

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

DIOMAR ADONIS COPETTI LIMA

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADA NA
IMPEDÂNCIA APARENTE: ALGORITMO UTILIZANDO
DADOS DE UM TERMINAL**

Porto Alegre

2013

DIOMAR ADONIS COPETTI LIMA

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADA NA
IMPEDÂNCIA APARENTE: ALGORITMO UTILIZANDO
DADOS DE UM TERMINAL**

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: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

Porto Alegre

2013

DIOMAR ADONIS COPETTI LIMA

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADA NA
IMPEDÂNCIA APARENTE: ALGORITMO UTILIZANDO
DADOS DE UM TERMINAL**

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

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela *Virginia Polytechnic Institute and State University – Blacksburg*, Estados Unidos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Flavio Antônio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UNIFEI

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil.

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela *Chalmers University of Technology* – Göteborg, Suécia.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Júnior

Porto Alegre, Março de 2013.

“Ser culto é o único modo de ser livre”.

José Martí.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em Memória de meu pai Carloci Jacintho Lima, que apesar da pouca convivência juntos, me deixou como exemplo a dedicação ao trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Nadir M. C. Lima, meu irmão Alex S. C. Lima, minha cunhada Verenice Forneck e ao meu sobrinho Eduardo A. Lima, pelo apoio e suporte dados em minha vida, pela confiança depositada em mim, pela paciência e compreensão que tiveram nos últimos anos.

À minha noiva Mônica Carina Seifert, pela paciência, pelo seu amor e amizade dedicados a mim nestes últimos anos.

Ao Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, pela excelente orientação, pelo apoio ao longo de todo o período deste mestrado e oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, pela sua orientação durante o estágio docência, realizado em disciplina por ele ministrada.

A todos os colegas do LASEP pelas oportunidades de trabalho em conjunto, conversas, chimarrões e os momentos de divertimentos.

Ao Renato Ferraz, Mario Orlando Oliveira e Alexandra de Moraes um agradecimento especial pelas dicas e sugestões que contribuíram valiosamente para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, por manterem o Departamento funcionando, dando todo o apoio possível aos alunos.

A todos os amigos e familiares que não foram citados, mas que de alguma forma me incentivaram para que eu atingisse este objetivo.

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

RESUMO

É notável que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) está constantemente exposto a adversidades ocasionadas por forças da natureza ou desgastes naturais de seus componentes. A localização com certa exatidão de uma falta no Sistema de Transmissão de Energia Elétrica (STEE), ocasionada por uma destas adversidades, contribui para a confiabilidade e segurança da operação do SEP. Neste contexto, este trabalho apresenta um método computacional de Localização de Falhas (LDF), desenvolvido em ambiente MATLAB®, baseado na Impedância Aparente (IA), utilizando dados de apenas um terminal, sendo o equacionamento desenvolvido em componentes simétricas. Este método tem como dados de entrada as componentes fundamentais de tensão e corrente do terminal local e a Potência de Curto Circuito (S_{CC}) do sistema equivalente conectado ao terminal remoto. Para validar o método proposto foram realizadas diversas simulações para todos os tipos de faltas *shunt*, contemplando inúmeras condições destas, utilizando para isso, o programa computacional ATP-EMTP, alimentado com dados de parâmetros reais de um sistema de transmissão. Objetivando analisar a eficiência deste método, realizou-se a comparação de seus resultados com os resultados obtidos por um método estado-da-arte. A partir de análises e comparações, os resultados alcançados pertencentes ao método de LDF proposto, apresentam-se promissores para a LDF em sistemas de transmissão.

Palavras-chave: Localização de faltas; Impedância aparente; Sistema de Transmissão; Componentes simétricas.

ABSTRACT

Electric Power Systems (EPS) are constantly exposed to adversities caused by forces of nature and components lifetime. The precise fault location in the Transmission System (TEPS), caused by these adversities, contributes to the reliability and safety the operation of the EPS. In this context, this work presents a computational method for fault location (FL), developed in MATLAB ® environment, based on the Apparent Impedance (AI) of the transmission line. The proposed method uses only one terminal data and is developed in symmetrical components equations. This method has as input data the fundamental components of voltage and current of the local terminal and the short circuit power (SCP) of the equivalent system connected to the remote terminal. The proposed method is validated through several simulations for all fault types, covering many fault conditions, making use of the software ATP-EMTP, fed with data from the actual parameters of a real life transmission system. Aiming to analyze the efficiency of this method, a comparison was made against the an state-of-the-art method. From analysis and comparison of the results obtained, is observed that the proposed scheme is capable to obtain precise fault location estimations and presents as promising method for the FL in transmission systems.

Keywords: Fault location; Apparent impedance; Transmission electric power system; Symmetrical components.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS.....	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivos.....	18
1.3. Estrutura do Trabalho	18
2. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	20
2.1. Métodos Baseados em Ondas Viajantes.....	21
2.2. Métodos Baseados na Impedância Aparente.....	21
2.2.1. Métodos de LDF Baseados na Impedância Aparente Utilizando Medidas de Um Terminal	22
2.2.2. Métodos de LDF Baseados na Impedância Aparente Utilizando Medidas de Dois Terminais	28
2.3. Considerações.....	30
3. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO.....	31
3.1. Equacionamento para LDF	32
3.1.1. Falta Fase Terra	34
3.1.2. Falta Fase-Fase e Fase-Fase-Terra	36
3.1.3. Falta Trifásica e Trifásica a Terra.....	38
3.2. Algoritmo Proposto de LDF	40
3.3. Considerações.....	44
4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS	45
4.1. Estudo de Caso	45
4.1.1. Sistema Elétrico de Potência Simulado	46
4.2. Resultados do Algoritmo Proposto.....	48

4.2.1. Influência da Resistência de Falta e Ângulo de Incidência	49
4.2.2. Influência da Distância da Falta (d).....	52
4.2.3. Influência da Variação dos Parâmetros do Sistema: Potência de Curto-Circuito (S_{CC}) e Impedância da Linha de Transmissão (Z_l).....	56
4.3. Método Apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).....	61
4.3.1. Influência da Resistência de Falta e Ângulo de Incidência	62
4.3.2. Influência da Distância da Falta (d).....	63
4.3.3. Influência da Variação dos Parâmetros do Sistema: Potência de Curto-Circuito (S_{CC}) e Impedância da Linha de Transmissão (Z_l).....	64
4.4. Comparação dos Resultados- Método Proposto versus Saha, Izykowski, Rosolowski (2010)	66
4.5. Considerações	70
5. CONCLUSÕES	72
5.1. Trabalhos Futuros	73
REFERÊNCIAS	74

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Classificação das metodologias de LFD.	20
Figura 2.2 Circuitos monofásicos equivalentes de uma falta.	23
Figura 3.1 Faltas <i>shunt</i> típicas: (a) Falta fase terra, (b) Falta fase fase, (c) Falta fase fase terra, (d) Falta trifásica, e (e) Falta trifásica terra.	31
Figura 3.2 Diagrama unifilar da linha de transmissão sob falta.	32
Figura 3.3 Diagrama de falta fase-terra.	34
Figura 3.4 Diagrama de falta fase-fase.	36
Figura 3.5 Diagrama de falta fase-fase-terra.	37
Figura 3.6 Diagrama de falta trifásica.	38
Figura 3.7 Diagrama de falta trifásica a terra.	39
Figura 3.8 Diagrama unifilar para falta FT- <i>a</i> : (a) circuito monofásico pré-falta (b) circuito monofásico em falta.	41
Figura 3.9 Fluxograma do algoritmo de localização de faltas proposto.	43
Figura 4.1 Detalhe da linha de transmissão BAGÉ 2- P. MEDICI.	47
Figura 4.2 Diagrama unifilar do sistema de transmissão sob falta.	47
Figura 4.3 Erros em função de RF para faltas FT- <i>a</i> – Conjunto I.	51
Figura 4.4 Erros percentuais em função de <i>d</i> para faltas FT- <i>a</i> – Conjunto I.	56
Figura 4.5 Erros percentuais em função de <i>d</i> para variações de S_{CC} , RF=0 Ω – Conjunto IV.	58
Figura 4.6 Erros percentuais em função de <i>d</i> para variações de S_{CC} , RF=10 Ω – Conjunto IV.	58
Figura 4.7 Erros percentuais em função de <i>d</i> para variações de S_{CC} , RF=20 Ω – Conjunto IV.	59
Figura 4.8 Erros percentuais em função de <i>d</i> para variações de S_{CC} , RF=40 Ω – Conjunto IV.	59
Figura 4.9 Erros percentuais em função de <i>d</i> para variações da S_{CC} e Z_t	61
Figura 4.10 Erros percentuais em função de <i>d</i> para variações da S_{CC} e Z_t	66

Figura 4.11 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=0 Ω	67
Figura 4.12 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=10 Ω	68
Figura 4.13 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=20 Ω	68
Figura 4.14 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=40 Ω	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Índices estatísticos de diferentes tipos de faltas ocorridas em linhas de transmissão com diferentes níveis de tensão (falta/ano/100 km).....	45
Tabela 4.2 Conjunto de Simulações	46
Tabela 4.3 Parâmetros do Sistema Elétrico de Potência Simulado.	47
Tabela 4.4 Valores estimados e lidos da tensão no ponto da falta em função de d para RF=0 e RF=40 Ω - Falta FT- a	48
Tabela 4.5 Valores estimados e lidos da corrente de falta em função de d para RF=0 e RF=40 Ω - Falta FT- a	48
Tabela 4.6 Erros percentuais em função de RF para o algoritmo proposto – Conjunto I.	49
Tabela 4.7 Erros percentuais em função de RF para o algoritmo proposto – Conjunto II.	50
Tabela 4.8 Erros percentuais em função de RF para o algoritmo proposto – Conjunto III.	50
Tabela 4.9 Erros percentuais em função do ângulo de incidência de falta – FT- a	52
Tabela 4.10 Erros percentuais em função de d para o algoritmo proposto – Conjunto I.	52
Tabela 4.11 Erros percentuais em função de d para o algoritmo proposto – Conjunto II.	53
Tabela 4.12 Erros percentuais em função de d para o algoritmo proposto – Conjunto III.	54
Tabela 4.13 Variação da S_{CC} do sistema equivalente conectado ao terminal R.....	56
Tabela 4.14 Erros percentuais em função de d para variações de S_{CC} – Conjunto IV...	56
Tabela 4.15 Variação da impedância da linha de transmissão (Z_l).....	59
Tabela 4.16 Erros percentuais em função de RF para variações de Z_l – Conjunto IV...	60
Tabela 4.17 Erros percentuais em função de RF para o método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – FT- a	62
Tabela 4.18 Erros percentuais em função de d para o método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).....	63

Tabela 4.19 Erros percentuais em função de RF para variações de S_{CC} - Conjunto IV.	64
Tabela 4.20 Erros percentuais em função de RF para variações de Z_1 – Conjunto IV...	65
Tabela 4.21 Erros percentuais em função de RF – método proposto VS Saha, Izykowski, Rosolowski (2010).....	66
Tabela 4.22 Erros percentuais em função de RF para variação da S_{CC} , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).....	69
Tabela 4.23 Erros percentuais em função de RF para variação de Z_1 , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

FF: Falta Fase Fase

FFF: Falta Fase Fase Fase

FFFT: Falta Fase Fase Fase Terra

FFT: Falta Fase Fase Terra

FT: Falta Terra

GPS: *Global Positioning System*

IA: Impedância Aparente

LDF: Localização de Falta

LT: Linha de Transmissão

OV: Ondas Viajantes

QEE: Qualidade da Energia Elétrica

RF: Resistência de Falta

SCC: Potência de Curto Circuito

SEP: Sistemas Elétricos de Potência

SIN: Sistema Interligado Nacional

STEE: Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

TC: Transformador de Corrente

TW: Transformada *Wavelets*

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem um papel relevante no desenvolvimento de um país. Segundo Elgerd (1977), pode-se dizer que a energia elétrica constitui a “força muscular” de nossa sociedade industrial e a sua abundância assegura o poder de nossa indústria e também nosso padrão de vida. A busca por esta abundância possibilitou a visualização de um crescimento significativo dos sistemas elétricos de potência nas últimas décadas, resultando em um incremento do número de linhas de transmissão e distribuição. Este crescimento veio acompanhado do aumento de restrições técnicas, vislumbrando a melhora da qualidade e continuidade da energia fornecida (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010). De acordo com Saadat (1999), o sistema elétrico de potência pode ser dividido em quatro grandes grupos: geração, transmissão e subtransmissão, distribuição e cargas.

O grupo de transmissão ou Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica (STEE) possibilita o transporte econômico da energia elétrica gerada por grupos de geração afastados dos grandes centros de consumo. De acordo com Elgerd (1977), estes sistemas são projetados para atender a certos critérios, como: capacidade de transmissão de energia, qualidade de transmissão, confiabilidade e economia.

Os dispositivos de controle e proteção apresentam grande importância no sistema elétrico, auxiliando no atendimento dos critérios acima citados. Dentre as várias capacidades que estes dispositivos possuem, a função de Localização de Falhas (LDF) se destaca com grande relevância, sendo alvo de vários estudos e pesquisas (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

A LDF pode contribuir para o atendimento dos critérios citados anteriormente das seguintes formas: isolamento seletivo do trecho faltoso, redução do tempo de reparo e conseqüentemente diminuição das perdas econômicas acarretadas pelo não fornecimento de energia elétrica; melhoria da qualidade do serviço prestado devido à continuidade de fornecimento; preservação de vidas em casos de contatos acidentais.

Podem ser consideradas duas classificações básicas de metodologias de LDF: uma baseada em ondas viajantes e outra na impedância aparente. Na primeira existem métodos onde o uso depende de uma condição de falta, sujeitando a linha desenergizada à injeção de Ondas Viajantes (OV), e assim, através do tempo de reflexão até o ponto da falta é possível estimar a distância da mesma. Na segunda, métodos de LDF empregam fasores de tensão e corrente durante a falta, sendo possível calcular a impedância

aparente entre o ponto de leitura e o ponto da falta. Assim, conhecendo-se a impedância característica da linha por unidade de comprimento é possível estimar a distância do ponto da falta. De acordo com Horowitz e Phadke (2008), o primeiro método de LDF descrito anteriormente, requer equipamentos especiais além de tempo e custos elevados de implementação. Normalmente são empregados em linhas ou cabos subterrâneos, onde as faltas tendem a ser permanentes e o uso de equipamentos e elevados custos de implementação são justificados. Já os métodos da segunda metodologia normalmente são empregados em linhas aéreas de transmissão, pois seu uso independe da condição de falta, além de não necessitar equipamentos especiais e tampouco a realização de testes com a linha desenergizada.

Este trabalho busca apresentar o estudo e desenvolvimento de um método para localização de faltas baseado na impedância aparente utilizando sinais de tensão e corrente de apenas um terminal. Propõe o desenvolvimento de um método válido para diferentes tipos de sistemas, considerando faltas com características de resistividade constante.

1.1. MOTIVAÇÃO

Linhas de transmissão de energia elétrica, como o próprio nome revela, são concebidas para realizar o transporte de grandes blocos de energia. É inevitável que para exercer sua função, estas linhas percorrem longas distâncias com diversas características geográficas, onde muitas vezes de difícil acesso. Também devem funcionar sob as mais diversas condições climáticas. Estes fatores fazem com o que o tempo necessário para realizar fisicamente uma vistoria ou manutenção, torne-se muito elevado. Em situações como esta, uma estimativa aproximada do local onde deve ser realizada a vistoria, é muito relevante, pois reduz significativamente o tempo necessário para a execução da tarefa. Desta forma, pesquisas sobre métodos de localização de faltas em linhas de transmissão apresentam grande importância e valor técnico a empresas focadas no mercado de transmissão da energia elétrica.

Em linhas de transmissão o fluxo de potência pode ocorrer ora por um sentido ora por outro, desta forma, a corrente de falta é composta pelas correntes contribuídas pelos dois terminais, local e remoto. A formulação proposta nesta dissertação estende o trabalho de Bretas e Salim (2006) para sistemas de transmissão, utilizando dados de apenas um terminal e a estimação da corrente de carga é realizada utilizando a potência de curto-circuito do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

1.2. OBJETIVOS

Buscando contribuir com os métodos de LDF existentes que atualmente compõem o estado da arte da metodologia de LDF, baseada na impedância aparente para Sistema de Transmissão de Energia Elétrica, a presente dissertação de mestrado possui os seguintes objetivos:

- desenvolver o equacionamento utilizando componentes simétricas, tendo como dados de entrada as componentes fundamentais de tensão e corrente de apenas um terminal, sendo a corrente contribuída pelo terminal remoto (I_R) estimada a partir da potência de curto circuito do sistema equivalente conectado ao terminal remoto;
- desenvolver um algoritmo para Localização de Faltas baseado na Impedância Aparente para todos os tipos de faltas *shunt* em linhas de transmissão com os dois terminais ativos;
- validar o algoritmo proposto através de simulações de uma linha de transmissão sob falta fase terra (FT), no programa computacional *ATP/EMTP* (BONEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007), realizando uma comparação com outro método de LDF e a análise de sua sensibilidade frente à variações dos parâmetros do sistema: S_{CC} e impedância da linha (Z_l).

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- no Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica das metodologias de LDF baseadas na impedância aparente e ondas viajantes, dando maior ênfase aos métodos baseados na impedância aparente. São abordados tanto os métodos atuais, consideradas o estado da arte neste assunto, como métodos que formaram a base para a LDF em STEE.
- no Capítulo 3 são apresentados os equacionamentos propostos nesta dissertação de mestrado. O equacionamento geral para cada tipo de falta é descrito em detalhes, bem como as modificações propostas para o algoritmo de localização de faltas existente.

- o Capítulo 4 apresenta o sistema utilizado nas simulações de faltas em uma linha de transmissão utilizando o programa *ATP/EMTP* e os resultados de localização de faltas obtidos através da utilização do método proposto.
- no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais desta dissertação, destacando-se os conhecimentos agregados durante o desenvolvimento deste estudo.

2. LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A busca pela melhoria da precisão e o baixo custo computacional dos métodos de localização, faz com que este tema seja alvo de pesquisadores há vários anos. Para Salim (2008) isso se deve a grande variedade de métodos disponíveis e a diversidade de sistemas elétricos com diferentes características. Segundo Iurinic (2012), a metodologia de LDF ao ser selecionada, deve levar em consideração os seguintes fatores: a velocidade de localização, precisão e robustez do método, o custo e requerimentos de manutenção associados aos dispositivos e habilidades requeridas pelo operador responsável. Em seu trabalho Kawady e Stenzel (2002), apresentam a classificação das metodologias de LDF através da Figura 2.1, dependendo de sua essência básica.

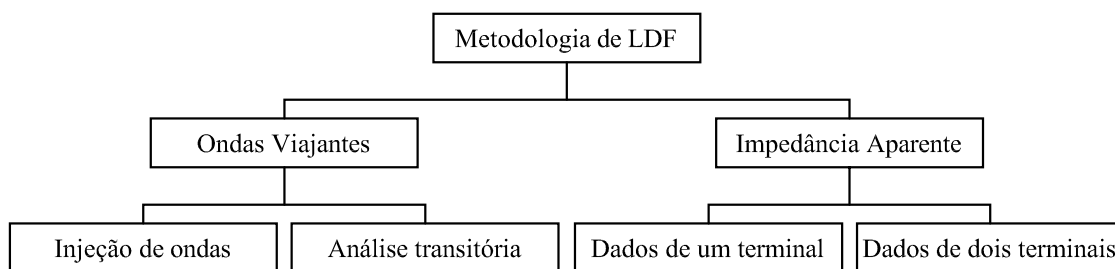


Figura 2.1 Classificação das metodologias de LDF.

De acordo com Kawady e Stenzel (2002) o conceito básico da metodologia de LDF baseadas em OV está na determinação do tempo necessário para a onda injetada viajar entre o ponto de injeção e o ponto de falta. Outra maneira é através da captura e análise de ondas transitórias que são geradas nos sinais de tensão ou corrente durante a falta. As metodologias de LDF baseadas em impedância aparente utilizam as medições oscilográficas das componentes fundamentais de tensão e corrente obtidas em um ponto da linha de transmissão, tornando possível o cálculo da impedância aparente do ponto de leitura até o ponto da falta. Conhecendo-se a impedância característica da linha por unidade de comprimento, pode-se estimar a distância da falta.

Este capítulo tem o propósito de apresentar uma breve descrição dos principais métodos de LDF para sistemas de transmissão, seguindo a classificação apresentada na Figura 2.1, dando maior ênfase as metodologias baseadas na impedância aparente, a qual é o foco desta dissertação.

2.1. MÉTODOS BASEADOS EM ONDAS VIAJANTES

O uso desta metodologia remonta os anos de 1930, tendo sido empregada largamente até a década de 1940 em linhas ou cabos subterrâneos desenergizados (GALLE *et al*, 1993). Apesar de sua precisão ser superior a metodologias de LDF baseada na impedância aparente, durante a década de 1950 foi gradualmente abandonada, devido a sua confiabilidade e problemas de manutenção, resultando na perda de interesse e confiança (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

Recentemente com o desenvolvimento de equipamentos de aquisição de dados com elevada precisão, juntamente com a sincronização de tempo via GPS (*Global Positioning System*) e sistemas de comunicação, fez com que esta metodologia reemergisse como tema de novas pesquisas, utilizando tanto dados de um (AURANGZEB; CROSSLEY; GALE, 2001) ou mais terminais (IBE; CORY, 1986).

Segundo Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) o desenvolvimento da tecnologia de transdutores possibilitou a gravação com alta taxa de amostragem de sinais transitórios durante a falta, permitindo desta forma, um melhor e mais eficiente uso dos métodos de análises de faltas baseados em ondas viajantes. Este desenvolvimento tornou possível o uso de ferramentas de análise de sinais, como a Transformada *Wavelets* (TW), o que permite a análise de transitórios localizados. O método proposto por Magnago e Abur (1998), faz uso desta ferramenta para obter os detalhes de alta frequência contidos na onda viajante, a partir de dados de um ou dois terminais, de posse dos instantes de reflexão revelados pela TW e da velocidade de propagação da onda, é possível determinar a distância da falta.

Métodos de LDF baseados em ondas viajantes são considerados precisos, mas com difícil e elevados custos de implementação em comparação com métodos baseados na impedância aparente. Isto se deve a necessidade da alta frequência de amostragem do sinal. Para Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) estas metodologias apresentam como desvantagem o fato da propagação da onda ser afetada pelos parâmetros do sistema e pela configuração da rede.

2.2. MÉTODOS BASEADOS NA IMPEDÂNCIA APARENTE

Devido aos seus custos de implementação, métodos baseados em ondas viajantes são usualmente empregados em linhas ou cabos subterrâneos, onde as faltas tendem a serem permanentes, fato que justifica o investimento elevado de implementação

(HOROWITZ; PHADKE, 2008). Em decorrência dos métodos baseados na impedância aparente não necessitarem de equipamentos especiais e tão pouco a realização de testes com a linha ou cabos desenergizados, faz com que estes se apresentem como uma alternativa as técnicas baseadas em ondas viajantes, sendo amplamente utilizadas em linhas aéreas de transmissão.

A primeira utilização da medida de impedância aparente ocorreu em 1923, através do trabalho apresentado por Crichton (1923), o qual descreve um relé para seccionamento automático de linhas de transmissão, com capacidade de estimar a área onde ocorreu a falta. Segundo Andrade e Leão (2012) a principal diferença entre proteção e localização de faltas é que a localização de faltas é utilizada para estimar com considerável precisão a posição da falta, já a proteção indica somente a área geral onde ocorre a falta, definida através da zona de proteção, no caso de relés de distância.

Em geral, metodologias de LDF baseadas na impedância aparente utilizam componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente, para assim, calcular a impedância aparente da linha de transmissão entre o ponto de medição e o ponto da falta. Através da comparação, entre a impedância aparente e a impedância da linha por unidade de comprimento, pode-se estimar o ponto da falta.

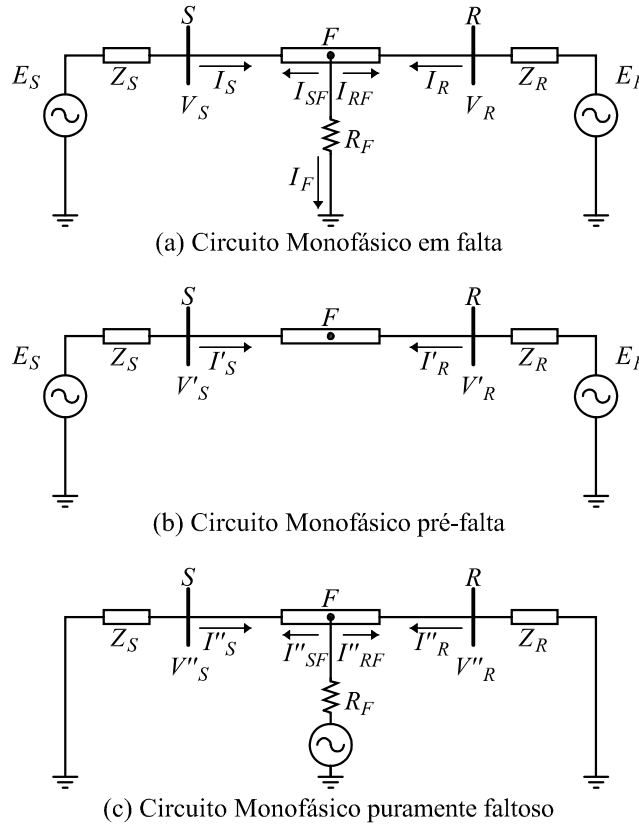
Metodologias baseadas na impedância aparente podem ser classificadas segundo os dados de entrada, ou seja, métodos utilizando dados de um terminal e métodos utilizando dados de dois ou mais terminais. Para Saha, Izykowski e Rosolowski (2010), esta classificação deve levar em conta ainda a disponibilidade dos dados medidos, seja utilizando um ou mais terminais: medidas completas (tensão e corrente) ou incompletas (tensão ou corrente).

A seguir são apresentados métodos baseados na impedância aparente utilizando medidas de um terminal e métodos utilizando medidas de dois ou mais terminais.

2.2.1. MÉTODOS DE LDF BASEADOS NA IMPEDÂNCIA APARENTE UTILIZANDO MEDIDAS DE UM TERMINAL

De acordo com Kawady e Stenzel (2002), estes métodos têm como vantagens a dependência somente da informação disponível em equipamentos de medição e a facilidade de implementação e simulação. Outra grande vantagem é o fato de não necessitar de meios de comunicação e sua simples implementação em relés de proteção digitais ou gravadores digitais de faltas (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

O desenvolvimento desta metodologia teve grande impulso a partir dos trabalhos de Takagi *et al* (1981) e Takagi *et al* (1982a), os quais apresentam um equacionamento para LDF baseado no teorema de superposição de circuitos, conforme Figura 2.2.



Fonte: Takagi *et al* (1981).

Figura 2.2 Circuitos monofásicos equivalentes de uma falta.

O método proposto por Takagi *et al* (1982b) foi idealizado para a LDF em linhas de transmissão utilizando dados de um terminal. No entanto, considera que estas linhas são suficientemente curtas e com uma geometria simétrica. O equacionamento considera um circuito monofásico, analisado em três etapas: circuito monofásico em falta, circuito monofásico pré-falta e circuito monofásico puramente faltoso. Desta forma, o circuito apresentado na Figura 2.2 (a) corresponde à soma do circuito pré-falta com o circuito puramente faltoso. A partir da análise dos circuitos apresentados na Figura 2.2, a tensão no ponto da falta é dada por:

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

onde:

V_F tensão no ponto da falta [V];

I_{SF} contribuição à corrente de falta do terminal local do circuito em falta¹ [A];

I_{RF} contribuição à corrente de falta do terminal remoto do circuito em falta [A];

R_F resistência de falta [Ω].

Considerando-se que V_F e I''_{SF} podem ser obtidos através de valores medidos no terminal local juntamente com os parâmetros da linha de transmissão:

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

$$I''_{SF} = (V''_S / Z_C) \cdot \sinh(\gamma x) - I''_S \cdot \cosh(\gamma x), \quad (2.3)$$

onde:

Z_C impedância característica da linha [Ω];

γ constante de propagação da linha;

x distância da falta em relação ao terminal local (S) [m];

V_S tensão medida no terminal local do circuito em falta [V];

I_S corrente medida no terminal local do circuito em falta [A].

Já a corrente de falta, I_F pode ser expressa como função de I''_{SF} , através da seguinte equação:

$$I_F = I''_{SF} \cdot \xi, \quad (2.4)$$

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

$$\theta = \angle(I_F / I''_{SF}), \quad (2.6)$$

onde ζ é um número real qualquer. Substituindo (2.2), (2.3) e (2.4) em (2.1), e ainda dividindo-se a expressão resultante por $\cosh(\gamma x)$, obtém-se:

$$V_S - Z_C \cdot I_S \cdot \tanh(\gamma x) + [(V''_S / Z_C) \cdot \tanh(\gamma x) - I''_S] \cdot \zeta \cdot e^{j\theta} \cdot R_F = 0. \quad (2.7)$$

Através da consideração apenas da parte imaginária da equação (2.7), pode-se remover do equacionamento a resistência de falta e também ζ , resultando em:

$$\Im \{ [V_S - Z_C \cdot I_S \cdot \tanh(\gamma x)] + [(V''_S / Z_C) \cdot \tanh(\gamma x) - I''_S]^* \cdot e^{-j\theta} \} = 0, \quad (2.8)$$

onde * denota o conjugado de um número complexo e \Im denota a parte imaginária de um número complexo.

Nota-se que na equação (2.8) apenas dois valores são desconhecidos, θ e x . Entretanto, θ representa diferença angular entre as correntes de falta oriundas de ambos

¹ ' e '' denotam as variáveis do circuito pré-falta e puramente faltoso.

os terminais. Adotando as simplificações (2.9) e (2.10), e considerando que a diferença angular entre as correntes de falta oriundas de ambos os terminais seja nula, pode-se obter uma equação para a distância da falta dada por (2.11):

$$\tanh(\gamma x) \approx \gamma x, \quad (2.9)$$

$$(V''_S / Z_l) \cdot \tanh(\gamma x) \ll I''_S, \quad (2.10)$$

$$x = \frac{\Im(V_S \cdot I''_S)}{\Im(Z_l \cdot I_S \cdot I''_S)}, \quad (2.11)$$

onde Z_l é a impedância característica da linha por unidade de comprimento. Pode-se considerar $I''_S = I_S - I'_S$. As simplificações que foram adotadas em (2.9) e (2.10) desconsideram o efeito capacitivo da linha.

O método desenvolvido por Takagi *et al* (1982b) apresenta-se eficiente para faltas sólidas ($R_F = 0 \Omega$). No entanto, a utilização do teorema de superposição contribui para uma estimativa errônea da corrente de falta vista do terminal local, quando a resistência de falta eleva-se. Contudo, dado o pioneirismo tanto na análise como das considerações realizadas visando a LDF em linhas de transmissão curtas, este trabalho possui grande importância para a metodologia de LDF fundamentada na impedância aparente (SALIM, 2008).

A partir dos trabalhos apresentados acima, verificou-se que foram sugeridos diferentes métodos de LDF baseados na impedância aparente, dentre esses Eriksson, Saha e Rockefeller (1985). Este método apresenta um diferencial em relação ao método proposto por Takagi *et al* (1982b), em virtude de que utiliza o modelo completo da rede, tornando possível a consideração da influência introduzida pelo terminal remoto.

O método faz uso de componentes simétricas no seu equacionamento. As componentes de sequência zero são desconsideradas, devido ao fato de a impedância positiva não depender da resistência do pé da torre nem da resistência do solo. A partir do equacionamento proposto apresenta-se equação(2.12):

$$V_S = I_S \cdot p \cdot Z_C + \left(\frac{I''_{SF}}{k_p} \right) \cdot R_F, \quad (2.12)$$

onde k_p é o fator de distribuição da corrente, definido pela equação (2.13) e p é a distância da falta em percentagem:

$$k_p = \frac{(1-p) \cdot Z_C + Z_S}{Z_R + Z_C + Z_R}, \quad (2.13)$$

onde Z_S e Z_R são as impedâncias de sequência positiva das fontes. Substituindo a equação (2.13) em (2.12) e rearranjando tem se:

$$p^2 - pk_1 + k_2 - k_3 \cdot R_F, \quad (2.14)$$

onde:

$$k_1 = \frac{V_S}{I_S \cdot Z_C} + 1 + \frac{Z_R}{Z_C}, \quad (2.15)$$

$$k_2 = \frac{V_S}{I_S \cdot Z_C} \cdot \left(\frac{Z_R}{Z_C} + 1 \right), \quad (2.16)$$

$$k_3 = \frac{I''_{SF}}{I_S \cdot Z_C} \cdot \left(\frac{Z_S + Z_R}{Z_C} + 1 \right). \quad (2.17)$$

Ao separar a equação complexa (2.14) em uma parte real e outra imaginária, pode-se eliminar a resistência de falta, resultando em uma expressão simples, com apenas uma variável desconhecida p .

No entanto, apesar deste método apresentar maiores benefícios em relação ao método desenvolvido por Takagi *et al* (1982b), seu uso depende do conhecimento de todos os parâmetros do sistema, como por exemplo, a impedância aparente da fonte conectada ao terminal remoto.

Srinivasan e St-Jacques (1989) apresentaram um equacionamento alternativo ao de Takagi *et al* (1982b), focando a localização de faltas voltada a sistemas com características de distribuição e subtransmissão de energia elétrica. Neste trabalho, os autores apresentaram duas metodologias para LDF: uma para linhas longas e outra para linhas curtas. Para ambas as metodologias foram consideradas linhas transpostas, ao passo que se utilizou em seus equacionamentos componentes simétricas. Destaca-se que nas metodologias apresentadas pelos pesquisadores, o sistema equivalente conectado ao terminal remoto é considerado passivo.

O trabalho apresentado por Johns, Moore e Whittard (1995) descreve um método para a LDF em linhas de transmissão a partir dos dados de um terminal, considerando faltas fase-terra. A técnica é baseada na representação hiperbólica de linhas de transmissão, considerando o modelo trifásico de parâmetros distribuídos, e no princípio da superposição, tal como apresentado por Takagi *et al* (1981). A localização da falta é obtida a partir de uma avaliação sistemática da impedância aparente do sistema para diferentes pontos de falta considerados ao longo da linha. O estudo de caso considerou um sistema de 400 kV e comprimento da linha de 100 km, apresentando

erros próximos a 4% na localização do ponto de falta para resistências de faltas inferiores a 50 Ω . Segundo Johns, Moore e Whittard (1995), estes erros se devem à consideração de que a linha é idealmente transposta e à utilização da teoria de componentes simétricas. No entanto, esta técnica considera como conhecido o valor da impedância da fonte remota.

A técnica apresentada por Novosel *et al* (1998) tem seu foco voltado para linhas de transmissão curtas, contendo cargas laterais intermediárias representadas por uma impedância agregada à jusante a fonte (SALIM, 2008). Esta técnica considera o teorema de superposição através de uma análise do sistema em regime permanente, em falta e puramente faltoso. Os autores propõem duas formas distintas de estimar a distância da falta: uma resulta em uma função quadrática, a qual não requer um algoritmo iterativo para resolução; e outra resulta em uma equação linear para obtenção da distância estimada da falta, porém esta última requer o uso de um algoritmo iterativo para a sua resolução.

Outro método que faz uso do Teorema da superposição é apresentado por Djuric e Terzija (1998). Neste trabalho os autores apresentam uma metodologia empregando apenas fasores da corrente pré-falta e durante a falta. O método utiliza componentes simétricas em seu equacionamento e faz uso de dois algoritmos para estimar a distância da falta, onde o primeiro calcula a distância da falta a partir dos fasores de corrente de fase, utilizando-se a impedância de sequência zero da linha como um parâmetro de entrada. No segundo algoritmo, além dos fasores de corrente de fase é requerido o fasor da corrente de carga pré-falta, enquanto que a utilização do parâmetro de sequência zero é dispensado. Apesar de o algoritmo utilizar apenas fasores das correntes pré-falta e durante a falta, este considera disponível a impedância da fonte.

Izykowski, Rosolowski e Saha (2004) apresentam em seu trabalho um método de localização de faltas para linhas paralelas utilizando sinais de tensão e corrente coletados no terminal local. Este apresenta um equacionamento simples e não necessita do conhecimento do valor das impedâncias dos sistemas equivalentes conectados aos terminais da linha, sendo o mesmo, capaz de localizar faltas com ambas às linhas em operação. No trabalho é realizada uma abordagem sobre a compensação de capacitâncias *shunt*, para melhora de desempenho do algoritmo.

O trabalho apresentado por Kang *et al* (2009) propõe um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão não transpostas de extra-alta tensão, considerando a presença de circuitos paralelos. O algoritmo é baseado na análise de

circuitos trifásicos a partir dos dados de tensão e corrente do terminal local durante a falta, utilizando componentes de fase. A distância de falta é obtida a partir da solução de uma equação algébrica de segunda ordem. Segundo Kang *et al* (2009), o algoritmo proposto é capaz de localizar faltas em linhas não transpostas independentemente da resistência de falta, da impedância das fontes local e remota e do efeito do acoplamento mútuo entre os circuitos paralelos. Para validação do algoritmo os autores realizaram simulações no programa computacional *EMTP*, considerando o modelo π nominal para linhas de transmissão.

2.2.2. MÉTODOS DE LDF BASEADOS NA IMPEDÂNCIA APARENTE UTILIZANDO MEDIDAS DE DOIS TERMINAIS

Na busca do aumento da precisão da localização de faltas em linhas de transmissão, muitos pesquisadores dedicaram seus esforços em novas metodologias, considerando dados de dois ou mais terminais. Tais métodos compensam erros originados pela impedância de falta e também por mudanças na configuração do sistema de potência. No entanto, o uso de dados de ambos os terminais da linha torna necessário um meio de comunicação. Estes métodos podem ser classificados em dois grupos, com dados não sincronizados e dados sincronizados.

O método apresentado por Jeyasurya e Rahman (1989) determina o ângulo de fase entre as correntes dos relés relativos a um eixo de referência comum. Segundo os autores, o fato da equação de localização utilizada em seu método desconsiderar o efeito da capacitância *shunt*, possibilita a estimativa precisa com apenas um ciclo de dados pós-falta.

O método apresentado por Apostolopoulos e Korres (2010) propõe um algoritmo para localização de faltas indiferente aos parâmetros da linha, podendo ser aplicado à linhas de transmissão transpostas ou não. O algoritmo utiliza dados não sincronizados de tensão e corrente de ambos os terminais, obtidos no instante pré-falta e durante a falta. Para determinar a distância da falta, o algoritmo é dividido em duas partes: na primeira parte, utiliza o modelo de parâmetros concentrados para a linha de transmissão, onde o efeito capacitivo da linha é desprezado. Nesta parte, um processo iterativo é empregado para estimar os valores iniciais da distância da falta e do ângulo de sincronização dos dados de tensão e corrente. Na segunda parte, o efeito capacitivo da linha é levado em conta e os resultados obtidos na primeira parte são utilizados como

valores iniciais no processo iterativo, o qual irá determinar a estimativa da distância da falta. Ambas as partes do algoritmo utilizam o método de Newton-Raphson para a solução, sendo que o primeiro que requer um adequado valor inicial para a inicialização do algoritmo.

Métodos que utilizam dados sincronizados necessitam de um maior investimento em equipamentos, devido ao sistema de comunicação necessário para a sincronização dos dados provenientes dos terminais da linha de transmissão. No entanto, segundo Johns, Moore e Whittard (1995), o método por eles apresentado, apesar de não necessitar do conhecimento dos valores das impedâncias das fontes, do valor da resistência de falta e da necessidade da identificação do tipo de falta, demonstra alto nível de precisão da estimativa da distância da falta.

O trabalho de Brahma e Girgis (2004) propõe uma abordagem para a localização de faltas em linhas de transmissão transpostas ou não, utilizando a matriz de impedâncias do sistema, a partir dos dados de tensão de ambos os terminais, os quais são sincronizados através de um GPS. Como o método proposto não utiliza medições de corrente, os erros de medição (e o efeito de saturação durante a falta) dos Transformadores de Corrente (TC) são eliminados. O equacionamento do sistema é feito a partir da inserção de uma barra fictícia no possível ponto da falta, a seguir esta barra é inserida na matriz de impedâncias do sistema. O equacionamento resulta em uma expressão que permite a determinação da distância da falta em função dos parâmetros da linha e das tensões em ambos os terminais.

Sadeh e Adinehzadeh (2010), propõe um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série, utilizando o modelo de parâmetros distribuídos no domínio do tempo. O algoritmo utiliza as amostras das medições sincronizadas de tensão e corrente dos terminais local e remoto da linha. Este método não necessita do modelo do compensador série, tampouco o conhecimento do seu modo de operação, para computar a queda de tensão sobre o dispositivo durante a falta. Além de não necessitar da filtragem da componente DC e outras componentes de frequência que estão presentes nos sinais de tensão e corrente. Segundo Sadeh e Adinehzadeh (2010), a vantagem do algoritmo proposto, em relação a outros anteriormente desenvolvidos, é não utilizar o modelo do compensador, sendo este uma das principais fontes de erros.

2.3. CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo buscou-se apresentar uma revisão bibliográfica dos principais métodos existentes para localização de faltas em linhas de transmissão baseados na impedância aparente e na teoria das ondas viajantes, dando maior ênfase à primeira metodologia. Verificou-se que a maioria das metodologias possui limitações e ainda são passíveis de estudos e investigações, como por exemplo, a estimativa das correntes durante a falta, que influenciam na precisão da LDF baseada na metodologia da impedância aparente.

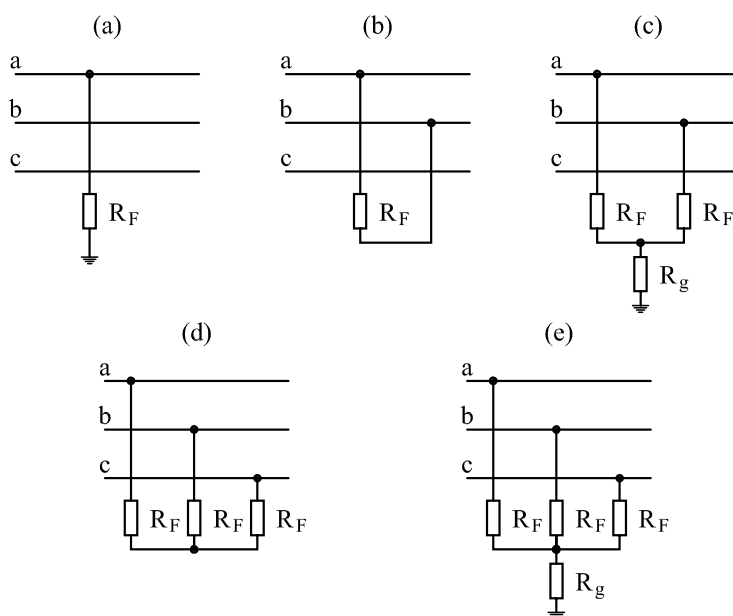
No próximo capítulo será apresentado o equacionamento proposto empregando o teorema das componentes simétricas.

3. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS PROPOSTO

Devido ao fato de o SEP estar constantemente exposto a forças da natureza e também ao desgaste natural de seus componentes, o mesmo é vulnerável a perturbações. Uma forma convencional de classificação destas perturbações é a sua classificação como internas ou externas. Como exemplos de perturbações internas podem ser citadas manobras operacionais e falhas de equipamentos. Já as perturbações externas têm como exemplo as descargas atmosféricas e queda de árvores.

Segundo Saha, Izykowski e Rosolowski (2010), os indicadores estatísticos de faltas que relacionam os diferentes níveis de tensão, condições técnicas e climáticas, indicam que 75% das faltas do SEP ocorrem no sistema de transmissão. Destas, grande parte são faltas temporárias, ou seja, ocorre a auto extinção devido a ação dos relés de proteção. Já os casos de faltas permanentes como, por exemplo, queda de linhas ou danos em cadeia de isoladores, o restabelecimento da operação normal do sistema depende da atuação de equipes de manutenção.

A Figura 3.1 apresenta as faltas do tipo *shunt* através de 5 modelos com base em elementos de circuitos elétricos empregados na formulação de algoritmos de localização de faltas baseados em modelos lineares de faltas. Faltas trifásicas (FFFT, FFF) são chamadas de faltas simétricas, os demais tipos de faltas (FT, FF e FFT) são chamadas de faltas assimétricas.



Fonte: Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

Figura 3.1 Faltas *shunt* típicas: (a) Falta fase terra, (b) Falta fase fase, (c) Falta fase fase terra, (d) Falta trifásica, e (e) Falta trifásica terra.

Por meio da revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2, pode-se verificar a necessidade do conhecimento dos dados de ambos os terminais, ou pelo menos, o conhecimento do sistema equivalente conectado ao terminal remoto, para que os métodos que compreendem o estado-da-arte para localização de faltas apresentem boa precisão na estimação da distância da falta. Com o objetivo de suprir tal necessidade, o algoritmo proposto utiliza como dados de entrada os valores lidos de tensão e corrente na frequência fundamental no terminal local (S) e o valor de potência de curto-circuito (S_{CC}) do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

Neste capítulo será apresentado o equacionamento para LDF em linhas de transmissão, bem como o algoritmo proposto que prevê a utilização do equacionamento para faltas do tipo fase terra.

3.1. EQUACIONAMENTO PARA LDF

O presente equacionamento de localização de faltas fundamentado na impedância aparente estende o trabalho de Bretas e Salim (2006), o qual se baseia na impedância aparente de sequência positiva. Desta forma, será apresentada a formulação matemática de LDF proposta para sistemas de transmissão para faltas do tipo: Fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, trifásica e trifásica a terra.

Antes de iniciar o desenvolvimento é necessário o destacar algumas considerações referentes ao sistema sob falta:

- o sistema é considerado equilibrado;
- a resistência de falta é constante;
- a resistência de falta é a mesma para todas as fases em falta;

A Figura 3.2 apresenta o diagrama unifilar de uma linha de transmissão sob falta, a partir desta, pode-se obter o equacionamento para as tensões trifásicas de falta em componentes de fase para uma falta FFFT.

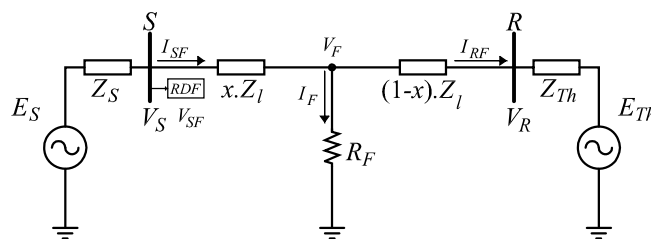


Figura 3.2 Diagrama unifilar da linha de transmissão sob falta.

Na Figura 3.2 são adotadas as seguintes notações:

V_{SF}	tensões de fase durante a falta no LDF [V];
V_F	tensões de fase no ponto da falta [V];
V_S	tensões de fase no terminal local [V];
V_R	tensões de fase no terminal remoto [V];
I_{SF}	correntes de fase durante a falta, contribuídas pelo terminal local [A];
I_{RF}	correntes de fase durante a falta, contribuídas pelo terminal remoto [A];
Z_l	impedância série da linha de transmissão [Ω];
Z_{Th}	impedância do sistema equivalente conectado ao terminal remoto [Ω];
Z_S	impedância do sistema conectado ao terminal local [Ω];
E_S	fonte de tensão conectada ao terminal local [V];
E_{Th}	fonte de tensão conectada ao terminal remoto [V];
I_F	corrente de falta [A];
R_F	resistência de falta [Ω];
x	valor por unidade da distância da falta em relação ao tamanho total da linha $0 \leq x \leq 1$;

RDF registrador digital de faltas.

Utilizando a notação apresentada acima, pode-se escrever:

$$[V_F] = [V_{SF}] - x \cdot [Z_l] \cdot [I_{SF}]. \quad (3.1)$$

Sendo que I_{SF} e V_{SF} representam respectivamente os vetores de correntes e tensões trifásicas lidas no terminal S, V_F representa os vetores de tensões trifásicas no ponto da falta e Z_l representa a matriz de impedância série da linha de transmissão. A partir da equação (3.1) é possível obter as equações genéricas para as tensões no ponto de falta, em faltas do tipo Fase-Terra e faltas envolvendo mais de uma fase, equações (3.2) e (3.3) respectivamente:

$$[V_{Fm}] = [V_{SFm} - x \cdot Z_{lm} \cdot I_{SFm}], \quad (3.2)$$

$$[V_{Fm} - V_{Fn}] = [V_{SFm} - x \cdot Z_{lm} \cdot I_{SFm}] - [V_{SFn} - x \cdot Z_{ln} \cdot I_{SFn}]. \quad (3.3)$$

A partir das equações (3.2) e (3.3) podem-se realizar os desenvolvimentos do equacionamento de localização de faltas para os tipos FT, FF, FFT, FFF e FFFT. Os subscritos m e n indicam a fase ou as fases do sistema (a , b ou c) que se encontram sob falta.

3.1.1. FALTA FASE TERRA

O diagrama apresentado na Figura 3.3 representa um sistema de transmissão de energia elétrica sob falta fase terra na fase a (FT- a).

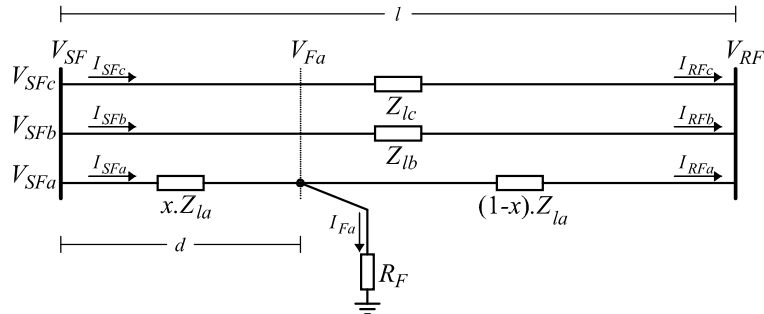


Figura 3.3 Diagrama de falta fase-terra.

Na Figura 3.3 são adotadas as seguintes notações, além das apresentadas na Figura 3.2:

- V_{SFa} tensão da fase a durante a falta [V];
- V_{SFb} tensão da fase b durante a falta [V];
- V_{SFc} tensão da fase c durante a falta [V];
- V_{Fa} tensão da fase a no ponto da falta [V];
- V_{Fb} tensão da fase b no ponto da falta [V];
- V_{Fc} tensão da fase c no ponto da falta [V];
- I_{SFa} corrente da fase a durante a falta, contribuída pelo terminal local [A];
- I_{SFb} corrente da fase b durante a falta, contribuída pelo terminal local [A];
- I_{SFc} corrente da fase c durante a falta, contribuída pelo terminal local [A];
- I_{RFa} corrente da fase a durante a falta, contribuída pelo terminal remoto [A];
- I_{RFb} corrente da fase b durante a falta, contribuída pelo terminal remoto [A];
- I_{RFc} corrente da fase c durante a falta, contribuída pelo terminal remoto [A];
- Z_{la} impedância série da linha de transmissão referente a fase a [Ω];
- Z_{lb} impedância série da linha de transmissão referente a fase b [Ω];
- Z_{lc} impedância série da linha de transmissão referente a fase c [Ω];
- I_{Fa} corrente de falta, referente a fase a [A];
- I_{Fb} corrente de falta, referente a fase b [A];
- I_{Fc} corrente de falta, referente a fase c [A];
- R_F resistência de falta referente à fase em falta [Ω];
- l comprimento da linha [km];

d distância da falta em relação ao terminal local [km];

x valor por unidade da distância da falta (d/l);

Tendo como base a equação genérica para a tensão no ponto da falta (3.2), escreve-se a equação (3.4) para a tensão no ponto da falta para uma falta FT- a :

$$V_{Fa} = V_{SFa} - x \cdot (Z_{l0} \cdot I_{SFa}), \quad (3.4)$$

A expressão (3.4) pode ser reescrita em função de componentes simétricas conforme:

$$V_{Fa} = (V_{SF0} + V_{SF1} + V_{SF2}) - x \cdot (Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot I_{SF1} + Z_{l2} \cdot I_{SF2}), \quad (3.5)$$

onde:

V_{SF0} tensão de sequência zero no terminal S durante a falta;

V_{SF1} tensão de sequência positiva no terminal S durante a falta;

V_{SF2} tensão de sequência negativa no terminal S durante a falta;

I_{SF0} corrente de sequência zero contribuída pelo terminal local durante a falta;

I_{SF1} corrente de sequência positiva contribuída pelo terminal local durante a falta;

I_{SF2} corrente de sequência negativa contribuída pelo terminal local durante a falta;

Z_{l0} impedância de sequência zero da linha de transmissão;

Z_{l1} impedância de sequência positiva da linha de transmissão;

Z_{l2} impedância de sequência negativa da linha de transmissão;

Considerando-se a linha de transmissão transposta ($Z_{l1} = Z_{l2}$) (ANDERSON, 1973), e $V_{Fa} = R_F \cdot I_{Fa}$, a equação (3.5) pode-se reescrita:

$$R_F \cdot I_{Fa} = (V_{SF0} + V_{SF1} + V_{SF2}) - x \cdot (Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2})), \quad (3.6)$$

sendo $V_{SF0} = V_{SF1} = V_{SF2} = V_{SFa}$. Rearranjando os componentes da equação (3.6) e isolando-se x tem-se:

$$x = \frac{V_{SFa} - R_F \cdot I_{Fa}}{(Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2}))}, \quad (3.7)$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação pelo conjugado da corrente de falta (I_{Fa}^*) e sabendo-se que $I_{Fa} \cdot I_{Fa}^* \cdot R_F$ resulta em um número real, pode-se desconsiderar R_F ao ser considerada apenas a parte imaginária da equação, desta forma, resultando na equação para a distância da falta em relação ao terminal local S, conforme:

$$x = \frac{\Im(V_{SFa} \cdot I_{Fa}^*)}{\Im((Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2})) \cdot I_{Fa}^*)}, \quad (3.8)$$

Adotando a equação (3.17) para a tensão no ponto da falta e realizando a substituição de (3.24) nesta equação, resulta em (3.18). Aplicando-se os mesmos passos para obtenção da equação (3.19), pode-se concluir que para as condições do sistema apresentadas na seção 3.1, as equações de LDF para faltas do tipo fase-fase e fase-fase-terra são equivalentes.

Aplicando os passos acima, para faltas entre as fases ac e bc obtém-se as respectivas equações de localização de falta (3.25) e (3.26):

$$x = \frac{\Im\left(\left((1-a) \cdot V_{SF1} + (1-a^2) \cdot V_{SF2}\right) \cdot I_{Fac}^*\right)}{\Im\left(\left(Z_{l1} \cdot \left((1-a) \cdot I_{SF1} + (1-a^2) \cdot I_{SF2}\right)\right) \cdot I_{Fac}^*\right)}, \quad (3.25)$$

$$x = \frac{\Im\left(\left((a^2-a) \cdot V_{SF1} + (a-a^2) \cdot V_{SF2}\right) \cdot I_{Fbc}^*\right)}{\Im\left(\left(Z_{l1} \cdot \left((a^2-a) \cdot I_{SF1} + (a-a^2) \cdot I_{SF2}\right)\right) \cdot I_{Fbc}^*\right)}, \quad (3.26)$$

onde $(a-a^2) = j1,732$.

3.1.3. FALTA TRIFÁSICA E TRIFÁSICA A TERRA

Para o desenvolvimento do equacionamento de localização de faltas do tipo trifásica e trifásica a terra serão adotados respectivamente, os modelos ilustrados na Figura 3.6 e Figura 3.7. O desenvolvimento do equacionamento para LDF será realizado através da análise de *Thévenin* nas fases b e c .

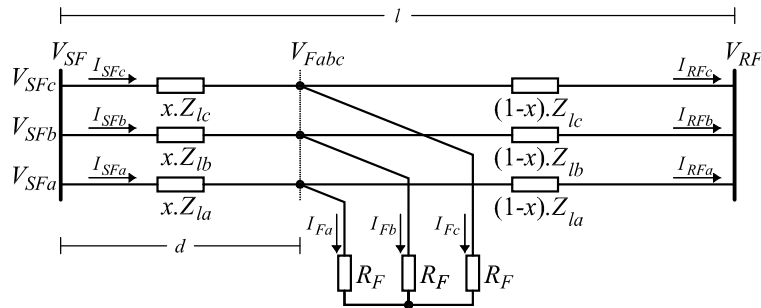


Figura 3.6 Diagrama de falta trifásica.

Por inspeção da Figura 3.5 pode-se adotar as seguintes condições de contorno:

$$V_{Fbc} = V_{Fb} - V_{Fc} = R_F \cdot (I_{Fb} - I_{Fc}), \quad (3.27)$$

$$I_{Fab} = I_{Fa} - I_{Fb}, \quad (3.28)$$

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = R_F \cdot I_{Fab}. \quad (3.29)$$

Substituindo os subscritos m e n da equação (3.3) pelos subscritos das respectivas fases em falta, b e c , pode-se escrever:

$$(V_{Fb} - V_{Fc}) = (V_{SFb} - x \cdot Z_{lb} \cdot I_{SFb}) - (V_{SFc} - x \cdot Z_{lc} \cdot I_{SFc}), \quad (3.30)$$

$$(V_{Fb} - V_{Fc}) = V_{SFb} - x \cdot Z_{lb} \cdot I_{SFb} - V_{SFc} + x \cdot Z_{lc} \cdot I_{SFc}, \quad (3.31)$$

$$(V_{Fb} - V_{Fc}) = (V_{SFb} - V_{SFc}) - x \cdot (Z_{lb} \cdot I_{SFb} - Z_{lc} \cdot I_{SFc}), \quad (3.32)$$

Pode-se ainda, substituir os componentes de fase do lado direito da igualdade da equação (3.32) por componentes de sequência, resultando na equação (3.33).

$$(V_{Fb} - V_{Fc}) = \left((V_{SF0} + a^2 \cdot V_{SF1} + a \cdot V_{SF2}) - (V_{SF0} + a \cdot V_{SF1} + a^2 \cdot V_{SF2}) \right) - x \cdot \left((Z_{l0} \cdot I_{SF0} + a^2 \cdot Z_{l1} \cdot I_{SF1} + a \cdot Z_{l2} \cdot I_{SF2}) - (Z_{l0} \cdot I_{SF0} + a \cdot Z_{l1} \cdot I_{SF1} + a^2 \cdot Z_{l2} \cdot I_{SF2}) \right). \quad (3.33)$$

Substituindo (3.29) em (3.33) e considerando $Z_{l1} = Z_{l2}$, em seguida rearranjar os termos da equação, resulta na equação (3.34):

$$R_{Fb} \cdot I_{Fbc} = \left((a^2 - a) \cdot V_{SF1} + (a - a^2) \cdot V_{SF2} \right) - x \cdot \left(Z_{l1} \cdot \left((a^2 - a) \cdot I_{SF1} + (a - a^2) \cdot I_{SF2} \right) \right). \quad (3.34)$$

Isolando-se x da equação (3.34) e multiplicando-se ambos os lados da equação pelo conjugado da corrente de falta (I_{Fbc}^*), pode-se obter a equação para a distância da falta em relação ao terminal local S, conforme:

$$x = \frac{\Im \left(\left((a^2 - a) \cdot V_{SF1} + (a - a^2) \cdot V_{SF2} \right) \cdot I_{Fbc}^* \right)}{\Im \left(\left(Z_{l1} \cdot \left((a^2 - a) \cdot I_{SF1} + (a - a^2) \cdot I_{SF2} \right) \right) \cdot I_{Fbc}^* \right)}. \quad (3.35)$$

A Figura 3.7 apresenta o diagrama de uma falta trifásica a terra, a partir de sua análise pode-se realizar o desenvolvimento para o equacionamento deste tipo de falta.

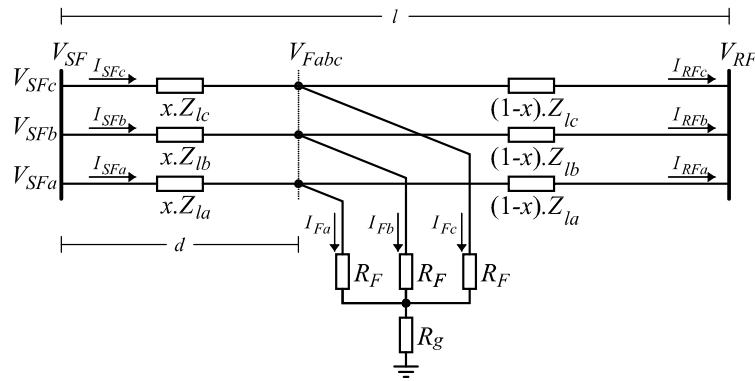


Figura 3.7 Diagrama de falta trifásica a terra.

Por inspeção da Figura 3.7 pode-se obter as seguintes condições de contorno:

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = (R_F \cdot I_{Fb} + R_g (I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc})) - (R_F \cdot I_{Fc} + R_g (I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc})), \quad (3.36)$$

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = R_F (I_{Fb} - I_{Fc}) + R_g (I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc}) - R_g (I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc}), \quad (3.37)$$

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = R_F (I_{Fb} - I_{Fc}), \quad (3.38)$$

$$I_{Fbc} = I_{Fb} - I_{Fc}, \quad (3.39)$$

$$(V_{Fa} - V_{Fb}) = R_F \cdot I_{Fbc}, \quad (3.40)$$

Adotando a equação (3.30) para a tensão no ponto da falta e realizando a substituição de (3.40) nesta equação, a equação resultante é idêntica a equação (3.34). Aplicando-se os mesmos passos utilizados para obtenção da equação (3.35) a equação resultante é idêntica a esta equação.

Comparando as equações (3.35) e (3.26), constata-se que as equações são idênticas, desta forma, pode-se concluir que para as condições do sistema já citadas, as equações de LDF para faltas do tipo fase-fase, fase-fase-terra, trifásica e trifásica a terra são as mesmas.

3.2. ALGORITMO PROPOSTO DE LDF

O primeiro passo antes da localização da falta é a sua detecção. Basicamente o processo de detecção consiste em diagnosticar a existência de faltas, classifica-las e determinar o seu instante de ocorrência. A ocorrência de uma falta está intimamente relacionada com a alteração dos valores de tensão e corrente, além de perturbações em grandezas como: ângulo de fase, frequência. Desta forma, através da comparação dos valores de tensão e corrente monitorados, com valores de referência é possível realizar a detecção de uma falta. A detecção de faltas não é foco deste trabalho de dissertação, portanto, mais informações podem ser encontradas em Filomena (2008) e Iurinic (2012).

Para o desenvolvimento do algoritmo proposto, as seguintes condições iniciais são consideradas:

- I. estão disponíveis medidas de tensão e corrente trifásicas no terminal à montante do sistema a ser analisado (terminal local);
- II. as medidas de tensão e corrente são dadas por números complexos, os quais representam os fasores destas medidas;
- III. são conhecidas as medidas de tensão e corrente pré-falta e durante a falta;
- IV. o tipo de falta a ser analisado é um dado de entrada do algoritmo;
- V. impedância série e a extensão da linha de transmissão são conhecidos em unidade de comprimento;
- VI. a potência de curto circuito (S_{CC}) do sistema equivalente conectado ao terminal remoto é conhecida.

Para exemplificação do algoritmo proposto é empregado os diagramas unifilares apresentados na Figura 3.8 (a) e (b), a qual representa um sistema de transmissão em condição de pré-falta e em falta FT-a, respectivamente.

Além das notações apresentadas anteriormente as notações abaixo são adotadas na Figura 3.8:

- I_{Sa} corrente pré-falta da fase “a”, contribuída pelo terminal local [A];
 I_{Ra} corrente pré-falta da fase “a”, contribuída pelo terminal remoto [A];

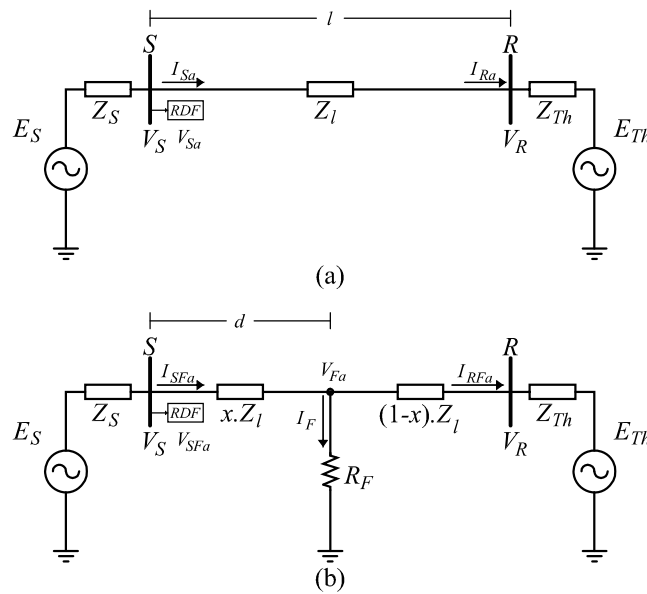


Figura 3.8 Diagrama unifilar para falta FT-a: (a) circuito monofásico pré-falta (b) circuito monofásico em falta.

A seguir são apresentados os passos que descrevem o algoritmo de localização de faltas proposto:

- I. supõe-se que a corrente que circula no terminal R (I_R) é igual à corrente pré-falta no terminal S, conforme a equação (3.41):

$$I_S = I_R, \quad (3.41)$$

- II. estima-se a tensão de fase pré-falta do terminal remoto, através das equações (3.42), (3.43) e (3.44):

$$V_{Ra} = V_{Sa} - (Zl_0 \cdot I_{S0} + Zl_1 (I_{S1} + I_{S2})) \cdot l, \quad (3.42)$$

$$V_{Rb} = V_{Sb} - (Zl_0 \cdot I_{S0} + Zl_1 (a^2 \cdot I_{S1} + a \cdot I_{S2})) \cdot l, \quad (3.43)$$

$$V_{Rc} = V_{Sc} - (Zl_0 \cdot I_{S0} + Zl_1 (a \cdot I_{S1} + a^2 \cdot I_{S2})) \cdot l, \quad (3.44)$$

onde:

V_{Ra} tensão da “fase a” no terminal remoto R;

V_{Rb} tensão da “fase b” no terminal remoto R;

- V_{Rc} tensão da “fase c” no terminal remoto R;
- V_{Sa} tensão da “fase a” no terminal local S;
- V_{Sb} tensão da “fase b” no terminal local S;
- V_{Sc} tensão da “fase c” no terminal local S;
- I_{S0} corrente pré-falta de sequência zero no terminal S;
- I_{S1} corrente pré-falta de sequência positiva no terminal S;
- I_{S2} corrente pré-falta de sequência negativa no terminal S;
- a operador que rotaciona o fasor em 120° ;

- III. assume-se a tensão equivalente de *Thevenin* igual à tensão do terminal remoto, conforme equação (3.45):

$$E_{Th} = V_R. \quad (3.45)$$

- IV. estima-se a impedância equivalente de *Thevenin*, segundo a equação (3.46):

$$Z_{Th} = \frac{|E_{Th}|^2}{S_{CC}^*}, \quad (3.46)$$

onde:

S_{CC}^* Conjugado da potência de curto circuito do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

- V. a partir do valor estimado da impedância equivalente de *Thevenin* pode-se estimar novamente a tensão equivalente de *Thevenin* por meio da equação (3.47):

$$E_{Th} = V_R - I_R \cdot Z_{Th}. \quad (3.47)$$

- VI. conforme proposto em Bretas e Salim (2006), a estimativa inicial da corrente de falta (I_{Fa}) é obtida pela diferença entre a corrente durante a falta no terminal S (I_{SFa}) e a corrente contribuída pelo terminal remoto pré-falta (I_{Ra}), equação (3.41). Desta forma, a partir da equação (3.48) é realizada a primeira estimativa da corrente de falta.

$$I_{Fa} = I_{SFa} - I_{Ra}. \quad (3.48)$$

- VII. estima-se a distância da falta a partir da equação (3.8).
- VIII. uma vez estimada a distância percentual da falta, é realizada a análise de convergência do algoritmo através da (3.49):

$$|x(i) - x(i-1)| < \delta, \quad (3.49)$$

onde i é o número de iterações do algoritmo e δ é uma tolerância pré definida.

IX. se x convergiu finaliza-se o algoritmo, senão passa-se para o próximo passo.

X. determina-se a tensão das fases no ponto da falta, de acordo com equações (3.50), (3.51) e (3.52);

$$V_{Fa} = V_{SFa} - x((I_{SF1} + I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}), \quad (3.50)$$

$$V_{Fb} = (V_{SF0} + a^2 \cdot V_{SF1} + a \cdot V_{SF2}) - x \cdot (Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1}(a^2 \cdot I_{SF1} + a \cdot I_{SF2})), \quad (3.51)$$

$$V_{Fc} = (V_{SF0} + a \cdot V_{SF1} + a^2 \cdot V_{SF2}) - x \cdot (Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1}(a \cdot I_{SF1} + a^2 \cdot I_{SF2})). \quad (3.52)$$

XI. considerando o sistema apresentado na Figura 3.8, obtém-se por meio da equação (3.53) a corrente no terminal remoto durante a falta, sem seguida estima-se novamente a corrente de falta através da equação (3.54);

$$I_{RF} = \frac{(V_F - E_{Th})}{((1-x) \cdot Z_l + Z_{Th})}. \quad (3.53)$$

$$I_{Fa} = I_{SFa} - I_{RFa}. \quad (3.54)$$

XII. com o valor atualizado das correntes de carga retorna-se ao passo VII.

Após a convergência do algoritmo, apresenta-se a estimativa da distância da falta em relação ao terminal local. A Figura 3.9 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto.

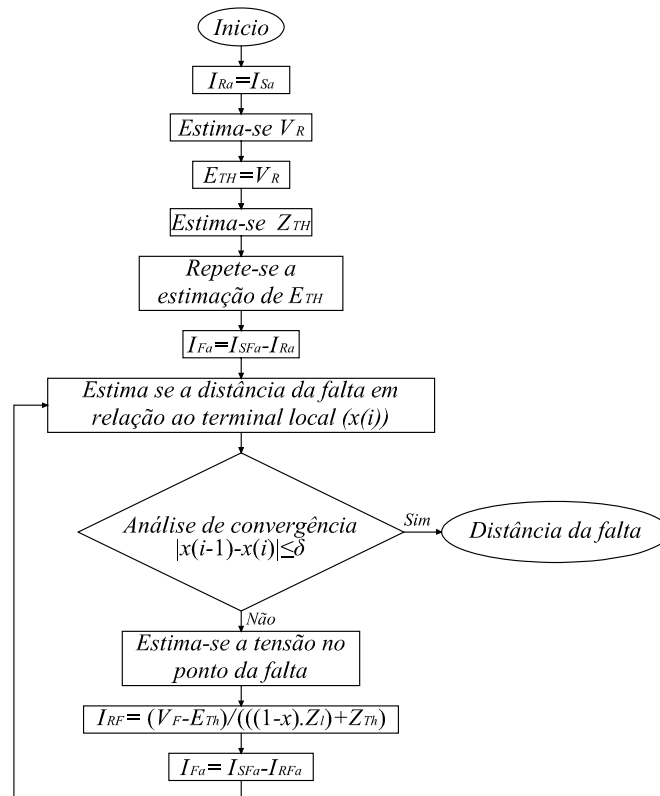


Figura 3.9 Fluxograma do algoritmo de localização de faltas proposto.

3.3. CONSIDERAÇÕES

O método de localização de faltas proposto foi apresentado neste capítulo. O equacionamento apresentado é desenvolvido em componentes simétricas e destina-se a localização de faltas do tipo FT, FF, FFT, FFF e FFFT. A metodologia é fundamentada no cálculo da impedância aparente a partir de medições dos sinais de tensão e corrente. O algoritmo de LFD utiliza como dados de entrada os fasores das componentes fundamentais dos sinais de tensão e corrente e o valor da potência de curto-circuito do sistema equivalente conectado ao terminal remoto, além dos parâmetros referentes a linha de transmissão.

No próximo capítulo será analisado o desempenho do método de localização de faltas proposto nesta dissertação, o qual será comparado com a método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

4. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos para a estimativa da distância da falta, utilizando o algoritmo desenvolvido nesta dissertação e a comparação deste, com o método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

4.1. ESTUDO DE CASO

Para obtenção de dados relativos às faltas no sistema de transmissão, foram realizadas simulações utilizando o programa computacional *ATP/EMTP* (BONEVILLE POWER ADMINISTRATION, 2007). O método proposto e o utilizado para comparação foram implementados no programa computacional *Matlab* (THE MATHWORKS, 2002), em virtude de sua simplicidade de programação e facilidade para posterior implementação em outros tipos de linguagens. Os métodos implementados foram avaliados a partir do erro percentual na estimativa da distância da falta, dada por (4.1) (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010):

$$Erro [\%] = \left| \frac{d_{estimada} - d_{exata}}{l} \right| \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

onde l é o comprimento total da linha de transmissão em km, $d_{estimada}$ e d_{exata} representam respectivamente a distância entre o terminal local e o ponto da falta estimada e exata.

Segundo Grainger e Stevenson (1994), experiências mostram que 70 a 80% das faltas ocorridas em linhas de transmissão são do tipo fase-terra. A Tabela 4.1 apresenta o índice de faltas ao ano a cada 100 km, considerando diferentes níveis de tensão. Pode-se verificar o elevado índice de faltas fase-terra em comparação com outros tipos de faltas.

Tabela 4.1 Índices estatísticos de diferentes tipos de faltas ocorridas em linhas de transmissão com diferentes níveis de tensão (falta/ano/100 km).

Tipo de Falta	Nível de tensão	
	(200-250) kV	(300-500) kV
Fase-terra	2,64	2,2
Fase-fase-terra	0,56	0,16
Envolvendo mais de um circuito de linha	0,11	0,06
Envolvendo circuitos de linha com diferentes níveis de tensão	0,005	0,004

Fonte: Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

Pode se visualizar na Tabela 4.1 que faltas do tipo fase terra apresentam grande incidência em relação aos outros tipos de faltas. No estudo de caso desenvolvido nesta dissertação, serão apresentadas as simulações para faltas FT, FF, FFT, FFF e FFFT. Dar-se-á ênfase particular a faltas FT, realizando-se a análise de sensibilidade do algoritmo frente a variações nos valores de impedância da linha (Z_l), valores da Potência de Curto-Circuito (S_{CC}) do sistema equivalente, da resistência da falta e do local da falta.

Para conclusões sobre a eficiência do algoritmo proposto, se fez necessário a avaliação deste frente aos diferentes tipos de faltas. Através da utilização do programa computacional *ATP/EMTP* obtiveram-se dados simulados de diferentes condições de falta. Dada a grande quantidade de simulações, os casos de faltas são divididos em quatro conjuntos, de acordo com a Tabela 4.2. Após a realização das simulações, todos os fasores trifásicos de tensão e corrente obtidos no terminal local foram filtrados para frequência fundamental através do filtro modificado de Fourier (LIN; LIU, 2002), utilizado também em Salim (2008).

Tabela 4.2 Conjunto de Simulações

Considerações da simulação	Conjunto I	Conjunto II	Conjunto III	Conjunto IV
Ângulo de incidência de falta	0°	45°	90°	0°
Tipos de falta	(FT- <i>a</i> , FT- <i>b</i> , FT- <i>c</i> , FF- <i>ab</i> , FFT- <i>ab</i> , FFF e FFFT)			FT- <i>a</i>
Variação de Z_l	-	-	-	1, 5 e 10 %
Variação da S_{CC}	-	-	-	-20, -10, 10 e 20%
RF	0, 10, 20 e 40 Ω			
Distância da falta	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 % ²			

A seção subsequente apresenta o sistema de transmissão utilizado nas simulações para obtenção dos dados referentes às faltas.

4.1.1. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA SIMULADO

O sistema elétrico de potência utilizado na simulação é apresentado na Figura 4.1, este representa a linha de transmissão que realiza a interconexão das barras do Sistema Interligado Nacional (SIN)³, BAGÉ 2 e P. MÉDICI.

² Percentagem em relação ao comprimento da linha de transmissão (50,9 km).

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros relativos a este sistema, os quais são empregados nas simulações realizadas no programa computacional ATP/EMTP. A barra BAGÉ 2 será considerada como o terminal local e conseqüentemente a barra P. MÉDICI como o terminal remoto.

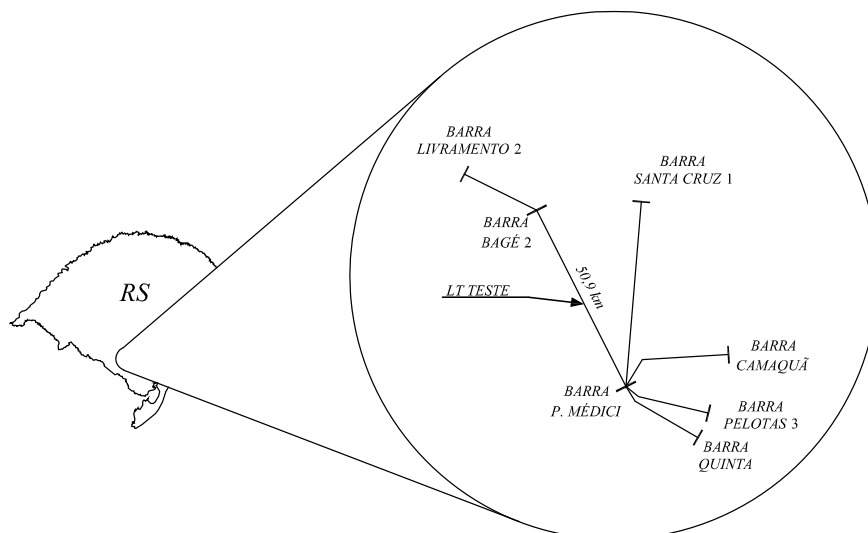


Figura 4.1 Detalhe da linha de transmissão BAGÉ 2- P. MEDICI.

Tabela 4.3 Parâmetros do Sistema Elétrico de Potência Simulado.

Parâmetros	Terminal Local (S)	Terminal Remoto (R)	Linha de Transmissão
Comprimento [km]	-	-	50,9
Nível de tensão [kV]	208,03 $\angle -9,00^\circ$	207,47 $\angle -13,55^\circ$	-
Impedância de Seq. Zero	0,2222+j5,8031 Ω	8,9031+j85,4229 Ω	0,0443+j0,1240 Ω/km
Impedância de Seq. Positiva	0,3650+j14,0840 Ω	34,9352+j140,38 Ω	0,0087+j0,0481 Ω/km
S_{CC} [MVA]	-	24+j138,31	-

A Figura 4.2 apresenta o diagrama unifilar do sistema de transmissão simulado, indicando as respectivas distâncias de faltas em percentagem.

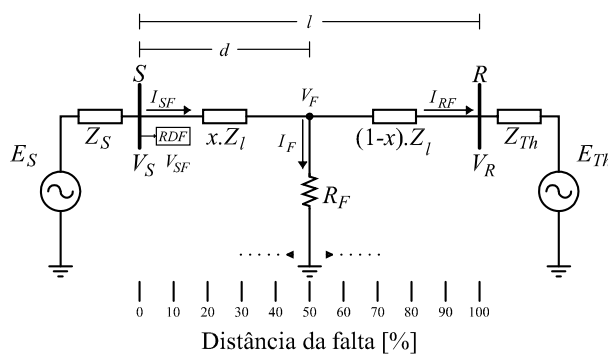


Figura 4.2 Diagrama unifilar do sistema de transmissão sob falta.

³ O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte.

4.2. RESULTADOS DO ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto, conforme apresentado anteriormente possui entre outros, os seguintes dados de entrada: tensão e corrente em frequência fundamental (lidos no terminal local) e o valor da potência de curto-circuito do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

Os resultados apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5 correspondem, respectivamente, aos valores da tensão no ponto da falta (estimada e lida) e os valores da corrente de falta (estimada e lida), em função da distância da falta para faltas FT-*a* com resistências de 0 e 40 Ω.

Tabela 4.4 Valores estimados e lidos da tensão no ponto da falta em função de *d* para RF=0 e RF=40 Ω - Falta FT-*a*.

Distância [%]	RF=0 Ω				RF=40 Ω			
	VF _a Estimada [V]		VF _a Lida [V]		VF _a Estimada [V]		VF _a Lida [V]	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
0	0,00	-98,85	0,00	-98,87	162771,83	-25,66	162750,28	-25,69
10	0,51	-98,40	0,00	-98,43	162102,35	-26,04	162063,60	-26,09
20	0,85	-97,98	0,00	-98,03	161440,23	-26,42	161384,39	-26,49
30	1,16	-97,58	0,00	-97,66	160785,80	-26,78	160712,85	-26,87
40	0,13	-97,22	0,00	-97,32	160138,97	-27,14	160049,37	-27,26
50	0,45	-96,88	0,00	-97,00	159500,10	-27,50	159393,54	-27,63
60	0,75	-96,56	0,00	-96,71	158869,24	-27,84	158745,75	-28,00
70	1,02	-96,27	0,00	-96,43	158246,40	-28,18	158106,10	-28,37
80	1,28	-95,99	0,00	-96,18	157631,83	-28,52	157474,71	-28,73
90	1,20	-95,73	0,00	-95,95	157025,35	-28,85	156851,51	-29,08
100	0,32	-95,86	0,00	-95,73	156427,34	-29,17	156237,10	-29,43

Tabela 4.5 Valores estimados e lidos da corrente de falta em função de *d* para RF=0 e RF=40 Ω - Falta FT-*a*.

Distância [%]	RF=0 Ω				RF=40 Ω			
	IF _a Estimada [A]		IF _a Lida [A]		IF _a Estimada [A]		IF _a Lida [A]	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
0	15811,02	-98,85	15996,50	-98,87	4031,02	-25,66	4068,76	-25,69
10	15316,20	-98,40	15515,61	-98,43	4008,58	-26,04	4051,59	-26,09
20	14853,30	-97,98	15066,01	-98,03	3986,33	-26,42	4034,61	-26,49
30	14419,43	-97,58	14644,87	-97,66	3964,26	-26,78	4017,82	-26,87
40	14012,03	-97,22	14249,70	-97,32	3942,40	-27,14	4001,24	-27,26
50	13628,83	-96,88	13878,26	-97,00	3920,73	-27,50	3984,84	-27,63
60	13267,81	-96,56	13528,58	-96,71	3899,26	-27,84	3968,64	-28,00
70	12927,15	-96,27	13198,89	-96,43	3877,99	-28,18	3952,65	-28,37

Distância [%]	RF=0 Ω				RF=40 Ω			
	IFa Estimada [A]		IFa Lida [A]		IFa Estimada [A]		IFa Lida [A]	
	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo
80	12605,23	-95,99	12887,59	-96,18	3856,92	-28,52	3936,87	-28,73
90	12300,53	-95,73	12593,20	-95,95	3836,06	-28,85	3921,29	-29,08
100	11188,97	-95,86	12314,57	-95,73	3815,41	-29,17	3905,93	-29,43

Pode-se observar nas Tabelas 4.4 e 4.5 que a estimação das variáveis, tensão e corrente, no ponto da falta, apresentam valores muito próximos aos valores lidos, seja em módulo ou em ângulo de fase. Esse passo apresenta grande relevância para a estimação da distância da falta, devido às equações de LDF serem dependentes das variáveis da corrente de falta.

Para a avaliação do método proposto são analisadas as condições de faltas representadas pelos Conjuntos I, II, III e IV, apresentados na Tabela 4.2. Os resultados obtidos para as Conjuntos I, II, e III referem-se a todos os tipos de faltas. Estes resultados serão utilizados para análise da influência da resistência de falta e também na análise da influência da distância da falta. Os resultados pertencentes ao Conjunto IV são empregados na análise da influência das variações dos parâmetros do sistema: potência de curto circuito e impedância da linha.

4.2.1. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FALTA E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

Os resultados pertencentes aos Conjuntos I, II, e III referem-se a todos os tipos de faltas, sendo os erros médios, mínimos e máximos em função da resistência de falta apresentados respectivamente nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8. Nestas Tabelas são apresentados os erros médios, mínimos ou máximos, para quatro valores de resistência de falta, considerando-se 11 pontos de faltas na extensão da linha de transmissão (0,10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%⁴).

Tabela 4.6 Erros percentuais em função de RF para o algoritmo proposto – Conjunto I.

RF [Ω]	Erro Médio [%]						
	FT-a	FT-b	FT-c	FF-ab	FFT-ab	FFF	FFFT
0	0,0037	0,0011	0,0024	0,0029	0,0029	0,0014	0,0014
10	0,6510	0,6486	0,6541	0,3832	0,3799	0,3856	0,3498
20	1,3387	1,3384	1,3437	0,8155	0,8150	0,8191	0,8191
40	2,8260	2,8274	2,8321	1,8368	1,8349	1,8266	1,8266

⁴ Percentagem da distância da falta em relação ao comprimento total da linha de transmissão.

RF [Ω]	Erro Mínimo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0837	0,0841	0,0842	0,3650	0,3615	0,3693	0,0026
20	0,2002	0,2005	0,2006	0,7802	0,7798	0,7839	0,7839
40	0,5285	0,5294	0,5290	1,7575	1,7550	1,7462	1,7462
RF [Ω]	Erro Máximo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0093	0,0037	0,0047	0,0059	0,0059	0,0037	0,0037
10	1,2543	1,2506	1,2616	0,3955	0,3925	0,3963	0,3946
20	2,5534	2,5526	2,5631	0,8422	0,8414	0,8454	0,8454
40	5,2782	5,2801	5,2898	1,9001	1,8982	1,8901	1,8901

Tabela 4.7 Erros percentuais em funo de RF para o algoritmo proposto – Conjunto II.

RF [Ω]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0037	0,0011	0,0025	0,0031	0,0031	0,0013	0,0013
10	0,6510	0,6486	0,6541	0,3832	0,3799	0,3856	0,3856
20	1,3388	1,3384	1,3437	0,8155	0,8150	0,8191	0,7793
40	2,8260	2,7975	2,8321	1,7461	1,8349	1,8266	1,8266
RF [Ω]	Erro Mínimo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0837	0,0841	0,0842	0,3650	0,3615	0,3693	0,3693
20	0,2002	0,2005	0,2006	0,7802	0,7798	0,7839	0,3917
40	0,5285	0,2005	0,5290	0,7990	1,7550	1,7462	1,7462
RF [Ω]	Erro Máximo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0093	0,0037	0,0047	0,0060	0,0060	0,0035	0,0035
10	1,2543	1,2506	1,2616	0,3955	0,3925	0,3963	0,3963
20	2,5533	2,5526	2,5631	0,8422	0,8414	0,8454	0,8454
40	5,2782	5,2801	5,2898	1,9001	1,8982	1,8901	1,8901

Tabela 4.8 Erros percentuais em funo de RF para o algoritmo proposto – Conjunto III.

RF [Ω]	Erro Mdio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0037	0,0011	0,0025	0,0028	0,0028	0,0013	0,0013
10	0,6510	0,6486	0,6541	0,3832	0,3799	0,3856	0,3856
20	1,3388	1,3384	1,3437	0,8155	0,8150	0,7810	0,8191

RF [Ω]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
40	2,8260	2,8274	2,8321	1,8368	1,8349	1,8266	1,8266
RF [Ω]	Erro Mínimo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0837	0,0841	0,0842	0,3650	0,3615	0,3693	0,3693
20	0,2002	0,2005	0,2006	0,7802	0,7798	0,3742	0,7839
40	0,5285	0,5294	0,5290	1,7575	1,7550	1,7462	1,7462
RF [Ω]	Erro Máximo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0093	0,0037	0,0047	0,0059	0,0059	0,0034	0,0034
10	1,2543	1,2506	1,2616	0,3955	0,3925	0,3963	0,3963
20	2,5533	2,5526	2,5631	0,8422	0,8414	0,8454	0,8454
40	5,2782	5,2801	5,2898	1,9001	1,8982	1,8901	1,8901

A análise das Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 permitem verificar a tendência de elevação do valor do erro médio com o aumento da resistência de falta, independentemente do tipo de falta associado. Tal tendência pode ser visualizada na Figura 4.3 a qual apresenta os erros obtidos para faltas FT-*a* em função da resistência de falta, considerando como pontos de faltas às distâncias 0, 10, 20, 40, 60 e 80% do comprimento total da linha.

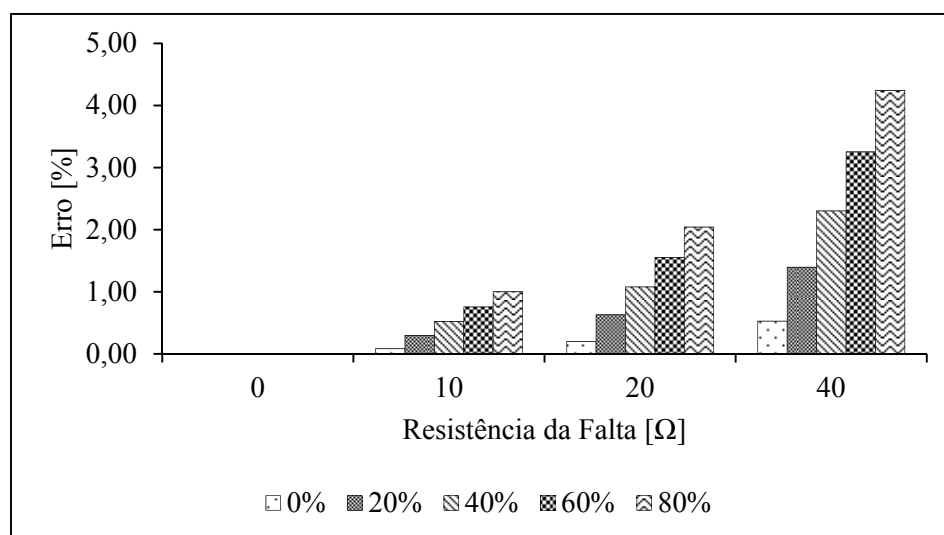


Figura 4.3 Erros em função de RF para faltas FT-*a* – Conjunto I.

A Tabela 4.9 apresenta os erros percentuais em função do ângulo de incidência de falta, para falta FT-*a*. A partir da análise desta tabela pode-se constatar que o ângulo de incidência da falta praticamente não exerce influência sobre os erros percentuais para este tipo de falta.

Tabela 4.9 Erros percentuais em função do ângulo de incidência de falta – FT-*a*.

RF[Ω]	Erro Médio [%]		
	Ângulo de Incidência da falta		
	0°	45°	90°
0	0,0037	0,0037	0,0037
10	0,6510	0,6510	0,6510
20	1,3387	1,3388	1,3388
40	2,8260	2,8260	2,8260
RF[Ω]	Erro Mínimo [%]		
	Ângulo de Incidência da falta		
	0°	45°	90°
0	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0837	0,0837	0,0837
20	0,2002	0,2002	0,2002
40	0,5285	0,5285	0,5285
RF[Ω]	Erro Máximo [%]		
	Ângulo de Incidência da falta		
	0°	45°	90°
0	0,0093	0,0093	0,0093
10	1,2543	1,2543	1,2543
20	2,5534	2,5533	2,5533
40	5,2782	5,2782	5,2782

4.2.2. INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DA FALTA (*d*)

Os resultados pertencentes aos Conjuntos I, II, e III apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 referem-se a todos os tipos de faltas, sendo os erros médios, mínimos e máximos em função da distância da falta apresentados respectivamente em cada tabela.

Tabela 4.10 Erros percentuais em função de *d* para o algoritmo proposto – Conjunto I.

d [%]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,2031	0,2035	0,2035	0,7257	0,7241	0,7249	0,7249
10	0,3905	0,3904	0,3911	0,7347	0,7332	0,7338	0,7338
20	0,5820	0,5816	0,5834	0,7434	0,7419	0,7421	0,7421
30	0,7778	0,7771	0,7800	0,7477	0,7462	0,7467	0,7467
40	0,9776	0,9768	0,9804	0,7551	0,7538	0,7538	0,7538
50	1,1823	1,1811	1,1857	0,7628	0,7613	0,7609	0,7609
60	1,3915	1,3903	1,3958	0,7697	0,7684	0,7676	0,7676
70	1,6053	1,6038	1,6099	0,7722	0,7708	0,7707	0,7707
80	1,8238	1,8222	1,8293	0,7785	0,7774	0,7764	0,7764
90	2,0457	2,0440	2,0505	0,7802	0,7789	0,7792	0,7792

d [%]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
100	2,2738	2,2718	2,2794	0,7853	0,7839	0,7836	0,6852
d [%]	Erro Mínimo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0005	0,0002	0,0001	0,0016	0,0016	0,0009	0,0009
20	0,0012	0,0000	0,0012	0,0033	0,0033	0,0018	0,0018
30	0,0018	0,0003	0,0018	0,0009	0,0009	0,0013	0,0013
40	0,0025	0,0005	0,0024	0,0026	0,0026	0,0004	0,0004
50	0,0032	0,0006	0,0030	0,0043	0,0043	0,0006	0,0006
60	0,0038	0,0008	0,0036	0,0059	0,0059	0,0016	0,0016
70	0,0046	0,0009	0,0041	0,0033	0,0033	0,0015	0,0015
80	0,0052	0,0010	0,0047	0,0048	0,0048	0,0006	0,0006
90	0,0086	0,0037	0,0026	0,0021	0,0021	0,0037	0,0037
100	0,0093	0,0037	0,0032	0,0034	0,0034	0,0026	0,0026
d [%]	Erro Máximo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,5285	0,5294	0,5290	1,7575	1,7550	1,7462	1,7462
10	0,9582	0,9588	0,9597	1,7770	1,7749	1,7665	1,7665
20	1,3971	1,3980	1,4001	1,7959	1,7942	1,7850	1,7850
30	1,8463	1,8474	1,8505	1,8100	1,8076	1,7992	1,7992
40	2,3047	2,3060	2,3096	1,8262	1,8246	1,8166	1,8166
50	2,7741	2,7753	2,7801	1,8426	1,8405	1,8330	1,8330
60	3,2541	3,2558	3,2615	1,8572	1,8557	1,8472	1,8472
70	3,7441	3,7460	3,7525	1,8673	1,8655	1,8577	1,8577
80	4,2456	4,2476	4,2548	1,8809	1,8795	1,8718	1,8718
90	4,7551	4,7573	4,7656	1,8894	1,8878	1,8795	1,8795
100	5,2782	5,2801	5,2898	1,9001	1,8982	1,8901	1,8901

Tabela 4.11 Erros percentuais em função de d para o algoritmo proposto – Conjunto II.

d [%]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,2031	0,1213	0,2035	0,7257	0,7241	0,7249	0,7249
10	0,3905	0,3904	0,3912	0,7348	0,7333	0,7338	0,7338
20	0,5820	0,5816	0,5835	0,4943	0,7420	0,7421	0,7421
30	0,7778	0,7772	0,7800	0,7478	0,7463	0,7466	0,7466
40	0,9777	0,9768	0,9804	0,7552	0,7539	0,7538	0,7538
50	1,1823	1,1812	1,1857	0,7629	0,7614	0,7610	0,7610
60	1,3915	1,3903	1,3958	0,7698	0,7684	0,7677	0,6581
70	1,6053	1,6038	1,6099	0,7723	0,7709	0,7707	0,7707
80	1,8238	1,8222	1,8293	0,7785	0,7774	0,7764	0,7764
90	2,0457	2,0440	2,0505	0,7802	0,7789	0,7791	0,7791

d [%]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
100	2,2738	2,2717	2,2794	0,7853	0,7839	0,7836	0,7836
d [%]	Erro Mínimo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0005	0,0000	0,0003	0,0019	0,0019	0,0009	0,0009
20	0,0012	0,0001	0,0012	0,0036	0,0036	0,0020	0,0020
30	0,0019	0,0003	0,0018	0,0013	0,0013	0,0010	0,0010
40	0,0025	0,0005	0,0024	0,0029	0,0029	0,0000	0,0000
50	0,0032	0,0007	0,0030	0,0045	0,0045	0,0010	0,0010
60	0,0038	0,0008	0,0036	0,0060	0,0060	0,0019	0,0019
70	0,0046	0,0009	0,0041	0,0034	0,0034	0,0013	0,0013
80	0,0053	0,0009	0,0047	0,0049	0,0049	0,0003	0,0003
90	0,0086	0,0037	0,0026	0,0021	0,0021	0,0035	0,0035
100	0,0093	0,0036	0,0032	0,0035	0,0035	0,0025	0,0025
d [%]	Erro Máximo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,5285	0,2005	0,5290	1,7575	1,7550	1,7462	1,7462
10	0,9582	0,9588	0,9597	1,7770	1,7749	1,7665	1,7665
20	1,3971	1,3980	1,4001	0,7990	1,7942	1,7850	1,7850
30	1,8463	1,8474	1,8505	1,8100	1,8076	1,7992	1,7992
40	2,3047	2,3060	2,3096	1,8262	1,8246	1,8166	1,8166
50	2,7739	2,7753	2,7801	1,8426	1,8405	1,8330	1,8330
60	3,2541	3,2558	3,2615	1,8572	1,8557	1,8472	1,8472
70	3,7441	3,7460	3,7525	1,8673	1,8655	1,8577	1,8577
80	4,2456	4,2476	4,2548	1,8809	1,8795	1,8718	1,8718
90	4,7551	4,7573	4,7656	1,8894	1,8878	1,8795	1,8795
100	5,2782	5,2801	5,2898	1,9001	1,8982	1,8901	1,8901

Tabela 4.12 Erros percentuais em função de d para o algoritmo proposto – Conjunto III.

d [%]	Erro Médio [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,2031	0,2035	0,2035	0,7257	0,7241	0,7249	0,7249
10	0,3905	0,3904	0,3913	0,7345	0,7330	0,6289	0,7337
20	0,5820	0,5816	0,5835	0,7433	0,7417	0,7419	0,7419
30	0,7778	0,7772	0,7800	0,7476	0,7461	0,7470	0,7470
40	0,9776	0,9769	0,9804	0,7551	0,7537	0,7540	0,7540
50	1,1823	1,1812	1,1857	0,7628	0,7613	0,7609	0,7609
60	1,3915	1,3903	1,3958	0,7697	0,7684	0,7676	0,7676
70	1,6053	1,6038	1,6099	0,7722	0,7709	0,7707	0,7707
80	1,8238	1,8222	1,8292	0,7785	0,7774	0,7764	0,7764
90	2,0457	2,0440	2,0505	0,7802	0,7790	0,7791	0,7791

100	2,2738	2,2717	2,2794	0,7853	0,7839	0,7836	0,7836
d [%]	Erro Mínimo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0006	0,0002	0,0006	0,0009	0,0009	0,0005	0,0005
20	0,0012	0,0004	0,0012	0,0027	0,0027	0,0010	0,0010
30	0,0019	0,0005	0,0018	0,0006	0,0006	0,0024	0,0024
40	0,0025	0,0006	0,0024	0,0024	0,0024	0,0011	0,0011
50	0,0032	0,0007	0,0030	0,0042	0,0042	0,0003	0,0003
60	0,0038	0,0008	0,0036	0,0059	0,0059	0,0016	0,0016
70	0,0046	0,0009	0,0041	0,0034	0,0034	0,0013	0,0013
80	0,0053	0,0009	0,0047	0,0048	0,0048	0,0003	0,0003
90	0,0086	0,0037	0,0026	0,0022	0,0022	0,0034	0,0034
100	0,0093	0,0036	0,0032	0,0034	0,0034	0,0025	0,0025
d [%]	Erro Máximo [%]						
	FT- <i>a</i>	FT- <i>b</i>	FT- <i>c</i>	FF- <i>ab</i>	FFT- <i>ab</i>	FFF	FFFT
0	0,5285	0,5294	0,5290	1,7575	1,7550	1,7462	1,7462
10	0,9582	0,9588	0,9597	1,7770	1,7749	1,7665	1,7665
20	1,3971	1,3980	1,4001	1,7959	1,7942	1,7850	1,7850
30	1,8463	1,8474	1,8505	1,8100	1,8076	1,7992	1,7992
40	2,3047	2,3060	2,3096	1,8262	1,8246	1,8166	1,8166
50	2,7739	2,7753	2,7801	1,8426	1,8405	1,8330	1,8330
60	3,2541	3,2558	3,2615	1,8572	1,8557	1,8472	1,8472
70	3,7441	3,7460	3,7525	1,8673	1,8655	1,8577	1,8577
80	4,2456	4,2476	4,2548	1,8809	1,8795	1,8718	1,8718
90	4,7551	4,7573	4,7656	1,8894	1,8878	1,8795	1,8795
100	5,2782	5,2801	5,2898	1,9001	1,8982	1,8901	1,8901

Analisando os valores de erros médios apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, para os diferentes conjuntos de simulações, pode-se verificar a tendência destes em elevar-se com o aumento da distância da falta, independentemente do tipo de falta associado. Tal tendência pode ser visualizada na Figura 4.4 com os erros obtidos para faltas FT-*a* em função da distância da falta, considerando-se os quatro valores para a resistência de falta.

Nota-se ainda, a partir das Figuras 4.3 e 4.4 que a influência da distância da falta é menor do que a influência da resistência de falta. Graficamente pode-se notar que o aumento da resistência de falta, proporciona a elevação superior do erro em relação ao aumento do erro proporcionado pela distância da falta.

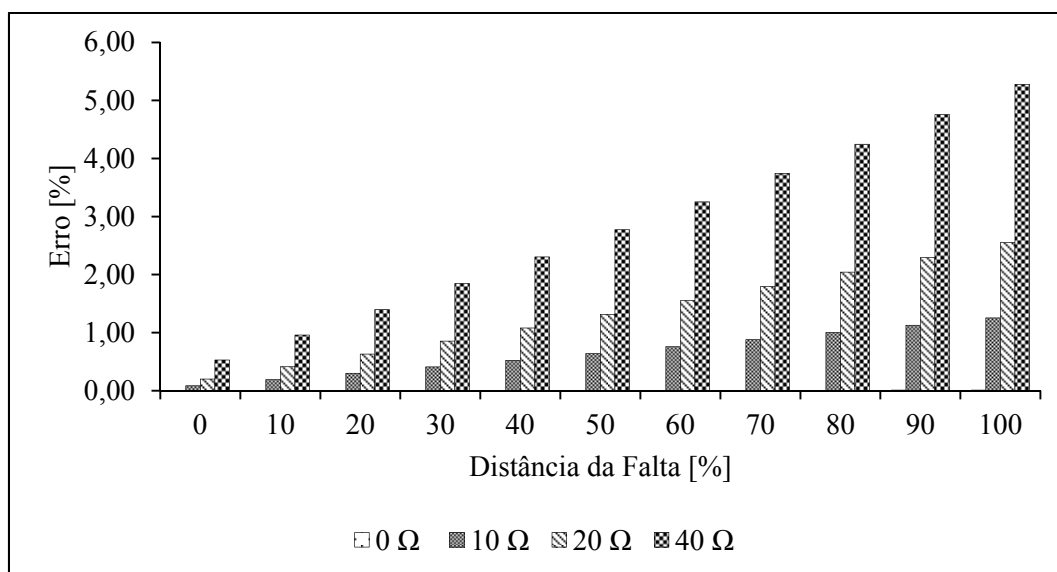


Figura 4.4 Erros percentuais em função de d para faltas FT- a – Conjunto I.

4.2.3. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA: POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO (S_{CC}) E IMPEDÂNCIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO (Z_L)

Nesta seção são apresentados os resultados pertencentes à variação dos parâmetros do sistema: potência de curto-circuito e impedância da linha de transmissão. A Tabela 4.13 apresenta os valores adotados para variação S_{CC} .

Tabela 4.13 Variação da S_{CC} do sistema equivalente conectado ao terminal R.

Varição	SCC [MVA]
-20 %	112,30
-10 %	126,34
0 %	140,38
10 %	154,42
20 %	168,46

Os resultados apresentados na Tabela 4.14 pertencem às simulações do Conjunto IV e referem-se à faltas FT- a , considerando as variações da S_{CC} apresentadas na Tabela 4.13. Sendo os erros médios, mínimos e máximos em função da distância da falta, para quatro valores de resistência de falta (0, 10, 20 e 40 Ω).

Tabela 4.14 Erros percentuais em função de d para variações de S_{CC} – Conjunto IV.

RF [Ω]	Erro Médio [%]				
	Variação da S_{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
0	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
10	0,3798	0,4782	0,6510	0,8515	1,0499

RF[Ω]	Erro Médio [%]				
	Variação da S _{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
20	0,7676	0,9765	1,3387	1,7471	2,1515
40	1,5824	2,0443	2,8260	3,6722	4,5115
RF[Ω]	Erro Mínimo [%]				
	Variação da S _{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0126	0,0271	0,0837	0,3025	0,5192
20	0,0042	0,0282	0,2002	0,6445	1,0847
40	0,0786	0,0503	0,5285	1,4434	2,3515
RF[Ω]	Erro Máximo [%]				
	Variação da S _{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
0	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093
10	0,8831	1,0699	1,2543	1,4365	1,6165
20	1,7955	2,1766	2,5534	2,9260	3,2943
40	3,7004	4,4931	5,2782	6,0558	6,8261

Analisando-se a Tabela 4.14 visualiza-se que a variação da S_{CC} não apresenta influência na alteração do valor do erro percentual médio para faltas sólidas, ou seja, RF=0 Ω. Entretanto para faltas com resistências maiores que zero, ocorre alteração no valor do erro médio, sendo notável a sua elevação com variação positiva da S_{CC}.

As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, apresentam os erros percentuais considerando-se as variações da S_{CC}. Observar-se que os erros percentuais são inferiores a 2,6 % para distâncias de falta menores do que 70 % do comprimento da linha e resistência de falta menor ou igual a 20 Ω. Para resistência de falta menor ou igual a 10 Ω e distância da falta inferior a 90 % do comprimento da linha, o valor do erro percentual apresentou-se inferior a 1,5%. O caso crítico (6,8262 %) ocorre para distância da falta superior a 90 % do comprimento da linha, resistência de falta igual 40 Ω e variação de 20% da SCC.

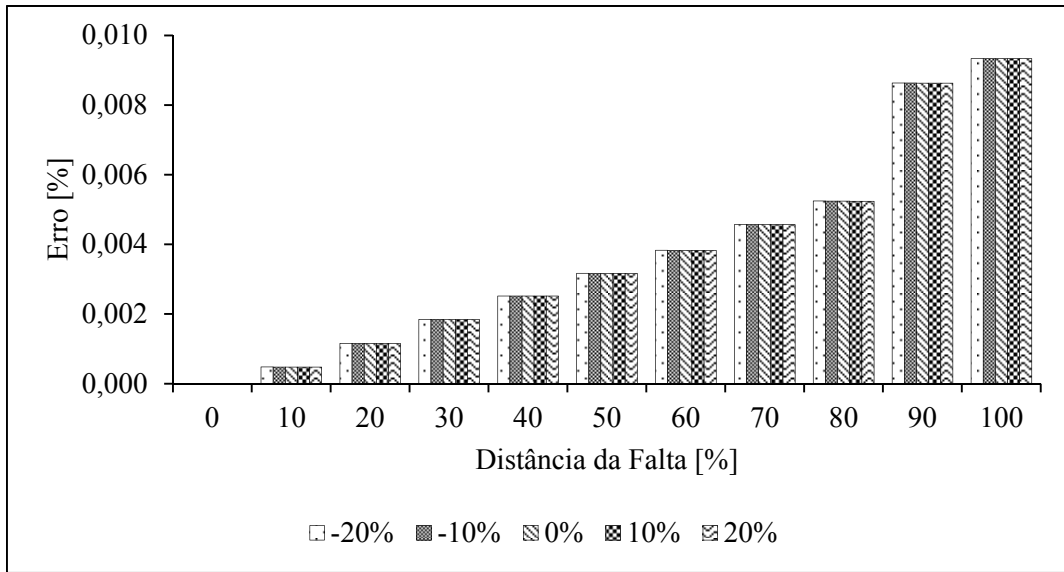


Figura 4.5 Erros percentuais em função de d para variações de S_{CC} , $RF=0 \Omega$ – Conjunto IV.

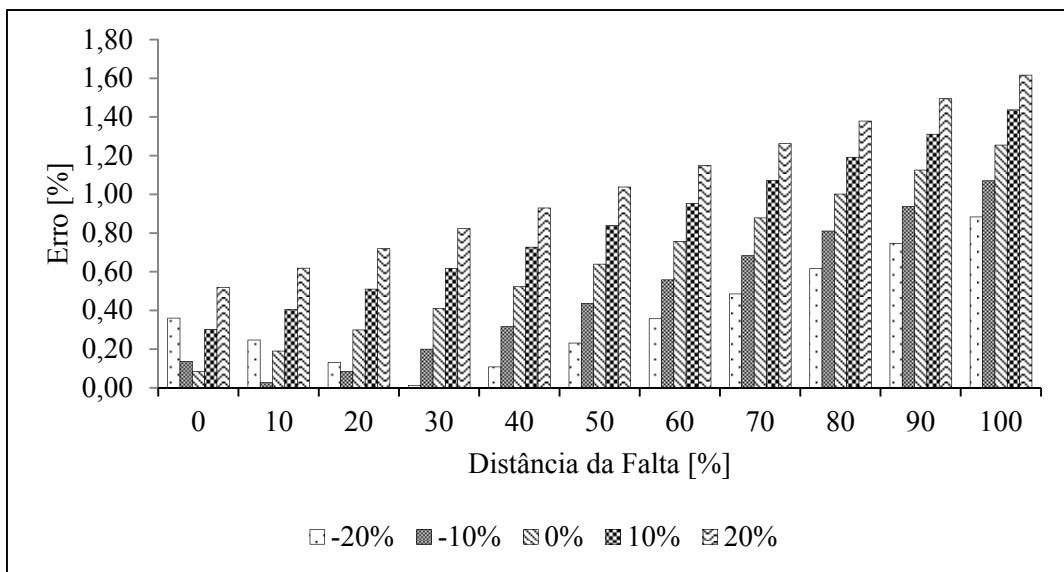


Figura 4.6 Erros percentuais em função de d para variações de S_{CC} , $RF=10 \Omega$ – Conjunto IV.

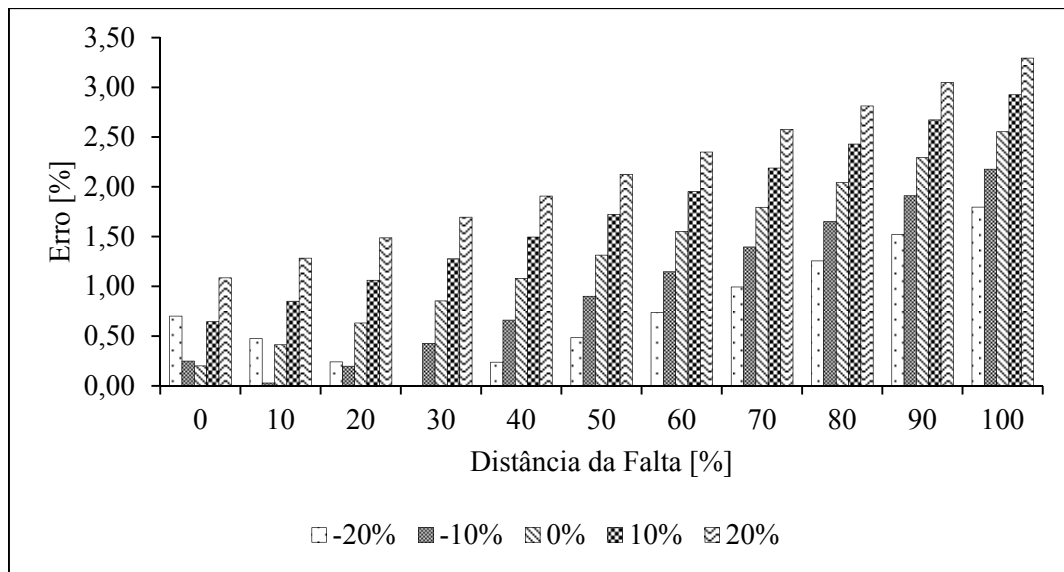


Figura 4.7 Erros percentuais em função de d para variações de S_{CC} , $RF=20 \Omega$ – Conjunto IV.

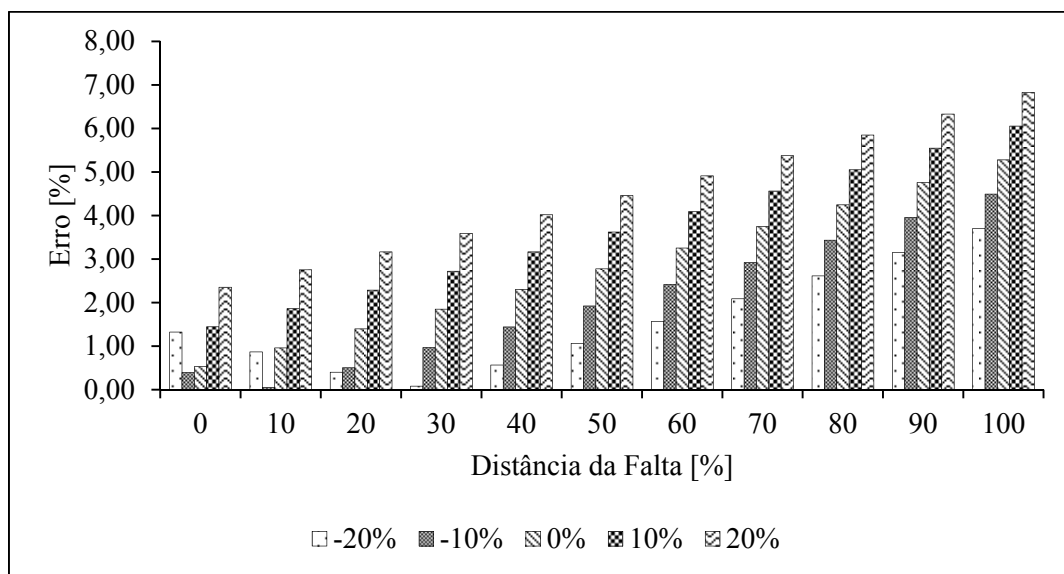


Figura 4.8 Erros percentuais em função de d para variações de S_{CC} , $RF=40 \Omega$ – Conjunto IV.

A Tabela 4.15 apresenta os valores adotados para a variação do parâmetro: impedância da linha de transmissão (Z_l).

Tabela 4.15 Variação da impedância da linha de transmissão (Z_l).

Varição	Z_l [Ω/km]
0 %	$Z_{l0}=0,0443 + j0,1240$
	$Z_{l1}=0,0087 + j0,0481$

Variação	Z_l [Ω /km]
1 %	$Z_{l0}=0,0447 + j0,1252$
	$Z_{l1}=0,0088 + j0,0486$
5 %	$Z_{l0}=0,0465 + j0,1302$
	$Z_{l1}=0,0091 + j0,0505$
10 %	$Z_{l0}=0,0487 + j0,1364$
	$Z_{l1}=0,0096 + j0,0529$

Os resultados apresentados na Tabela 4.16 pertencem às simulações do Conjunto IV, considerando-se as variações de Z_l apresentadas na Tabela 4.15. Os erros médios, mínimos e máximos são apresentados em função da resistência de falta para variação da impedância da linha.

Tabela 4.16 Erros percentuais em função de RF para variações de Z_l – Conjunto IV.

RF [Ω]	Erro Médio [%]			
	Variação de Z_l [%]			
	0	1	5	10
0	0,0037	0,4914	2,3774	4,5421
10	0,6510	1,1391	3,0011	5,1376
20	1,3387	1,8198	3,6561	5,7628
40	2,8260	3,2930	5,0722	7,1141
RF [Ω]	Erro Mínimo [%]			
	Variação de Z_l [%]			
	0	1	5	10
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0837	0,0828	0,0794	0,0754
20	0,2002	0,1981	0,1899	0,1805
40	0,5285	0,5228	0,5012	0,4764
RF [Ω]	Erro Máximo [%]			
	Variação de Z_l [%]			
	0	1	5	10
0	0,0093	0,9809	4,7530	9,0824
10	1,2543	2,2267	5,9572	10,2325
20	2,5534	3,5103	7,1949	11,4145
40	5,2782	6,2164	9,7905	13,8926

Analisando-se a Tabela 4.16 pode-se visualizar que a variação de Z_l apresenta influência na alteração do valor do erro percentual médio para todas as faixas de resistências de faltas (0, 10, 20 e 40 Ω). Estas variações proporcionam respectivamente uma elevação máxima no valor do erro médio de aproximadamente 0,49, 2,37 e 4,54.

A Figura 4.9 apresenta os erros percentuais em função da distância da falta, considerando-se uma falta FT- a , com resistência de falta igual a 10 Ω e variações de

10% da SCC e Z_l . A partir da análise desta figura verifica-se que a influência da variação do parâmetro Z_l representa uma elevação superior no valor do erro percentual quando comparado com a influência da variação do parâmetro SCC.

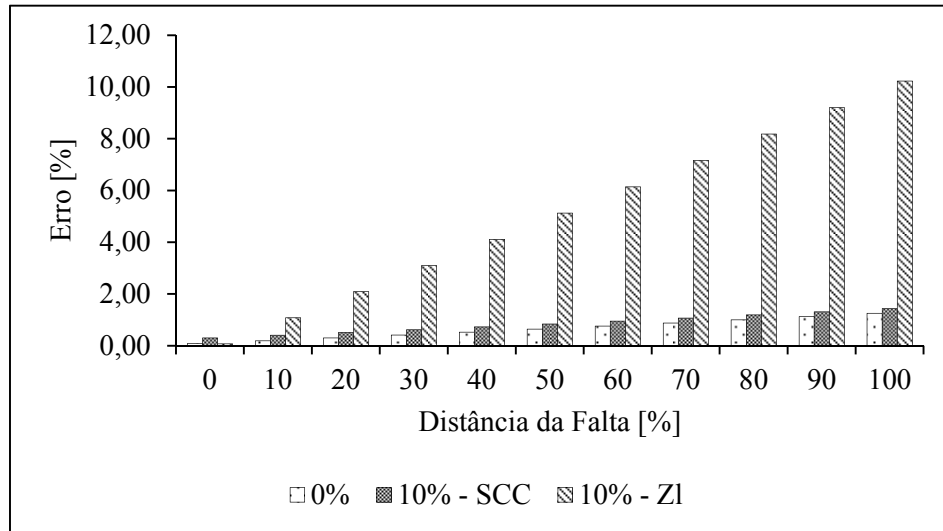


Figura 4.9 Erros percentuais em função de d para variações da S_{CC} e Z_l .

4.3. MÉTODO APRESENTADO EM SAHA, IZYKOWSKI E ROSOLOWSKI (2010)

Objetivando analisar a eficiência do algoritmo proposto para LDF em sistemas de transmissão com dados de apenas um terminal, faz-se necessário a comparação de seus resultados frente aos resultados obtidos por um método existente e já difundido, como o apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

Neste método, através da lei de *Kirchhoff* de tensão chega-se a equação (4.2) da malha que compreende o segmento da linha em falta e o caminho da resistência de falta, vista do terminal local:

$$V_{SF} = (d \cdot Z_l) \cdot I_S + R_F \cdot I_F. \quad (4.2)$$

A corrente de falta é determinada pela equação (4.3):

$$I_F = \left(\frac{\Delta I_S}{k_F} \right), \quad (4.3)$$

onde ΔI_S é a diferença entre a corrente durante a falta e a corrente pré-falta lida no terminal local, k_F é o fator de distribuição de corrente determinado pela equação (4.4):

$$k_F = |k_F| e^{j\gamma} = \frac{-dZ_l + Z_l + Z_{Th}}{Z_S + Z_l + Z_{Th}}. \quad (4.4)$$

Substituindo (4.4) e (4.3) em (4.2), multiplicando a equação resultante por $(e^{j\gamma} \Delta I_S)$, em seguida isolando-se d e considerando apenas a parte imaginária da equação chega-se a equação de localização (4.5):

$$d = \frac{\Im(V_{SF} \cdot \Delta I_S^* \cdot e^{j\gamma})}{\Im(Z_l \cdot I_{SF} \cdot \Delta I_S^* \cdot e^{j\gamma})} \quad (4.5)$$

Os resultados apresentados a seguir referem-se à faltas FT- a , considerando-se quatro valores de resistências de falta e 11 pontos de faltas ao longo da linha de transmissão.

4.3.1. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FALTA E ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

A Tabela 4.17 apresenta respectivamente os erros médios, mínimos e máximos em função da resistência e do ângulo de incidência de faltas.

Tabela 4.17 Erros percentuais em função de RF para o método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – FT- a .

RF[Ω]	Erro Médio [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
0	0,3811	0,3811	0,3811
10	1,0510	1,0510	1,0510
20	1,6936	1,6936	1,6936
40	2,9117	2,9117	2,9117
RF[Ω]	Erro Mínimo [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
0	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,1696	0,1696	0,1696
20	0,3143	0,3143	0,3143
40	0,5253	0,5253	0,5253
RF[Ω]	Erro Máximo [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
0	1,1371	1,1372	1,1372
10	2,3255	2,3255	2,3255
20	3,4884	3,4884	3,4884
40	5,7586	5,7586	5,7586

Analisando os valores referentes aos erros médios na Tabela 4.17, é possível verificar que há uma tendência do valor do erro percentual elevar-se com o aumento da

resistência de falta. Pode-se verificar também a, que o ângulo de incidência da falta não exerce influência sobre o valor deste erro.

4.3.2. INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DA FALTA (d)

A

Tabela 4.18 apresenta respectivamente os erros médios, mínimos e máximos em função da função da distância e do ângulo de incidência para faltas do tipo FT-a.

Tabela 4.18 Erros percentuais em função de d para o método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

d [%]	Erro Médio [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
0	0,2523	0,2523	0,2523
10	0,4249	0,4249	0,4249
20	0,6204	0,6204	0,6204
30	0,8445	0,8445	0,8445
40	1,0934	1,0934	1,0934
50	1,3717	1,3717	1,3717
60	1,6774	1,6775	1,6775
70	2,0101	2,0101	2,0101
80	2,3717	2,3717	2,3717
90	2,7590	2,7590	2,7590
100	3,1774	3,1774	3,1774
d [%]	Erro Mínimo [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
0	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0023	0,0023	0,0022
20	0,0288	0,0287	0,0287
30	0,0797	0,0797	0,0797
40	0,1554	0,1554	0,1554
50	0,2560	0,2560	0,2560
60	0,3817	0,3817	0,3817
70	0,5327	0,5327	0,5327
80	0,7093	0,7093	0,7093
90	0,9089	0,9089	0,9089
100	1,1371	1,1372	1,1372
d [%]	Erro Máximo [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
0	0,5253	0,5253	0,5253

d [%]	Erro Máximo [%]		
	Ângulo de Incidência [°]		
	0	45	90
10	0,9194	0,9194	0,9194
20	1,3279	1,3279	1,3279
30	1,7739	1,7739	1,7739
40	2,2496	2,2496	2,2496
50	2,7567	2,7566	2,7566
60	3,2949	3,2949	3,2949
70	3,8637	3,8637	3,8637
80	4,4647	4,4647	4,4647
90	5,0944	5,0944	5,0944
100	5,7586	5,7586	5,7586

Analisando os valores dos erros apresentados na

Tabela 4.18 pode-se verificar a influência da distância da falta (d). Observa-se tendência dos erros percentuais elevarem-se com o aumento da distância da falta.

4.3.3. INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA: POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO (S_{CC}) E IMPEDÂNCIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO (Z_L)

As Tabelas 4.19 e 4.20 apresentam respectivamente os erros percentuais da metodologia apresentada em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010), referentes às variações dos parâmetros do sistema: potência de curto-circuito e impedância da linha de transmissão. As variações dos parâmetros do sistema são as mesmas apresentadas nas Tabelas 4.13 e 4.15.

Tabela 4.19 Erros percentuais em função de RF para variações de S_{CC} - Conjunto IV.

RF[Ω]	Erro Médio [%]				
	Variação da S_{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
0	0,3814	0,3813	0,3811	0,3811	0,3810
10	0,7265	0,7870	1,0510	1,0410	1,2166
20	1,0804	1,1815	1,6936	1,6713	2,0239
40	1,7812	1,9350	2,9117	2,8593	3,5707
RF[Ω]	Erro Mínimo [%]				
	Variação da S_{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,0656	0,0485	0,1696	0,0842	0,2824

20	0,0927	0,1423	0,3143	0,1427	0,5401
RF[Ω]	Erro Mínimo [%]				
	Variação da S_{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
40	0,0860	0,0902	0,5253	0,1798	0,9779
RF[Ω]	Erro Máximo [%]				
	Variação da S_{CC} [%]				
	-20	-10	0	10	20
0	1,1379	1,1376	1,1371	1,1370	1,1367
10	1,9291	2,0867	2,3255	2,3930	2,5446
20	2,6826	2,9985	3,4884	3,6199	3,9255
40	4,1130	4,7497	5,7586	6,0067	6,6273

Tabela 4.20 Erros percentuais em função de RF para variações de Z_1 – Conjunto IV.

RF[Ω]	Erro Médio [%]			
	Variação de Z_1 [%]			
	0	1	5	10
0	0,3811	0,8724	2,7440	4,8920
10	1,0510	1,3712	3,2240	5,3503
20	1,6936	1,8439	3,6790	5,7846
40	2,9117	2,7398	4,5300	6,5970
RF[Ω]	Erro Mínimo [%]			
	Variação de Z_1 [%]			
	0	1	5	10
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	0,1696	0,1006	0,1109	0,1063
20	0,3143	0,0730	0,2467	0,2364
40	0,5253	0,0592	0,3227	0,5706
RF[Ω]	Erro Máximo [%]			
	Variação de Z_1 [%]			
	0	1	5	10
0	1,1371	2,1162	5,8451	10,1248
10	2,3255	3,2076	6,8981	11,1305
20	3,4884	4,2684	7,9160	12,1025
40	5,7586	6,3181	9,8882	13,9858

Analisando a Tabela 4.19 pode-se constatar que a variação da S_{CC} apresenta uma pequena influência na alteração do valor do erro percentual médio para faltas sólidas. Entretanto para faltas com resistências maiores que zero, é notável a alteração deste erro com variação positiva da S_{CC} , alcançando um acréscimo do erro percentual médio de aproximadamente 0,66 %.

É possível visualizar com a análise da Tabela 4.20, que a variação de Z_l apresenta influência na alteração do valor do erro percentual médio para todas as faixas de resistências de faltas. Estas variações proporcionam a elevação do valor do erro médio de aproximadamente 0,49, 2,36 e 4,51, respectivamente para variações de 1, 5 e 10 %.

A Figura 4.10 apresenta os erros percentuais em função da distância da falta, considerando-se uma falta FT- a , com resistência de falta igual a 10Ω e variações de 10% da S_{CC} e Z_l . Da mesma forma que no método proposto, pode-se visualizar nesta figura, que influência da variação do parâmetro Z_l , representa um erro percentual superior ao erro percentual referente a influência da variação do parâmetro S_{CC} .

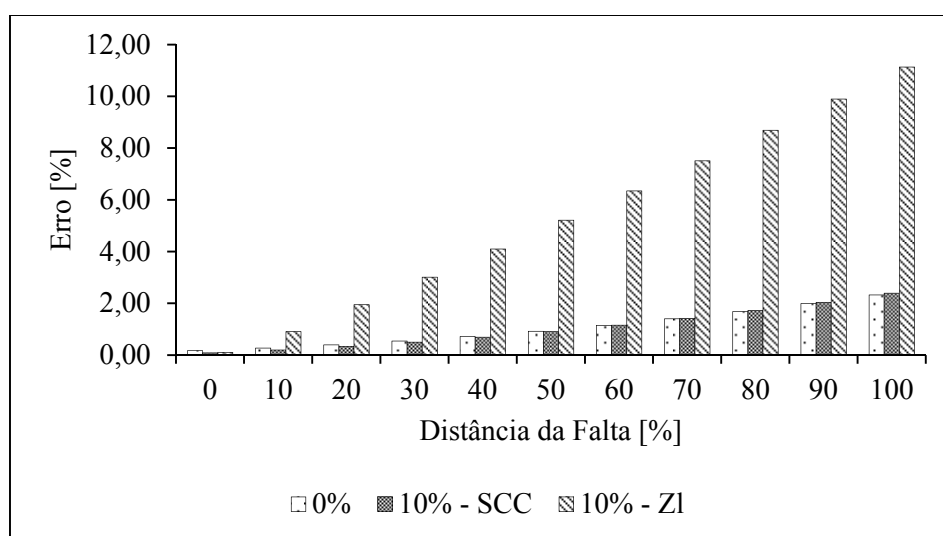


Figura 4.10 Erros percentuais em função de d para variações da S_{CC} e Z_l .

4.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS- MÉTODO PROPOSTO VERSUS SAHA, IZYKOWSKI, ROSOLOWSKI (2010)

Na Tabela 4.21, visualiza-se a comparação entre os erros percentuais obtidos pelo algoritmo proposto e a metodologia empregada para comparação. Esta tabela apresenta os erros percentuais em função da resistência de falta, considerando-se 11 pontos de falta e ângulo de incidência igual a zero.

Tabela 4.21 Erros percentuais em função de RF – método proposto VS Saha, Izykowski, Rosolowski (2010).

RF[Ω]	Erro Médio [%]	
	Método	
	Proposta	Saha <i>et al</i> (2010)
0	0,0037	0,3811

Erro Médio [%]		
RF[Ω]	Método	
	Proposta	Saha <i>et al</i> (2010)
10	0,6510	1,0510
20	1,3387	1,6936
40	2,8260	2,9117
Erro Mínimo [%]		
RF[Ω]	Método	
	Proposta	Saha <i>et al</i> (2010)
0	0,0000	0,0000
10	0,0837	0,1696
20	0,2002	0,3143
40	0,5285	0,5253
Erro Máximo [%]		
RF[Ω]	Método	
	Proposta	Saha <i>et al</i> (2010)
0	0,0093	1,1371
10	1,2543	2,3255
20	2,5534	3,4884
40	5,2782	5,7586

As Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 apresentam graficamente os erros percentuais em função da distância da falta para ambas às metodologias, sendo respectivamente para faltas com RF=0, 10, 20 e 40 Ω .

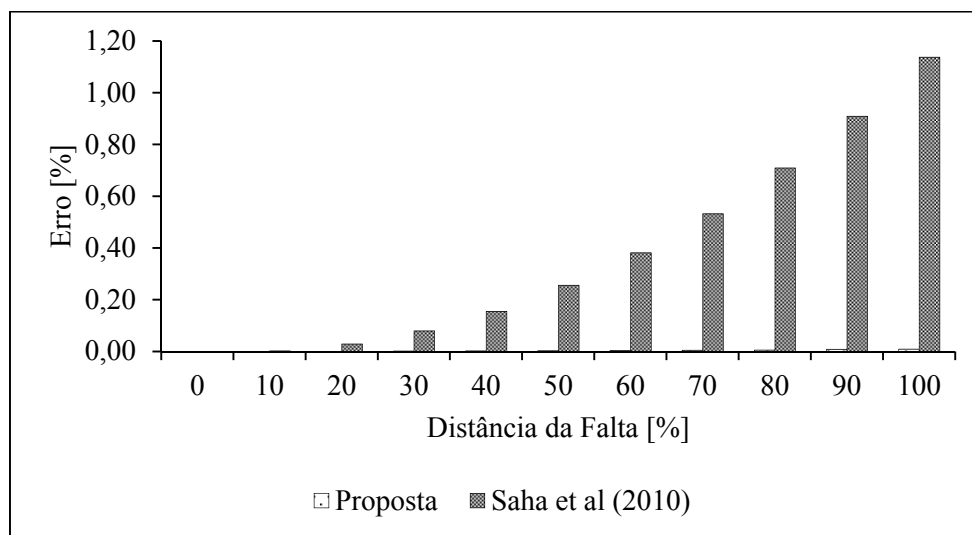


Figura 4.11 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=0 Ω .

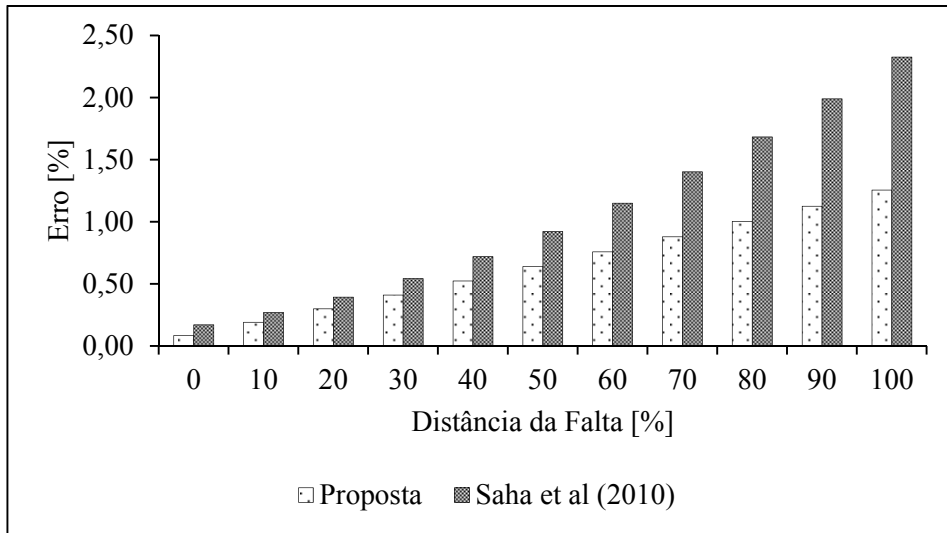


Figura 4.12 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=10 Ω .

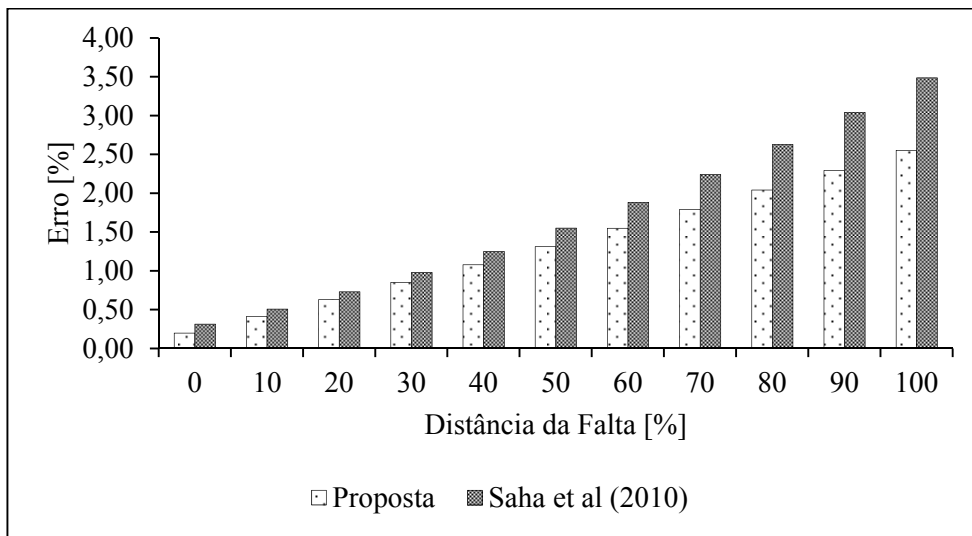


Figura 4.13 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=20 Ω .

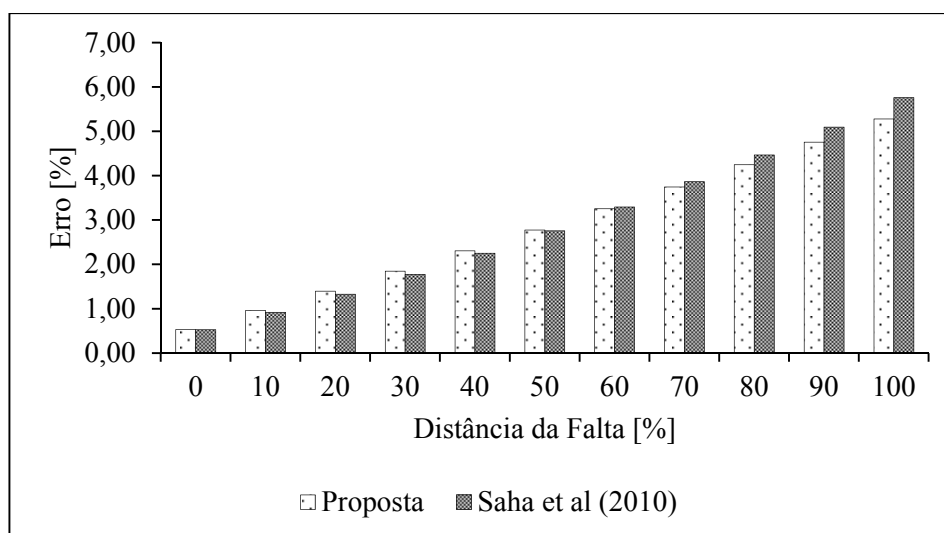


Figura 4.14 Erros percentuais em função de d , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) – falta FT- a e RF=40 Ω .

A partir da análise da Tabela 4.21 e das Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 evidencia-se que a método proposto proporciona a redução dos erros percentuais. Em comparação com a metodologia apresentada em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) a redução do erro médio alcançou 0,4 %, enquanto para o erro máximo a redução é de até 1,12%.

A Tabela 4.22 apresenta a comparação entre os erros percentuais resultantes da utilização do método proposto e o apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010). Estes erros são apresentados em função da resistência de falta, para uma falta FT- a , levando-se em consideração as variações da S_{CC} . Pode-se constatar que para variações negativas da S_{CC} , excluindo-se o erro médio para RF=40 Ω e variação de -10 %, os erros médios pertencentes a metodologia desenvolvida apresentaram-se inferiores aos pertencentes a metodologia empregada para comparação. A mesma situação ocorre para variações positivas da S_{CC} , excluindo-se as situações de variação de 10 % e 20 % para a resistência de falta superior a 20 ohms.

Tabela 4.22 Erros percentuais em função de RF para variação da S_{CC} , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

RF[Ω]	Variação do Erro Médio [%]							
	Método proposto				Método Saha <i>et al</i> (2010)			
	-20 [%]	-10 [%]	10 [%]	20 [%]	-20 [%]	-10 [%]	10 [%]	20 [%]
0	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,3814	0,3813	0,3811	0,3810
10	0,3798	0,4782	0,8515	1,0499	0,7265	0,7870	1,0410	1,2166
20	0,7676	0,9765	1,7471	2,1515	1,0804	1,1815	1,6713	2,0239
40	1,5824	2,0443	3,6722	4,5115	1,7812	1,9350	2,8593	3,5707

As variações da impedância da linha foram consideradas em ambas as metodologias, desta forma, a Tabela 4.23 apresenta a comparação entre os erros percentuais médios resultantes de suas utilizações. Estes erros são apresentados em função da resistência de falta, para uma falta FT-*a*, levando-se em consideração as variações de Z_l .

É possível verificar que os erros médios percentuais para faltas com resistência menores que 40Ω , referentes ao método proposto, apresentam-se inferiores aos erros percentuais pertencentes ao método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

Tabela 4.23 Erros percentuais em função de RF para variação de Z_l , método proposto versus Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

RF[Ω]	Variação do Erro Médio [%]					
	Método Proposto			Método Saha <i>et al</i> (2010)		
	1 [%]	5 [%]	10 [%]	1 [%]	5 [%]	10 [%]
0	0,4914	2,3774	4,5421	0,8724	2,7440	4,8920
10	1,1391	3,0011	5,1376	1,3712	3,2240	5,3503
20	1,8198	3,6561	5,7628	1,8439	3,6790	5,7846
40	3,2930	5,0722	7,1141	2,7398	4,5300	6,5970

4.5. CONSIDERAÇÕES

A partir dos erros percentuais resultantes do método proposto é possível realizar a análise de seu desempenho. Nos resultados apresentados na seção 4.2.1, é notável o aumento do erro devido ao aumento da resistência de falta.

Na seção 4.2.2, em todos os casos a tendência é de aumento do erro percentual com o aumento da distância da falta, apresentando-se mais uniforme para faltas sólidas, e mais acentuadas para faltas com resistências maiores que 10Ω .

O desempenho do método proposto frente às variações dos parâmetros do sistema (S_{CC} e Z_l) é apresentado através dos erros percentuais na seção 4.2.3. Pode-se verificar que os resultados sofrem maior influência da variação da impedância da linha, devido ao fato de ser utilizada diretamente no denominador do equacionamento proposto. A menor influência da variação S_{CC} é devido ao fato desta não ser utilizada diretamente no equacionamento proposto, mas através da estimação da corrente de falta.

Cabe ressaltar que o sistema utilizado nas simulações é um sistema com dados reais, mas é desconsiderada a capacitância *shunt* da linha de transmissão, fato que

contribuiu para a melhoria dos resultados apresentados. Entretanto, deve-se salientar que foram utilizados apenas dados de um terminal (tensão e corrente) e o valor da potência de curto-circuito do sistema equivalente conectado ao terminal remoto. Visto que ambos os métodos foram analisados considerando-se as mesmas condições, o método proposto nesta dissertação, apresentou melhor desempenho frente ao método apresentado em Saha, Izykowski e Rosolowski (2010).

Os resultados mostram que o algoritmo é capaz de determinar a distância da falta com erro de aproximadamente 1,25 % para faltas FT com distâncias de até 100 % do comprimento da linha e resistência menor ou igual a 10 Ω e erros inferiores a 5 % para distância de faltas de até 90 % do comprimento da linha para faltas com resistência igual a 40 Ω . Para faltas envolvendo mais de uma fase, o algoritmo é capaz de determinar a distância da falta com erro de aproximadamente 1,9 % para faltas com resistência menor ou igual a 40 Ω .

5. CONCLUSÕES

A localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica é uma ferramenta extremamente relevante, que contribui para o bom desempenho do sistema. A localização de faltas permite o isolamento seletivo do trecho faltoso, a redução do tempo de reparo do sistema e a melhoria da qualidade da energia elétrica, através da continuidade do fornecimento.

Os custos intrínsecos aos métodos baseados em ondas viajantes e também aos métodos baseados na impedância aparente, utilizando dados de dois ou mais terminais, faz com que os métodos baseados na impedância aparente com dados de um terminal apresentem-se com maior atratividade. Desta forma, buscou-se apresentar um método com baixo custo estimado de implementação, baseado na impedância aparente, utilizando dados de um terminal e empregando componentes simétricas em seu equacionamento. Este trabalho estende o método proposto por Bretas e Salim (2006), realizando o equacionamento para todos os tipos de faltas, e também é adicionada a estimação do sistema equivalente conectado ao terminal remoto usando-se apenas a sua potência de curto-circuito.

Para obter resultados do método desenvolvido nesta dissertação, realizaram-se simulações de várias condições de faltas, através do programa computacional ATP-EMTP, utilizando como sistema teste, parâmetros reais de uma linha de transmissão. Com o objetivo de analisar sua eficiência, implementou-se o método apresentado por Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) para faltas do tipo FT-*a*.

Os resultados obtidos foram apresentados no capítulo 4, onde é possível constatar que apesar de não ser considerada a capacitância *shunt* equivalente da linha de transmissão, estes resultados apresentaram-se promissores para os diferentes tipos de faltas. Visualiza-se por meio da comparação entre ambos os métodos, que o método desenvolvido nesta dissertação apresentou maior eficiência frente à faltas do tipo FT, assim como, considerando-se variações dos parâmetros do sistema (Z_l e S_{CC}).

Dentre estes resultados verifica-se que a resistência de falta afeta de forma mais significativa os resultados obtidos do que a distância de falta. Isto se deve ao fato de incertezas inerentes ao processo de estimação da corrente contribuída pelo terminal remoto, a qual influência diretamente no cálculo da corrente de falta empregada nas equações de LDF. Tais incertezas são oriundas de suposições adotadas para a estimação do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

Os resultados mostraram que o algoritmo é capaz de determinar a distância da falta com erros percentuais praticamente nulos (0%) para todos os tipos de faltas sólidas, ao longo da linha de transmissão. Para faltas FT com resistência menor ou igual a 20Ω os erros são inferiores a 2,30 % para faltas ocorridas até a 90 % do comprimento da linha. O erro percentual máximo 5,28 %, ocorre para faltas FT ocorridas no terminal remoto e com resistência de falta igual a 40Ω . Cabe salientar que os erros apresentados nesta dissertação correspondem às incertezas associadas ao algoritmo de localização, como a estimativa das componentes fundamentais e estimação do sistema equivalente, erros inerentes a precisão de equipamentos de medição tendem a elevar os erros percentuais resultantes do algoritmo de LDF.

Baseando-se nas avaliações realizadas do método baseado na impedância aparente utilizando dados de um terminal proposto nesta dissertação, conclui-se que os desenvolvimentos apresentam-se promissores para a LDF em sistemas de transmissão.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Devido a grande abrangência deste tema, fazem-se necessários muitos tópicos de pesquisas para que se saturem todas as contribuições possíveis ao assunto. Desta forma, visando à melhora da eficácia e confiabilidade do método de LDF tratado nesta dissertação, são sugeridos os seguintes tópicos para dar continuidade a este trabalho:

- validação do método proposto a partir de dados de faltas reais;
- análise da localização de faltas a partir de simulações considerando os valores de precisão dos equipamentos de medição, transformadores de potencial e de corrente;
- análise da localização de faltas a partir de simulações considerando a capacitância *shunt* da linha de transmissão.
- análise da localização de faltas a partir de simulações de faltas de alta impedância e faltas lineares com a resistência de falta variável;
- desenvolvimento e implementação de sistemas com maior grau de precisão da estimação do sistema equivalente conectado ao terminal remoto.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. Ames: The Iowa State University Press, 1973.
- ANDRADE, L.; LEÃO, T. P. Impedance-based fault location analysis for transmission lines. **PES T&D 2012**, Orlando, p. 1-6, May 2012.
- APOSTOLOPOULOS, C. A.; KORRES, G. N. A Novel Algorithm for Locating Faults on Transposed/Untransposed Transmission Lines Without Utilizing Line Parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 25, n. 4, p. 2328-2338, Apr. 2010.
- AURANGZEB, M.; CROSSLEY, P.; GALE, P. Fault location using the high frequency travelling waves measured at a single location on a transmission line. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEMS PROTECTION, 7., 2001, Amsterdam. **Proceedings...** Stevenage: IET, 2001. p. 403-406.
- BONEVILLE POWER ADMINISTRATION. **Alternative Transients Program: ATP-EMTP**, 2007. Programa de computador.
- BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Fault Location on a Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 19, n. 4, p.1619-1622, Oct. 2004.
- BRETAS, A. S., SALIM, R. Fault Location in Unbalanced DG Systems using the Positive Sequence Apparent Impedance. In: TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2006, Caracas. **Proceedings. . .** Piscataway: IEEE/PES, 2006. p. 1-6.
- CRICHTON, L. N. The Distance Relay for Automatically Sectionalizing Electrical Net Works. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 42, p. 527-537, Jan. 1923.
- DJURIC, M. B., & TERZIJA, V. V. Distance protection and fault location utilizing only phase current phasors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 13, n. 4, p.1020-1026, Oct. 1998.
- ELGERD, O. I. **Introdução à teoria de sistemas de energia**. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.
- ERIKSSON, L.; SAHA, M.; ROCKEFELLER, G. An Accurate Fault Locator With Compensation For Apparent Reactance In The Fault Resistance Resulting From

Remote-End Infeed. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-104, n. 2, p. 423-436, Feb. 1985.

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. Ground distance relaying with fault-resistance compensation for unbalanced systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 1319-1326, July 2008.

GALLE, P. F. et al. Fault location based on travelling waves. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER SYSTEM PROTECTION, 5., 1993, York. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1993. p. 54-59.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. Singapore: McGraw-Hill, 1994.

HOROWITZ, S.; PHADKE, A. **Power System Relaying**. Chichester: John Wiley and Sons, 2008.

IBE, A.; CORY, B. Travelling wave-based fault locator for two-and three-terminal networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. PWRD-1, n. 2, p. 283-288, Apr. 1986.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std C37.114**: IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. New York, 2005. 36 p.

IURINIC, L. U. **Diagnóstico de faltas em sistemas de subtransmissão**: uma formulação baseada na Transformada Wavelet contínua. 2012. 84 p. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) – Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E.; SAHA, M. M. Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 115, n.2, p. 268-273, Mar. 2004.

JEYASURYA, B.; RAHMAN, M. A. Accurate fault location of transmission lines using microprocessors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN POWER PROTECTION, 4., 1989, Edinburgh. **Proceedings...** London: IEE, 1989. p. 13-17.

JOHNS, A. T.; MOORE, P. J.; WHITTARD, R. New technique for the accurate location of earth faults on transmission systems. **IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 142, n. 2, p. 119-127, 1995.

KANG, S.H. et al. A Fault Location Algorithm Based on Circuit Analysis for Untransposed Parallel Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 24, n. 4, p. 1850-1856, Oct. 2009.

KAWADY, T.; STENZEL, J. Investigation of practical problems for digital fault location algorithms based on EMTP simulation. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA PACIFIC, 2002, Yokohama. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2002. v.1, p. 118-123.

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: ASIA PACIFIC, 2002, Yokohama. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2002. v. 3, p.1733-1737.

MAGNAGO, F.; ABUR, A. Fault location using wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1475-1480, Oct. 1998.

THE MATHWORKS. **Matlab**. 2002. Programa de computador.

NOVOSEL, D. et al. **System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads**. US Patent 5,839,093. 1998.

SAADAT, H. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1999.

SADEH, J.; ADINEHZADEH, A. Accurate fault location algorithm for transmission line in the presence of series connected FACTS devices. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Lausanne, v. 6, n. 3, p. 323-328, Mar. 2010.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault location on power networks**. London: Springer London, 2010.

SALIM, R. **Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica fundamentada na impedância**. 2008. 158 p. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) – Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SRINIVASAN, K.; St-JACQUES, A. A New Fault Location Algorithm for Radial Transmission Lines with Loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, n. 3, p. 1676-1682, July 1989.

STEVENSON JR., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1981.

TAKAGI, T. et al. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I - Fourier Transformation Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-100, n. 3, p. 1316-1323, Mar. 1981.

TAKAGI, T. et al. A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II - Laplace Transform Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway , v. PAS-101, n. 3, p.564-573, Mar. 1982a.

TAKAGI, et al. Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-101, n. 8, p. 2892-2898, Aug. 1982b.