando-se as equações (4.18) e (4.19) na forma matricial, conforme demonstrado em (4.22), pode-se separar as incógnitas da distância e da resistência da falta, como pode ser visto em (4.23)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{Sf(r)}^m \\ \mathbf{V}_{Sf(i)}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{I}_{f(r)}^m \\ \mathbf{A}_2 & \mathbf{I}_{f(i)}^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \mathbf{R}_f^m \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ \mathbf{R}_f^m \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{I}_{f(i)}^m - \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{I}_{f(r)}^m} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{f(i)}^m & -\mathbf{I}_{f(r)}^m \\ -\mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{Sf(r)}^m \\ \mathbf{V}_{Sf(i)}^m \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Separando a equação (4.23) em duas equações independentes, obtêm-se as estimativas da distância e da resistência da falta, indicadas em (4.24) e (4.25):

$$x = \frac{V_{Sf(r)}^m \cdot I_{f(i)}^m - V_{Sf(i)}^m \cdot I_{f(r)}^m}{A_1 \cdot I_{f(i)}^m - A_2 \cdot I_{f(r)}^m} \quad (4.24)$$

$$R_f^m = \frac{V_{Sf(i)}^m \cdot A_1 - V_{Sf(r)}^m \cdot A_2}{A_1 \cdot I_{f(i)}^m - A_2 \cdot I_{f(r)}^m} \quad (4.25)$$

4.5.2 Equacionamento para Localização de Falta Fase-Fase em Ramal Bifásico

A Figura 4.5 representa a seção de uma linha de distribuição sujeita à ocorrência de uma falta fase-fase a uma distância x da subestação, na qual, para referência, estão envolvidas as fases bc .

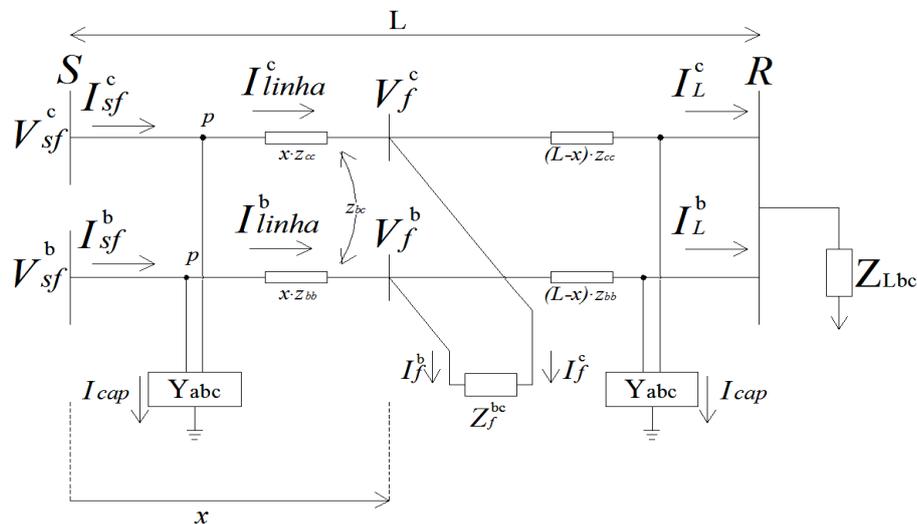


Figura 4.5: Falta Fase-Fase (BC) ramal bifásico

Sendo V_{Sf}^b e V_{Sf}^c as tensões durante a falta no terminal S da subestação, podendo ser expressas por:

$$V_{Sf}^b = x \cdot (z_{bb} \cdot I_{linha}^b + z_{bc} \cdot I_{linha}^c) + V_f^b \quad (4.26)$$

$$V_{Sf}^c = x \cdot (z_{cc} \cdot I_{linha}^c + z_{cb} \cdot I_{linha}^b) + V_f^c \quad (4.27)$$

As equações (3)(4.26) e (3)(4.27) podem ser rescritas de forma a representar a ocorrência de uma falta envolvendo outras fases do circuito, podendo ser uma lateral com fases ab , bc ou ac , dependendo da configuração, na seguinte forma:

$$V_{Sf}^m = x \cdot (z_{mm} \cdot I_{linha}^m + z_{mn} \cdot I_{linha}^n) + V_f^m \quad (4.28)$$

$$V_{Sf}^n = x \cdot (z_{nn} \cdot I_{linha}^n + z_{nm} \cdot I_{linha}^m) + V_f^n \quad (4.29)$$

em que m e n podem representar as fases a, b ou c.

Nesta situação de falta, as condições de contorno são

$$\mathbf{V}_f^m - \mathbf{V}_f^n = \mathbf{Z}_f^{mn} \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.30)$$

$$\mathbf{I}_f^m = -\mathbf{I}_f^n \quad (4.31)$$

Substituindo a equação (3)(4.29) em (3)(4.30) tem-se

$$\mathbf{V}_f^m - \mathbf{V}_{sf}^n + x \cdot (z_{nm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{mn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) = \mathbf{Z}_f^{mn} \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.32)$$

e logo (3)(4.32) em 0 e efetuando algumas manipulações algébricas chega-se à expressão

$$\mathbf{V}_{sf}^m = \mathbf{V}_{sf}^n + x \cdot ((z_{mm} - z_{nn}) \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + (z_{mn} - z_{nm}) \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + \mathbf{Z}_f^{mn} \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.33)$$

Assumindo que a impedância de falta \mathbf{Z}_f^{mn} é puramente resistiva e constante, separa-se a equação (4.33) em suas componentes reais e imaginárias indicadas como r e i , respectivamente. Dessa forma, obtêm-se as expressões (4.34) e (4.35)

$$\mathbf{V}_{sf(r)}^m - \mathbf{V}_{sf(r)}^n = x \cdot \mathbf{B}_1 + \mathbf{R}_f^{mn} \cdot \mathbf{I}_{f(r)}^m \quad (4.34)$$

$$\mathbf{V}_{sf(i)}^m - \mathbf{V}_{sf(i)}^n = x \cdot \mathbf{B}_2 + \mathbf{R}_f^{mn} \cdot \mathbf{I}_{f(i)}^m \quad (4.35)$$

onde \mathbf{B}_1 e \mathbf{B}_2 são

$$\mathbf{B}_1 = \sum_{k=m,n} \left((z_{mk(r)} - z_{nk(r)}) \cdot \mathbf{I}_{linha(r)}^k - (z_{mk(i)} - z_{nk(i)}) \cdot \mathbf{I}_{linha(i)}^k \right) \quad (4.36)$$

$$\mathbf{B}_2 = \sum_{k=m,n} \left((z_{mk(r)} - z_{nk(r)}) \cdot \mathbf{I}_{linha(i)}^k + (z_{mk(i)} - z_{nk(i)}) \cdot \mathbf{I}_{linha(r)}^k \right) \quad (4.37)$$

Colocando (4.34) e (4.35) na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{sf(r)}^m - \mathbf{V}_{sf(r)}^n \\ \mathbf{V}_{sf(i)}^m - \mathbf{V}_{sf(i)}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{I}_{f(r)}^m \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{I}_{f(i)}^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \mathbf{R}_f^{mn} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

determina-se as estimativas da distância e da resistência da falta, em função das estimativas das tensões e correntes no terminal S,

$$\begin{bmatrix} x \\ \mathbf{R}_f^m \end{bmatrix} = \frac{1}{\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{I}_{f(i)}^m - \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{I}_{f(r)}^m} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{f(i)}^m & -\mathbf{I}_{f(r)}^m \\ -\mathbf{B}_2 & \mathbf{B}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{sf(r)}^m - \mathbf{V}_{sf(r)}^n \\ \mathbf{V}_{sf(i)}^m - \mathbf{V}_{sf(i)}^n \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

$$\mathbf{V}_{Sf}^m = x \cdot (z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{nn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + \mathbf{V}_f^m \quad (4.42)$$

$$\mathbf{V}_{Sf}^n = x \cdot (z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{nn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + \mathbf{V}_f^n \quad (4.43)$$

As equações das tensões no local da falta entre as fases m e n , são dadas por:

$$V_f^m = (Z_f^m + Z_f) \cdot I_f^m + Z_f \cdot I_f^n \quad (4.44)$$

$$V_f^n = Z_f \cdot I_f^m + (Z_f^n + Z_f) \cdot I_f^n \quad (4.45)$$

e no ponto p , a corrente da linha pode ser obtido por (3)(4.46)

$$I_{linha} = I_{Sf} - I_{cap} \quad (4.46)$$

Substituindo as equações (3)(4.44) e (3)(4.45) em (3)(4.42) e (3)(4.43), respectivamente e, considerando que as impedâncias de faltas sejam puramente resistivas, obtém-se

$$\mathbf{V}_{Sf}^m = x \cdot (z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{nn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + (R_f^m + R_f) \cdot I_f^m + R_f \cdot I_f^n \quad (4.47)$$

$$\mathbf{V}_{Sf}^n = x \cdot (z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{nn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + R_f \cdot I_f^m + (R_f^n + R_f) \cdot I_f^n \quad (4.48)$$

As equações (3)(4.47) e (3)(4.48) são separadas em suas componentes reais e imaginárias, representadas com r e i , respectivamente. Após algumas manipulações algébricas, chegam-se as equações

$$\begin{aligned} V_{Sf(r)}^m &= x \cdot C_1 + R_f^m \cdot I_{f(r)}^m + R_f \cdot (I_{f(r)}^m + I_{f(r)}^n) \\ V_{Sf(i)}^m &= x \cdot C_2 + R_f^m \cdot I_{f(i)}^m + R_f \cdot (I_{f(i)}^m + I_{f(i)}^n) \\ V_{Sf(r)}^n &= x \cdot C_3 + R_f^n \cdot I_{f(r)}^n + R_f \cdot (I_{f(r)}^m + I_{f(r)}^n) \\ V_{Sf(i)}^n &= x \cdot C_4 + R_f^n \cdot I_{f(i)}^n + R_f \cdot (I_{f(i)}^m + I_{f(i)}^n) \end{aligned} \quad (4.49)$$

em que

$$\begin{aligned}
C_1 &= \sum_{k=m,n} \left(z_{mk(r)} \cdot I_{linha(r)}^k - z_{mk(i)} \cdot I_{linha(i)}^k \right) \\
C_2 &= \sum_{k=m,n} \left(z_{mk(r)} \cdot I_{linha(i)}^k + z_{mk(i)} \cdot I_{linha(r)}^k \right) \\
C_3 &= \sum_{k=m,n} \left(z_{nk(r)} \cdot I_{linha(r)}^k - z_{nk(i)} \cdot I_{linha(i)}^k \right) \\
C_4 &= \sum_{k=m,n} \left(z_{nk(r)} \cdot I_{linha(i)}^k + z_{nk(i)} \cdot I_{linha(r)}^k \right)
\end{aligned} \tag{4.50}$$

O conjunto de equações apresentadas em (3)(4.49) é colocada na forma matricial, conforme demonstra (4.51).

$$\begin{bmatrix} V_{sf(r)}^m \\ V_{sf(i)}^m \\ V_{sf(r)}^n \\ V_{sf(i)}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & I_{f(r)}^m & 0 & I_{f(r)}^m + I_{f(r)}^n \\ C_2 & I_{f(i)}^m & 0 & I_{f(i)}^m + I_{f(i)}^n \\ C_3 & 0 & I_{f(r)}^n & I_{f(r)}^m + I_{f(r)}^n \\ C_4 & 0 & I_{f(i)}^n & I_{f(i)}^m + I_{f(i)}^n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_f^m \\ R_f^n \\ R_f \end{bmatrix} \tag{4.51}$$

Separando as incógnitas da distância e das resistências da falta, conforme visto em (4.52).

$$\begin{bmatrix} x \\ R_f^m \\ R_f^n \\ R_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & I_{f(r)}^m & 0 & I_{f(r)}^m + I_{f(r)}^n \\ C_2 & I_{f(i)}^m & 0 & I_{f(i)}^m + I_{f(i)}^n \\ C_3 & 0 & I_{f(r)}^n & I_{f(r)}^m + I_{f(r)}^n \\ C_4 & 0 & I_{f(i)}^n & I_{f(i)}^m + I_{f(i)}^n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sf(r)}^m \\ V_{sf(i)}^m \\ V_{sf(r)}^n \\ V_{sf(i)}^n \end{bmatrix} \tag{4.52}$$

Da mesma forma como nos casos anteriores, à distância e as resistências de faltas são incógnitas dependentes das correntes de falta e das correntes capacitivas, assim como das tensões e correntes que são medidas na subestação e dos parâmetros de linha.

4.5.4 Equacionamento para Localização de Falta Fase-terra em Circuito Bifásico

Na Figura 4.7 é apresentado um defeito a uma distância x da subestação do tipo fase-terra numa seção de uma linha de distribuição representando um ramal bifásico. Como referência para a realização do equacionamento, estão envolvidas as fases bc .

Analisando o circuito para realizar o equacionamento da estimativa do local da falta para a fase envolvida no defeito, neste caso a fase b , e sendo V_{sf}^b a tensão durante a falta no terminal S da subestação, podendo ser expressa por:

$$\mathbf{V}_{sf}^b = x \cdot (z_{bb} \cdot \mathbf{I}_{linha}^b + z_{bc} \cdot \mathbf{I}_{linha}^c) + \mathbf{V}_f^b \quad (4.53)$$

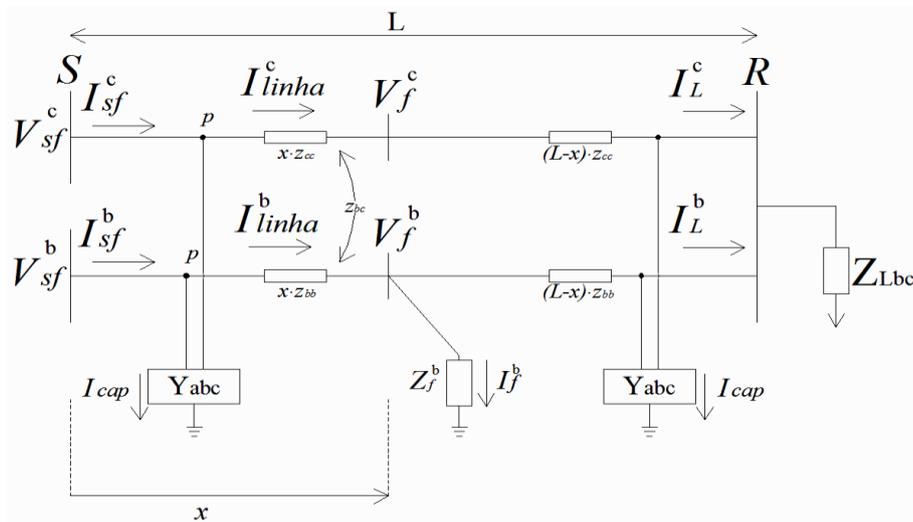


Figura 4.7: Falta Fase-terra (B-t) ramo bifásico

A equação (4.53) pode ser reescrita de forma que possa ser representada a ocorrência de uma falta envolvendo as outras fases presente no circuito, podendo ser uma lateral constituída das fases ab , bc ou ac , pela expressão (4.54):

$$\mathbf{V}_{sf}^m = x \cdot (z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{mn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + \mathbf{V}_f^m \quad (4.54)$$

em que m e n podem representar as fases a , b ou c . As condições de contorno nesta situação de falta são:

$$\mathbf{V}_f^m = \mathbf{Z}_f \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.55)$$

$$\mathbf{I}_{linha}^m = \mathbf{I}_{sf}^m - \mathbf{I}_{cap}^m \quad (4.56)$$

Substituindo (4.55) em (4.54) e assumindo uma impedância de falta \mathbf{Z}_f^m puramente resistiva e constante, obtém-se:

$$\mathbf{V}_{sf}^m = x \cdot (z_{mm} \cdot \mathbf{I}_{linha}^m + z_{mn} \cdot \mathbf{I}_{linha}^n) + \mathbf{R}_f \cdot \mathbf{I}_f^m \quad (4.57)$$

e logo, separando (4.57) em suas componentes reais e imaginárias representadas por r e i , respectivamente, chega-se à expressão (4.58)

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{sf(r)}^m &= x \cdot D_1 + \mathbf{R}_f^m \cdot \mathbf{I}_{f(r)}^m \\ \mathbf{V}_{sf(i)}^m &= x \cdot D_2 + \mathbf{R}_f^m \cdot \mathbf{I}_{f(i)}^m \end{aligned} \quad (4.58)$$

em que as variáveis D_1 e D_2 são

$$\begin{aligned}
D_1 &= z_{mm(r)} \cdot I_{linha(r)}^m - z_{mm(i)} \cdot I_{linha(i)}^m + z_{mn(r)} \cdot I_{linha(r)}^n - z_{mn(i)} \cdot I_{linha(i)}^n \\
D_2 &= z_{mm(r)} \cdot I_{linha(i)}^m + z_{mm(i)} \cdot I_{linha(r)}^m + z_{mn(r)} \cdot I_{linha(i)}^n + z_{mn(i)} \cdot I_{linha(r)}^n
\end{aligned} \tag{4.59}$$

Colocando na forma matricial o conjunto de expressões em (4.58), obtém-se

$$\begin{bmatrix} V_{sf(r)}^m \\ V_{sf(i)}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 & I_{f(r)}^m \\ D_2 & I_{f(i)}^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_f^m \end{bmatrix} \tag{4.60}$$

e separando as incógnitas da distância da falta e da resistência da falta em função das estimativas das tensões e correntes no terminal S tem-se

$$\begin{bmatrix} x \\ R_f^m \end{bmatrix} = \frac{1}{D_1 \cdot I_{f(i)}^m - D_2 \cdot I_{f(r)}^m} \cdot \begin{bmatrix} I_{f(i)}^m & -I_{f(r)}^m \\ -D_2 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sf(r)}^m \\ V_{sf(i)}^m \end{bmatrix} \tag{4.61}$$

e a equação (4.61) pode ser separada em duas equações independentes, apresentadas em (4.62) e (4.63), obtendo as estimativas da distância da falta e da resistência da falta, respectivamente:

$$x = \frac{V_{sf(r)}^m \cdot I_{f(i)}^m - V_{sf(i)}^m \cdot I_{f(r)}^m}{D_1 \cdot I_{f(i)}^m - D_2 \cdot I_{f(r)}^m} \tag{4.62}$$

$$R_f^m = \frac{V_{sf(i)}^m \cdot D_1 - V_{sf(r)}^m \cdot D_2}{D_1 \cdot I_{f(i)}^m - D_2 \cdot I_{f(r)}^m} \tag{4.63}$$

As equações apresentadas são extensões necessárias para a utilização da metodologia apresentada em (FILOMENA et al. 2009) para sistemas de distribuição rurais, onde a presença de laterais/ramais bifásicos e monofásicos nas construções são comuns.

Na Figura 4.8 apresenta-se o diagrama de bloco da metodologia proposta que compõe o algoritmo para a localização do local da falta e da resistência de falta.

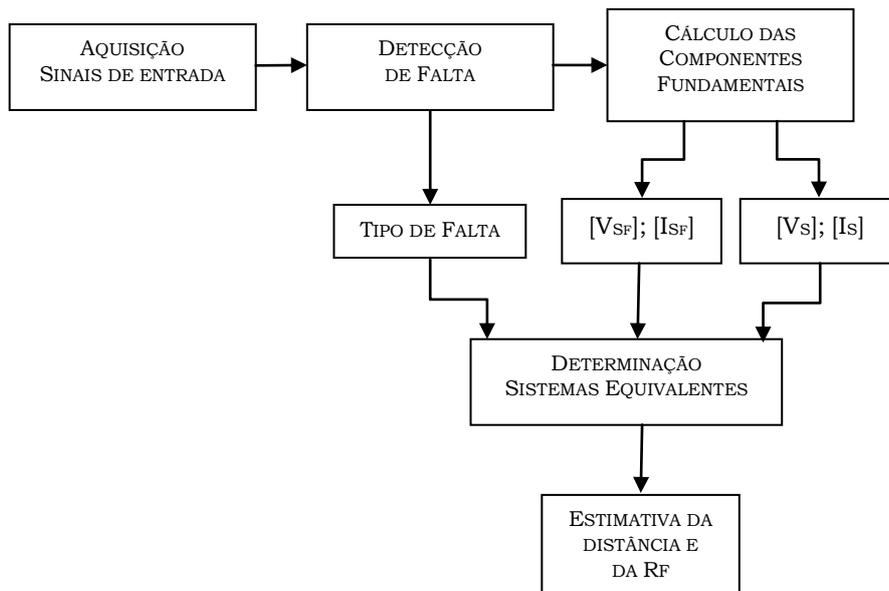


Figura 4.8: Diagrama de bloco do algoritmo proposto

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta para a estimativa da distância da falta bem como da resistência de falta. As faltas em questão, às quais estão sujeitas os sistemas de distribuição de energia elétrica, variam desde faltas sólidas, ou seja, faltas com valor de resistência nula, até faltas com altos valores de resistência. Como apresentado no Capítulo 3, às faltas de alta impedância são consideradas presentes no estudo desta proposta, as quais em lugar da utilização de resistência de valor constante para simular valores elevados, é utilizado um modelo específico para a representação das FAI.

No próximo capítulo será apresentado um estudo de caso e as análises da influência das FAI na metodologia proposta de LF.

5 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo será apresentado o sistema teste utilizado para o estudo de caso. O estudo de caso objetiva determinar a influência das FAI no método proposto em (FILOMENA, 2008), o qual foi estendido para sistemas rurais.

5.2 ESTUDO DE CASO

O sistema elétrico simulado foi construído contendo seis seções. O alimentador foi adaptado para ser constituído por linhas aéreas de distribuição e laterais. O alimentador possui um comprimento total de 3,085 km, sendo 4 seções pertencentes ao alimentador principal e duas ramificações laterais, uma lateral trifásica de 0,245 km, e outra lateral monofásica de 0,2 km. Para a modelagem do alimentador é utilizado o modelo de linha π , considerando as características próprias dos sistemas de distribuição com o espaçamento assimétrico entre os condutores das fases e não transposição das linhas. A aquisição dos dados e validação da extensão da metodologia foram realizadas no *software* ATP/EMTP (BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007). O ATP/EMTP é um software utilizado para realizar simulações digitais e estudos de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética e eletromecânica. A construção numérica do algoritmo da metodologia estendida foi implementada no *software* MatLab (MATLAB, 2009).

5.3 SISTEMA TESTE

Na Figura 5.1 apresenta-se o diagrama unifilar do alimentador utilizado para a realização dos testes.

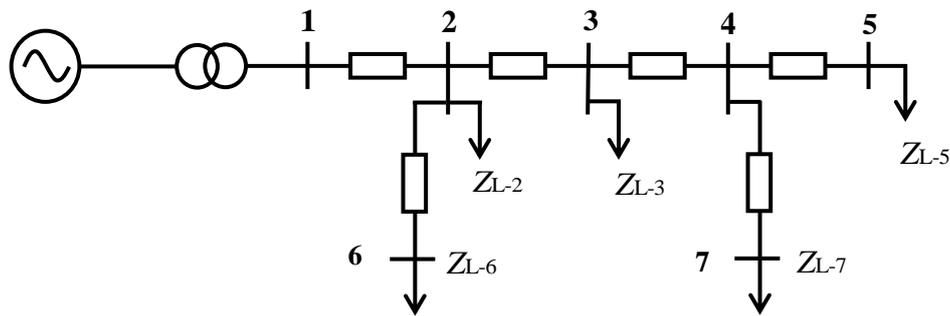


Figura 5.1: Diagrama Unifilar do alimentador para teste

Como pode ser observado na Figura 5.1, o alimentador principal é composto pelas barras 1, 2, 3, 4, 5; e derivações laterais que partem da barra 2 e 4. A ramificação lateral que deriva da barra 2 possui uma topologia trifásica enquanto que a ramificação que se origina da barra 4 possui uma configuração monofásica. Sendo assim, ter-se-ão três sistemas equivalentes que consistem os circuitos a serem analisados para a localização das faltas.

A seguir, nas Tabela 5.1 e Tabela 5.3 são apresentadas algumas características do sistema teste. Outros detalhes do sistema são mostrados no APÊNDICE A . Na Tabela 5.1 é apresentado o comprimento de cada seção do sistema assim como as sub-seções, e na Tabela 5.2 as distâncias onde foram aplicadas as faltas.

São considerados como seções os segmentos das linhas de distribuição entre cada barra do sistema. Para as simulações das faltas foi preciso dividir cada seção em sub-seções do forma que as faltas pudessem ser aplicadas ao longo da linha.

Tabela 5.1: Dados do comprimento das seções e sub-seções do alimentador

Barra	Barra	Número de sub-seções	Comprimento de cada sub-seção (m)	Comprimento da Seção (m)
1	2	10	168	1680
2	3	10	75	750
3	4	5	59	295
4	5	5	72	360
2	6	5	40	200
4	7	5	49	245
Pontos de faltas aplicada		40	Comprimento total	3085

Para as simulações das faltas, cada uma das 6 seções utilizadas foram divididas em sub-seções de comprimento menores como as apresentadas na Tabela 5.2. Como pode ser observado, nas seções 1 e 2 foram aplicadas faltas em 10 pontos e nas seguintes seções, 5 pontos de faltas foram aplicadas em cada uma das seções, devido ao comprimento menor. As distâncias apresentadas estão dadas em metros [m], tomando como ponto de início a subestação onde são feitas as medições.

Tabela 5.2: Distâncias das faltas aplicadas [m]

Seção 1	Seção 2	Seção 3	Seção 4	Seção 5	Seção 6
168	1755	2489	2797	1720	2774
336	1830	2548	2869	1760	2823
504	1905	2607	2941	1800	2872
672	1980	2666	3013	1840	2921
840	2055	2725	3085	1880	2970
1008	2130				
1176	2205				
1344	2280				
1512	2355				
1680	2430				

Na Tabela 5.3 é apresentada as cargas conectadas ao longo do sistema. As cargas utilizadas no estudo foram consideradas como impedâncias constantes conectadas em Y com neutro solidamente aterrado. Uma carga monofásica é alimentada pela ramificação conectada à fase *a* do alimentador principal.

Tabela 5.3: Cargas do alimentador

Sigla da carga	Potência das Cargas (kW + jKVAR)		
	Fase a	Fase b	Fase c
ZL2	94,301 + j 19,152	94,301 + j 19,152	94,301 + j 19,152
ZL3	125,725 + j 25,528	113,151 + j 22,975	102,87 + j20,886
ZL5	104,78 + j 21,18	94,301 + j 19,152	85,758 + j 17,411
ZL6	471,45 + j 95,894	471,45 + j 95,894	471,45 + j 95,894
ZL7	314,316 + j 63,884	0	0

5.4 CONDIÇÕES DE TESTES

Foram aplicadas faltas em diferentes pontos do sistema. Utilizaram-se valores distintos para as faltas modeladas por meio de resistências constantes, para a comprovação do desempenho do algoritmo. Para as simulações das FAI utilizou-se o modelo descrito no Capítulo 3 desenvolvido por (Emanuel et al. 1990), com o

objetivo de considerar as características próprias deste tipo de falta descrito no mesmo capítulo.

A seguir serão apresentadas as diferentes condições do sistema para os casos simulados, as quais são:

- 4 tipos de faltas: A-g, B-g, C-g e ABC-g;
- 40 pontos de faltas ao longo do alimentador principal e laterais;
- 4 impedâncias de faltas: $R_f = 0 \Omega$, $R_f = 10 \Omega$, $R_f = 20 \Omega$, $R_f = 50 \Omega$, e FAI;
- 3 condições diferentes de carregamento;
- 3 ângulos de incidência de falta: 0° , 45° e 90° .

O ângulo de incidência de falta refere-se ao instante em que ocorre o defeito. Para todos os estudo de caso foi adotado como referência angular a tensão da fase *a*. Ainda, destaca-se que na lateral monofásica entre as barras 4 e 7 foram aplicadas faltas do tipo fase *a*-terra. Na Tabela 5.4 são definidas as 3 condições de operação utilizadas no estudo de caso.

Tabela 5.4: Condições do sistema para estudo de caso

Condição 1			
Ângulo de incidência da falta:	0°	45°	90°
Carregamento do sistema:	Conforme Tabela 5.3		
Condição 2			
Ângulo de incidência da falta:	90°		
Carregamento do sistema:	Diminuição das cargas em 20%		
Condição 3			
Ângulo de incidência da falta:	90°		
Carregamento do sistema:	Aumento das cargas em 20%		

A seguir serão apresentadas as análises dos resultados obtidos do estudo de caso.

5.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção serão expostos os resultados obtidos do estudo de caso. Analisar-se-á, entre outros, a estimativa da distância de falta pela metodologia quando da ocorrência de uma falta de alta impedância. Como foi apresentado no Capítulo 3, este

tipo de falta gera baixa corrente de falta, muitas vezes difíceis de serem detectados pela proteção convencional do sistema.

O erro percentual da distância estimada da falta é calculado em função do comprimento total do alimentador por (5.1), sugerido em (ZIMMERMAN; COSTELLO, 2006):

$$erro [\%] = \left[\frac{x_{real} [m] - x_{estimada} [m]}{L_{total-equivalente} [m]} \right] \cdot 100 \quad (5.1)$$

onde

x_{real}	Constitui a distância real da falta (m) em relação ao ponto de medição (subestação);
$x_{estimada}$	Constitui a distância calculada da falta (m) em relação ao ponto de medição (subestação);
$L_{total-equivalente}$	Comprimento total do alimentador.

5.6 RESULTADOS OBTIDOS

5.6.1 Influência do ângulo de incidência da falta

Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados obtidos nas simulações referentes à condição 1 para faltas fase-terra de acordo ao mostrado na Tabela 5.4.

Conforme pode ser observado, na simulação das faltas com a utilização de resistências constantes, os erros obtidos são de valores reduzidos, mas a variação do ângulo em que ocorre uma falta faz com que se obtenham estimativas diferentes da distância de faltas. A referência angular do ângulo é a tensão da fase a . O erro máximo obtido da aplicação de faltas nos 40 pontos de faltas foi de 1,98% para um ângulo de incidência de falta de 45° na fase a para uma resistência de valor de 50Ω .

No caso da FAI os erros obtidos foram de valores muito elevados, estimando distancias muito além dos locais reais de ocorrência da falta. Mesmo com ângulos de incidências diferentes, as porcentagens dos erros mantiveram-se muito elevadas e sem uma grande variação nos valores, sendo o erro médio maior obtido de 75,15% para uma falta na fase a .

Tabela 5.5: Influência do ângulo de incidência da falta – Falta Fase-terra

Tipo de Falta	R_F [Ω]	Erro médio [%]			Erro máximo [%]		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
A-g	0	0,24	0,22	0,20	0,50	0,48	0,49
	10	0,25	0,23	0,25	0,63	0,66	0,67
	20	0,25	0,22	0,24	0,53	0,64	0,65
	50	0,41	0,43	0,42	1,86	1,98	1,86
	FAI	69,50	71,95	75,15	84,65	87,63	87,05
B-g	0	0,06	0,08	0,07	0,11	0,14	0,16
	10	0,07	0,07	0,07	0,16	0,17	0,18
	20	0,07	0,08	0,09	0,11	0,16	0,25
	50	0,48	0,46	0,52	1,18	1,75	1,89
	FAI	68,46	66,20	74,01	86,48	83,48	84,30
C-g	0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,10	0,15
	10	0,05	0,05	0,11	0,09	0,09	0,17
	20	0,06	0,06	0,13	0,14	0,14	0,15
	50	0,37	0,41	0,43	1,17	1,56	1,78
	FAI	68,28	67,04	67,98	86,45	82,75	86,08

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para faltas trifásica-terra. Da mesma forma, foram variados os ângulos de incidências das faltas aplicando faltas com resistências constantes e FAI.

Neste caso observou-se que os erros obtidos para faltas com resistência constante apresentam erros com valores acima daqueles obtidos para faltas fase-terra. Mesmo assim, podem se obter estimativas razoáveis da distância do local da falta. O erro máximo dos 40 pontos de faltas simulados resultante foi de 4,05%, para um valor de falta elevado de 50 Ω .

Tabela 5.6: Influência do ângulo de incidência da falta – Faltas Trifásica-terra

Tipo de Falta	R_F [Ω]	Erro médio [%]			Erro máximo [%]		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
ABC-g	0	1,35	1,28	1,42	2,18	2,22	2,28
	10	1,42	1,36	1,38	2,16	2,37	2,42
	20	1,57	1,53	1,55	2,56	2,68	2,62
	50	1,68	1,72	1,78	3,72	3,54	4,05
	FAI	79,31	78,67	78,15	88,63	89,34	90,42

A estimativa da distância da falta de alta impedância resulta em erros muito elevados.

Nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são mostrados a curva dos erros para faltas fase-terra utilizando modelo de resistência constante. Estas curvas de *erro x distância* foram obtidas considerando um ângulo de incidência de falta de 90° e com carregamento nominal como mostrado na Tabela 5.3. Os valores dos erros encontrados para este tipo de defeito são pouco influenciados pela distância da falta. À medida que aumenta a distância aplicada da falta com respeito à subestação, tem-se um pequeno aumento do erro. Este aumento é incrementado para faltas com maiores R_f .

Na Figura 5.2 mostram-se curvas de erro para faltas monofásica entre a fase *a* e terra com valores diferentes de resistências.

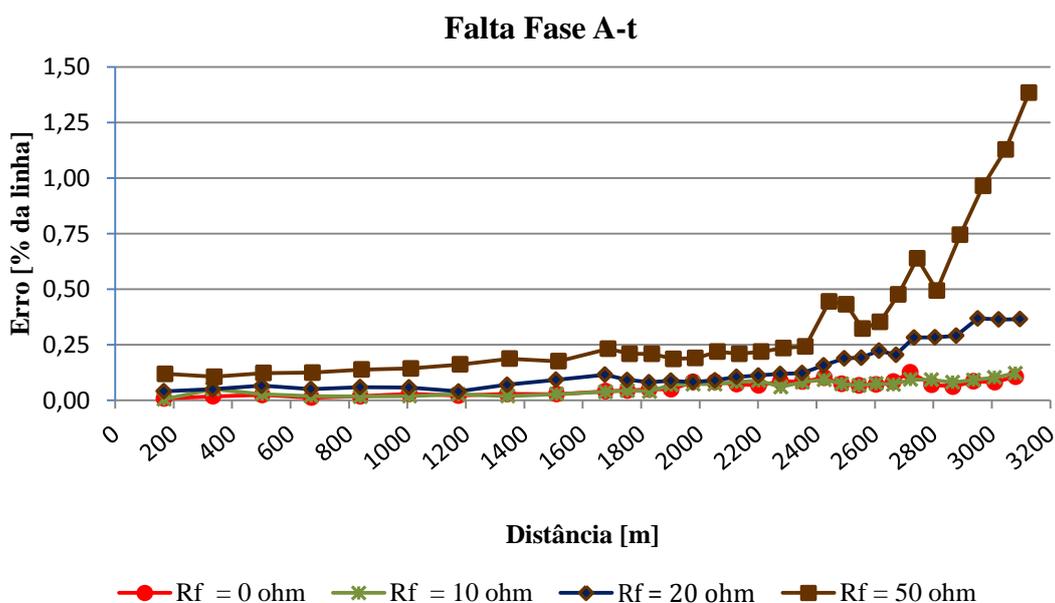


Figura 5.2: Curva do resultado para falta A-t

Na Figura 5.3 mostram-se curvas de erro para faltas monofásica entre a fase *b* e terra com valores diferentes de resistências.

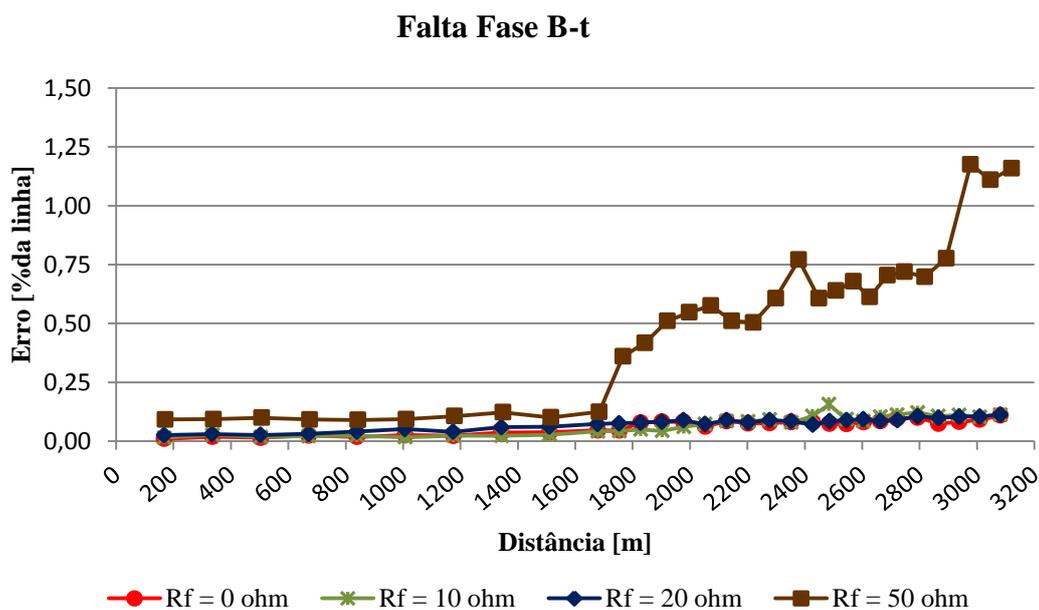


Figura 5.3: Curva do resultado para falta B-t

Na Figura 5.4 são apresentadas curvas de erro para faltas monofásica entre a fase *c* e terra.

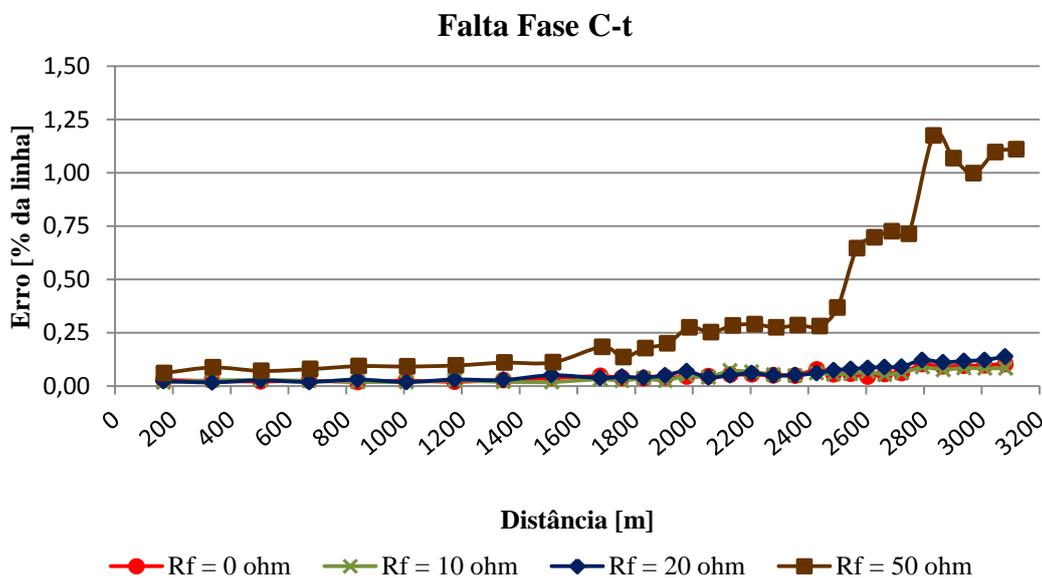


Figura 5.4: Curva do resultado para falta C-t

Nas seguintes figuras são apresentadas as curvas dos erros obtidas da análise da influência da FAI na metodologia. Em ambos os casos, as análises foram realizados sob carregamento nominal do sistema, com um ângulo de incidência de falta de 90° . Na Figura 5.5 estão mostradas as curvas para faltas do tipo monofásico, os quais mostram um comportamento similar. Como se pode notar, o erro obtido

aumenta com a distância da falta. Para uma falta simulada a uma distância de 168 metros distante da subestação, o erro encontrado foi de 53,41%. Na Figura 5.6 é mostrada a curva de erro para uma falta trifásica aplicada ao longo do alimentador. Analisando os erros obtidos, a localização de FAI por meio desta metodologia se torna inviável.

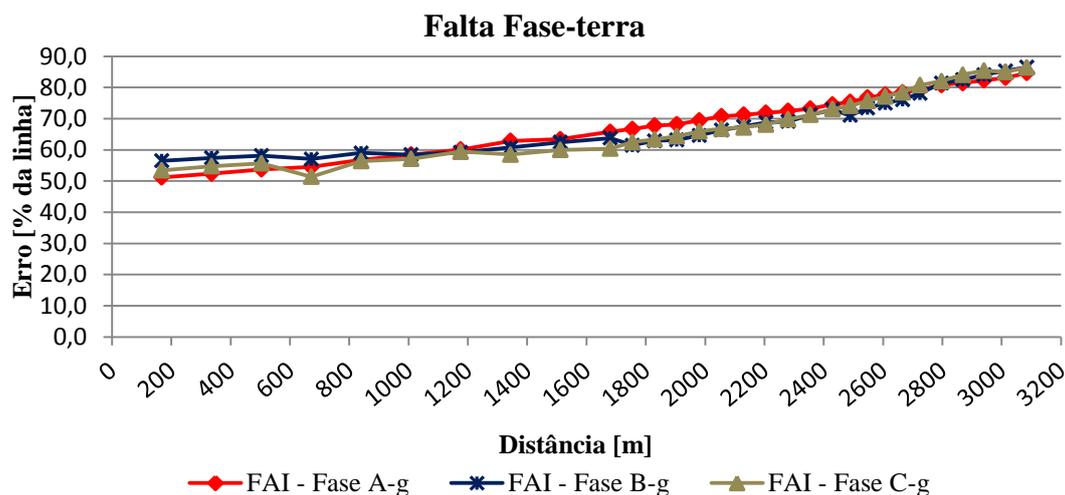


Figura 5.5: Curva do resultado para faltas fase-terra para FAI

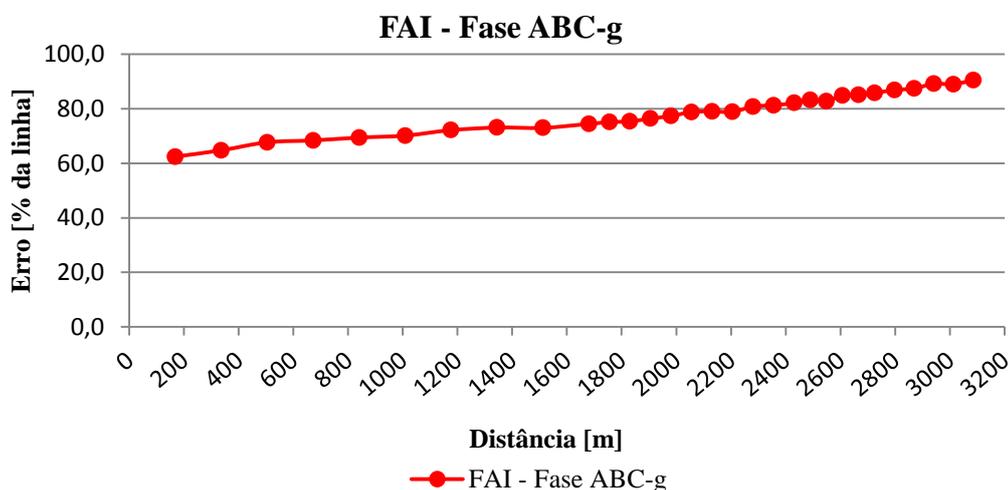


Figura 5.6: Curva do resultado para falta Trifásica-terra para FAI

5.6.2 Influência da Lateral Monofásica

Visando analisar o comportamento da extensão realizada na metodologia na presença da lateral monofásica, na continuação são apresentadas as curvas dos erros obtidos da falta fase *a*-terra. As faltas foram aplicadas com o carregamento nominal

do sistema, e variou-se o valor da resistência mantendo constante o ângulo de incidência de falta em 90° .

As curvas apresentadas são uma comparação entre faltas aplicadas no alimentador principal e na lateral a partir da barra à qual está presente a ramificação.

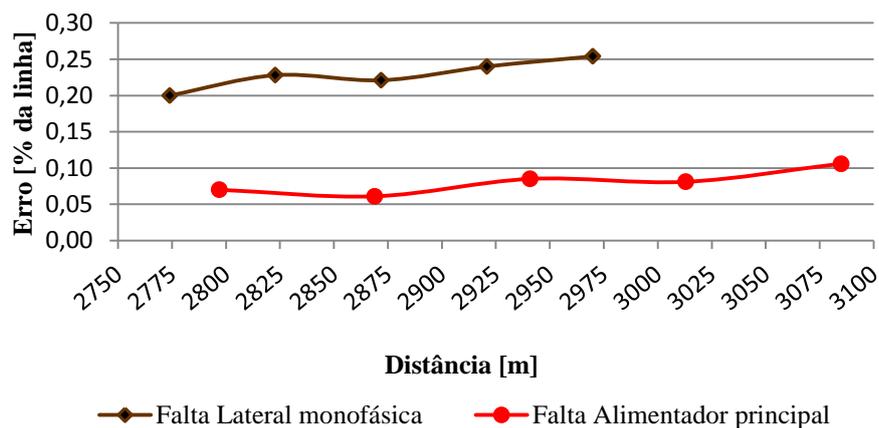


Figura 5.7: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 0Ω

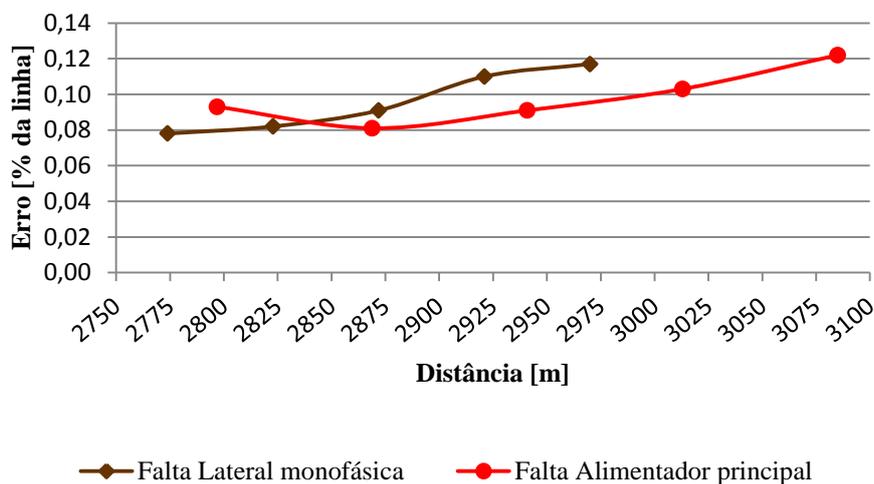


Figura 5.8: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 10Ω

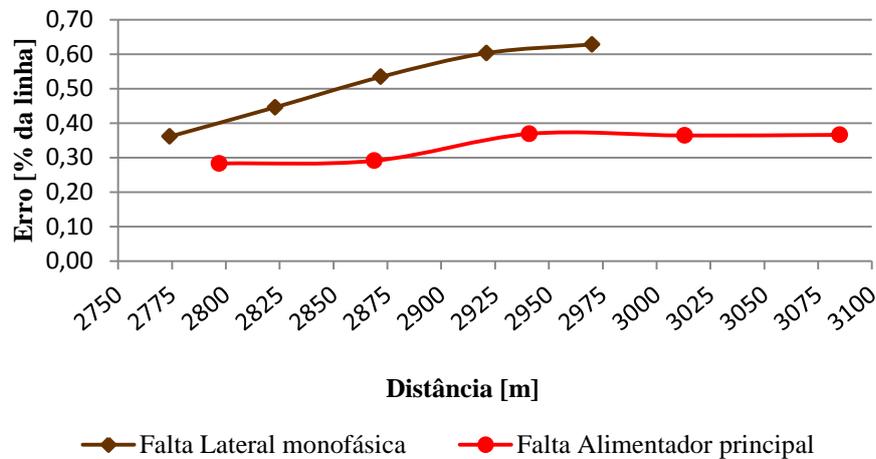


Figura 5.9: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 20 Ω

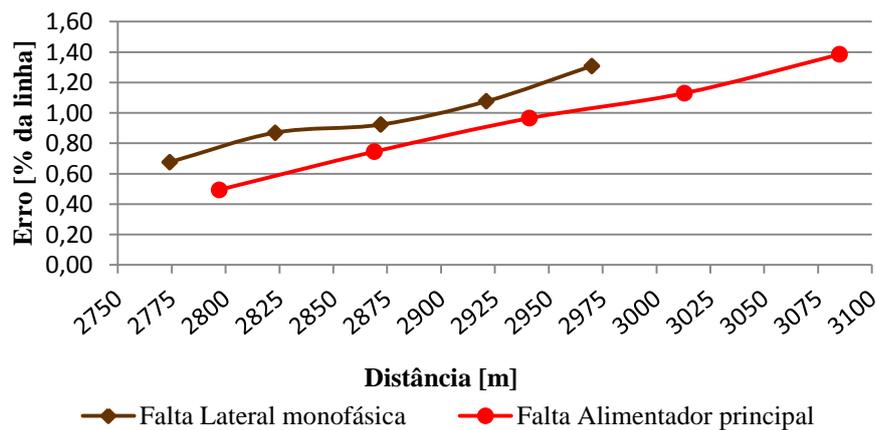


Figura 5.10: Falta Fase A-terra na lateral monofásica – 50 Ω

Como se pode observar nos casos simulados, os erros obtidos para faltas na lateral monofásica apresentam erros levemente maiores em comparação das faltas aplicadas no alimentador principal. Os erros maiores devem-se talvez à obtenção do equivalente da lateral. Além disso, deve-se levar em conta que o tipo de condutor empregado nessa lateral é diferente aos demais condutores do sistema. Mesmo assim, a ordem de grandeza dos erros obtidos é baixo o que permite obter uma adequada estimativa da distância da falta.

5.6.3 Influência da variação do carregamento

A seguir serão apresentados os erros obtidos nas simulações quando as condições do carregamento foram variadas. Estas variações, conforme mostra a

Tabela 5.4, consistem na redução e no aumento das cargas em um 20% referente ao carregamento nominal do sistema como apresentado na Tabela 5.3.

5.6.3.1 Condição de carregamento 2

Na Tabela 5.7 são apresentados os erros das estimativas da distância da falta para falta fase-terra e ângulo de incidência de 90°. A redução da condição de carregamento produziu leve incremento nos erros obtidos das simulações para faltas com resistência constante. Mesmo assim, o algoritmo não se vê fortemente influenciado pela redução no carregamento.

Tabela 5.7: Condição 2 do carregamento – Falta Fase-terra

Tipo de Falta	R_F [Ω]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]
A-g	0	0,24	0,49
	10	0,23	0,72
	20	0,34	0,61
	50	0,87	2,31
	FAI	84,34	98,74
B-g	0	0,21	0,38
	10	0,18	0,41
	20	0,29	0,48
	50	0,96	2,46
	FAI	81,45	110,30
C-g	0	0,12	0,16
	10	0,14	0,14
	20	0,15	0,18
	50	0,43	2,68
	FAI	83,71	105,78

No entanto, nesta condição de carregamento, as FAI têm uma influência ainda maior no método de localização de falta. Encontram-se erros da ordem de 110,3%.

Na Tabela 5.8 são apresentados os erros obtidos para uma simulação de falta trifásica. Quando são aplicadas faltas por meio de resistências constantes, os erros obtidos aumentam comparando com os erros apresentados na Tabela 5.6 com carregamento nominal. O erro máximo encontrado foi de 7,84% para uma falta com valor de 50 Ω.

Tabela 5.8: Condição 2 do carregamento – Falta Trifásica-terra

Tipo de Falta	R_F [Ω]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]
ABC-g	0	1,52	2,28
	10	1,48	3,32
	20	1,84	5,19
	50	2,23	7,84
	FAI	NC	NC

Para uma FAI, o algoritmo não teve convergência. Isto pode ser devido às condições do sistema, dada a redução do carregamento e do modelo da FAI que é utilizado nas simulações.

5.6.3.2 Condição de carregamento 3

Os resultados dos erros referentes à estimativa da distância do local da falta fase-terra e trifásica-terra são apresentados na Tabela 5.9 e Tabela 5.10, respectivamente. Aplicou-se a condição de carregamento 3 como mostrado na Tabela 5.4. Os erros médios e máximos foram calculados para todos os 40 pontos de falta distribuídos no alimentador e laterais. Foi variada a resistência de falta e aplicado igualmente FAI para cada um dos locais de falta.

Tabela 5.9: Condição 3 do carregamento – Falta Fase-terra

Tipo de Falta	R_F [Ω]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]
A-g	0	0,20	0,49
	10	0,25	0,67
	20	0,24	0,65
	50	0,42	1,86
	FAI	72,46	87,34
B-g	0	0,17	0,26
	10	0,17	0,38
	20	0,49	0,72
	50	1,52	2,89
	FAI	71,31	86,43
C-g	0	0,19	0,27
	10	0,27	0,36
	20	0,48	0,77
	50	1,53	3,58
	FAI	74,61	85,76

Mesmo com o aumento do 20% no carregamento do sistema, a estimativa da distância da falta do método não foi influenciada. Obtiveram-se erros máximos com valores de 3,58% para uma falta fase-terra de 50 Ω na fase *c* e de 5,55% para uma falta trifásica-terra com mesmo valor de resistência da falta fase-terra.

Tabela 5.10: Condição 3 do carregamento – Falta Trifásica-terra

Tipo de Falta	R_F [Ω]	Erro médio [%]	Erro máximo [%]
ABC-g	0	1,42	2,28
	10	1,68	2,42
	20	2,55	2,62
	50	4,78	5,55
	FAI	84,1	87,46

Considerando as características das FAI, os erros obtidos para os tipos de faltas mostrados nas tabelas acima, apresentam valores muito elevados demonstrando também nesta condição de carregamento que as FAI influenciam fortemente a metodologia impossibilitando a localização das mesmas.

5.7 ANÁLISE GERAL DA INFLUÊNCIA DA FAI NA METODOLOGIA

De acordo com os resultados obtidos nas diferentes simulações com variações do carregamento do sistema, ângulo de incidência da falta e valores de resistências de falta, o método consegue uma boa estimativa da distância do local do defeito. A influência que a FAI provoca na metodologia de localização baseada na impedância aparente, demonstrou que a metodologia em questão não é adequada para a localização de faltas de alta impedância, dada as características próprias da mesma.

O algoritmo comporta-se de maneira eficiente perante as faltas modeladas por meio de resistências constantes, inclusive para a estimação da distância da falta em uma seção com configuração monofásica.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo realizar a extensão da metodologia proposta em (FILOMENA, 2008) para sistemas de distribuição rurais. Nos SDEE urbanos, o alimentador principal e os ramais são trifásicos. Em região rural, o alimentador principal é trifásico das quais se derivam ramais com uma, duas ou três fases (GIRGIS; FALLON; LUBKEMAN, 1993) com comprimento de vários quilômetros de extensão, tornando a análise destes sistemas mais complexo.

Simularam-se faltas monofásicas e trifásicas ao longo do alimentador principal e laterais. As faltas foram simuladas por meio de 4 resistências de valor constante e faltas do tipo de alta impedância, que possui modelo próprio.

O algoritmo foi testado em um alimentador de distribuição composto de 6 seções aéreas sendo duas destas seções pertencentes às ramificações trifásica e monofásica. Uma ramificação monofásica foi utilizada com o objetivo de simular a situação de uma zona rural. Considerou-se como condição de carregamento nominal do sistema cargas equilibradas quanto desequilibradas. Com a presença de uma carga monofásica, variou-se o carregamento do sistema em duas condições, isto é $\pm 20\%$ para analisar o comportamento do algoritmo.

Os resultados obtidos para a localização de faltas com valores de resistência constante, perante as variações realizadas nas simulações apresentaram resultados promissores para a determinação da distância da ocorrência do defeito, sejam estas faltas localizadas no alimentador principal ou nas laterais presentes. Os erros encontrados das simulações no caso do carregamento nominal não ultrapassaram 2% do comprimento da linha demonstrando um desempenho eficiente, conforme já comprovado em estudos anteriores.

Com respeito às faltas monofásicas aplicadas na lateral, percebe-se também erros de valores baixos menores que 2%. Compararam-se as faltas na lateral monofásica com as faltas monofásicas na seção final do alimentador, resultando em estimativas de locais mais precisas destas últimas mesmo com o aumento da resistência de falta.

O comportamento do algoritmo para os casos das faltas de alta impedância simuladas com o modelo apresentado no Capítulo 3 apresentou erros muito elevados na faixa entre 70 e 110%. O caso de erro mais extremo ocorreu para uma falta monofásica na fase *b* do sistema com valor de 110,30% na condição em que as cargas foram reduzidas. Ainda, em alguns casos testados, o algoritmo proposto não convergiu. Verifica-se desta forma, que a localização de FAI se torna inviável utilizando o algoritmo proposto devido aos erros obtidos.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

O tópico da localização de defeitos em sistemas de distribuição de energia elétrica tem uma relevante importância para as distribuidoras de energia elétrica no que concerne à continuidade e qualidade da energia assim como à segurança para a população. Dada as diferentes configurações e particularidades dos sistemas de distribuição, propõem-se os seguintes assuntos para dar continuidade a este trabalho e aprimorar o desempenho da metodologia de LF:

- Validação da extensão da metodologia utilizando dados de faltas reais;
- Avaliação do comportamento da extensão da metodologia para sistemas de distribuição reais ou com maior grau de complexidade visando à representação mais exata de um SDEE;
- Extensão da metodologia para a inclusão da geração distribuída, levando em conta o alto interesse deste tipo de geração conectada às redes de distribuição;
- Aplicação de falta de alta impedância utilizando outros modelos propostos na literatura para este tipo de falta de forma a avaliar o desempenho da extensão da metodologia;
- Extensão da metodologia para a detecção das faltas de alta impedância;
- Inclusão de um algoritmo para a eliminação das múltiplas estimativas do local da falta e identificar a seção da linha sob defeito.

REFERÊNCIAS

- BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transients Program: ATP/EMTP**. Portland, 2007. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2010.
- DARWISH, H. A.; ELKALASHY, N. I. Universal Arc Representation Using EMTP. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v.20, n.2, p.772–779, Apr. 2005.
- DAS, R; BAYOUMI, D., System for Detection of High Impedance Fault. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 19., 2007, Vienna. **Proceedings...** Vienna: [S.n.], 2007, p.1-4.
- EMANUEL, A. E. et al. High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15 kV Distribution Feeders: contribution to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v.5, n.2, p.676-686, Apr. 1990.
- ELKALASHY, N. I. et al. Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation**, Piscataway, v.14, n.2, p.375-383, Apr. 2007.
- 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.
- FILOMENA, A. D. et al. Fault Location for Underground Distribution Feeders: an extended impedance-based formulation with capacitive current compensation. **Electrical Power and Energy Systems**, [S.l.], p.489-496, Mar. 2009.
- GIRGS, A. A.; FALLON, C. M.; LUBKEMAN, D. L. A Fault Location Technique for Rural Distribution Feeders. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v.20, n.6, p.1170–1175, Nov.-Dez. 1993.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. JR. **Análisis de Sistemas de Potencia**. México D.F: McGraw-Hill, 1996. 740 p. ISBN 970-10-0908-8.
- JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground Resistance : revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.4, n.2, p.949–956, Apr. 1989.

JEERING, D. I.; LINDERS, J. R. Unique Aspects of Distribution System Harmonics Due to High Impedance Ground Faults. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.5, n.2, p.1086–1094, Apr. 1990.

KERSTING, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2007. 421 p. ISBN: 0-8493-5806-X.

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.

KIZILCAY, M.; PNIOK, T. Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems. **Europe Transaction on Electrical Power**, [S.l.:S.n.], v.1, n.1, p.55–60, Jan.-Feb. 1991.

LEE, S.-J. et al. An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, 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: ASIA PACIFIC, 2002, Yokohama. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002. v.4, p.1733-1737.

MATLAB. **The language of technical computing**. [S.l.]: The Mathworks, R2009a.

MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais**. 2005. 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NAGPAL, M.; XU, W.; SAWADA, J. Harmonic Impedance Measurement Using Three-Phase Transient. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v.13, n.1, p.272–277, Jan. 1998.

NAKAGOMI, R. M. et al. Modelagem e Simulação de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, 8., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [S.n.], 2005. [6 p.].

NAM, S. R. et al. A Modeling Method of a High Impedance Fault in a Distribution System Using Two Series Time-Varying Resistances in EMTP. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, [S.l.]. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001. v.2, p.1175–1180.

NASCIMENTO, J. C. **Modelagem de redes aéreas com retorno por terra em sistemas de distribuição de energia elétrica para análises de faltas de alta impedância**. 2006. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2006.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**. Baldock: Research Studies Press, 1988. 289 p.

SAADAT, H. **Power System Analysis**. Boston: McGraw-Hill, 2002, 712 p. ISBN 0-07-284796-4.

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

SALIM, R. H. et al. Further Improvements on Impedance-Based Fault Location for Power Distribution Systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**. [S.l.], v.5, n.4, p.467–478, Sept. 2010.

SANKARAN, C. **Power Quality**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 202 p. ISBN 0-8493-1040-7.

SHORT, T. A., **Electric Power Distribution Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 761 p. ISBN 0-8493-1791-6.

SILVA, P. R. **Técnica Alternativa para Detecção de Faltas de Alta Impedância**. 1992. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1992.

SULTAN, A. F.; SWIFT, G. W.; FEDIRCHUK, D. J. Detecting Arcing Downed-Wires Using Fault Current Flicker and Half-Cycle Asymmetry. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v.9, n.1, p.461–470, Jan. 1994.

TENGDIN, J. et al. High Impedance Fault Detection Technology. In: REPORT OF PSRC WORKING GROUP D15. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/d/D15MSW60.html>>. Acesso em: 10 set. 2011.

UBIRAJARA, J. N. N. **Localização de Faltas em Alimentadores Primários de Distribuição de Energia com a Presença da Geração Distribuída**. 2010. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

URIARTE, F. B. **Modeling, Detection, and Localization of High-Impedance Faults In Low-Voltage Distribution Feeders**. 2003. 70 p. Dissertação (Master of Science in Electrical Engineering) – Faculty of the Virginia Tech Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2003.

VICO, J. et al. High Impedance Fault Detection on Rural Electric Distribution Systems. In: CONFERENCE PAPERS, 2010, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.:S.n.], 2010. p.B3-1–B3-8.

WESTER, C. G. High Impedance Fault Detection on Distribution Systems. In: RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE, 1998, St. Louis **Proceedings...** [S.l.:S.n.], 1998. p.c5-1 – c5-5.

ZHU, J.; LUBKEMAN, D. L.; GIRGIS, A. Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders. **IEEE transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.12, n.2, p.801–809, Apr. 1997.

ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. Impedance-Based Fault Location Experience. In: IEEE RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE, 2006, Albuquerque. **Proceedings...** [S.l.:S.n.], 2003. p.1–16.

APÊNDICE A SISTEMA TESTE

A.1 DADOS DO SISTEMA IMPLEMENTADO

As estruturas dos postes utilizados para o sistema de distribuição aéreo, assim como as configurações ID-500, e ID-510 (KERSTING, 2001) para a representação das topologias trifásica e monofásica respectivamente são mostradas na Figura A.1:

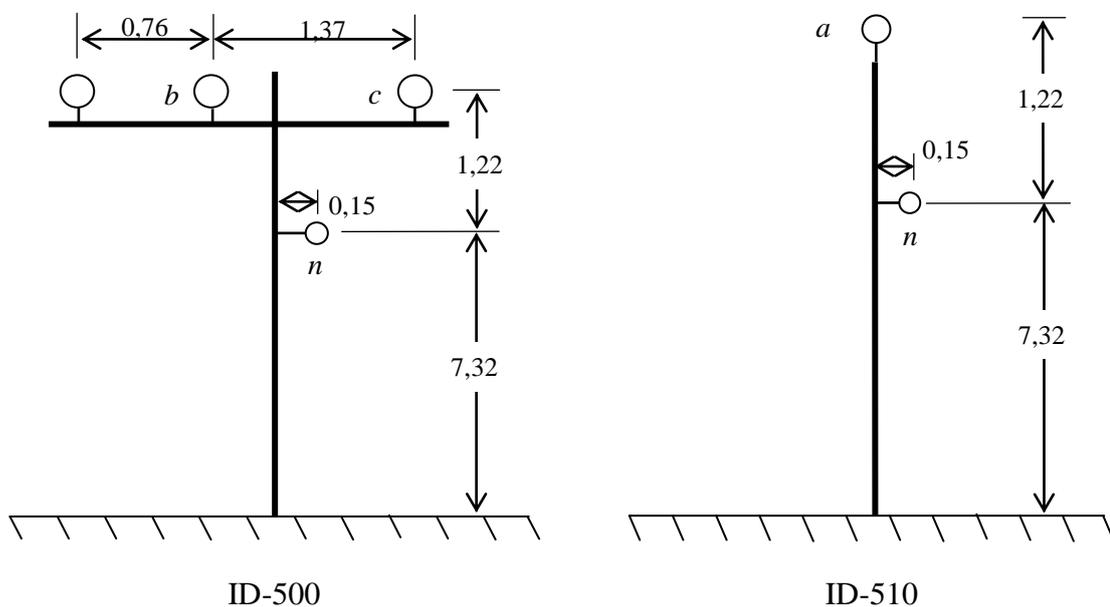


Figura A.1 Configuração das estruturas, espaçamento em [m]

Na Tabela A.1 se especifica a numeração das barras do sistema, comprimento de cada seção, tipo de condutor e o espaçamento aplicado em cada seção. O sistema também foi modificado com respeito ao tipo de condutor, fazendo uso de 3 tipos com diferentes características cujas especificações foram obtidos de (KERSTING, 2001).

Tabela A.1: Dados do sistema teste

Barras		Seção	Comprimento [m]	Tipo de condutor		Espaçamento ID
Inicial	Final			Fases	Neutro	
1	2	1	1680	556,500 26/7	4/0	500
2	3	2	750	556,500 26/7	4/0	500
2	6	5	200	4/0	4/0	500
3	4	3	295	556,500 26/7	4/0	500
4	5	4	360	556,500 26/7	4/0	500
4	7	6	245	1/0	1/0	510

As matrizes de impedância e de admitância das linhas calculadas a partir da equação de Carson modificada e posterior aplicação do método de redução de Kron (KERSTING, 2002) resultaram nas matrizes mostradas a continuação:

Seção 1, 2, 3 e 4:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0,2097 + j0,6511 & 0,0969 + j0,3117 & 0,0954 + j0,2392 \\ 0,0969 + j0,3117 & 0,2153 + j0,6325 & 0,0982 + j0,2632 \\ 0,0954 + j0,2392 & 0,0982 + j0,2632 & 0,2121 + j0,6430 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m} \quad (\text{A.1})$$

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} j3,7032 & -j1,2401 & -j0,4608 \\ -j1,2401 & j3,9146 & -j0,7826 \\ -j0,4608 & -j0,7826 & j3,5037 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \frac{S}{m} \quad (\text{A.2})$$

Seção 5:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0,4620 + j0,7526 & 0,0969 + j0,3117 & 0,0953 + j0,2391 \\ 0,0969 + j0,3117 & 0,4676 + j0,7341 & 0,0981 + j0,2632 \\ 0,0953 + j0,2391 & 0,0981 + j0,2632 & 0,4644 + j0,7445 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m} \quad (\text{A.3})$$

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} j3,3707 & -j1,0504 & -j0,4093 \\ -j1,0504 & j3,5412 & -j0,6721 \\ -j0,4093 & -j0,6721 & j3,2184 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \frac{S}{m} \quad (\text{A.4})$$

Dado que a seção 6 está constituída de uma lateral constituída de uma só fase, especificamente da fase a , as matrizes de impedância e de admitância desta seção resultam em:

Seção 6:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0,8259 + j0,8373 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m} \quad (\text{A.5})$$

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} j2,8082 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6} \frac{S}{m} \quad (\text{A.6})$$

Os parâmetros do transformador utilizado no sistema estão mostrados a continuação na Tabela A.2:

Tabela A.2: Parâmetros do Transformador				
MVA	Conexão	kV - AT	kV - BT	Z_{tr}
5	$\Delta - Yg$	138	13,8	0.007+j0.085