



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS
DE COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

MOISÉS HONORATO DE OLIVEIRA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA LOCALIZAÇÃO
DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE MEDIDAS
NÃO SINCRONIZADAS DE DOIS TERMINAIS**

MOSSORÓ/RN
2018

MOISÉS HONORATO DE OLIVEIRA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE MEDIDAS NÃO SINCRONIZADAS
DE DOIS TERMINAIS**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Melinda Cesianara Silva da Cruz

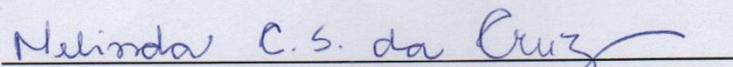
MOSSORÓ/RN
2018

MOISÉS HONORATO DE OLIVEIRA NETO

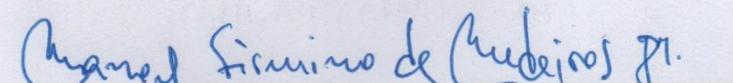
DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO A PARTIR DE MEDIDAS NÃO SINCRONIZADAS DE DOIS TERMINAIS

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

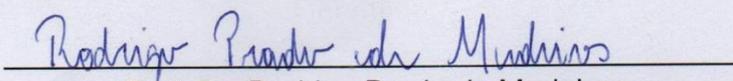
Data da defesa: 28/08/2018



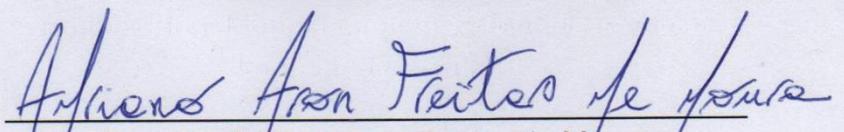
Prof. Dra. Melinda Cesianara Silva da Cruz
Orientadora



Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Júnior
Examinador externo



Prof. Dr. Rodrigo Prado de Medeiros
Examinador interno



Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura
Examinador interno

“Não há comparação entre o que se perde por fracassar e o que se perde por não tentar.”

(Francis Bacon)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de dissertação de mestrado ao meu avô materno, Moisés Honorato de Oliveira (*in memorian*), e à minha avó paterna, Maria de Souza Vaz (*in memorian*), que vieram a falecer durante a construção deste trabalho.

Meu avô, “seu Moises”, com quem eu convivia todos os dias e via sua vontade de lutar pela vida, é meu maior exemplo de humildade e abnegação. Um ser de coração gigante, que não tenho palavras para descrever a importância dele em minha vida e minha trajetória.

Minha avó, minha segunda mãe, guerreira e batalhadora, que após a morte precoce do meu avô paterno, superou todas as dificuldades e obstáculos e conseguiu criar com dignidade seus 6 filhos. Poderia escrever milhões de palavras tentando defini-la, mas tem uma palavra que a define bem: família. A maior prova disso é que boa parte dos netos a tinha como mãe.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, ao meu pai, Francisco Batista da Mota, e à minha mãe, Sandra Luzia de Oliveira, que sempre se fizeram presentes em toda minha vida, como também em minha jornada escolar e universitária, oferecendo total apoio e incentivo; agradeço por todo amor e ensinamentos que me fizeram crescer cada vez mais, e por serem eles meu porto seguro. Quero agradecer também a toda minha família, avó, tios, primos e em especial à minha irmã.

Quero agradecer à minha namorada, Raissa Rebouças de Medeiros, por esses sete anos de carinho, atenção, amizade e acima de tudo companheirismo. Agradecer a todos os amigos que passaram na minha vida escolar e pessoal, todos eles com significado especial. Aos meus colegas e professores da UFERSA, pelos ensinamentos e amizade durante esse período dentro da universidade.

Um agradecimento especial à minha professora e orientadora, Melinda Cesianara Silva da Cruz, por toda sabedoria prestada, todas as palavras sábias e conselhos ditos. Por toda atenção e empenho prestados para que este trabalho fosse finalizado. Pela compreensão e paciência nos momentos em que me ausentei, na maioria das vezes, por força maior.

Agradeço à instituição ANP (Agência Nacional do Petróleo) pelo suporte financeiro.

RESUMO

O sistema elétrico brasileiro é formado por inúmeras linhas de transmissão, que interligam os centros de consumo aos centros de geração. Quando ocorre uma falta permanente em uma dessas linhas, o trabalho das equipes de manutenção para localizar o ponto de falta é habitualmente demorado, o que acarreta diversos prejuízos financeiros, tanto para as empresas consumidoras como para a concessionária. O setor petrolífero, por exemplo, é um dos grandes prejudicados em decorrência do desligamento de linhas de transmissão que atendem os campos de extração. Nesse sentido, estudos relacionados à localização de faltas em linhas de transmissão têm sido muito frequentes na literatura. Esses estudos possuem o objetivo geral de determinar precisamente o local da falta, auxiliando as equipes de manutenção no restabelecimento rápido do suprimento de energia. Este trabalho teve o objetivo de elaborar duas metodologias para localização de faltas em linhas de transmissão, ambas baseadas em fasores fundamentais não sincronizados de dois terminais. As metodologias apresentaram duas etapas. Na primeira etapa, denominada etapa de processamento, obteve-se os fasores de tensão e de corrente, sincronizados, dos dois terminais da linha de transmissão. Na segunda etapa, implementou-se as metodologias de localização, desenvolvidas a partir do conceito de mínimos quadrados. Para validação dos métodos, foram simuladas, no *software* ATP, faltas em linhas de transmissão distintas. Os desempenhos dos algoritmos de localização foram, portanto, avaliados considerando curtos-circuitos em diversos locais da linha, e para diferentes resistências de falta. Os resultados obtidos mostraram que as metodologias desenvolvidas são precisas e representam importantes ferramentas a comporem o estado da arte de localização de faltas em linhas de transmissão.

Palavras-Chave: Linhas de transmissão. Localização de faltas. Estimação de parâmetros. Sincronização de registros.

ABSTRACT

The Brazilian electric system formed by numerous transmission lines, that connect the centers of consumption to the centers of generation. When a permanent fault occurs on one of these lines, the work of the maintenance teams to locate the point of failure is usually time-consuming, which entails several financial losses, both for the consuming companies and for the concessionaire. The oil sector, for example, is one of the major impaired due to the shutdown of transmission lines that serve the extraction fields. In this sense, studies related to the location of faults in transmission lines have been very frequent in the literature. These studies have the general objective of determining precisely the location of the fault, assisting the maintenance teams in the rapid restoration of the energy supply. This work was intended to develop two methodologies for locating faults in transmission lines, both based on unsynchronized fundamental Fasos of two terminals. The methodologies presented two steps. In the first stage, called the processing stage, the voltage and current, synchronized, of the two terminals of the transmission line were obtained. In the second step, localization methodologies were implemented, developed from the concept of minimum squares. For the validation of the methods, there were simulated, in the ATP software, faults in different transmission lines. The performances of the localization algorithms were therefore evaluated considering short circuits in several locations of the line, and for different resistances of lack. The results obtained showed that the developed methodologies are accurate and represent important tools to compose the state of the art of locating faults in transmission lines.

Keywords: Transmission line. Fault location. Estimation of parameters. Data synchronization

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CIRCUITOS DE FALTA, PRÉ-FALTA E PÓS-FALTA.	24
FIGURA 2 - MODELAGEM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EM FALTA.	27
FIGURA 3 - MODELAGEM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO EM FALTA.	28
FIGURA 4 - MODELO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO COM TRÊS TERMINAIS EM FALTA.	29
FIGURA 5 – LINHA DE TRANSMISSÃO EM FALTA - PRESTON ET AL. (2010).....	30
FIGURA 6 – MODELO π DE SEQUÊNCIA POSITIVA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.	37
FIGURA 7 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE SEQUÊNCIA POSITIVA DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO OPERANDO NO REGIME PRÉ-FALTA.	43
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DAS RELAÇÕES DE A , x E y	45
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SIMULADA NO SOFTWARE ATP...	47
FIGURA 10 – SIMULAÇÃO DE FALTA NA LINHA DE 90 KM (10% DA LINHA) – TERMINAL 01 ...	48
FIGURA 11 – SIMULAÇÃO DE FALTA NA LINHA DE 90 KM (10% DA LINHA) – TERMINAL 02. ...	48
FIGURA 12 – SINAL DE CORRENTE AMPLIADO – FALTA NA LINHA DE 90 KM (10%), TERMINAL 01.	49
FIGURA 13 - LINHA DE TRANSMISSÃO EM FALTA.	50
FIGURA 14 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) CONSIDERANDO R_F IGUAL A 0 OHMS - METODOLOGIA 01.	63
FIGURA 15 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) CONSIDERANDO R_F IGUAL A 100 OHMS - METODOLOGIA 01.	64
FIGURA 16 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) – R_F IGUAL A 0 OHMS – METODOLOGIA 02.	68
FIGURA 17 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) – R_F IGUAL A 100 OHMS – METODOLOGIA 02.	68
FIGURA 18 – ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA DR, DIM E DMED – LINHA DE 138 kV ($R_F = 0$ OHMS) – METODOLOGIA 02.....	69
FIGURA 19 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA DR, DIM E DMED – LINHA DE 230 kV ($R_F = 0$ OHMS) – METODOLOGIA 02.....	70
FIGURA 20 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA DR, DIM E DMED – LINHA DE 500 kV ($R_F = 0$ OHMS) – METODOLOGIA 02.....	70

FIGURA 21 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) – R_F IGUAL A 0 OHMS – METODOLOGIA 02 MODIFICADA.....	75
FIGURA 22 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) – R_F IGUAL A 100 OHMS – METODOLOGIA 02 MODIFICADA.....	75
FIGURA 23 – ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DE FALTA (%) PARA METODOLOGIAS 01 E 02 MODIFICADA – LINHA DE 138 kV ($R_F = 0$ OHMS).....	76
FIGURA 24 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DE FALTA (%) PARA METODOLOGIAS 01 E 02 MODIFICADA – LINHA DE 230 kV ($R_F = 0$ OHMS).....	76
FIGURA 25 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DE FALTA (%) PARA METODOLOGIAS 01 E 02 – LINHA DE 500 kV ($R_F = 0$ OHMS).....	77
FIGURA 26 – ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA VARIAÇÃO DE +10%, +20% E +30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – METODOLOGIA 01 – LINHA DE 230 kV.	80
FIGURA 27 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA VARIAÇÃO DE -10%, -20% E -30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – METODOLOGIA 01 – LINHA DE 230 kV.	81
FIGURA 28 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA VARIAÇÃO DE +10%, +20% E +30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – METODOLOGIA 02 – LINHA DE 230 kV.	82
FIGURA 29 - ERRO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS (%) VERSUS LOCAL DA FALTA (%) PARA VARIAÇÃO DE -10%, -20% E -30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – METODOLOGIA 02 – LINHA DE 230 kV.	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA REFERENTE A LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.....	34
TABELA 2 - RESULTADOS DO ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PARA RESISTÊNCIA DAS LINHAS.	39
TABELA 3 - RESULTADOS DO ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PARA REATÂNCIA DAS LINHAS.	39
TABELA 4 - RESULTADOS DO ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PARA CAPACITÂNCIA DAS LINHAS.	40
TABELA 5 - AMOSTRA DE INÍCIO DA FALTA NAS LINHAS DE 90KM, 180KM E 250KM.....	47
TABELA 6 – RAÍZES ENCONTRADAS PARA FALTA FASE-TERRA NO QUILOMETRO 50 DA LINHA DE 500 kV.	56
TABELA 7– RAÍZES ENCONTRADAS PARA FALTA FASE-TERRA NO QUILOMETRO 90 DA LINHA DE 138 kV.	56
TABELA 8 – RAÍZES ENCONTRADAS PARA FALTA FASE-TERRA NO QUILOMETRO 72 DA LINHA DE 138 kV.	57
TABELA 9 – DADOS DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE SEQUÊNCIA POSITIVA DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SIMULADAS NO ATP.....	59
TABELA 10 – DADOS DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE SEQUÊNCIA ZERO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO SIMULADAS NO ATP.....	59
TABELA 11 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 01 – LINHA DE 138 kV, R_F IGUAL A 0 OHMS.	60
TABELA 12 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 01 – LINHA DE 138 kV, R_F IGUAL A 100 OHMS.	60
TABELA 13 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 01 – LINHA DE 230 kV, R_F IGUAL A 0 OHMS.	61
TABELA 14 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 01 – LINHA DE 230 kV, R_F IGUAL A 100 OHMS.	61
TABELA 15 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 01 – LINHA DE 500 kV, R_F IGUAL A 0 OHMS.	62
TABELA 16 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA LINHA DE 500 kV, R_F IGUAL A 100 OHMS.	62
TABELA 17 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 – LINHA DE 138 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.	65

TABELA 18 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 – LINHA DE 138 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 100 OHMS.	65
TABELA 19 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 – LINHA DE 230 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.	66
TABELA 20 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 – LINHA DE 230 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 100 OHMS.	66
TABELA 21 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 – LINHA DE 500 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.	67
TABELA 22 – DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 – LINHA DE 500 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 100 OHMS.	67
TABELA 23 - DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 MODIFICADA – LINHA DE 138 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.	71
TABELA 24 - DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 MODIFICADA W– LINHA DE 138 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 100 OHMS.	72
TABELA 25 - DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 MODIFICADA – LINHA DE 230 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.	72
TABELA 26 - DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 MODIFICADA – LINHA DE 230 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 100 OHMS.	73
TABELA 27 - DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 MODIFICADA – LINHA DE 500 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.	74
TABELA 28 - DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02 MODIFICADA – LINHA DE 500 kV E RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 100 OHMS.	74
TABELA 30 – ERROS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS CONSIDERANDO ERROS DE +10%, +20% E +30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – LINHA DE 230 kV - METODOLOGIA 01.....	79
TABELA 31 – ERROS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS CONSIDERANDO ERROS DE -10%, -20% E -30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – LINHAS DE 230 kV - METODOLOGIA 01.....	80
TABELA 32 – ERROS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS CONSIDERANDO ERROS DE +10%, +20% E +30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – METODOLOGIA 02.....	82
TABELA 33 – ERROS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS CONSIDERANDO ERROS DE -10%, -20% E -30% NA CAPACITÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO – METODOLOGIA 02.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{I}_1	Fasor de corrente de sequência positiva associado ao terminal 1
\dot{I}_2	Fasor de corrente de sequência positiva associado ao terminal 2
V_1	Fasor de tensão de sequência positiva associado ao terminal 1
\dot{V}_2	Fasor de tensão de sequência positiva associado ao terminal 2
Z_T	Impedância série da linha de transmissão, sequência positiva
Y_T	Admitância em paralelo da linha de transmissão, sequência positiva
Z_m	Impedância mútua
Z_p	Impedância própria
Z_1	Impedância de sequência positiva
Z_0	Impedância de sequência zero
Y_m	Admitância mútua
Y_p	Admitância própria
C_1	Capacitância de sequência positiva
C_0	Capacitância de sequência zero
f	Frequência da rede elétrica, 60 Hertz

V_S	Módulo da tensão pré-falta no terminal S
V_R	Módulo da tensão pré-falta no terminal R
I_S	Módulo da corrente pré-falta no terminal S
I_R	Módulo da corrente pré-falta no terminal R
V_F	Fasor de tensão no local de ocorrência da falta
D	Distância de falta ao terminal 01
L	Comprimento da linha
Z	Impedância série da linha por unidade de comprimento.
Y	Admitâncias <i>shunt</i> da linha por unidade de comprimento

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 OBJETIVOS GERAIS	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3. ORGANIZAÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 MÉTODOS BASEADOS NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES	20
2.2 METODOS BASEADOS NA TEORIA DAS COMPONENTES FUNDAMENTAIS	23
2.3 METODOS BASEADOS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	32
2.4 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA	33
3 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA	35
3.1 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA POSITIVA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	35
3.1.1 METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA POSITIVA	36
3.1.2 CÁLCULO DA ADMITÂNCIA EM PARALELO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	37
3.1.3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA SÉRIE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO	38
3.1.4 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS	39
3.1.5 MATRIZ DE IMPEDÂNCIA SÉRIE E MATRIZ DE ADMITÂNCIA SHUNT	40
3.2 SINCRONIZAÇÃO DE REGISTROS	42
3.3 ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA DE INÍCIO DA FALTA	46
3.3.1 MÉTODO UTILIZADO PARA A LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRA DE INÍCIO DA FALTA	46
3.3.2 RESULTADOS DO MÉTODO UTILIZADO	47
3.4 ESTIMAÇÃO DE FASORES DE TENSÃO E CORRENTE PÓS-FALTA	48

4 DESENVOLVIMENTO DAS METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS	50
.....	
4.1 METODOLOGIA 01	52
4.2 METODOLOGIA 02	55
5 RESULTADOS.....	58
5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – METODOLOGIA 01	59
5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – METODOLOGIA 02	64
5.2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O DESEMPENHO DA METODOLOGIA 02	69
5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – METODOLOGIA 02 MODIFICADA.....	71
5.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS	75
6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO EM RELAÇÃO À IMPRECISÕES NOS PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA ZERO DA LINHA DE TRANSMISSÃO	78
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS.....	86

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O homem em toda sua evolução sempre buscou formas de energia para sua própria sobrevivência ou desenvolvimento. Inicialmente, com a descoberta do fogo, utilizou-se da energia térmica e luminosa. Posteriormente, como forma de produzir energia mecânica, domou animais, mas foi após a revolução industrial no século XVIII, com a invenção do motor e das máquinas a vapor, que obteve maiores avanços nas formas de obtenção de energia. Devido a vantagens como transporte, obtenção e manipulação, atualmente, a forma de energia de maior relevância para a humanidade é a energia elétrica. Esta é tida como fundamental para sociedade moderna. Um exemplo de utilização e importância da energia elétrica é na extração de petróleo, que emprega diversos equipamentos, como bombas e motores elétricos. A qualidade e a continuidade do fornecimento da energia elétrica são essenciais nesse setor petrolífero, visto que uma falta no sistema elétrico pode gerar interrupção da operação e como consequência diversos prejuízos, notadamente financeiros.

O sistema elétrico brasileiro é composto por inúmeras linhas de distribuição e de transmissão. Essas linhas estão a todo instante expostas a intempéries naturais e a condições extremas impostas pela natureza. Logo, estão muito vulneráveis a falhas. As linhas de transmissão apresentam grandes extensões e grande parte dela está interligada. Devido a esses fatores, uma falta permanente em uma linha de transmissão pode acarretar a interrupção de energia elétrica a dezenas de quilômetros do local de sua ocorrência, bem como tornar o processo de restauração do sistema um pouco demorado.

Além das faltas permanentes, existem as faltas temporárias, que são de curta duração. Nesses casos, é importante identificar e avaliar o trecho atingido, pois é

provável que esse trecho do sistema apresente pontos fracos, mais susceptíveis a uma futura falha permanente.

Diante do exposto, muitos trabalhos na literatura têm desenvolvido ferramentas com o objetivo de determinar precisamente o local de uma falta em uma linha de transmissão. De acordo com Deng et al. (2016), a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos, até então, sobre localização de faltas em linhas de transmissão são baseados na teoria de fasores fundamentais, na teoria de ondas viajantes ou na teoria de inteligência artificial. A utilização desses métodos em comparação com o método convencional (identificação visual do ponto de falta através de patrulha terrestre ou aérea, percorrendo toda extensão da linha) otimiza o trabalho das equipes de manutenção, melhora a continuidade do fornecimento de energia elétrica e minimiza as consequências financeiras acarretadas pela falta de eletricidade. O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver dois algoritmos de localização, ambos formulados a partir do conceito de mínimos quadrados e utilizando a teoria de fasores fundamentais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver duas metodologias para localização de faltas em linhas de transmissão, ambas baseadas em componentes fundamentais de tensão e corrente e dados não sincronizados de dois terminais, contribuindo assim, para o estado da arte da localização de faltas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma pesquisa dos principais estudos já estabelecidos na literatura referentes à localização de faltas em linhas de transmissão;
- Simular linhas de transmissão no *software* ATP (*Alternative Transients Program*), de forma a obter os sinais de tensão e de corrente que alimentarão os algoritmos de localização de faltas;
- Implementar um algoritmo de estimação dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, com o objetivo de aumentar a confiabilidade do conjunto de dados de entrada;

- Implementar um algoritmo de sincronização de registros e localizador do início da falta, com o intuito de aplicar os métodos desenvolvidos a dados não sincronizados;
- Desenvolver duas metodologias de localização de faltas e verificar seus desempenhos mediante diversos tipos de linhas, locais de faltas e impedâncias de falta;
- Realizar uma análise de sensibilidade dos algoritmos em relação à capacitância *shunt* de sequência zero, já que esses parâmetros também são dados de entrada dos algoritmos propostos, mas nem sempre são disponibilizados pelas empresas concessionárias ou encontrados por ferramentas de estimação.

1.3. ORGANIZAÇÃO

O presente texto dividido em 7 capítulos. O primeiro capítulo é introdutório, incluindo justificativa, relevância do tema e objetivos.

O segundo capítulo remete ao estado da arte, que tem como objetivo expor uma pesquisa qualitativa, histórica e subjetiva, retomando teoria e conceitos relacionados à localização de faltas em linhas de transmissão. Nesse capítulo, serão abordados algoritmos atuais, como também algoritmos de relevância histórica que foram usados como base para os algoritmos atuais.

No terceiro capítulo descreve-se a etapa de processamento dos dados de entrada. Os dados de corrente e tensão que são monitorados nos dois terminais da linha não estão adequados para servirem de entrada às metodologias propostas, e precisam ser ajustados para isso. Nessa etapa ocorre a extração dos fasores de frequência fundamental, a sincronização dos registros oscilográficos, a determinação dos parâmetros elétricos da linha e a determinação do instante em que se inicia a falta.

O capítulo 4 apresenta de forma detalhada o equacionamento matemático das metodologias de localização de faltas desenvolvidas.

No capítulo seguinte, capítulo 5, serão apresentados os resultados das simulações no ATP para três linhas distintas, linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV, com intuito de validar as metodologias descritas no capítulo 4.

No capítulo 6 expõe-se uma análise de sensibilidade dos algoritmos desenvolvidos em relação a imprecisões na capacitância *shunt* de sequência zero das linhas.

No último capítulo apresenta-se a conclusão do trabalho.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existe uma preocupação por parte das concessionárias em maximizar o desempenho de processos de localização de falta em linhas de transmissão. Nos últimos anos, os sistemas de transmissão se expandiram e ficaram mais complexos. Ao mesmo tempo, as concessionárias foram forçadas a apresentar serviços de excelência, com melhores índices de continuidade no fornecimento de energia elétrica, o que vem motivando pesquisadores de todo o mundo a estudarem o assunto. A seguir serão explanados alguns trabalhos que tratam dos problemas relacionados à localização de faltas em linhas de transmissão. O estado da arte foi dividido em três tópicos, de forma a apresentar os métodos que se baseiam em ondas viajantes, fasores fundamentais e inteligência artificial, os três principais existentes na literatura. Notadamente, a teoria de fasores fundamentais será a mais explanada, pois é a teoria utilizada no desenvolvimento do presente trabalho.

2.1 MÉTODOS BASEADOS NA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Lima (2013) relata que os primeiros indícios da utilização da teoria das Ondas Viajantes (OV) para localização de faltas ocorreram por volta dos anos 30, sendo bastante utilizada até a década de 40 em linhas ou cabos subterrâneos. O mesmo autor relatou ainda que algoritmos baseados na teoria de OV apresentavam desempenhos superiores em relação às metodologias baseadas em fasores fundamentais, porém, devido a problemas de confiabilidade (exatidão dos resultados), a teoria das ondas viajantes foi sendo menos explorada. Posteriormente, pode-se verificar que o problema da confiabilidade pode ser resolvido quando se trabalha com altas taxas de amostragem. O avanço da tecnologia digital possibilitou um grande

aumento das taxas de amostragem, tornando viável a implementação prática da teoria de OV em algoritmos de localização.

No início da década de 90, Gale et al. (1993) publicaram um artigo que tratava de um estudo sobre localizadores de falta em linhas de transmissão baseados na teoria das Ondas Viajantes utilizando dois terminais. Nesse trabalho, os métodos de localização de faltas foram classificados em vários grupos - A, B, C e D. Os localizadores do tipo A e D não dependiam de ondas viajantes oriundas de gerador de pulso ou sinal de entrada, e sim de ondas viajantes produzidas a partir de faltas no sistema. Já os localizadores classificados como B e C precisavam da injeção de um pulso ou sinal inicial ao circuito. O grupo B possui subgrupos, diferenciando-se pela forma como o sinal era injetado. No entanto, o autor focou em discutir em seu trabalho apenas os tipos A, B e D. Gale et al. (1993) utilizou três ensaios de campo para cada tipo de estimador.

Magnano e Abur (1998) propuseram um algoritmo de localização de faltas empregando a teoria de ondas viajantes e a transformada *Wavelet*. Eles utilizaram o programa ATP/EMTP para simular faltas em sistemas de transmissão. O algoritmo proposto independe da impedância de falta e mostrou resultados satisfatórios considerando dados de um e dois terminais, bem como para linhas compensadas por meio de capacitores série. Vale salientar que a precisão do algoritmo proposto pelos autores depende fundamentalmente da taxa de amostragem.

Da Silva (2003) propôs um método de localização de faltas utilizando a teoria das ondas viajantes de tensão geradas por uma situação de falta. Tal método utilizou-se da transformada *Wavelet* para detectar a chegada das ondas nos terminais. O algoritmo oferece a opção de resolução a partir de duas técnicas, de acordo com a aquisição dos dados. Uma das formas de resolução é baseada em dados de apenas um terminal e a outra técnica de resolução se baseia em dados de dois terminais. Os resultados obtidos mostraram um alto desempenho, tanto em relação à precisão como em relação à velocidade de resposta. O algoritmo utilizado para os dados registrados de dois terminais apresentou melhor performance que os dados de apenas um terminal. De acordo com o mesmo autor, os parâmetros de impedância de falta, tipo de falta, ângulo de incidência de falta, posição de falta e efeito de acoplamento mútuo não apresentaram influência relevante no método.

Araújo (2011) elaborou um estudo com diversas famílias *Wavelets* e seus níveis de decomposição. Esse estudo tinha como objetivo avaliar a performance de cada família *Wavelet* em um algoritmo de localização de faltas baseado na teoria das ondas viajantes de dois terminais. Foram estudadas 76 situações diferentes (variando família e ordem), as quais contribuíram, na maioria das vezes, para baixos erros de localização. No entanto, as *Wavelets* que implicaram em melhores performances foram a Daubechies15 (Db15) e a Symlets (Sym17).

Cavalcanti et al. (2013) apresentaram um equacionamento matemático para a localização de faltas em linhas de transmissão fundamentado em ondas viajantes e dados de dois terminais. O equacionamento compreende uma série de filtros, denominados pelo autor como Gradientes Morfológicos de Multi-resolução. Esses filtros são operações matemáticas simples aplicadas no domínio do tempo. A morfologia matemática apresentada mostrou-se independente do tipo de falha, posição e demais condições de ocorrência da falha. Outro ponto positivo da abordagem foi em relação às taxas de amostragem, as quais foram menores que as normalmente utilizadas em localizadores de falta baseados na teoria das Ondas Viajantes.

Lopes (2014) propôs um novo algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão baseado em dados não sincronizados de dois terminais, utilizando a teoria de ondas viajantes e a transformada de Park. Diferente das formulações clássicas, o algoritmo proposto determina o local da falta em tempo real. Os resultados comprovaram que o algoritmo é eficiente para detecção e localização de faltas em tempo real.

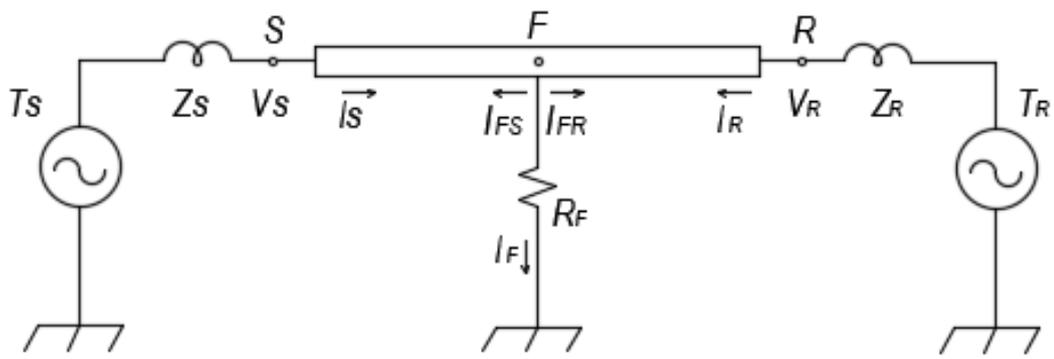
Abreu (2015) traz em seu trabalho um método de localização de faltas para linhas de transmissão que utiliza sinais de onda viajantes e a transformada *Wavelet*. Na avaliação de desempenho do sistema desenvolvido, considerações sobre as famílias *Wavelets* e a influência do ruído branco foram investigadas. O ruído branco é adicionado ao sinal com intuito de aproximar o sinal simulado aos sinais oscilográficos reais de uma falta. O ruído branco é o sinal que cobre toda a faixa de frequências, ou seja, é um ruído que possui componentes em todas as frequências.

2.2 METODOS BASEADOS NA TEORIA DAS COMPONENTES FUNDAMENTAIS

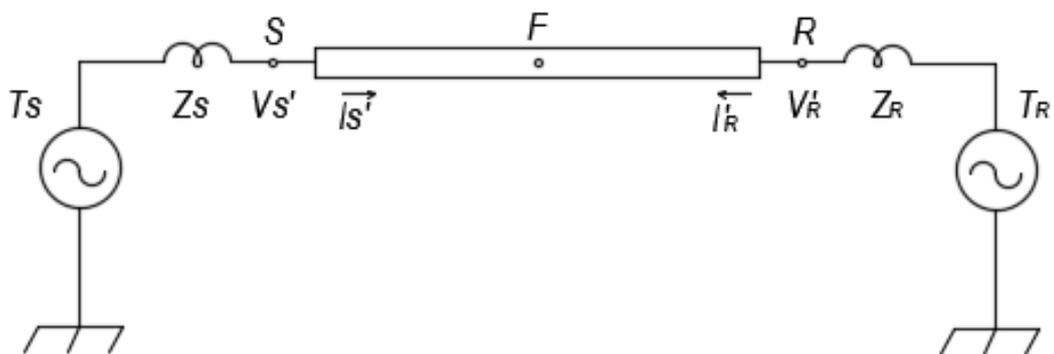
A teoria das componentes fundamentais apresenta algumas vantagens que fazem com que ela seja a mais encontrada na literatura e utilizada pelas concessionárias. De acordo com Lopes (2014), as principais vantagens são custos de implementação, simplicidade, requerem menores taxas de amostragem e, geralmente, pouco esforço computacional.

Os primeiros algoritmos que utilizaram a teoria das componentes fundamentais se basearam em dados de um único terminal, não necessitando de canais de comunicação para troca de informações com os terminais remotos. Segundo Lima (2013), os trabalhos de Takagi et al. (1981) e Takagi et al. (1982) foram grandes impulsionadores para o desenvolvimento da metodologia de localização de faltas utilizando dados de apenas um terminal. Esses trabalhos apresentam um equacionamento para localização de faltas (LDF) baseado no teorema de superposição de circuitos.

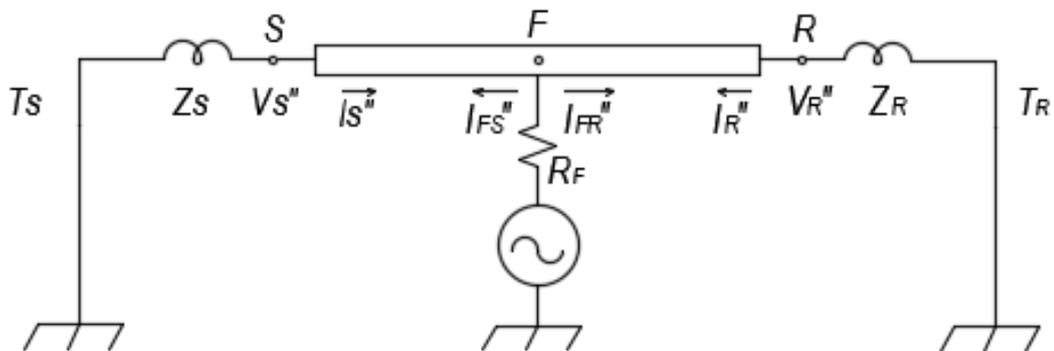
Takagi et al. (1981) elaboraram um dos primeiros algoritmos de grande relevância utilizando componentes fundamentais de um terminal. Esse trabalho utilizou-se da transformada de Fourier e da superposição. Para melhor compreensão sobre o teorema da superposição utilizado por Takagi et al. (1981) deve-se considerar os circuitos da Figura 1. Nesta figura, o circuito de falta (a) corresponde a junção dos circuitos de pré-falta (b) e pós-falta (c).



a) Circuito de falta



b) Circuito de pré-falta



c) Circuito de pós-falta

Figura 1 - Circuitos de falta, pré-falta e pós-falta.

Fonte: autoria própria.

Considerando a primeira lei de ohm no circuito de falta, encontra-se a equação abaixo, que relaciona a tensão (V_F), corrente (I_F) e resistência (R_F) no ponto de falta:

$$V_F = I_F R_F \quad (1.1)$$

De acordo com as Leis de Kirchoff e observando o circuito da Figura 1(a), tem-se que:

$$I_F = -(I_{FS} + I_{FR}) \quad (1.2)$$

Em que I_{FS} é a corrente entre os terminais F (local em que ocorre o curto) e S e I_{FR} é a corrente entre os terminais F e R.

Substituindo (1.2) em (1.1), obtém-se:

$$V_F = -R_F (I_{FS} + I_{FR}) \quad (1.3)$$

Para facilitar os cálculos, define-se uma nova variável $K(x)$.

$$K(x) = \frac{I_{FR}}{I_{FS}} \quad (1.4)$$

Substituindo a equação (1.4) em (1.3), encontra-se a equação para a tensão no ponto de falta, V_F , dependendo da variável $K(x)$.

$$V_F = -R_F I_{FS} [1 + K(x)] \quad (1.5)$$

Alguns dados são determinados através de medições disponíveis localmente. E por meio destas, é possível definir matematicamente V_F e I_{FS}'' , como:

$$V_F = A(x)V_S - B(x)I_S \quad (1.6)$$

$$I_{FS}'' = C(x)V_S'' - D(x)I_S'' \quad (1.7)$$

Determinando a equação (1.5) apenas a partir de dados obtidos localmente, pode-se descrevê-la como:

$$A(x)V_S - B(x)I_S = -R_F [C(x)V_S'' - D(x)I_S''] [1 + K(x)] \quad (1.8)$$

Em que:

$$R_F [1 + K(x)] = -\frac{A(x)V_S - B(x)I_S}{C(x)V_S'' - D(x)I_S''} \quad (1.9)$$

No método proposto por Takagi et al. (1981), a impedância de falta (R_F) é puramente resistiva e a razão K é real, pois considera-se que a linha de transmissão possui baixas perdas e as impedâncias das fontes dos dois terminais são puramente indutivas. Logo, o lado esquerdo da equação (1.9) é um valor real. Sendo o lado esquerdo real, o lado direito também irá ser real para que a equação seja verdadeira. Com isso, a parte imaginária da equação é igual a zero.

$$\text{Im} \left[\frac{A(x)V_s - B(x)I_s}{C(x)V_s'' - D(x)I_s''} \right] = 0 \quad (1.10)$$

Na equação (1.10), $A(x) = D(x) = \cosh(\gamma x)$; $B(x) = Z_C * \sinh(\gamma x)$; $C(x) = \sinh(\gamma x)/Z_C$, em que Z_C é a impedância característica da linha, γ é a constante de propagação da linha, x é a distância de falta, V_s e I_s são os fasores de tensão e corrente pós-falta no terminal S , respectivamente, e V'' a diferença entre os fasores de tensão pós-falta e pré-falta do terminal S da linha de transmissão e I'' a diferença entre os fasores de corrente pós-falta e pré-falta do terminal S da linha de transmissão. Pelo fato da equação (1.10) ser não-linear, encontra-se o valor da distância da falta (x) através do método iterativo de Newton-Raphson.

Em 1982, Takagi et al. apresentaram um outro algoritmo, fazendo algumas considerações ao método proposto em 1981:

- I. $\tanh(\gamma x) = \gamma x$, pelo fato da linha de transmissão ser curta;
- II. Os ângulos de corrente de falta (I_f) e corrente de falta do terminal S (I_{f_s}'') são iguais.

Então, seguindo a mesma lógica e ordem do algoritmo anteriormente exposto, Takagi et al. (1982) chegaram à seguinte expressão:

$$x = \frac{\text{Im}(V_s I_s'')}{\text{Im}(Z I_s I_s'')} \quad (1.11)$$

O método de Takagi et al. (1982) assume impedâncias de falta puramente resistivas, o que pode levar a erros. Além disso é baseado na versão mais simples do modelo de linha de transmissão a parâmetros concentrados. No entanto, segundo

Salim (2008), pelo fato desse método ter sido pioneiro e servido de base para muitos outros métodos, tem grande relevância.

Johns e Jamali (1990) elaboraram um localizador de faltas utilizando dados sincronizados de tensão e corrente de dois terminais, o qual se baseia em um modelo de linha de transmissão a parâmetros distribuídos. A ferramenta desenvolvida pelos autores é descrita a seguir, considerando o circuito da Figura 2.

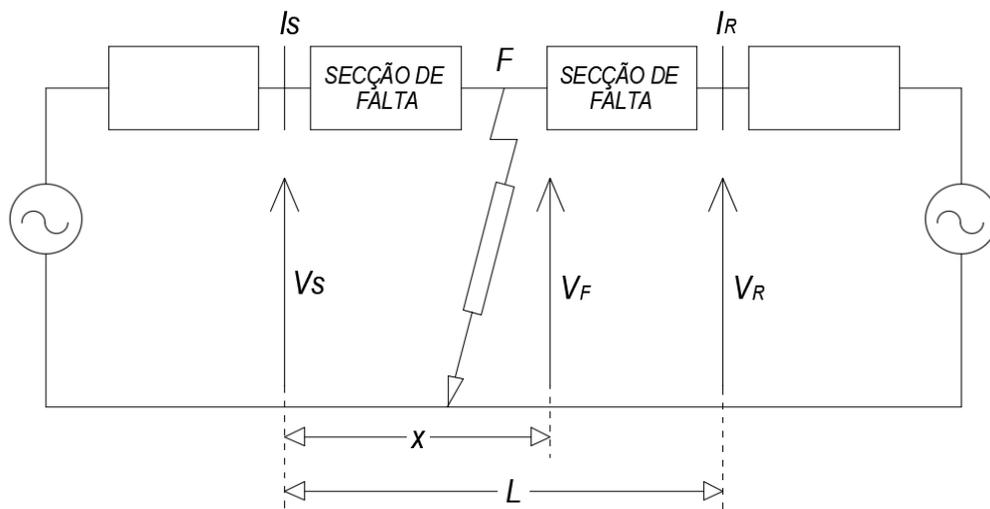


Figura 2 - Modelagem de uma linha de transmissão em falta.
Fonte: autoria própria.

A partir da análise da Figura 2, obtém-se as seguintes equações para tensão no ponto de falta F:

$$V_f = \cosh(Yx)V_s - Z_c \sinh(Yx)I_s \quad (1.12)$$

$$V_f = \cosh(Y(L-x))V_r - Z_c \sinh(Y(L-x))I_r \quad (1.13)$$

Nas equações (1.12) e (1.13), a impedância característica (Z_c) é dada por $Z_c = (Z/Y)^{1/2}$ e a constante de propagação Y é dada por $Y = (Z * Y)^{1/2}$. Z é impedância série da linha por unidade de comprimento e Y é admitância *shunt* da linha por unidade de comprimento.

Igualando as equações (1.12) e (1.13) e isolando a distância da falta (x), têm-se que:

$$x = [\tanh^{-1} \left(-\frac{H_2}{H_1} \right)] / Y \quad (1.14)$$

Na equação (1.14):

$$H_1 = Z_0 \cosh(Yl) I_r - \sinh(Yl) V_r + Z_0 I_s \quad (1.15)$$

$$H_2 = \cosh(\gamma l) V_R - Z_0 \operatorname{sen}(\gamma l) I_R - V_S \quad (1.16)$$

Girgis et al. (1992) publicaram um artigo no qual propõem um método de localização de faltas em linhas de transmissão de dois e três terminais utilizando dados sincronizados e não sincronizados. O método de Girgis et al. (1992) considerou o circuito da Figura 3.

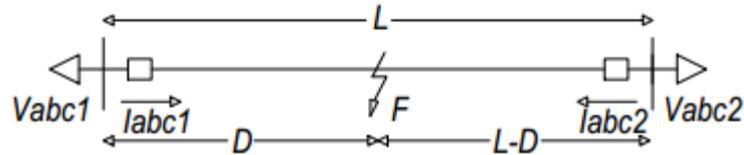


Figura 3 - Modelagem de uma linha de transmissão em falta.
Fonte: autoria própria.

A partir da análise do circuito da Figura 3, tem-se que:

$$V_{fabc} = V_{abc1} - DZ_{abc}I_{abc1} \quad (1.17)$$

$$V_{fabc} = V_{abc2} - (L - D)Z_{abc}I_{abc2} \quad (1.18)$$

Igualando as equações (1.17) e (1.18), têm-se:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + LZ_{abc}I_{abc2} = DZ_{abc}(I_{abc1} + I_{abc2}) \quad (1.19)$$

A equação (1.19) pode ser escrita na forma trifásica, como:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} x \quad (1.20)$$

onde:

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + L \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} I_{i2} \quad (1.21)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} (I_{i1} + I_{i2}) \quad (1.22)$$

$j = a, b, c$

A distância de falta (x) na equação (1.20), pode ser encontrada usando a teoria dos mínimos quadrados, conforme equação (1.23).

$$x = (M^+M)^{-1}M^+Y \quad (1.23)$$

Sendo M^+ o conjugado da transposta de M .

Aggarwal et al. (1993) elaboraram um localizador de faltas em linhas de transmissão levando em consideração dados de três terminais, como mostra a Figura 4.

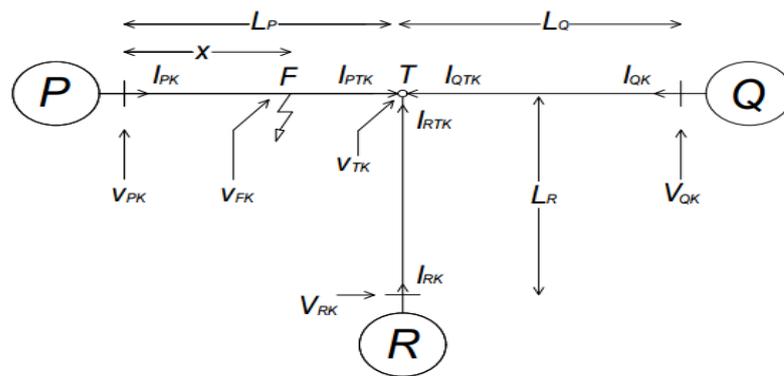


Figura 4 - Modelo de uma linha de transmissão com três terminais em falta.
Fonte: autoria própria.

Tendo como base a Figura 4, extraindo os fasores fundamentais de tensão e corrente em regime permanente através da transformada de Fourier, pode-se obter as equações (1.24) a (1.27).

$$D_k = -V_{pk} + A_k \cosh(\gamma_k L_{pk}) + Z_{ck} B_k \sinh(\gamma_k L_{pk}) \quad (1.24)$$

$$C_k = -Z_{ck} I_{pk} + A_k \sinh(\gamma_k L_{pk}) - Z_{ck} B_k \sinh(\gamma_k L_{pk}) \quad (1.25)$$

$$B_k = -\cosh(\gamma_k L_{qk}) I_{qk} + Y_{ck} \sinh(\gamma_k L_{pk}) V_{rk} \\ - \cosh(\gamma_k L_{rk}) I_{rk} + Y_{ck} \sinh(\gamma_k L_{qk}) V_{qk} \quad (1.26)$$

$$A_k = -\cosh(\gamma_k L_{qk}) V_{qk} + Z_{ck} \sinh(\gamma_k L_{pk}) I_{qk} \quad (1.27)$$

Em que Z_c é a impedância característica da linha, Y_c é a admitância característica da linha (dada pelo inverso de Z_c), γ é a constante de propagação da linha, e $k = 1$ para modo terra, 2 e 3 para modo aéreo. De acordo com Aggarwal et al. (1993), a distância de falta pode ser obtida por:

$$x = \tan^{-1}(D_k / C_k) / Y_k \quad (1.28)$$

Segundo o autor, o localizador apresentou alta precisão e independe da resistência da falta, das variações de impedância da fonte e da configuração da linha.

Brahma (2006) propôs um estimador para determinar o local de faltas em linhas de transmissão de múltiplos terminais. Esse estimador utiliza medições sincronizadas apenas da tensão antes e depois da falta em todos os terminais da linha, tendo com grande ponto positivo o fato de eliminar os erros oriundos dos transformadores de corrente. O algoritmo proposto por esse autor depende dos parâmetros de impedância da fonte trifásica. Com isso, assume-se que tais valores são conhecidos.

Preston et al. (2010) apresentaram um algoritmo para localização de faltas em linha de transmissão, em que a formulação matemática é obtida a partir da análise dos fasores sincronizados das tensões e correntes de sequência positiva e negativa de ambos os terminais da linha, não dependendo dos parâmetros da linha. O método desenvolvido por Preston et al. (2010) se baseia no circuito da Figura 5.

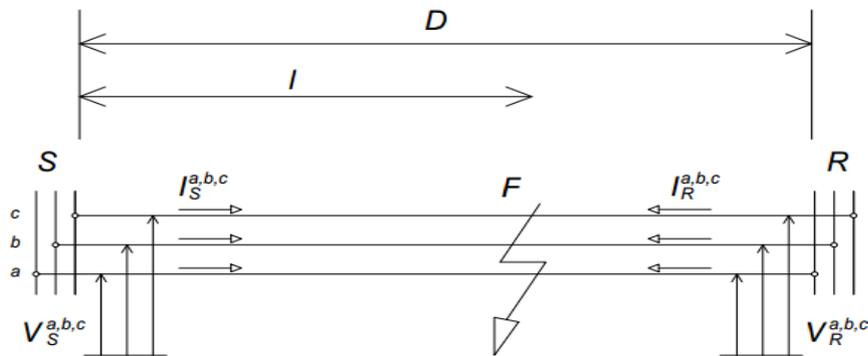


Figura 5 – Linha de transmissão em falta - Preston et al. (2010).
Fonte: autoria própria.

O equacionamento desse método analisa dados de sequência positiva e negativa e está descrito abaixo:

$$V_S^P - z l I_S^P = V_R^P - Z(D - l) I_R^P \quad (1.29)$$

$$V_S^N - z l I_S^N = V_R^N - Z(D - l) I_R^N \quad (1.30)$$

Em que, V_S^P e V_S^N são fasores de tensão de sequência positiva e negativa para o terminal S, e V_R^P e V_R^N são fasores de tensão de sequência positiva e negativa para o

terminal R; I_S^P e I_S^N são os fasores de corrente de sequência positiva e negativa para o terminal S, e I_R^P e I_R^N são os fasores de corrente de sequência positiva e negativa para o terminal R; Z é a impedância série da linha por unidade de comprimento de sequência positiva ou negativa.

O método proposto por Preston et al. (2010) não utiliza parâmetros da rede. Com isso, é necessário eliminar o Z (impedância da rede). Preston et al. (2010) propõem então que seja isolado o Z , como mostra abaixo:

$$Zl = \frac{(V_S^P - V_R^P)I_R^P - (V_S^N - V_R^N)I_R^N}{I_S^P I_R^N - I_S^N I_R^P} \quad (1.31)$$

$$Z(D - l) = \frac{(V_S^P - V_R^P)I_S^N - (V_S^N - V_R^N)I_S^P}{I_S^P I_R^N - I_S^N I_R^P} \quad (1.32)$$

Como último passo para encontrar a equação final, os autores escrevem o percentual da distância da falta em relação ao tamanho total da linha, como mostra a equação (1.33).

$$l\% = 100 \frac{(V_S^P - V_R^P)I_R^N - (V_S^N - V_R^N)I_R^P}{(V_S^P - V_R^P)(I_S^N + I_R^N) - (V_S^N - V_R^N)(I_S^P + I_R^P)} \quad (1.33)$$

Apostolopoulos e Korres (2010) modelaram um localizador de faltas para linhas de transmissão que não depende dos parâmetros da linha, utilizando medidas não sincronizadas de tensão e corrente de ambos os terminais. O algoritmo necessita de dados de pré-falta e durante a falta, sendo equacionado em duas etapas. A primeira etapa tem como objetivo estimar um valor inicial para distância de falta e ângulo de sincronização, a partir de um modelo de linha que despreza as capacitâncias. A segunda etapa trata de um processo iterativo de Newton-Raphson, o qual utiliza os dados de distância de falta e ângulo de sincronização encontrados na etapa anterior. O efeito capacitivo da linha é levado em consideração nessa segunda etapa.

Cruz (2015) elaborou um estimador de localização de faltas em linhas de transmissão considerando dados de dois terminais não sincronizados. O estimador baseou-se na teoria de estimação de estados e considerou erros sistemáticos nas medidas de tensão e de corrente (calculando erro e a variância). A autora classificou o cálculo da variância da distância da falta como uma das principais contribuições para o trabalho. De acordo com Cruz (2015), a partir da variância estima-se uma região

com aproximadamente 95,45% de probabilidade de incidência da falta. O estimador apresenta duas fases. A primeira fase ocorre no regime de pré-falta e tem como finalidade definir de forma mais precisa o ângulo de sincronização e os parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão. A segunda fase ocorre no regime pós-falta, onde os valores encontrados na etapa anterior são utilizados. Essa etapa tem como objetivo estimar a distância de falta.

2.3 METODOS BASEADOS EM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Além das técnicas mais utilizadas de localização de faltas, ondas viajantes e componentes fundamentais, vem surgindo na literatura técnicas que relacionam os conceitos e fundamentos da inteligência artificial. Essas técnicas vêm apresentando ótimos resultados, e estão contribuindo de forma significativa na precisão da localização de faltas. Porém, segundo Lopes (2014), apesar dos métodos de inteligência artificial apresentarem bom desempenho, estes têm aplicação restrita, já que consistem em técnicas com alto grau de complexidade e alto esforço computacional.

De acordo com a pesquisa do presente trabalho, os métodos de inteligência artificial que mais aparecem na literatura de localização de faltas em linhas de transmissão são as técnicas de Sistemas Especialistas, Redes Neurais Artificiais, Sistemas de Lógica Fuzzy e Algoritmos Genéticos, sendo entre essas, a técnica de Redes Neurais a mais difundida na literatura.

Gomes (2006) elaborou uma metodologia para localização de faltas em linhas de transmissão que utiliza a decomposição harmônica da corrente de fuga da linha e a técnica de Redes Neurais Artificiais. A técnica de inteligência artificial mencionada foi habilitada com dois conjuntos de dados.

Reddy e Mohanta (2008) propuseram um algoritmo para localização de faltas em linhas de transmissão através da Lógica *Fuzzy* (lógica nebulosa). Eles relatam que a lógica *Fuzzy* foi escolhida pela sua simplicidade, fácil implementação e menor trabalho computacional quando comparada com outras técnicas de inteligência artificial.

Raybolt (2011) avaliou uma técnica de localização de faltas em linhas de transmissão em circuito duplo também utilizando a técnica de Redes Neurais Artificiais. O trabalho discute os principais fatores que levam algoritmos clássicos a erros. A principal análise realizada diz respeito ao efeito do acoplamento mútuo

existente entre linhas paralelas. O resultado obtido comprovou a eficiência da aplicação de Redes Neurais em problemas relacionados à localização de faltas em linhas de transmissão.

2.4 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA

Com intuito de facilitar a compreensão, esta seção tem como objetivo elaborar um quadro com a síntese das literaturas de localização de faltas mencionadas neste capítulo. A Tabela 1 apresenta as literaturas explanadas, Ondas Viajantes (OV), Frequência Fundamental (FF) e Inteligência Artificial (IA), classificando quanto ao método utilizado para localização de faltas, ao número de terminais, a exigência ou não dos parâmetros elétricos da rede (impedância série e/ou admitância *shunt*) e a necessidade da sincronização prévia de registros.

Tabela 1 - Tabela resumo da revisão bibliográfica referente a localização de faltas.

	Classificação do método	Número de terminais			Parâmetros da linha	Necessita de sincron.
		1	2	3		
Gale et. Al (1993)	OV	-	X	-	-	-
Magnano e Abur (1998)	OV	X	X	-	-	X
Da Silva (2003)	OV	X	X	-	-	X
Araújo (2011)	OV	-	X	-	-	X
Cavalcanti et al. (2013)	OV	-	X	-	-	-
Lopes (2014)	OV	-	X	-	-	X
Abreu (2015)	OV	-	X	-	-	X
Takagi et al. (1981)	FF	X	-	-	X	-
Takagi et al. (1982)	FF	X	-	-	X	-
Girgis et al. (1982)	FF	-	X	-	X	X
Aggarwal et al. (1993)	FF	-	-	X	X	X
Brahma (2006)	FF	-	-	X	X	X
Preston et al. (2010)	FF	-	-	X	-	X
Apostolopoulos e Korres (2010)	FF	-	X	-	-	X
Lima (2013)	FF	X	-	-	X	-
Cruz (2015)	FF		X	-	X	X
Gomes (2006)	IA	-	X	-	X	-
Reddy e Mohanta (2008)	IA	X	-	-	X	-
Raybolt (2011)	IA	X	-	-	-	-

Fonte: autoria própria.

Capítulo 3

PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

Os dados de tensão e corrente que serão utilizados nos algoritmos de localização de faltas propostos nesta dissertação são admitidos como sendo oriundos de registros oscilográficos, obtidos a partir de medidores instalados nos dois terminais da linha de transmissão. Por isso, antes da etapa de localização de faltas, é necessário que exista uma etapa de processamento dos dados, que neste trabalho é composta por métodos capazes de estimar os parâmetros elétricos da linha a partir de fasores de tensão e corrente pré-falta, realizar a sincronização dos registros, identificar o instante em que ocorre o curto nos dois terminais e estimar os fasores de tensão e corrente pós-falta. Cada um desses métodos que compõem a etapa de processamento será detalhados nas seções a seguir.

3.1 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA POSITIVA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Em uma linha de transmissão existem quatro parâmetros elétricos, dois parâmetros longitudinais (resistência e reatância séries) e dois parâmetros transversais (condutância *shunt* e susceptância *shunt*). A exatidão desses parâmetros pode influenciar de forma significativa no desempenho de algoritmos de localização de faltas, portanto, é de extrema importância que estes parâmetros apresentem os menores erros possíveis.

No entanto, em virtude das linhas de transmissão estarem expostas a intempéries e, em alguns casos, submetidas a condições extremas impostas pela natureza, ocorrem desgastes e degradações físicas. Esses desgastes e degradações levam a

alterações nos parâmetros elétricos da linha, o que pode acarretar em erros nos localizadores de faltas que usam tradicionalmente parâmetros de projeto das linhas.

Assim, neste trabalho, utilizou-se um algoritmo para estimar os parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão (R, L e C), baseado unicamente em fasores de tensão e corrente pré-falta. Essa estratégia foi utilizada para garantir a precisão das metodologias de localização propostas mesmo em situações em que os parâmetros elétricos da linha apresentem erros ou sejam desconhecidos. O algoritmo de estimação de parâmetros utilizado é apresentado na próxima seção.

É importante ressaltar que os parâmetros de sequência zero também são requeridos pelas metodologias de localização desenvolvidas, porém, não foram encontrados na literatura métodos de estimação que calculassem esses parâmetros para circuitos equilibrados no regime de pré-falta, o que garantiria uma maior exatidão nos valores de R, L e C de sequência zero. Alguns trabalhos que calculam parâmetros de sequência zero foram encontrados utilizando dados de pós-falta, como em Wang e Xu (2015) e Dasgupta e Soman (2015), no entanto, sempre dependentes de métodos iterativos ou fasores influenciados pelos transitórios de falta. Assim preferiu-se, neste trabalho, utilizar os parâmetros de sequência zero de projeto das linhas de transmissão e realizar uma análise de sensibilidade das metodologias de localização propostas mediante imprecisões nos valores desses parâmetros. Essa análise pode ser visualizada no capítulo 6 desta dissertação.

3.1.1 Metodologia de estimação de parâmetros de sequência positiva

A metodologia de estimação de parâmetros de sequência positiva que será usada neste trabalho baseia-se unicamente em fasores pré-falta de tensão e de corrente, conforme descrito em Benetti (2009), sendo formulada a partir da análise do circuito da Figura 6.

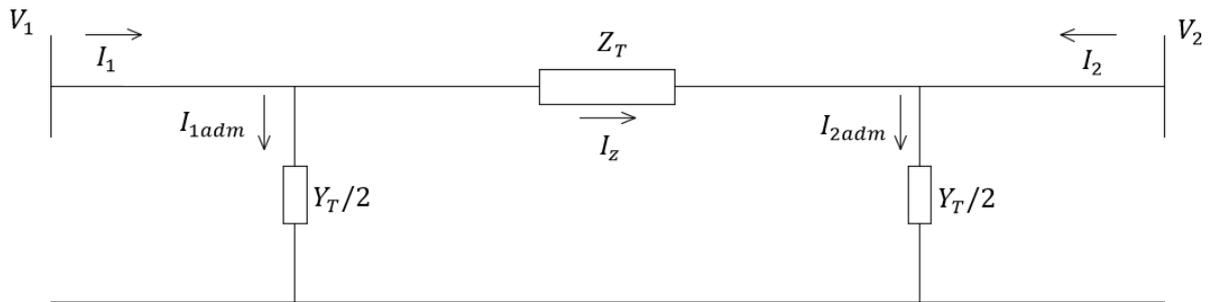


Figura 6 – Modelo π de sequência positiva de uma linha de transmissão.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6:

\dot{I}_1 é o fasor de corrente de sequência positiva associado ao terminal 1;

\dot{I}_2 é o fasor de corrente de sequência positiva associado ao terminal 2;

\dot{V}_1 é o fasor de tensão de sequência positiva associado ao terminal 1;

\dot{V}_2 é o fasor de tensão de sequência positiva associado ao terminal 2;

Z_T é a impedância série da linha de transmissão de sequência positiva;

$Y_T/2$ é a admitância em paralelo da linha de transmissão de sequência positiva.

As expressões para o cálculo dos parâmetros transversais e longitudinais da linha de transmissão serão deduzidas nas seções a seguir.

3.1.2 Cálculo da admitância em paralelo de uma linha de transmissão

Utilizando a lei de Kirchhoff das correntes no circuito da Figura 6, tem-se que:

$$\dot{I}_z = \dot{I}_1 - \dot{I}_{1adm} \quad (3.1)$$

$$\dot{I}_z = \dot{I}_{2adm} - \dot{I}_2 \quad (3.2)$$

De acordo com a lei de Ohm, pode-se escrever as equações:

$$\dot{I}_{1adm} = \dot{V}_1 \frac{Y_T}{2} \quad (3.3)$$

$$\dot{I}_{2adm} = \dot{V}_2 \frac{Y_T}{2} \quad (3.4)$$

Substituindo \dot{I}_{1adm} e \dot{I}_{2adm} nas equações (3.1) e (3.2), obtêm-se:

$$I_z = I_1 - \left(\dot{V}_1 \frac{Y_T}{2} \right) \quad (3.5)$$

$$I_z = \left(\dot{V}_2 \frac{Y_T}{2} \right) - I_2 \quad (3.6)$$

Igualando as equações (3.5) e (3.6), obtêm-se a seguinte expressão para a admitância *shunt* da linha:

$$Y_T = 2 \left(\frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2} \right) \quad (3.7)$$

A equação (3.7) é uma equação complexa que pode ser descrita conforme equação (3.8). A parte real dessa equação corresponde à condutância *shunt* e a parte imaginária, à susceptância *shunt*. Notar que a admitância *shunt* encontrada depende unicamente dos fasores de tensão e corrente de sequência positiva, pré-falta, dos dois terminais da linha de transmissão.

$$Y_T = 2 \left(\frac{I_1 e^{j\theta_{i1}} + I_2 e^{j\theta_{i2}}}{V_1 e^{j\theta_{v1}} + V_2 e^{j\theta_{v2}}} \right) \quad (3.8)$$

3.1.3 Cálculo da impedância série de uma linha de transmissão

Para encontrar o valor da impedância série, deve-se considerar mais uma vez o circuito da Figura 6. Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões nesse circuito, pode-se escrever a seguinte equação:

$$Z_T = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{\dot{I}_z} \quad (3.9)$$

Substituindo a equação (3.7) na equação (3.6), deixa-se a corrente \dot{I}_z em função apenas dos fasores de tensão e corrente, como pode ser observado na equação (3.10).

$$\dot{I}_z = \frac{\dot{V}_2 \dot{I}_1 - \dot{V}_1 \dot{I}_2}{\dot{V}_2 + \dot{V}_1} \quad (3.10)$$

Para finalizar, deve-se substituir \dot{I}_z , encontrada na equação (3.10), na equação (3.9), o que leva à expressão (3.11) para o cálculo da impedância série da linha.

$$Z_T = \frac{\dot{V}_1^2 - \dot{V}_2^2}{\dot{V}_2 \dot{I}_1 - \dot{V}_1 \dot{I}_2} \quad (3.11)$$

Similarmente à equação (3.7), a equação (3.11) é uma equação complexa, que pode ser escrita conforme a equação (3.12). A parte real dessa equação é a resistência da linha e a parte imaginária a reatância da linha.

$$Z_T = \frac{(V_1 e^{j\theta_{v1}})^2 - (V_2 e^{j\theta_{v2}})^2}{V_2 e^{j\theta_{v2}} I_1 e^{j\theta_{i1}} - V_1 e^{j\theta_{v1}} I_2 e^{j\theta_{i2}}} \quad (3.12)$$

3.1.4 Validação da metodologia de estimação de parâmetros

Para comprovar a eficiência do algoritmo de estimação de parâmetros, foram utilizados fasores oriundos de simulações de linhas de 138 kV (90 km), 230 kV (180 km) e 500 kV (250 km), no *software* ATP. Os resultados estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 2 - Resultados do algoritmo de estimação de parâmetros para resistência das linhas.

	138 kV	230 kV	500 kV
<i>Valor Real (Ω/km)</i>	0,115674	0,09127	0,0221
<i>Valor Encontrado (Ω/km)</i>	0,1151	0,0895	0,0214
<i>Erro Absoluto (Ω/km)</i>	0,000574	0,00177	0,0007
<i>Erro percentual (%)</i>	0,4962	1,9393	3,1674

Fonte: autoria própria.

Tabela 3 - Resultados do algoritmo de estimação de parâmetros para reatância das linhas.

	138 kV	230 kV	500 kV
<i>Valor Real (Ω/km)</i>	0,46218	0,51879	0,3212
<i>Valor Encontrado (Ω/km)</i>	0,4211	0,5146	0,3158
<i>Erro Absoluto (Ω/km)</i>	0,04108	0,00419	0,0054
<i>Erro percentual (%)</i>	8,8883	0,8076	1,6812

Fonte: autoria própria.

Tabela 4 - Resultados do algoritmo de estimação de parâmetros para capacitância das linhas.

	138 kV	230 kV	500 kV
Valor Real (nF/km)	9,54	8,47	13,46
Valor Encontrado (nF/km)	9,5475	8,5086	13,576
Erro Absoluto (Ω/km)	0,0075	0,0386	0,116
Erro percentual (%)	0,0786	0,4557	0,8618

Fonte: autoria própria.

Os erros apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 são justificados principalmente pela imprecisão na extração dos fasores através da transformada de Fourier.

Vale ressaltar que o valor da capacitância não é encontrado diretamente pela equação (3.8). É necessário substituir o valor da parte imaginária da equação (3.8) na equação abaixo.

$$C = \frac{b_{sh}}{2\pi f} \quad (3.13)$$

Na equação (3.13), C corresponde ao valor da capacitância, b_{sh} é a susceptância *shunt*, e f é a frequência fundamental, 60 Hz.

Analisando as tabelas 2, 3 e 4, pode-se observar que o maior erro percentual no parâmetro da resistência foi de 3,1674%, que se deu na linha de 500 kV. O parâmetro da reatância apresentou maior erro percentual na linha de 138 kV, com o valor de 8,8883%. Já o maior erro percentual da capacitância se deu na linha de 500 kV, com um erro de 0,8618%. O valor da condutância *shunt* não foi avaliado, tendo em vista que este parâmetro não foi modelado nas simulações (Benetti, 2009).

Os resultados obtidos neste tópico foram importantes para mostrar que o método de estimação de parâmetros de sequência positiva que será usado neste trabalho é eficiente, o que garantirá que as metodologias de localização desenvolvidas não sofram influência da imprecisão ou desconhecimento desses parâmetros.

3.1.5 Matriz de Impedância série e matriz de admitância *shunt*

Os algoritmos de localização de faltas desenvolvidos neste trabalho necessitam das matrizes de impedância série e admitância paralela trifásicas da linha. A matriz

de impedância série é representada pela impedância mútua (Z_m) e pela impedância própria (Z_p), conforme a equação (3.14).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Na equação (3.14), Z_p e Z_m podem ser obtidas através das equações (3.15) e (3.16).

$$Z_m = \frac{Z_0 - Z_1}{3} \quad (3.15)$$

$$Z_p = Z_m + Z_1 \quad (3.16)$$

Nas equações (3.15) e (3.16), Z_1 e Z_0 representam as impedâncias de sequência positiva e de sequência zero, respectivamente. O valor de sequência positiva é encontrado através do algoritmo de estimação de parâmetros. O valor de sequência zero é obtido a partir de consulta ao banco de dados da linha de transmissão.

A matriz de admitância *shunt*, por sua vez, é composta pelas admitâncias mútuas (Y_m) e pelas admitâncias próprias (Y_p), como mostra a equação (3.17).

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} Y_p & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_p & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_p \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Para encontrar Y_m e Y_p , é necessário encontrar as capacitâncias mútua (C_m) e própria (C_p), de acordo com as equações (3.18) a (3.21).

$$C_m = \frac{C_0 - C_1}{3} \quad (3.18)$$

$$C_p = C_m + C_1 \quad (3.19)$$

$$Y_m = 2\pi f C_m i \quad (3.20)$$

$$Y_p = 2\pi f C_p i \quad (3.21)$$

Nas equações (3.18) e (3.19), C_1 e C_0 representam as capacitâncias de sequência positiva e zero, respectivamente.

3.2 SINCRONIZAÇÃO DE REGISTROS

Vários fatores podem prejudicar a exatidão de algoritmos de localização de faltas baseados em dados de dois terminais, sendo um deles a não sincronização de registros oscilográficos. Como os localizadores propostos neste trabalho utilizam dados de tensão e corrente de dois terminais, há a necessidade de se implementar alguma ferramenta de sincronização para minimização dos possíveis erros de localização de faltas.

Os dados dos terminais das linhas de transmissão são monitorados através de registradores. No entanto, esses registradores não possuem a mesma base de tempo, existindo um “erro de relógio”, que precisa ser corrigido através da sincronização. Atualmente, a maioria dos localizadores de falta admite dados sincronizados por PMUs (*Phasor Measurement Units*). As PMUs são equipamentos que realizam medições dos sinais de tensão e corrente de sequência positiva de diversos locais, processam esses dados e sincronizam através de um pulso de clock fornecido pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS).

A implementação de um sistema de PMUs apresenta um custo elevado, logo, é importante buscar métodos ou tecnologias mais viáveis e que ofereçam precisão semelhante na sincronização. Além disso, as PMUs são vulneráveis a falhas, o que pode levar a erros de sincronização. Devido ao que foi mencionado, os métodos de sincronização de dados via *software* podem ser uma alternativa, tanto para substituir as PMUs, como para auxiliá-las.

Na literatura existem diversas abordagens que realizam a sincronização de registros de falta. Essas abordagens, em sua grande maioria, utilizam transitórios de alta frequência. No entanto, no presente trabalho será utilizado um algoritmo de sincronização de registros que emprega unicamente fasores de tensão e corrente pré-falta, e que não depende dos parâmetros elétricos da linha de transmissão. Esse algoritmo foi apresentado em Cruz et al. (2016) e será detalhado a seguir, a partir da análise do circuito da Figura 7.

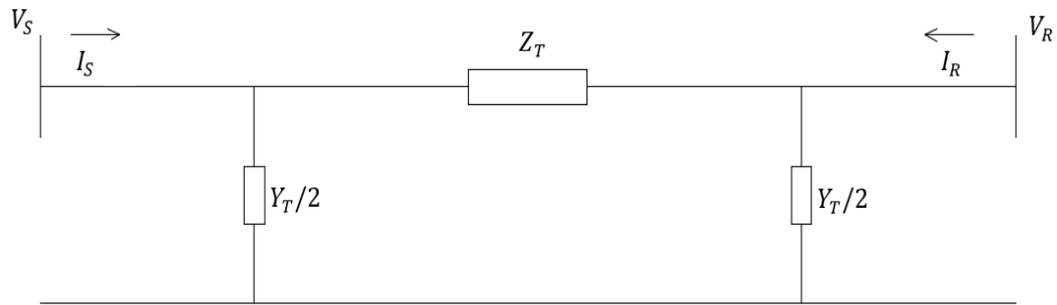


Figura 7 - Circuito equivalente de seqüência positiva de uma linha de transmissão operando no regime pré-falta.

Fonte: autoria própria.

Na Figura 7:

Z_T : impedância série da linha de transmissão, seqüência positiva.

$Y_T = jb_{shunt}$: representa a admitância *shunt* da linha de transmissão, seqüência positiva.

$V_S = V_S e^{j\theta_{VS}}$: onde V_S é o módulo da tensão pré-falta no terminal S e θ_S é o ângulo da tensão pré-falta no terminal S.

$V_R = V_R e^{j\theta_{VR}}$: onde V_R é o módulo da tensão pré-falta no terminal R e θ_R é o ângulo da tensão pré-falta no terminal R.

$I_S = I_S e^{j\theta_{IS}}$: onde I_S é o módulo da corrente pré-falta no terminal S e θ_S é o ângulo da corrente pré-falta no terminal S.

$I_R = I_R e^{j\theta_{IR}}$: onde I_R é o módulo da corrente pré-falta no terminal R e θ_R é o ângulo da corrente pré-falta no terminal R.

Da Figura 7, pode-se extrair a seguinte relação:

$$I_S + I_R e^{j\delta} = \frac{Y_T}{2} (V_S + V_R e^{j\delta}) \quad (3.22)$$

Em que δ é o ângulo de sincronização entre os dois terminais.

A equação (3.22) representa uma equação complexa que pode ser dividida em duas equações reais, que estão apresentadas abaixo.

$$I_S \cos(\theta_{IS}) + I_R \cos(\theta_{IR} + \delta) = \frac{-b_{shunt}}{2} (V_S \sin(\theta_{VS}) + V_R \sin(\theta_{VR} + \delta)) \quad (3.23)$$

$$I_S \sin(\theta_{IS}) + I_R \sin(\theta_{IR} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} (V_S \cos(\theta_{VS}) + V_R \cos(\theta_{VR} + \delta)) \quad (3.24)$$

Definindo-se:

$$a = I_S \cos(\theta_{IS}) \quad (3.25)$$

$$b = I_S \sin(\theta_{IS}) \quad (3.26)$$

$$c = V_S \sin(\theta_{VS}) \quad (3.27)$$

$$d = V_S \cos(\theta_{VS}) \quad (3.28)$$

E substituindo as equações (3.25) a (3.28) nas equações (3.23) e (3.24), obtêm-se:

$$a + I_R \cos(\theta_{IR} + \delta) = \frac{-b_{shunt}}{2} (c + V_R \sin(\theta_{VR} + \delta)) \quad (3.29)$$

$$b + I_R \sin(\theta_{IR} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} (d + V_R \cos(\theta_{VR} + \delta)) \quad (3.30)$$

Dividindo a equação (3.29) pela equação (3.30), conforme mostra a equação (3.31), pode-se obter a equação (3.32).

$$\frac{a + I_R \cos(\theta_{IR} + \delta)}{b + I_R \sin(\theta_{IR} + \delta)} = \frac{\frac{-b_{shunt}}{2} (c + V_R \sin(\theta_{VR} + \delta))}{\frac{b_{shunt}}{2} (d + V_R \cos(\theta_{VR} + \delta))} \quad (3.31)$$

$$A = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \cos(\delta) - (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \sin(\delta) \quad (3.32)$$

Onde:

$$A = ad + bc + V_R I_R \cos(\theta_{VR} - \theta_{IR}) \quad (3.33)$$

$$x_1 = -a V_R \cos(\theta_{VR}) \quad (3.34)$$

$$x_2 = -b V_R \sin(\theta_{VR}) \quad (3.35)$$

$$x_3 = -d I_R \cos(\theta_{IR}) \quad (3.36)$$

$$x_4 = -c I_R \sin(\theta_{IR}) \quad (3.37)$$

$$y_1 = a V_R \sin(\theta_{VR}) \quad (3.38)$$

$$y_2 = b V_R \cos(\theta_{VR}) \quad (3.39)$$

$$y_3 = d I_R \sin(\theta_{IR}) \quad (3.40)$$

$$y_4 = c I_R \cos(\theta_{IR}) \quad (3.41)$$

Considerando $x = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$ e $y = -y_1 + y_2 - y_3 + y_4$, obtém-se a expressão (3.42) que relaciona o parâmetro A com o ângulo de sincronização e com os parâmetros x e y .

$$A = x \cos(\delta) - y \sin(\delta) \quad (3.42)$$

A relação entre as variáveis A , x e y , disposta na equação (3.42), pode ser representada geometricamente, conforme a Figura 8.

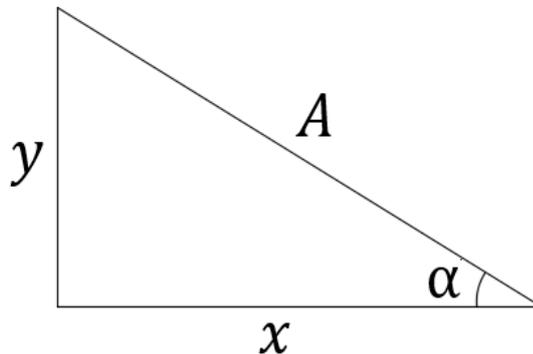


Figura 8 - Representação geométrica das relações de A , x , α e y .
Fonte: autoria própria.

A partir da Figura 8, pode-se extrair as seguintes relações:

$$x = A \sin(\beta) \quad (3.43)$$

$$y = A \cos(\beta) \quad (3.44)$$

$$A = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.45)$$

Substituindo as equações (3.43) a (3.45) na equação (3.42), pode-se encontrar:

$$\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \sin(\beta - \delta) \quad (3.46)$$

Logo, o ângulo de sincronização pode ser determinado através da expressão (3.47).

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (3.47)$$

Existe uma ressalva nesse método: para determinar o valor correto do ângulo de sincronização δ , deve ser realizada uma análise do sinal do parâmetro y . Com isso, deve-se adicionar a seguinte etapa ao algoritmo:

- Se ($y < 0$)

$$\delta = 180 - \text{sen}^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

- Senão

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{A}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

3.3 ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA DE INÍCIO DA FALTA

Os métodos mais comuns existentes na literatura que identificam o instante ou amostra de início de falta são baseados ou no uso da Transformada *Wavelet* ou no uso de algoritmos que comparam valores instantâneos de dois ciclos consecutivos do sinal amostrado. Neste trabalho, utilizou-se o método de comparação de ciclos, o qual será detalhado a seguir. Vale salientar que, para a implementação desse método, foram utilizados apenas sinais de corrente, pelo fato destes apresentarem variações mais significativas quando ocorre uma falta.

3.3.1 Método utilizado para a localização da amostra de início da falta

Esse método consiste em comparar duas amostras correspondentes de ciclos consecutivos de um sinal, a fim de verificar se a diferença entre elas é superior a uma tolerância previamente estabelecida (neste trabalho adotou-se a tolerância de 0,06 pu – base 100 MVA e tensão nominal da linha). Caso a diferença entre as duas amostras comparadas seja superior à tolerância, em quaisquer das três correntes de linha, a falta será detectada. Para uma maior precisão e confiabilidade, usa-se um contador para confirmar se a diferença continua maior que a tolerância por pelo menos quatro amostras consecutivas.

O método foi implementado neste trabalho de maneira a identificar três amostras de início da falta para cada terminal, uma vez que se tem correntes associadas às

fases a, b e c. Assim, a amostra de início da falta foi escolhida como sendo a de maior amplitude dentre as seis identificadas.

Para validação do algoritmo de identificação da amostra de início da falta, foram realizadas simulações de faltas fase A-terra em linhas de transmissão no *software* ATP. As linhas foram simuladas conforme perfil da Figura 9, em que os comprimentos do trecho LT2 são 90 km, 180 km e 250 km, para os respectivos níveis de tensão: 138kV, 230kV e 500kV. O comprimento dos trechos LT1 e LT3 é de 20 km. Em cada linha foram simuladas faltas no início (10% da linha), meio (50% da linha) e fim do trecho LT2 (90% da linha).



Figura 9 - Representação da linha de transmissão simulada no *software* ATP.

Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Resultados do método utilizado

Os resultados do algoritmo que identifica a amostra de início das faltas nas simulações das linhas de 90 km, 180 km e 250 km estão apresentados na Tabela 05.

Tabela 5 - Amostra de início da falta nas linhas de 90km, 180km e 250km.

	90 km		180km		250km	
	Term. 01	Term. 02	Term. 01	Term. 02	Term. 01	Term. 02
10% da linha	513	517	508	516	515	525
50% da linha	515	515	512	512	520	520
90% da linha	517	513	516	508	525	515

Fonte: autoria própria.

Para validar o algoritmo, seguem as Figuras 10 e 11, que ilustram graficamente a amostra de início da falta nos terminais 01 e 02 considerando um caso de falta na linha de 90 km simulada.

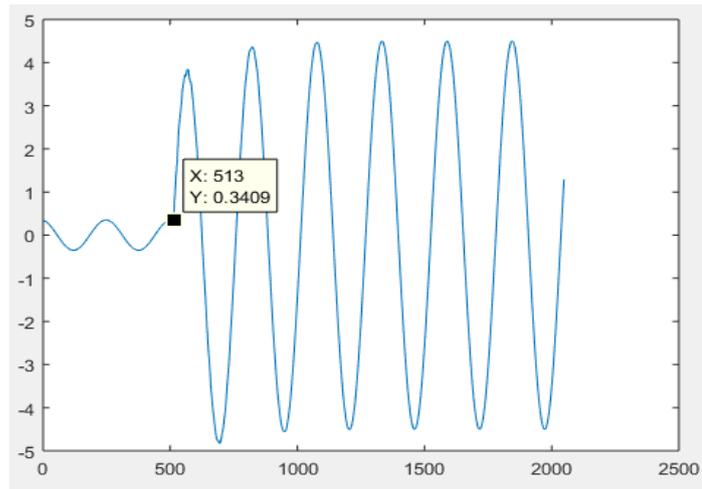


Figura 10 – Simulação de falta na linha de 90 km (10% da linha) – terminal 01
Fonte: autoria própria.

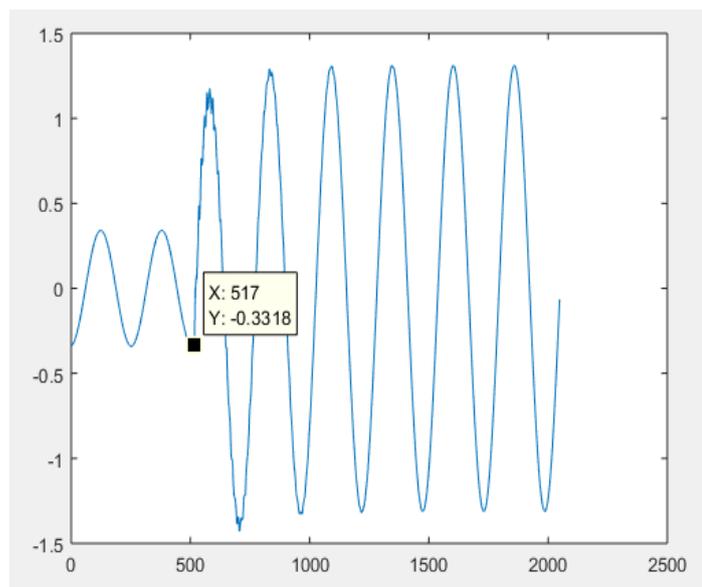


Figura 11 – Simulação de falta na linha de 90 km (10% da linha) – terminal 02.
Fonte: autoria própria.

3.4 ESTIMAÇÃO DE FASORES DE TENSÃO E CORRENTE PÓS-FALTA

Após a falta, vários transitórios eletromagnéticos atuam de forma significativa, podendo influenciar na qualidade dos fasores e, conseqüentemente, na exatidão da localização de faltas. Nas simulações realizadas, os transitórios de alta frequência podem estar presentes de forma expressiva até o segundo ciclo, como pode ser observado na Figura 12. Com isso, optou-se por extrair os dados do terceiro ciclo após

o instante de início da falta. A extração fasorial se deu através da transformada de Fourier de um ciclo.

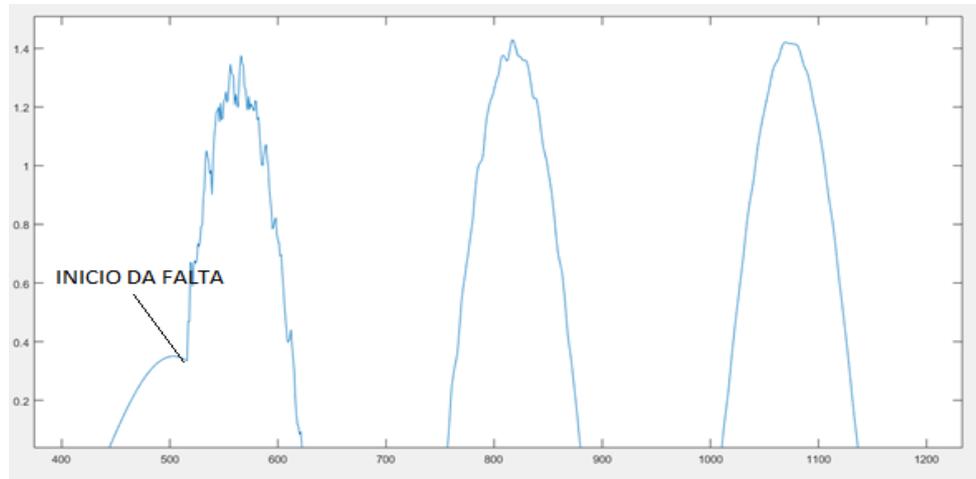


Figura 12 – Sinal de corrente ampliado – falta na linha de 90 km (10%), terminal 01.
Fonte: autoria própria.

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO DAS METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Após a etapa de processamento dos dados de entrada, ocorre a etapa pós-falta. Nessa etapa será obtido o valor da distância de falta, a partir de um equacionamento que depende dos fasores fundamentais sincronizados extraídos dos dois terminais da linha, e dos parâmetros elétricos da linha. O equacionamento desenvolvido baseou-se no trabalho de Girgis et al. (1992), no entanto, considerou as capacitâncias da linha de transmissão no cálculo da distância de falta. Para formular as metodologias de localização propostas neste trabalho, considerar o circuito da Figura 13.

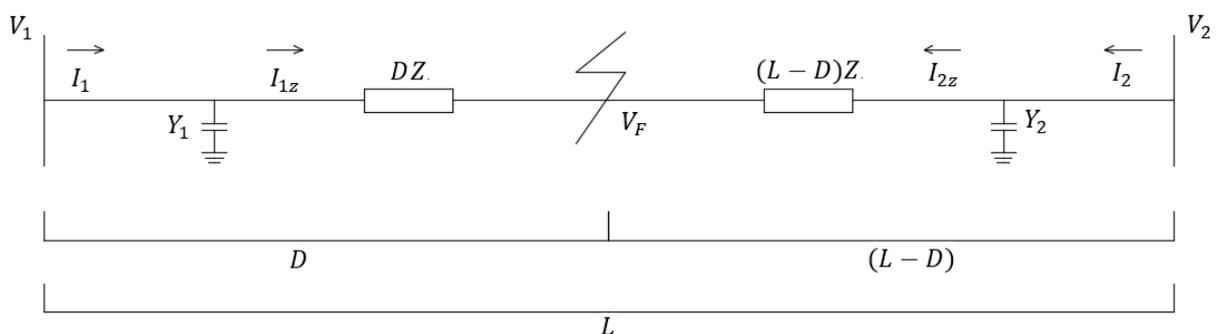


Figura 13 – Diagrama esquemático de uma linha de transmissão em falta.
Fonte: autoria própria.

A Figura 13 representa o diagrama unifilar de uma linha de transmissão trifásica, em que V_1 , V_2 e V_F são definidos como sendo os vetores de tensão trifásicos no terminal 01, terminal 02 e no local de ocorrência da falta, respectivamente. As correntes I_1 e I_2 correspondem às correntes no terminal 01 e terminal 02,

respectivamente. D é a distância de falta ao terminal 01 e L o comprimento da linha. Os parâmetros Y_1 e Y_2 representam as admitâncias *shunt* da linha do trecho antes e após o local onde ocorre o curto-circuito.

A partir da análise do circuito da Figura 13, pode-se obter as seguintes relações:

$$Y_1 = DY \quad (4.1)$$

$$Y_2 = (L - D)Y \quad (4.2)$$

$$V_F = V_1 - DZI_{1z} \quad (4.3)$$

$$V_F = V_2 - (L - D)ZI_{2z} \quad (4.4)$$

$$I_{1z} = I_1 - V_1Y_1 \quad (4.5)$$

$$I_{2z} = I_2 - V_2Y_2 \quad (4.6)$$

Substituindo as equações (4.5) e (4.6) nas equações (4.3) e (4.4), tem-se:

$$V_F = V_1 - DZ(I_1 - V_1Y_1) \quad (4.7)$$

$$V_F = V_2 - (L - D)Z(I_2 - V_2Y_2) \quad (4.8)$$

Igualando as equações (4.7) e (4.8), e utilizando as relações das equações (4.1) e (4.2), encontra-se:

$$D^2ZY(V_1 - V_2) + D(-Z(I_1 + I_2) + 2LZYV_2) + V_1 - V_2 + LZI_2 - L^2ZYV_2 = 0 \quad (4.9)$$

A equação (4.9) corresponde a uma equação complexa trifásica, que pode ser dividida em seis equações reais. As seis equações dependem unicamente dos fasores fundamentais dos dois terminais e dos parâmetros elétricos da linha, tendo apenas uma incógnita, D . Essas equações serão utilizadas na formulação dos localizadores de falta propostos.

A fim de facilitar a compreensão e simplificar as deduções que se seguem, foram realizadas as seguintes substituições na equação (4.9):

$$D^2(ZY(V_1 - V_2)) = D^2L_{jk} \quad (4.10)$$

$$D(-Z(I_1 + I_2) + 2LZYV_2) = DM_{jk} \quad (4.11)$$

$$+V_1 - V_2 + LZI_2 - L^2ZYV_2 = N_{jk} \quad (4.12)$$

Nas equações (4.10) a (4.12) os coeficientes j variam para as fases A, B e C, enquanto o valor de k varia para parte real (r) e parte imaginária (im). As seis equações reais obtidas da equação (4.9) estão descritas abaixo.

$$L_{Ar} D^2 + M_{Ar} D + N_{Ar} = 0 \quad (4.13)$$

$$L_{Ai} D^2 + M_{Aim} D + N_{Aim} = 0 \quad (4.14)$$

$$L_{Br} D^2 + M_{Br} D + N_{Br} = 0 \quad (4.15)$$

$$L_{Bim} D^2 + M_{Bim} D + N_{Bim} = 0 \quad (4.16)$$

$$L_{Cr} D^2 + M_{Cr} D + N_{Cr} = 0 \quad (4.17)$$

$$L_{Cim} D^2 + M_{Cim} D + N_{Cim} = 0 \quad (4.18)$$

Como o sistema apresenta um número maior de equações (seis equações) do que de incógnitas (apenas uma), tem-se um sistema sobredeterminado. Neste trabalho será utilizado o conceito de mínimos quadrados para resolver o sistema sobredeterminado encontrado. A partir da solução adotada, foi possível formular duas metodologias de localização de faltas, as quais serão apresentadas nas próximas seções. Vale salientar que o método de mínimos quadrados consiste em uma técnica de otimização que tem o intuito de encontrar o melhor valor de uma variável a partir de um conjunto de dados.

4.1 METODOLOGIA 01

Esta metodologia foi formulada como um problema de otimização, cuja função objetivo foi construída a partir do conceito de mínimos quadrados, ou seja, foi modelada pelo somatório do quadrado dos resíduos associados às equações (4.13) a (4.18). Como as equações (4.13) a (4.18) são todas iguais a zero, então as próprias equações foram assumidas como sendo os resíduos do problema, conforme equações (4.19) a (4.24).

$$L_{Ar} D^2 + M_{Ar} D + N_{Ar} = e_1 \quad (4.19)$$

$$L_{Ai}D^2 + M_{Aim}D + N_{Aim} = e_2 \quad (4.20)$$

$$L_{Br}D^2 + M_{Br}D + N_{Br} = e_3 \quad (4.21)$$

$$L_{Bim}D^2 + M_{Bim}D + N_{Bim} = e_4 \quad (4.22)$$

$$L_{Cr}D^2 + M_{Cr}D + N_{Cr} = e_5 \quad (4.23)$$

$$L_{Cim}D^2 + M_{Cim}D + N_{Cim} = e_6 \quad (4.24)$$

A função objetivo do problema, portanto, pode ser descrita conforme a equação (4.25).

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \sum_{x=1}^6 (e_x)^2 \quad (4.25)$$

Substituindo os valores dos resíduos na equação (4.25), encontra-se:

$$\begin{aligned} F_{obj} = \frac{1}{2} [& (L_{Ar}D^2 + M_{Ar}D + N_{Ar})^2 + (L_{Aim}D^2 + M_{Aim}D + N_{Aim})^2 \\ & + (L_{Br}D^2 + M_{Br}D + N_{Br})^2 + (L_{Bim}D^2 + M_{Bim}D + N_{Bim})^2 \\ & + (L_{Cr}D^2 + M_{Cr}D + N_{Cr})^2 + (L_{Cim}D^2 + M_{Cim}D + N_{Cim})^2] \end{aligned} \quad (4.26)$$

Na equação (4.26), precisa-se encontrar o valor de D que minimize o somatório do quadrado dos resíduos. Assim, derivando toda a equação (4.26) em relação a D (condição de otimalidade de primeira ordem), encontra-se:

$$\begin{aligned} \frac{dF_{obj}}{dD} = \frac{2}{2} [& (L_{Ar}D^2 + M_{Ar}D + N_{Ar}) (2L_{Ar}D + M_{Ar}) \\ & + (L_{Aim}D^2 + M_{Aim}D + N_{Aim}) (2M_{Aim}D + N_{Aim}) \\ & + (L_{Br}D^2 + M_{Br}D + N_{Br}) (2L_{Br}D + M_{Br}) \\ & + (L_{Bim}D^2 + M_{Bim}D + N_{Bim}) (2L_{Bim}D + M_{Bim}) \\ & + (L_{Cr}D^2 + M_{Cr}D + N_{Cr}) (2L_{Cr}D + M_{Cr}) \\ & + (L_{Cim}D^2 + M_{Cim}D + N_{Cim}) (2L_{Cim}D + M_{Cim})] = 0 \end{aligned} \quad (4.27)$$

A equação (4.27) pode ser simplificada e escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& [(2L_{Ar}^2 D^3 + L_{Ar} M_{Ar} D^2 + 2M_{Ar} L_{Ar} D^2 + M_{Ar}^2 D + 2L_{Ar} N_{Ar} D + M_{Ar} N_{Ar}) \\
& + (2L_{Aim}^2 D^3 + L_{Aim} M_{Aim} D^2 + 2M_{Aim} L_{Aim} D^2 + M_{Aim}^2 D \\
& + 2L_{Aim} N_{Aim} D + M_{Aim} N_{Aim}) \\
& + (2L_{Br}^2 D^3 + L_{Br} M_{Br} D^2 + 2M_{Br} L_{Br} D^2 + M_{Br}^2 D + 2L_{Br} N_{Br} D \\
& + M_{Br} N_{Br}) \\
& + (2L_{Bim}^2 D^3 + L_{Bim} M_{Bim} D^2 + 2M_{Bim} L_{Bim} D^2 + M_{Bim}^2 D \\
& + 2L_{Bim} N_{Bim} D + M_{Bim} N_{Bim}) \\
& + (2L_{Cr}^2 D^3 + L_{Cr} M_{Cr} D^2 + 2M_{Cr} L_{Cr} D^2 + M_{Cr}^2 D + 2L_{Cr} N_{Cr} D \\
& + M_{Cr} N_{Cr}) \\
& + (2L_{Cim}^2 D^3 + L_{Cim} M_{Cim} D^2 + 2M_{Cim} L_{Cim} D^2 + M_{Cim}^2 D \\
& + 2L_{Cim} N_{Cim} D + M_{Cim} N_{Cim})] = 0
\end{aligned} \tag{4.28}$$

Com objetivo de facilitar a compreensão, os coeficientes da incógnita D foram isolados e denominados S_3 , S_2 , S_1 e S_0 , sendo definidos abaixo.

- Coeficiente de D^3

$$S_3 = 2L_{Ar}^2 + 2L_{Aim}^2 + 2L_{Br}^2 + 2L_{Bim}^2 + 2L_{Cr}^2 + 2L_{Cim}^2$$

- Coeficiente de D^2

$$\begin{aligned}
S_2 = & L_{Ar} M_{Ar} + 2M_{Ar} L_{Ar} + L_{Aim} M_{Aim} + 2M_{Aim} L_{Aim} + L_{Br} M_{Br} + 2M_{Br} L_{Br} \\
& + L_{Bim} M_{Bim} + 2M_{Bim} L_{Bim} + L_{Cr} M_{Cr} + 2M_{Cr} L_{Cr} + L_{Cim} M_{Cim} \\
& + 2M_{Cim} L_{Cim}
\end{aligned}$$

- Coeficiente de D

$$\begin{aligned}
S_1 = & M_{Ar}^2 + 2L_{Ar} N_{Ar} + M_{Aim}^2 + 2L_{Aim} N_{Aim} + M_{Br}^2 + 2L_{Br} N_{Br} + M_{Bim}^2 \\
& + 2L_{Bim} N_{Bim} + M_{Cr}^2 + 2L_{Cr} N_{Cr} + M_{Cim}^2 + 2L_{Cim} N_{Cim}
\end{aligned}$$

- Coeficiente de D^0

$$S_0 = M_{Ar} N_{Ar} + M_{Aim} N_{Aim} + M_{Br} N_{Br} + M_{Bim} N_{Bim} + M_{Cr} N_{Cr} + M_{Cim} N_{Cim}$$

Assim, a metodologia 01 de localização de faltas consiste na determinação de D a partir do polinômio de terceiro grau explicitado na equação (4.29).

$$S_3 D^3 + S_2 D^2 + S_1 D + S_0 = 0 \tag{4.29}$$

Notar que a equação (4.29) gera três raízes, ou seja, três valores para D . Verificou-se, usando esta metodologia, que duas das três raízes encontradas sempre eram absurdas (da ordem de 10^5), valores muito distante do valor real da falta, o que fez com que fossem desconsideradas da solução.

4.2 METODOLOGIA 02

A segunda metodologia desenvolvida difere da primeira em relação aos resíduos que foram usados para formular a função objetivo. Os resíduos aqui foram representados como a diferença entre a distância real da falta e as distâncias estimadas a partir das equações (4.13) a (4.18), conforme descrito a seguir.

$$F_{obj} = \frac{1}{2} \sum_{x=1}^6 (D - D_x)^2 \quad (4.30)$$

A equação (4.30) também pode ser expressa conforme a equação (4.31).

$$F_{obj} = \frac{1}{2} ((D - D_1)^2 + (D - D_2)^2 + (D - D_3)^2 + (D - D_4)^2 + (D - D_5)^2 + (D - D_6)^2) \quad (4.31)$$

Na equação (4.31), D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 e D_6 são as raízes oriundas das equações (4.13), (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18), respectivamente. Analogamente à metodologia 01, precisa-se encontrar o valor de D que minimize o somatório do quadrado dos resíduos expresso na equação (4.31). Assim, derivando toda a equação (4.31) em relação D , e igualando a zero (condição de otimalidade de primeira ordem), encontra-se:

$$\frac{dF_{obj}}{dD} = \frac{2}{2} ((D - D_1) + (D - D_2) + (D - D_3) + (D - D_4) + (D - D_5) + (D - D_6)) = 0 \quad (4.32)$$

Simplificando a equação (4.32), obtém-se:

$$D = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6}{6} \quad (4.33)$$

Como as equações (4.13) a (4.18) são do segundo grau, pode-se encontrar as raízes de cada equação através da fórmula de *Bhaskara*.

A fórmula de *Bhaskara* permite encontrar sempre duas raízes, que podem ser reais e distintas, reais e iguais ou complexas e distintas. Como o equacionamento possui seis equações do segundo grau, serão encontradas doze raízes, sendo seis delas oriundas de equações com coeficientes reais, a saber: (4.13), (4.15) e (4.17), e as outras seis oriundas de equações com coeficientes complexos: (4.14), (4.16) e (4.18). Aqui vale salientar uma questão importante: são encontradas doze raízes, porém a metodologia de localização definida na equação (4.33) necessita de apenas seis equações. Assim, seis raízes devem ser selecionadas dentre as 12. O procedimento de seleção será definido a seguir, com a utilização de casos práticos de localização de faltas. Nas tabelas 6, 7 e 8 apresentam-se alguns resultados referentes a faltas que foram simuladas no ATP para linhas de 138kV, 230 kV e 500kV.

Tabela 6 – Raízes encontradas para falta fase-terra no quilômetro 50 da linha de 500 kV.

	Raiz 1	Raiz 2
Equação 4.13	25.807 km	52 km
Equação 4.14	-979 km	16 km
Equação 4.15	25.058 km	49 km
Equação 4.16	-979 km	16 km
Equação 4.17	12.219 km	49 km
Equação 4.18	23.493 km	78 km

Fonte: autoria própria.

Tabela 7– Raízes encontradas para falta fase-terra no quilômetro 90 da linha de 138 kV.

	Raiz 1	Raiz 2
Equação 4.13	-270.470 km	90 km
Equação 4.14	90 km	9.468,90 km
Equação 4.15	-43.510 km	90 km
Equação 4.16	90 km	9.468,90 km
Equação 4.17	-5.080 km	90 km
Equação 4.18	90 km	-9.899,90 km

Fonte: autoria própria.

Tabela 8 – Raízes encontradas para falta fase-terra no quilômetro 72 da linha de 138 kV.

	Raiz 1	Raiz 2
Equação 4.13	-40.897 km	72 km
Equação 4.14	72 km	-21.485 km
Equação 4.15	-24.271 km	72 km
Equação 4.16	72 km	-21.485
Equação 4.17	-41.611 km	72 km
Equação 4.18	72 km	1.650 km

Fonte: autoria própria.

Como pode ser observado nas tabelas 06, 07 e 08, das 12 raízes resultantes para cada caso simulado, seis delas são absurdas (resultaram em valores de distância de falta muito maiores que o comprimento da linha). Assim, elaborou-se um algoritmo para filtrar as seis raízes factíveis que serão utilizadas no cálculo da distância de falta conforme a equação (4.33). O algoritmo está descrito a seguir:

```

Dvet = [DAr; DA1r; DBr; DB1r; DCr; DC1r; DAim DA1im; DBim; DB1im; DCim;
DC1im];
for i = 1:12
    if abs(Dvet(i))<L
        D1vet(i) = Dvet(i);
    end
end
end

```

Capítulo 5

RESULTADOS

Para avaliar o desempenho dos dois algoritmos de localização de faltas desenvolvidos, foram simulados curtos-circuitos em três linhas de transmissão distintas, considerando variações no local e na resistência das faltas. Todos os sistemas elétricos foram simulados no *software* ATP.

Os algoritmos de localização foram testados apenas para faltas fase-terra, pois, de acordo com Grainger e Stevenson (1994), de 70% a 80% das faltas em linhas de transmissão ocorrem entre uma única fase e a terra. Os sinais de tensão e corrente utilizados pelos algoritmos foram obtidos a partir de registros oscilográficos oriundos de medidores simulados no *software* ATP. Nas simulações, considerou-se uma taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo, a qual é compatível com a taxa de amostragem de medidores reais. Os parâmetros das linhas simuladas são apresentados na Tabela 9, sendo estes também dados característicos de linhas de transmissão reais. As linhas simuladas seguem o perfil especificado na Figura 9, em que se assumiu V_1 igual a 1 pu com ângulo de 0° e V_2 igual a 1 pu com ângulo de -10° . As faltas neste trabalho foram sempre simuladas no trecho LT2 das linhas (vide Figura 9).

Tabela 9 – Dados dos parâmetros elétricos de sequência positiva das linhas de transmissão simuladas no ATP.

Tensão	Comprimento (km)			Parâmetros elétricos		
	LT1	LT2	LT3	Resistência	Reatância	Capacitância
138 kV	20	90	20	0,115674 Ω/km	0,46218 Ω/km	9,54 nF/km
230 kV		180		0,09127 Ω/km	0,51879 Ω/km	8,47 nF/km
500 kV		250		0,0221 Ω/km	0,3212 Ω/km	13,46 nF/km

Fonte: autoria própria.

Tabela 10 – Dados dos parâmetros elétricos de sequência zero das linhas de transmissão simuladas no ATP.

Tensão	Comprimento (km)			Parâmetros elétricos		
	LT1	LT2	LT3	Resistência	Reatância	Capacitância
138 kV	20	90	20	0,4163817 Ω/km	1,69306 Ω/km	5,50 nF/km
230 kV		180		0,44016 Ω/km	1,5659 Ω/km	6,10 nF/km
500 kV		250		0,3777 Ω/km	1,4238 Ω/km	8,58 nF/km

Fonte: autoria própria.

Para avaliação das metodologias de localização, utilizou-se de dois parâmetros, o erro absoluto e o erro percentual. O erro absoluto é dado pela diferença entre a distância real da falta e a distância estimada. O erro percentual é obtido pela expressão (5.1).

$$e(\%) = \frac{|Dr - De|}{l} 100 \quad (5.1)$$

Em que:

e(%) é o erro percentual;

Dr é a distância real;

De é a distância estimada;

l é o comprimento da linha.

5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – METODOLOGIA 01

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos pela metodologia 01, apresentada no tópico 4.1, considerando simulações de faltas em linhas de 138 kV, 230 kV e 500kV, as quais foram especificadas nas tabelas 9 e 10. Nas simulações,

considerou-se dois valores para resistências de falta, um valor nulo (0 ohms) e outro valor de alta impedância (100 ohms).

Os resultados para as simulações da linha de 138 kV, utilizando a metodologia 01, são apresentados na Tabela 11, para resistência de falta (R_F) igual a zero, e na Tabela 12, para resistência de falta igual a 100 ohms.

Tabela 11 – Desempenho da metodologia 01 – linha de 138 kV, R_F igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	9	9,2027	0,2027	0,23%
20%	18	18,1597	0,1597	0,18%
30%	27	27,0929	0,0929	0,10%
40%	36	36,0793	0,0793	0,09%
50%	45	44,9999	0,0001	0,00%
60%	54	53,9199	0,0801	0,09%
70%	63	62,9039	0,0961	0,11%
80%	72	71,8331	0,1669	0,19%
90%	81	80,7856	0,2144	0,24%

Fonte: autoria própria.

Tabela 12 – Desempenho da metodologia 01 – linha de 138 kV, R_F igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	9	9,2235	0,2235	0,25%
20%	18	18,1799	0,1799	0,20%
30%	27	27,1275	0,1275	0,14%
40%	36	36,0685	0,0685	0,08%
50%	45	45,0052	0,0052	0,01%
60%	54	53,9409	0,0591	0,07%
70%	63	62,8758	0,1242	0,14%
80%	72	71,812	0,188	0,21%
90%	81	80,7521	0,2479	0,28%

Fonte: autoria própria.

Pode-se observar nas tabelas 11 e 12 que a metodologia 01 foi eficiente na determinação do local da falta em todas as situações. Para resistência de falta nula, o maior erro absoluto foi de 0,2144 km e o maior erro percentual de 0,24%. Já para

resistência de falta igual a 100 ohms, o maior erro absoluto foi de 0,2479 km, que percentualmente equivale a 0,28%.

As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados da metodologia 01, quando da simulação de faltas na linha de 230 kV com resistência nula e resistência de 100 ohms, respectivamente.

Tabela 13 – Desempenho da metodologia 01 – linha de 230 kV, R_F igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro - Percentual
10%	18	18,548	0,548	0,30%
20%	36	36,3198	0,3198	0,18%
30%	54	54,2668	0,2668	0,15%
40%	72	72,2628	0,2628	0,15%
50%	90	90,0027	0,0027	0,00%
60%	108	107,7372	0,2628	0,15%
70%	126	125,7116	0,2884	0,16%
80%	144	143,6255	0,3745	0,21%
90%	162	161,3718	0,6282	0,35%

Fonte: autoria própria.

Tabela 14 – Desempenho da metodologia 01 – linha de 230 kV, R_F igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	18	18,7757	0,7757	0,43%
20%	36	36,7055	0,7055	0,39%
30%	54	54,5729	0,5729	0,32%
40%	72	72,3654	0,3654	0,20%
50%	90	90,1078	0,1078	0,06%
60%	108	107,8358	0,1642	0,09%
70%	126	125,5835	0,4165	0,23%
80%	144	143,3799	0,6201	0,34%
90%	162	161,1993	0,8007	0,44%

Fonte: autoria própria.

De acordo com as Tabelas 13 e 14, os maiores erros percentuais foram de 0,35% e 0,44%, na simulação com resistência de falta nula e resistência de falta igual a 100

ohms, respectivamente. Ambos ocorreram para a falta no quilômetro 162 da linha. Os melhores resultados se dão quando as faltas incidem próximas ao centro da linha.

Os resultados da simulação da linha de transmissão de 500kV para resistência de falta igual a 0 e resistência de falta igual a 100 ohms estão expostos nas tabelas 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 – Desempenho da metodologia 01 – linha de 500 kV, R_F igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	25	26,3883	1,3883	0,56%
20%	50	51,4578	1,4578	0,58%
30%	75	76,1772	1,1772	0,47%
40%	100	100,6025	0,6025	0,24%
50%	125	125,0268	0,0268	0,01%
60%	150	149,4353	0,5647	0,23%
70%	175	173,8472	1,1528	0,46%
80%	200	198,5479	1,4521	0,58%
90%	225	223,6046	1,3954	0,56%

Fonte: autoria própria.

Tabela 16 – Resultados da simulação para linha de 500 kV, R_F igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	25	27,1968	2,1968	0,88%
20%	50	52,2789	2,2789	0,91%
30%	75	76,7474	1,7474	0,70%
40%	100	101,1484	1,1484	0,46%
50%	125	125,448	0,448	0,18%
60%	150	149,5877	0,4123	0,16%
70%	175	173,8306	1,1694	0,47%
80%	200	198,4309	1,5691	0,63%
90%	225	223,3327	1,6673	0,67%

Fonte: autoria própria.

Nas simulações da linha de 500 kV e resistência de falta igual a zero, o algoritmo apresentou menor eficiência quando a falta aconteceu a 200 km do início da linha,

com erro percentual de 0,58%. Já na simulação da mesma linha com resistência de falta igual a 100 ohms, o maior erro se deu quando a falta ocorreu a 50 km do início da linha, com erro percentual de 0,91%.

Os resultados obtidos para várias simulações realizadas mostram que a metodologia de localização de faltas desenvolvida é eficiente, sendo pouco sensível a variações do local da falta e da resistência de falta. Os resultados apresentados nas tabelas 11 a 16 foram ainda representados graficamente nas Figuras 14 e 15, a fim de proporcionar uma melhor visualização do desempenho da metodologia 01 para os casos simulados.

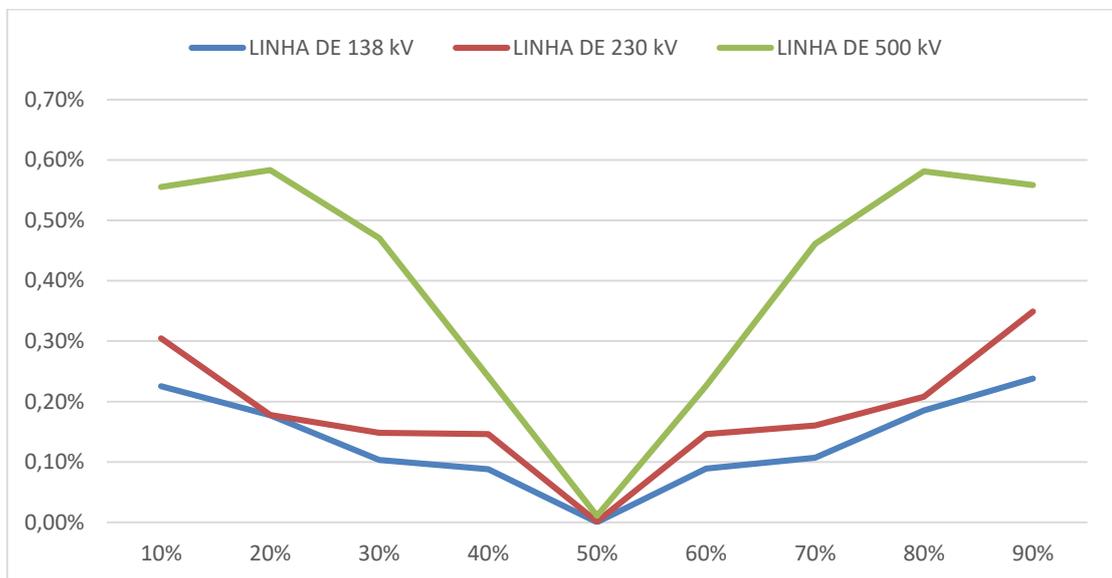


Figura 14 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) considerando R_F igual a 0 ohms - Metodologia 01.

Fonte: autoria própria.

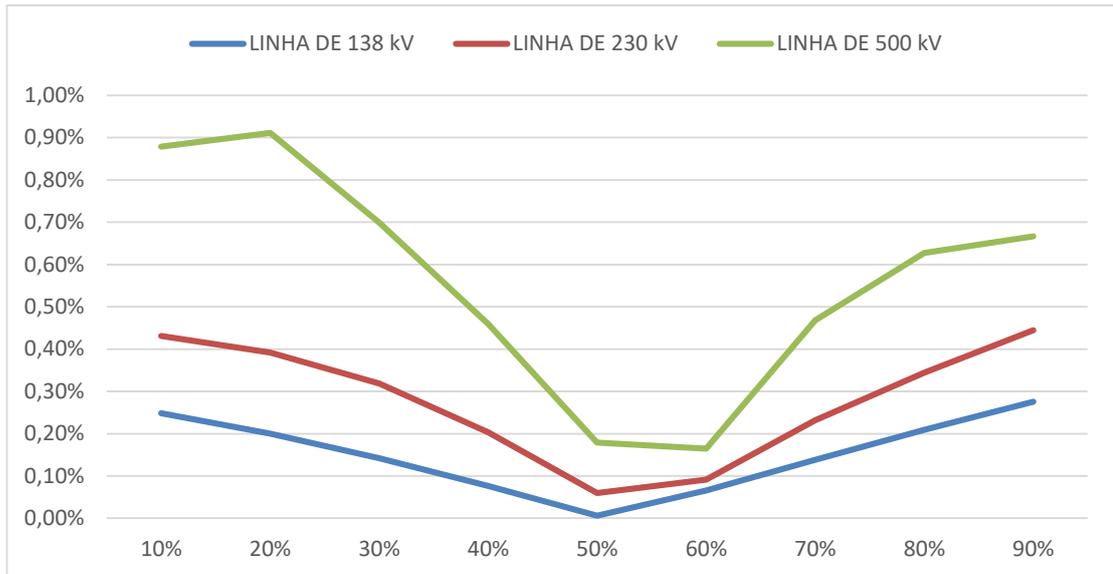


Figura 15 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) considerando R_F igual a 100 ohms - Metodologia 01.

Fonte: autoria própria.

5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – METODOLOGIA 02

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pela metodologia 02 quando da simulação de curtos-circuitos nas linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV. De maneira similar ao algoritmo anterior, foram realizadas simulações com resistência de falta igual a 0 ohms e 100 ohms.

Os erros de localização de faltas para a linha de 138 kV utilizando a metodologia 02 e resistência de falta igual a 0 ohms estão representados na Tabela 17, enquanto as simulações para resistência de falta igual a 100 ohms estão na Tabela 18.

Tabela 17 – Desempenho da metodologia 02 – linha de 138 kV e resistência de falta igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	9	9,3766	0,3766	0,42%
20%	18	18,2098	0,2098	0,23%
30%	27	27,108	0,108	0,12%
40%	36	39,214	3,214	3,57%
50%	45	45,734	0,734	0,82%
60%	54	54,8718	0,8718	0,97%
70%	63	71,2202	8,2202	9,13%
80%	72	73,4751	1,4751	1,64%
90%	81	87,394	6,394	7,10%

Fonte: autoria própria.

Tabela 18 – Desempenho da metodologia 02 – linha de 138 kV e resistência de falta igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	9	8,8505	0,1495	0,17%
20%	18	17,9448	0,0552	0,06%
30%	27	26,9754	0,0246	0,03%
40%	36	35,9954	0,0046	0,01%
50%	45	44,9998	0,0002	0,00%
60%	54	54,0015	0,0015	0,00%
70%	63	63,0128	0,0128	0,01%
80%	72	72,0234	0,0234	0,03%
90%	81	81,0674	0,0674	0,07%

Fonte: autoria própria.

Nas simulações realizadas na linha de 138 kV com resistência de falta de 0 ohms e de 100 ohms, os maiores erros percentuais foram de 9,13% e 0,17%, respectivamente. Na simulação com resistência de falta igual a 0 ohms, o maior erro se deu a 70% da linha, enquanto que na simulação com resistência de falta igual a 100 ohms, o maior erro ocorreu quando a falta se deu a 10% do comprimento total da linha.

Os erros de localização nas simulações de falta da linha de 230 kV são exibidos nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Desempenho da metodologia 02 – linha de 230 kV e resistência de falta igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	18	18,5437	0,5437	0,30%
20%	36	36,385	0,385	0,21%
30%	54	54,3043	0,3043	0,17%
40%	72	72,4832	0,4832	0,27%
50%	90	90,4569	0,4569	0,25%
60%	108	108,3796	0,3796	0,21%
70%	126	126,4462	0,4462	0,25%
80%	144	144,3035	0,3035	0,17%
90%	162	162,0498	0,0498	0,03%

Fonte: autoria própria.

Tabela 20 – Desempenho da metodologia 02 – linha de 230 kV e resistência de falta igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	18	17,3909	0,6091	0,34%
20%	36	35,4828	0,5172	0,29%
30%	54	53,6109	0,3891	0,22%
40%	72	71,731	0,269	0,15%
50%	90	89,8725	0,1275	0,07%
60%	108	108,0295	0,0295	0,02%
70%	126	126,1927	0,1927	0,11%
80%	144	144,3601	0,3601	0,20%
90%	162	162,479	0,479	0,27%

Fonte: autoria própria.

A partir da análise das Tabelas 19 e 20, observa-se que a metodologia 02 exibiu uma menor eficiência para faltas a 18 km do início da linha, tanto para resistência de falta nula, como para resistência de falta igual a 100 ohms. Os erros de localização de faltas percentuais para essas situações foram de 0,3% e 0,34%, respectivamente.

A Tabela 21 mostra os resultados da simulação para a linha de 500 kV com resistência de falta nula. A Tabela 22 exibe os resultados para a mesma linha com resistência de falta de 100 ohms.

Tabela 21 – Desempenho da metodologia 02 – linha de 500 kV e resistência de falta igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	25	22,3307	2,6693	1,07%
20%	50	42,6654	7,3346	2,93%
30%	75	60,9614	14,0386	5,62%
40%	100	108,2117	8,2117	3,28%
50%	125	101,9956	23,0044	9,20%
60%	150	128,3912	21,6088	8,64%
70%	175	157,5137	17,4863	6,99%
80%	200	169,0847	30,9153	12,37%
90%	225	177,0754	47,9246	19,17%

Fonte: autoria própria.

Tabela 22 – Desempenho da metodologia 02 – linha de 500 kV e resistência de falta igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	25	23,884	1,116	0,45%
20%	50	49,9817	0,0183	0,01%
30%	75	75,0537	0,0537	0,02%
40%	100	100,0118	0,0118	0,00%
50%	125	124,9385	0,0615	0,02%
60%	150	150,0357	0,0357	0,01%
70%	175	175,2608	0,2608	0,10%
80%	200	200,6408	0,6408	0,26%
90%	225	226,5785	1,5785	0,63%

Fonte: autoria própria.

Conforme a Tabela 21, o maior erro percentual na simulação da linha de 500 kV com resistência nula foi de 19,17%, maior erro percentual em todos os casos simulados no algoritmo 02. Já na simulação dessa linha com resistência de falta igual a 100 ohms, o maior erro percentual foi de 0,63%.

Os resultados que constam nas Tabelas 17 a 22 são representados nas Figuras 16 e 17, a fim de ilustrar graficamente o desempenho da metodologia 02 para os casos simulados.

A partir dos resultados alcançados, pode-se concluir que a metodologia 02 apresentou melhor performance na determinação do local de faltas de alta impedância. Já para faltas com resistência de falta nula, o algoritmo não foi preciso, como se pode constatar pela discrepância dos resultados obtidos para as linhas de 230 kV e 500 kV, por exemplo.

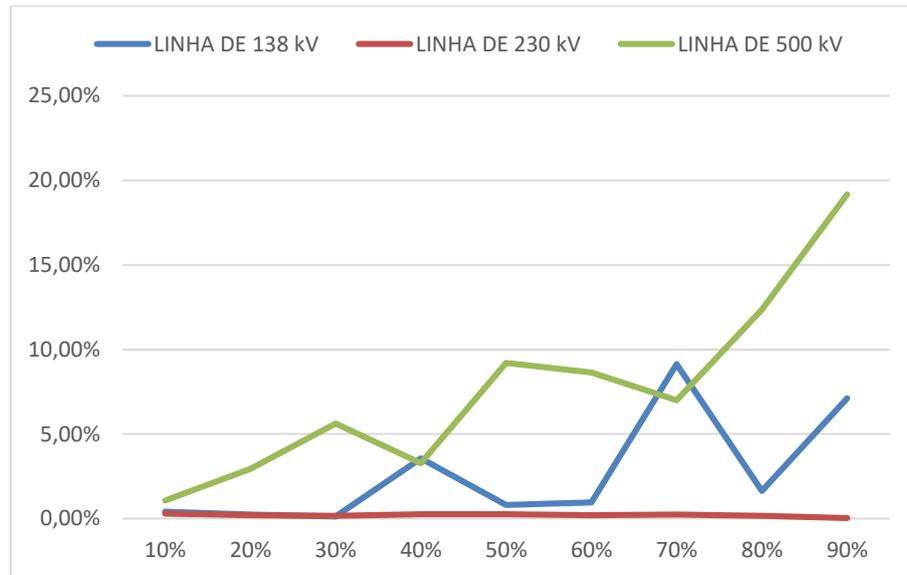


Figura 16 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) – R_F igual a 0 ohms – Metodologia 02.

Fonte: autoria própria.

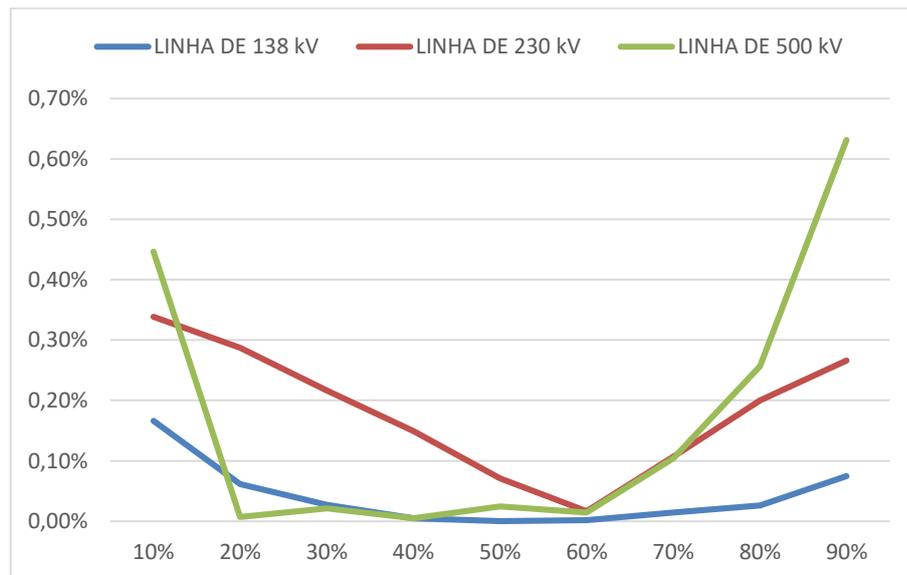


Figura 17 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) – R_F igual a 100 ohms – Metodologia 02.

Fonte: autoria própria.

5.2.1 Considerações sobre o desempenho da metodologia 02

A metodologia 02 de localização de faltas, descrita na equação (4.33), baseia-se na média aritmética de seis distâncias de faltas (Dmed), que são originadas das equações (4.13) a (4.18). Das seis distâncias utilizadas, três delas são originadas de equações que possuem coeficientes reais, e as outras três são originadas de equações que possuem coeficientes imaginários. Assim, remodelou-se a metodologia 02 para que ela calculasse duas novas distâncias de falta. A primeira, chamada Dr, é obtida a partir da média aritmética das três distâncias de faltas oriundas das equações com coeficientes reais. A segunda, chamada Dim, é obtida a partir da média aritmética das três distâncias de faltas oriundas das equações com coeficientes imaginários. Dmed é o resultado obtido das 6 distâncias de faltas, com coeficientes imaginários e coeficientes reais. Os resultados obtidos para as três distâncias de falta: Dr, Dim e Dmed, são apresentados nas Figuras 18, 19 e 20, para as linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV, respectivamente.

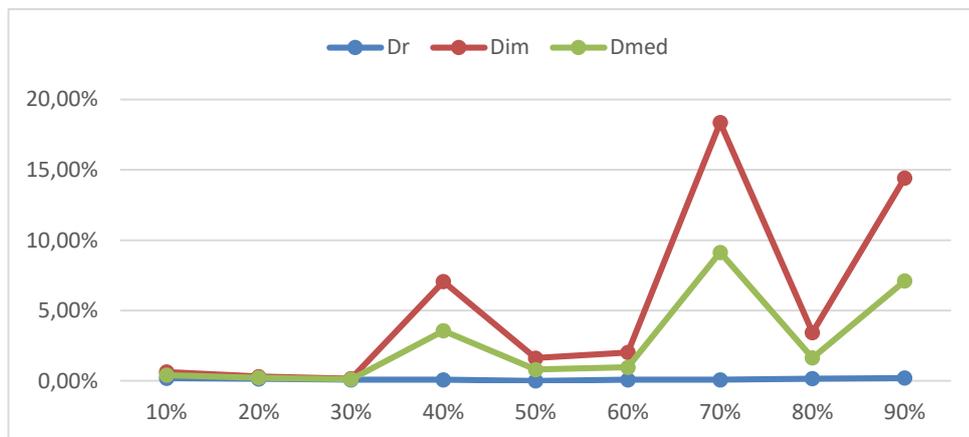


Figura 18 – Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para Dr, Dim e Dmed – linha de 138 kV ($R_F = 0$ ohms) – Metodologia 02.

Fonte: autoria própria.

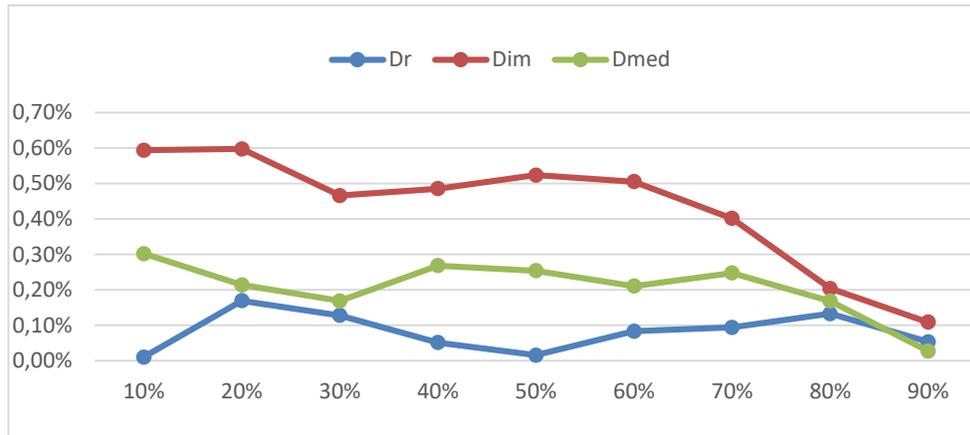


Figura 19 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para Dr, Dim e Dmed – linha de 230 kV ($R_F = 0$ ohms) – Metodologia 02.

Fonte: autoria própria.

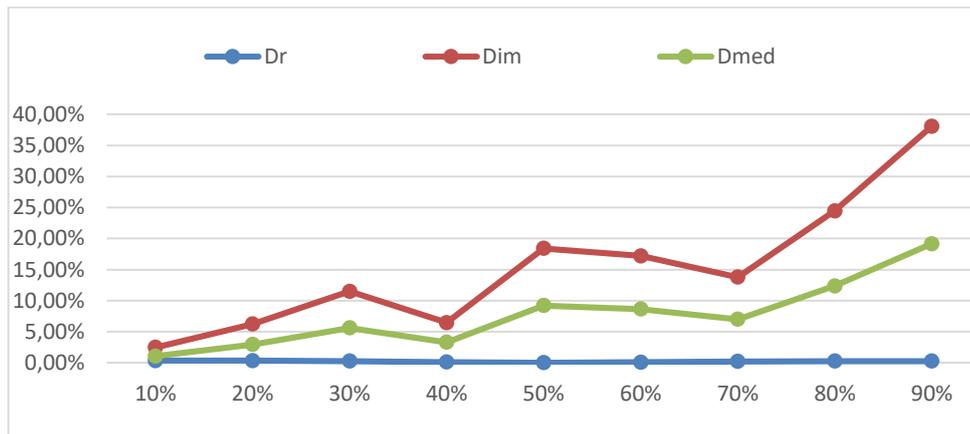


Figura 20 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para Dr, Dim e Dmed – linha de 500 kV ($R_F = 0$ ohms) – Metodologia 02.

Fonte: autoria própria.

A partir da análise das Figuras 18, 19 e 20, percebe-se que a metodologia 02 tem seu desempenho expressivamente melhorado ao calcular a média usando apenas as distâncias oriundas das equações que possuem coeficientes reais. Por exemplo, no caso da linha de 500 kV, falta em 90% da linha, o erro de localização que era de aproximadamente 20% foi para aproximadamente 0%. Constatou-se ainda que as distâncias oriundas das equações que dependem de coeficientes imaginários são as que mais contribuem para o baixo desempenho da metodologia 02, conforme ela foi descrita na seção 4. Assim, os resultados obtidos foram importantes para mostrar que a metodologia 02 também é eficiente, quando considera a média das distâncias de falta originadas das equações com coeficientes reais.

Devido, a expressiva melhoria da metodologia 02 quando se utilizou apenas as equações advindas da parte real, foi realizada uma análise da metodologia 02, utilizando apenas as equações advindas da parte real. Essa análise foi denominada de metodologia 02 modificada e os resultados estão apresentados no tópico seguinte.

5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – METODOLOGIA 02 MODIFICADA

Neste tópico serão exibidos os resultados obtidos da simulação da metodologia 02 modificada em curtos-circuitos nas linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV. Como realizado em tópicos anteriores, foram simulados curtos-circuitos com resistência de falta iguais a 0 ohms e 100 ohms.

Os erros de localização de faltas para a linha de 138 kV utilizando a metodologia 02 modificada e resistência de falta igual a 0 ohms estão na tabela 23. Já os erros de localização das simulações para resistência de falta igual a 100 ohms estão na tabela 24.

Tabela 23 - Desempenho da metodologia 02 modificada – linha de 138 kV e resistência de falta igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	9	9,1787	0,1787	0,20%
20%	18	18,1386	0,1386	0,15%
30%	27	27,0711	0,0711	0,08%
40%	36	36,0734	0,0734	0,08%
50%	45	44,9999	0,0001	0,00%
60%	54	53,9257	0,0743	0,08%
70%	63	62,9259	0,0741	0,08%
80%	72	71,8548	0,1452	0,16%
90%	81	80,8092	0,1908	0,21%

Fonte: autoria própria.

Tabela 24 - Desempenho da metodologia 02 modificada w- linha de 138 kV e resistência de falta igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	9	8,4294	0,5706	0,63%
20%	18	17,6834	0,3166	0,35%
30%	27	26,8169	0,1831	0,20%
40%	36	35,9273	0,0727	0,08%
50%	45	45,0096	0,0096	0,01%
60%	54	54,0875	0,0875	0,10%
70%	63	63,1776	0,1776	0,20%
80%	72	72,2655	0,2655	0,30%
90%	81	81,4101	0,4101	0,46%

Fonte: autoria própria.

De acordo com as tabelas 23 e 24, os menores erros de localização para simulação da linha de 138 kV com resistência de falta igual a 0 ohms e 100 ohms foram exatamente quando a falta ocorreu no centro da linha, com erro percentual de 0,00% e 0,01%, respectivamente.

Nas tabelas 25 e 26 serão apresentados os erros de localização para simulação da linha de 230 kV com resistência de falta igual a 0 ohms e 100 ohms, respectivamente.

Tabela 25 - Desempenho da metodologia 02 modificada – linha de 230 kV e resistência de falta igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	18	18,0186	0,0186	0,01%
20%	36	35,6948	0,3052	0,17%
30%	54	53,7699	0,2301	0,13%
40%	72	72,0928	0,0928	0,05%
50%	90	89,9714	0,0286	0,02%
60%	108	107,8499	0,1501	0,08%
70%	126	126,1696	0,1696	0,09%
80%	144	144,2394	0,2394	0,13%
90%	162	161,903	0,097	0,05%

Fonte: autoria própria.

Tabela 26 - Desempenho da metodologia 02 modificada – linha de 230 kV e resistência de falta igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	18	16,5701	1,4299	0,79%
20%	36	34,9068	1,0932	0,61%
30%	54	53,3929	0,6071	0,34%
40%	72	71,7321	0,2679	0,15%
50%	90	90,1175	0,1175	0,07%
60%	108	108,4891	0,4891	0,27%
70%	126	126,7884	0,7884	0,44%
80%	144	145,1853	1,1853	0,66%
90%	162	163,3931	1,3931	0,77%

Fonte: autoria própria.

As tabelas acima mostram que os maiores erros foram de 0,3052 km na simulação com resistência de falta igual a 0 ohms e 1,4299 km na simulação com resistência de falta igual a 100 ohms. Os menores erros de localização foram exatamente quando a falta ocorreu na metade da linha, com erros de 0,0286 km para resistência de falta igual a 0 ohms e 0,1175 km para resistência de falta igual a 100 ohms.

Os desempenhos da metodologia 02 modificada para linha de 500 kV com resistência de falta igual 0 ohms e 100 ohms estão expressos nas tabelas 27 e 28, respectivamente.

Tabela 27 - Desempenho da metodologia 02 modificada – linha de 500 kV e resistência de falta igual a 0 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	25	25,8515	0,8515	0,34%
20%	50	50,8717	0,8717	0,35%
30%	75	75,6598	0,6598	0,26%
40%	100	100,2662	0,2662	0,11%
50%	125	125,0139	0,0139	0,01%
60%	150	149,8038	0,1962	0,08%
70%	175	174,4805	0,5195	0,21%
80%	200	199,333	0,667	0,27%
90%	225	224,3315	0,6685	0,27%

Fonte: autoria própria.

Tabela 28 - Desempenho da metodologia 02 modificada – linha de 500 kV e resistência de falta igual a 100 ohms.

Dreal (%)	Dreal (km)	Destimada (km)	Erro Absoluto	Erro Percentual
10%	25	23,2369	1,7631	0,71%
20%	50	50,5033	0,5033	0,20%
30%	75	75,6929	0,6929	0,28%
40%	100	100,9835	0,9835	0,39%
50%	125	126,2133	1,2133	0,49%
60%	150	151,1842	1,1842	0,47%
70%	175	176,3593	1,3593	0,54%
80%	200	202,2437	2,2437	0,90%
90%	225	228,6625	3,6625	1,47%

Fonte: autoria própria.

As tabelas 27 e 28 mostram que a metodologia 02 modificada se comportou de forma eficiente para simulação na linha de 500 kV, onde os maiores foram 0,8717 km para resistência de falta igual a 0 ohms e 3,6625 km para resistência de falta igual a 100 ohms.

As figuras 21 e 22 mostram o desempenho da metodologia 02 modificada para as três linhas simuladas, 138 kV, 230 kV e 500 kV.

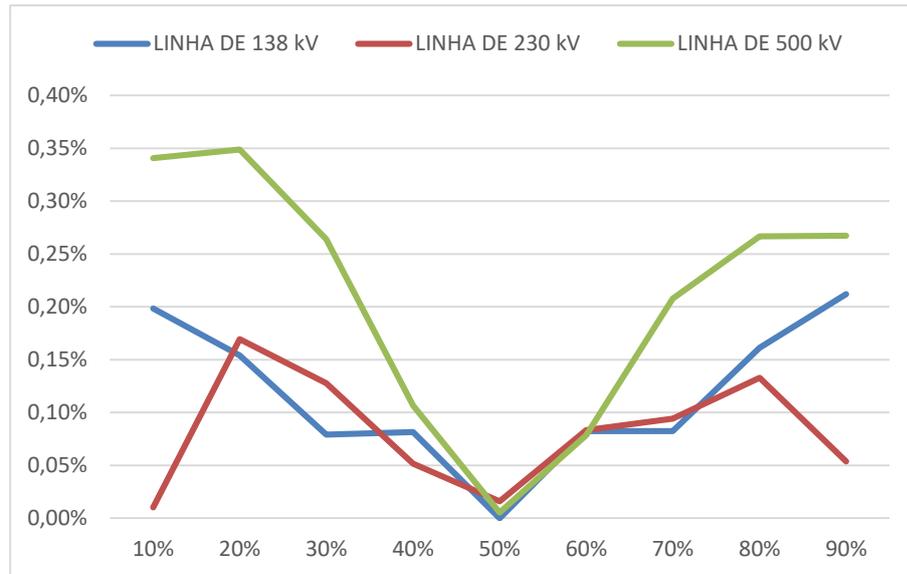


Figura 21 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) – R_F igual a 0 ohms – Metodologia 02 modificada.
Fonte: autoria própria.

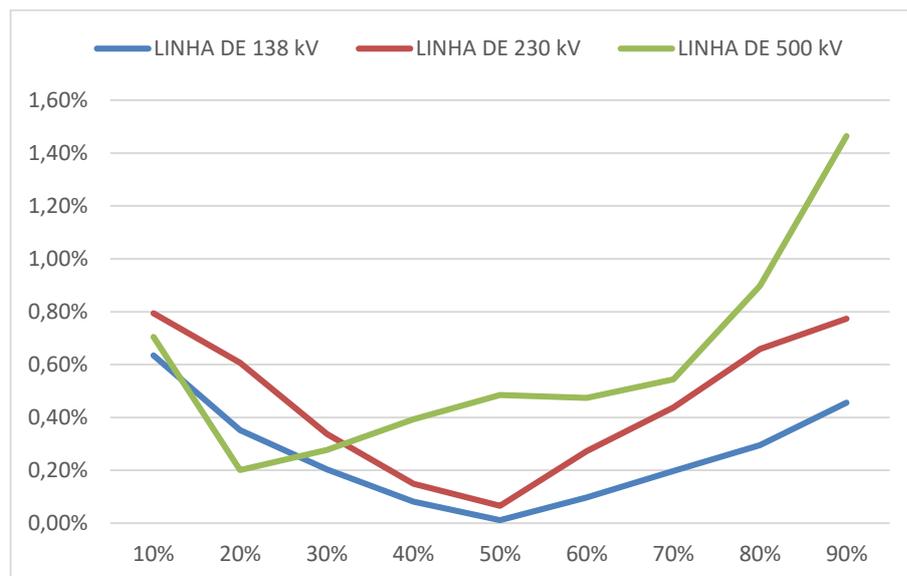


Figura 22 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) – R_F igual a 100 ohms – Metodologia 02 modificada.
Fonte: autoria própria.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS

As Figuras 21, 22 e 23 mostram os erros de localização de faltas das metodologias 01 e 02 modificada, considerando R_F igual a zero, e diversas faltas aplicadas nas linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV. Observa-se nas Figuras que, para as mesmas situações, os menores erros foram os apresentados pela metodologia 02 modificada. A metodologia 02 usada na comparação foi a que calcula a distância de falta utilizando apenas as raízes advindas das equações reais.

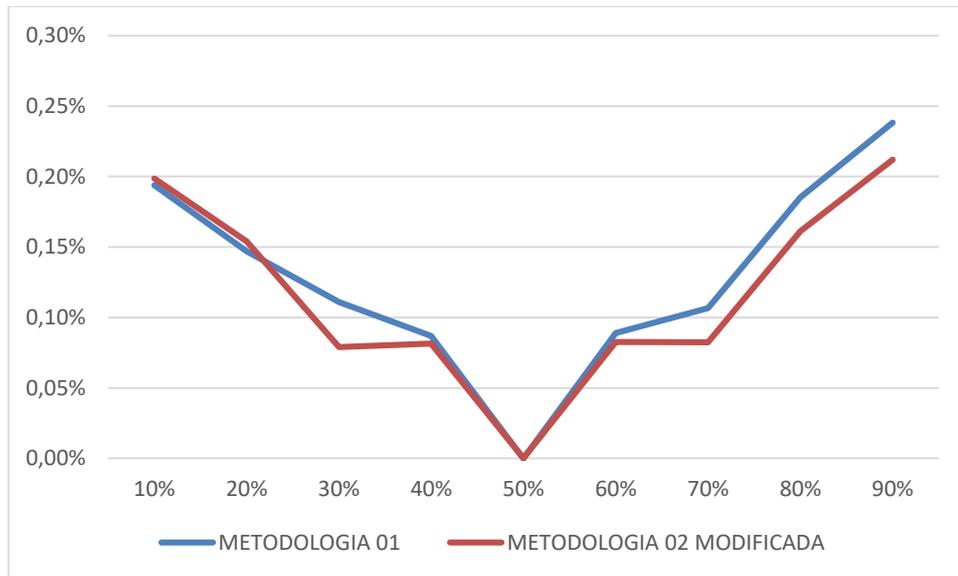


Figura 23 – Erro de localização de faltas (%) versus local de falta (%) para metodologias 01 e 02 modificada – linha de 138 kV ($R_F = 0$ ohms).
Fonte: autoria própria.

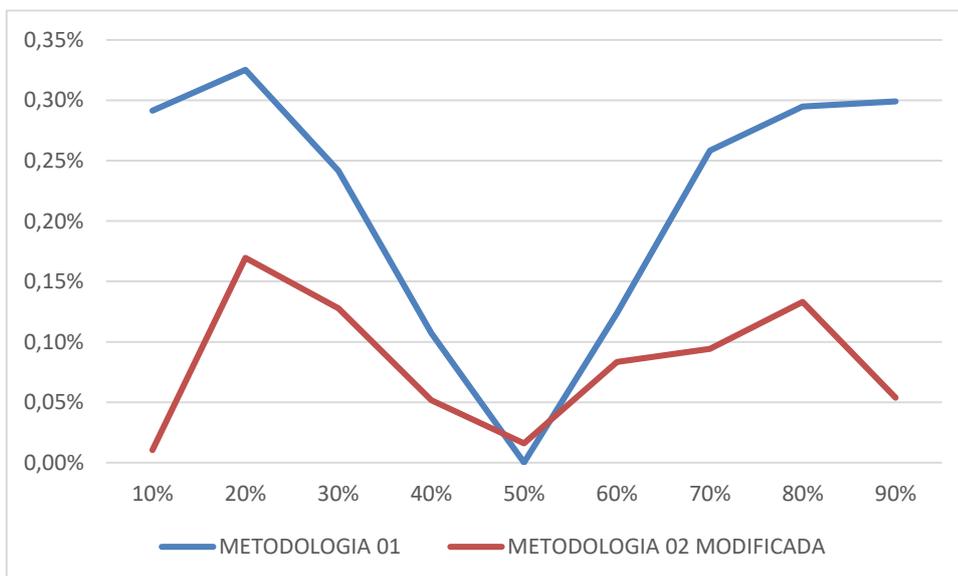


Figura 24 - Erro de localização de faltas (%) versus local de falta (%) para metodologias 01 e 02 modificada – linha de 230 kV ($R_F = 0$ ohms).
Fonte: autoria própria.

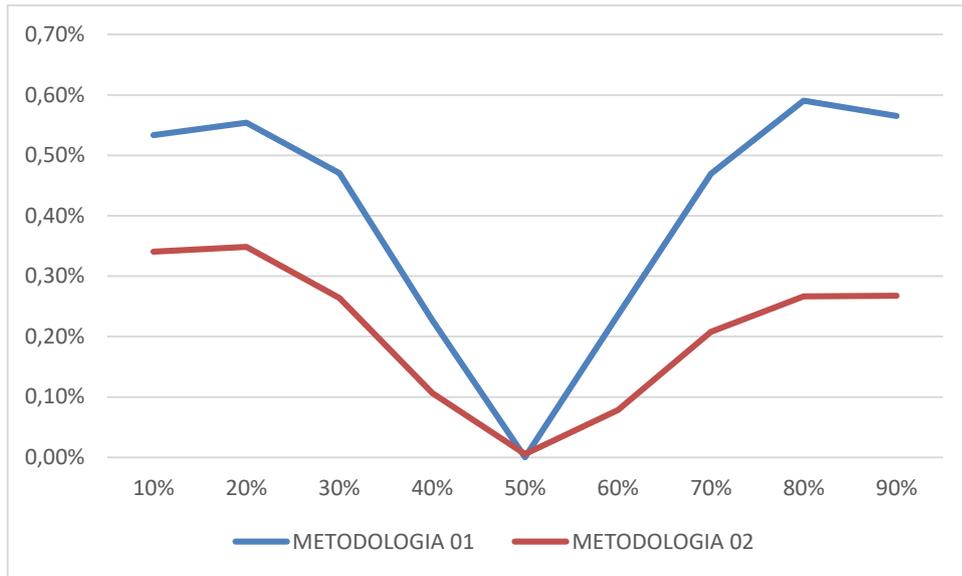


Figura 25 - Erro de localização de faltas (%) versus local de falta (%) para metodologias 01 e 02 – linha de 500 kV ($R_F = 0$ ohms).

Fonte: autoria própria.

Capítulo 6

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS METODOLOGIAS DE LOCALIZAÇÃO EM RELAÇÃO À IMPRECISÕES NOS PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA ZERO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Os parâmetros elétricos de sequência positiva e zero da linha de transmissão são dados de entrada de ambas as metodologias de localização de faltas desenvolvidas neste trabalho. Os parâmetros de sequência positiva foram encontrados na etapa de processamento, a partir do algoritmo descrito no capítulo 3. Os parâmetros de sequência zero utilizados foram obtidos a partir de dados de projeto da linha. Algoritmos que estimam os parâmetros de sequência zero de linhas de transmissão são escassos na literatura. Os que existem, na maior parte das vezes, são formulados a partir de métodos iterativos, não sendo objetos deste trabalho, como os apresentados por Dasgupta e Soman (2017) e Wang e Xu (2015).

Este tópico tem como objetivo analisar a sensibilidade dos dois algoritmos de localização desenvolvidos em relação à variação nos parâmetros de sequência zero da linha de transmissão. Essa análise foi feita porque os valores dos parâmetros de sequência zero, principalmente das capacitâncias, nem sempre são disponibilizados pelas empresas concessionárias, o que inviabilizaria o uso das metodologias de localização propostas. Assim, buscou-se verificar se na ausência da informação da capacitância de sequência zero da linha, a utilização de um valor mesmo que impreciso poderia influenciar significativamente no desempenho das metodologias desenvolvidas. Os erros simulados para a capacitância de sequência zero foram de 10%, 20% e 30% (para mais e para menos) em relação ao valor típico de capacitância

de sequência zero da linha de transmissão em análise. As Tabelas 23 e 24 apresentam os erros de localização de faltas em função dos erros nas capacitâncias de sequência zero utilizando a metodologia 01, e considerando faltas na linha de 230 kV ($R_F = 0$), que foi simulada no capítulo 5. As Figuras 24 e 25 mostram graficamente o erro da distância de falta quando se variou a capacitância *shunt* de sequência zero e os locais de falta.

Tabela 29 – Erros de localização de faltas considerando erros de +10%, +20% e +30% na capacitância de sequência zero – Linha de 230 kV - Metodologia 01.

Dreal (km)	SEM VARIACÃO		VARIACÃO +10%		VARIACÃO +20%		VARIACÃO +30%	
	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)
18	18,548	0,30%	18,5837	0,32%	18,4952	0,28%	18,4688	0,26%
36	36,3198	0,18%	36,2953	0,16%	36,2708	0,15%	36,2464	0,14%
54	54,2668	0,15%	54,247	0,14%	54,2273	0,13%	54,2075	0,12%
72	72,2628	0,15%	72,2518	0,14%	72,2408	0,13%	72,2298	0,13%
90	90,0027	0,00%	90,0027	0,00%	90,0027	0,00%	90,0027	0,00%
108	107,7372	0,15%	107,7481	0,14%	107,7591	0,13%	107,77	0,13%
126	125,7116	0,16%	125,7312	0,15%	125,7508	0,14%	125,7705	0,13%
144	143,6255	0,21%	143,6498	0,19%	143,6741	0,18%	143,6985	0,17%
162	161,3718	0,35%	161,398	0,33%	161,4242	0,32%	161,4504	0,31%

Fonte: autoria própria.

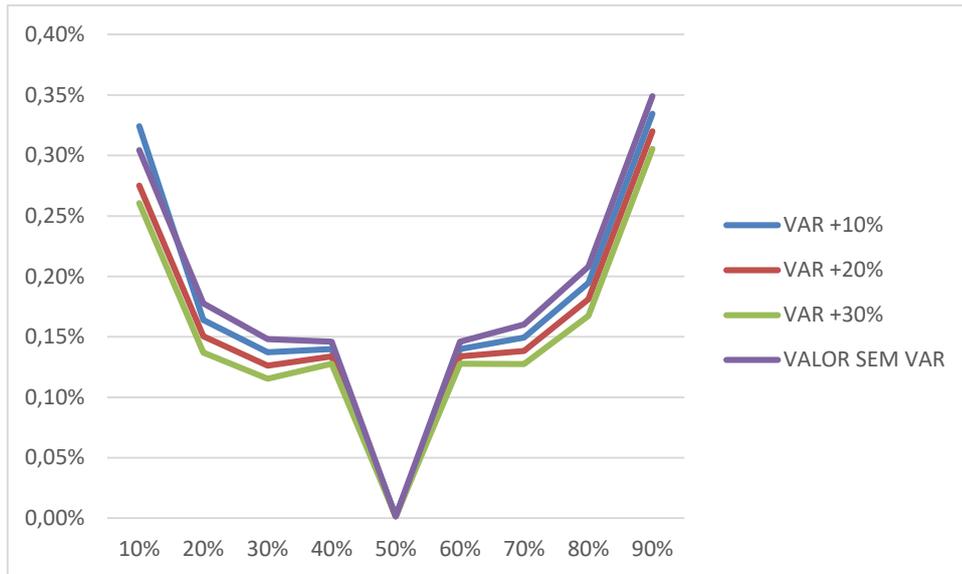


Figura 26 – Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para variação de +10%, +20% e +30% na capacitância de sequência zero – Metodologia 01 – Linha de 230 kV.

Fonte: autoria própria.

Tabela 30 – Erros de localização de faltas considerando erros de -10%, -20% e -30% na capacitância de sequência zero – Linha de 230 kV - Metodologia 01.

	SEM VARIAÇÃO		VARIAÇÃO -10%		VARIAÇÃO -20%		VARIAÇÃO -30%	
	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)
18	18,548	0,30%	18,5743	0,32%	18,6007	0,33%	18,627	0,35%
36	36,3198	0,18%	36,3443	0,19%	36,3687	0,20%	36,3931	0,22%
54	54,2668	0,15%	54,2865	0,16%	54,3062	0,17%	54,3258	0,18%
72	72,2628	0,15%	72,2738	0,15%	72,2847	0,16%	72,2957	0,16%
90	90,0027	0,00%	90,0027	0,00%	90,0027	0,00%	90,0028	0,00%
108	107,7372	0,15%	107,7263	0,15%	107,7154	0,16%	107,7045	0,16%
126	125,7116	0,16%	125,692	0,17%	125,6724	0,18%	125,6528	0,19%
144	143,6255	0,21%	143,6012	0,22%	143,5769	0,24%	143,5527	0,25%
162	161,3718	0,35%	161,3457	0,36%	161,3196	0,38%	161,2935	0,39%

Fonte: autoria própria.

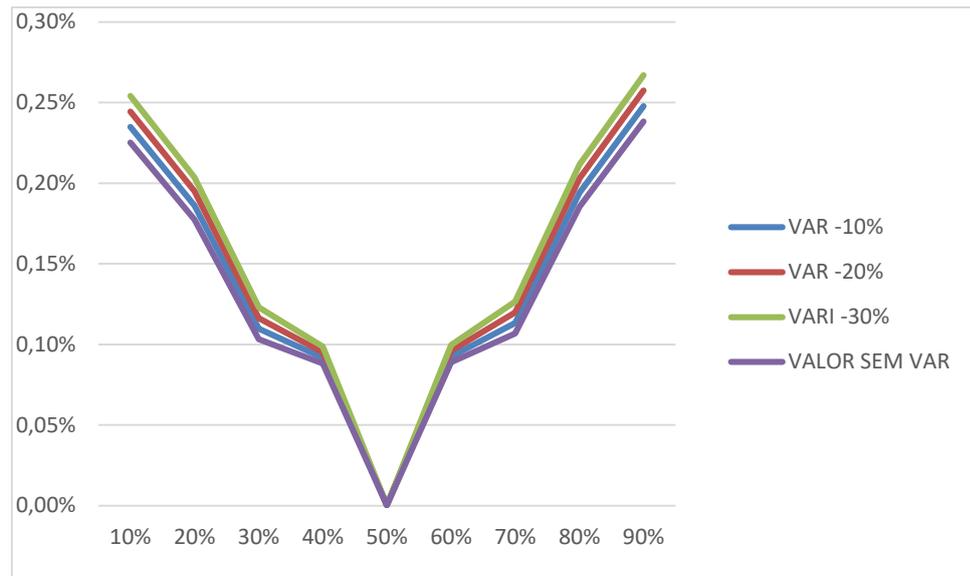


Figura 27 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para variação de -10%, -20% e -30% na capacitância de sequência zero – Metodologia 01 – Linha de 230 kV.

Fonte: autoria própria.

Os gráficos e tabelas mostram que a variação da capacitância *shunt* de sequência zero influencia na precisão do algoritmo 01 de localização de faltas, principalmente quando as faltas ocorrem nas extremidades da linha. No entanto, mesmo nessas situações, a influência foi pouco significativa, tendo em vista que a maior variação de erro de localização de faltas se deu nas extremidades da linha e foi de, aproximadamente, 0,03%, considerando $R_F = 0$. Vale salientar que essa análise também foi feita para R_F igual a 100 ohms, levando a variações de erro da mesma ordem de grandeza das obtidas para $R_F = 0$.

Na Tabela 25 e na Figura 26 são apresentados os erros de localização de faltas em função dos erros nas capacitâncias de sequência zero (+10%, +20% e +30%), utilizando a metodologia 02, e considerando faltas na linha de 230 kV ($R_F = 0$).

Tabela 31 – Erros de localização de faltas considerando erros de +10%, +20% e +30% na capacitância de sequência zero – Linha de 230 kV – Metodologia 02.

Dreal (km)	SEM VARIACÃO		VARIACÃO +10%		VARIACÃO +20%		VARIACÃO +30%	
	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)
18	18,5437	0,30%	18,4604	0,26%	18,3767	0,21%	18,2927	0,16%
36	36,385	0,21%	36,3102	0,17%	36,235	0,13%	36,1594	0,09%
54	54,3043	0,17%	54,2475	0,14%	54,1903	0,11%	54,1327	0,07%
72	72,4832	0,27%	72,454	0,25%	72,4246	0,24%	72,3949	0,22%
90	90,4569	0,25%	90,4588	0,25%	90,4607	0,26%	90,4626	0,26%
108	108,3796	0,21%	108,4094	0,23%	108,4393	0,24%	108,4695	0,26%
126	126,4462	0,25%	126,4958	0,28%	126,5457	0,30%	126,5959	0,33%
144	144,3035	0,17%	144,3619	0,20%	144,4206	0,23%	144,4795	0,27%
162	162,0498	0,03%	162,108	0,06%	162,1663	0,09%	162,2248	0,12%

Fonte: autoria própria.

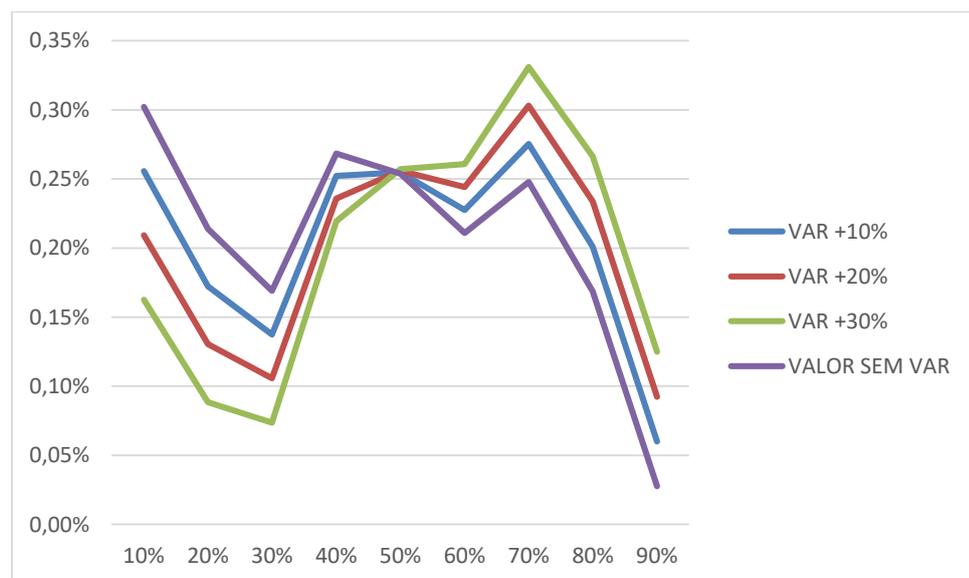


Figura 28 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para variação de +10%, +20% e +30% na capacitância de sequência zero – Metodologia 02 – Linha de 230 kV.

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 26 e na Figura 27 apresentam-se os erros de localização de faltas em função dos erros nas capacitâncias de sequência zero (-10%, -20% e -30%), utilizando a metodologia 02, e considerando faltas nas linhas de 230 kV ($R_F = 0$).

Tabela 32 – Erros de localização de faltas considerando erros de -10%, -20% e -30% na capacitância de sequência zero – Linha de 230 kV - Metodologia 02.

Dreal (km)	SEM VARIÇÃO		VARIÇÃO -10%		VARIÇÃO +20%		VARIÇÃO +30%	
	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)	Destim (km)	Erro (%)
18	18,5437	0,30%	18,6267	0,35%	18,7093	0,39%	18,7916	0,44%
36	36,385	0,21%	36,4593	0,26%	36,5332	0,30%	36,6067	0,34%
54	54,3043	0,17%	54,3607	0,20%	54,4167	0,23%	54,4724	0,26%
72	72,4832	0,27%	72,5122	0,28%	72,541	0,30%	72,5696	0,32%
90	90,4569	0,25%	90,4551	0,25%	90,4532	0,25%	90,4514	0,25%
108	108,3796	0,21%	108,35	0,19%	108,3206	0,18%	108,2914	0,16%
126	126,4462	0,25%	126,3969	0,22%	126,3479	0,19%	126,2991	0,17%
144	144,3035	0,17%	144,2453	0,14%	143,5769	0,24%	144,1297	0,07%
162	162,0498	0,03%	161,9918	0,00%	161,9339	0,04%	161,8762	0,07%

Fonte: autoria própria.

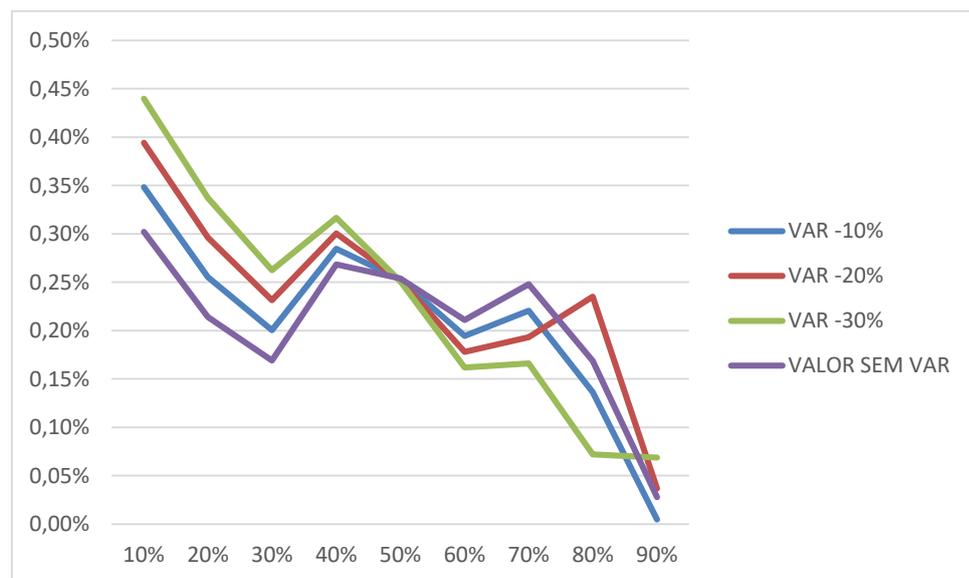


Figura 29 - Erro de localização de faltas (%) versus local da falta (%) para variação de -10%, -20% e -30% na capacitância de sequência zero – Metodologia 02 – Linha de 230 kV.

Fonte: autoria própria.

A partir dos resultados obtidos, nota-se que a variação da capacitância *shunt* de sequência zero também influenciou na estimação da distância da falta usando a metodologia 02. Semelhante à metodologia 01, essa influência foi pouco significativa, uma vez que a maior variação de erro de localização de faltas foi de 0,10%.

Capítulo 7

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo principal a elaboração de duas metodologias de localização de faltas em linhas de transmissão a partir de dados não sincronizados de dois terminais. Os dois algoritmos são compostos por duas etapas, a etapa de processamento dos dados de entrada, e a etapa pós-falta. Na etapa de processamento é realizada a extração dos fasores fundamentais de pré e pós-falta, a estimação dos parâmetros da linha de sequência positiva, a sincronização dos registros e a obtenção do instante de início da falta. Na segunda etapa, estima-se o local onde ocorreu o curto-circuito. Ambas as metodologias foram formuladas a partir do conceito de mínimos quadrados, tendo em vista que as equações de falta obtidas constituíam um sistema sobredeterminado.

A metodologia 01 mostrou-se precisa nas situações analisadas, tanto para resistência de falta igual a zero, como para resistência de falta igual a 100 ohms, contribuindo para erros de localização muito próximos de zero, principalmente em faltas que ocorrem próximas ao centro da linha. Já a metodologia 02, a princípio, não foi tão eficiente, tendo apresentado erro de localização de faltas de aproximadamente 20% em uma das situações analisadas. Entretanto, a partir de uma análise adicional realizada no capítulo 5, constatou-se que a metodologia 02 também pode ser exato, ao considerar no cálculo da distância de falta apenas as raízes advindas das equações com coeficientes reais.

Com objetivo de dar continuidade ao trabalho e contribuir para a literatura de localização de faltas em linhas de transmissão, são sugeridas algumas ideias para trabalhos futuros. A primeira recomendação seria realizar uma investigação sobre a adição de um método de estimação de parâmetros de sequência zero, na etapa pós-

falta. Outra sugestão para trabalhos futuros seria simular e avaliar as metodologias desenvolvidas para outros tipos de faltas em linha de transmissão, como trifásicas, bifásicas e bifásicas-terra. Uma terceira sugestão seria comparar o desempenho dos algoritmos desenvolvidos em relação a outros algoritmos existentes na literatura. Sugere-se também a utilização de outros algoritmos na etapa de processamento dos dados de entrada, a fim de verificar o desempenho das metodologias de localização em relação a métodos diferentes de sincronização, estimação de parâmetros, identificação do início da falta e extração de fasores.

REFERÊNCIAS

ABREU, Francisco Carlos Moreira. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando ondas viajantes e transformada wavelet sob influência de ruído branco**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2015.

AGGARWAL, R K et al. **A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders**. *IEEE, Bath*, v. 8, n. 3, p.874-883, jul. 1993.

APOSTOLOPOULOS, Christos A.; KORRES, George N.. **A Novel Algorithm for Locating Faults on Transposed/Untransposed Transmission Lines Without Utilizing Line Parameters**. *IEEE, Atenas*, v. 25, n. 4, p.2328-2338, out. 2010.

ARAUJO, Maryson da Silva. **Influência de Famílias Wavelets e suas ordens no desempenho de um localizador de faltas em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. 2011. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

BARROS, Herrysonn Araújo. **Cálculo de Parâmetros Elétricos de Linha de Transmissão a partir de Medidas de Tensão e Corrente**. 2017. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BENETTI, Marcelo Azevedo. **Utilização de Medição Fasorial Sincronizada em Metodologia de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão**. 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BRAHMA, Sukumar M.. **Fault Location Scheme for a Multi-Terminal Transmission Line Using Synchronized Voltage Measurements.** IEEE, Chester, v. 20, n. 2, p.1325-1331, abr. 2005

CAVALCANTE, Paulo A. H. et al. **A transmission Line Two-end Fault Location Approach Based on Mathematical Morphology.** IEEE, Campinas, v. 13, n. 1, p.978-982, nov. 2013.

CIPRIANI, Emanoelli; COSTA, Antonio J. A. Simões. **Análise de observabilidade e criticidade de medidas na estimação de estados em sistemas de potência considerando medições fasoriais sincronizadas.** Congresso Brasileiro de Automática, Bonito, v. 1, n. 1, p.3436-3443, set. 2010.

CRUZ, Melinda C. S. da; OLIVEIRA, José T. de; MEDEIROS JÚNIOR, Manoel F. de. **Sincronização de Registros Oscilográficos em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos.** Anais do Vi Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, [S.l.], 2016. Grupo de Pesquisa Otimização e Supervisão de Sistemas Elétricos Industriais.

CRUZ, Melinda Cesianara Silva da. **Metodologia de Estimação de Estados para Tratamento de Medições Errôneas e Registros não Sincronizados em Algoritmos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão.** 2015. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Ufrn, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

CRUZ, Melinda Cesianara Silva. **Localização de faltas em linhas de transmissão de múltiplos terminais a partir de registros oscilográficos sincronizados via transformada wavelet.** 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pos Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CRUZ, Melinda Cesianara Silva; OLIVEIRA, José Tavares de; MEDEIROS JÚNIOR, Manoel Firmino. **A Performance Analysis of Methods for Fault Location in Transmission Lines Considering Errors in Data Acquisition.** IEEE Latin America, Natal, v. 13, p.2159-2167, 7 jun. 2015.

CRUZ, Melinda Cesianara Silva et al. **Metodologia para Sincronização de Registros de Falta baseada em Equações de Circuito Equivalente de Linhas de Transmissão. IEEE/IAS International Conference On Industry Applications**, Fortaleza, v. 10, n. 10, p.120-126, fev. 2012.

DASGUPTA, Kalyan; SOMAN, Shreevardhan Arunchandra. **Estimation of zero sequence parameters of mutually coupled transmission lines from synchrophasor measurements. IET Generation, Transmission & Distribution**, [s.l.], v. 11, n. 14, p.3539-3547, 28 set. 2017. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0057>.

GALE, P. F. et al. Fault Location Based On Travelling Waves. *IET*, Mossoró, v. 1, n. 1, p.54-59, 30 mar. 1993.

GIRGIS, Adly A.; HART, David G.; PETERSON, William L.. **A new fault location technique for two-and three-terminal lines. IEEE**, Carolina do Sul, v. 7, n. 1, p.98-107, jan. 1992.

GOMES, Cristiane Ruiz. **LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO DECOMPOSIÇÃO HARMÔNICA E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

JOHNS, A. T.; JAMALI, S.. **Accurate fault location technique for power transmission lines. IEE**, Londres, v. 137, n. 6, p.395-402, nov. 1990.

KEZUNOVIC, Mladen; RIKALO, Igor. **Detect and Classify Faults Using Neural Nets. IEEE**, Texas, v. 96, n. 4, p.42-47, out. 1996.

LEITES, Renan Augusto da Costa. **Processamento de medidas fasoriais de tensão e corrente na estimação de estados em sistema de potência**. 2010. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

LIMA, Diomar Adonis Copetti. **Localização de Falhas em sistemas de transmissão de energia elétrica baseada na impedância aparente: algoritmo utilizando dados de um terminal**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

LOPES, Felipe Vigolvin. **Localização de faltas em tempo real baseado na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais.** 2014. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Campina Grande, 2014.

MAGNAGO, Fernando H.; ABUR, Ali. **Fault location using wavelets.** *IEEE*, Texas, v. 13, n. 4, p.1475-1480, out. 1998.

NASCIMENTO, Ricardo Mion do. **Estudo comparativo utilizando equações de fluxo na forma polar e retangular.** 2008. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajuba, 2008.

PESENTE, Jonas Roberto. **Estudo da Utilização de Medição Sincronizada de Fasores para o Esquema de Controle de Emergência do Sistema de Transmissão de Itaipu em 60 Hz.** 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PRESTON, G. et al. **New settings-free fault location algorithm based on synchronised sampling.** *IET*. Manchester, v. 5, n. 3, p.376-383, jun. 2010.

Reddy, M. Jayabharata e Mohanta, D. K. (2007). **A Wavelet-Fuzzy Combined Approach for Classification and Location of Transmission Line Faults.** *International Journal of Electric Power & Energy Systems*, vol. 29, ed. 9, pp. 669 - 678.

RAYBOLT, Ana Carolina da Silva. **Localização de faltas em linhas de transmissão em circuito duplo utilizando redes neurais artificiais.** 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SALIM, Rodrigo Hartstein. **Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica fundamentada na**

impedância. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SANTO, Silvio Giuseppe di; PEREIRA, Carlos Eduardo de Moraes. **Fault location metho applied to transmission lines of general configuration.** *Science Direct*, São Paulo, v. 2, n. 2, p.287-294, fev. 2015.

SILVA, Murilo da; COURY, Denis V.; OLESKOVICZ, Mário. **Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas.** *Revista de Controle e Automação*, São Carlos, v. 16, n. 1, p.345-358, 03 ago. 2004.

SILVA, Nastasha Salame da. **Estimação de estados hierárquia considerando a coestimação de estados e topologia no nível de subestação.** 2015. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SIMÕES COSTA, A. J. A.; SALGADO, R. **Análise estática de segurança de sistemas elétricos de potência.** Florianópolis, 2002. (Apostila).

TAKAGI, T. et al. **A new algorithm of an accurate fault location for ehv/uhv transmission lines: part i - fourier transformation method.** *IEEE*, Tokyo, v. 3, n. 1, p.1316-1323, mar. 1981.

TAKAGI, T. et al. **Development of a new type fault Idicator using the one-terminal voltage and current data.** *IEEE*, Tokyo, v. 101, n. 8, p.2892-2898, 08 ago. 1982.

WANG, Yang; XU, Wilsun. **Algorithms and field experiences for estimating transmission line parameters based on fault record data.** *IET Generation, Transmission & Distribution*, [s.l.], v. 9, n. 13, p.1773-1781, 1 out. 2015. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1092>.