

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

Fernanda Cazabonet Ramos

**ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE METODOLOGIAS PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS FUNDAMENTADAS EM DADOS DE UM E DOIS
TERMINAIS APLICADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Alegrete

2018

Fernanda Cazabonet Ramos

**ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE METODOLOGIAS PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS FUNDAMENTADAS EM DADOS DE UM E DOIS
TERMINAIS APLICADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em (Engenharia Elétrica)

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos.

Alegrete
2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R175a Ramos, Fernanda Cazabonet

Análise da resposta transitória de metodologias para
localização de faltas fundamentadas em dados de um e dois
terminais aplicadas em sistemas elétricos de potência /
Fernanda Cazabonet Ramos.

93 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Desempenho. 2. Sistemas Elétricos de Potência. 3. Relé
de Distância. 4. Resposta Transitória. 5. Localização de
Falta. I. Título.

FERNANDA CAZABONET RAMOS

ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE METODOLOGIAS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS
FUNDAMENTADAS EM DADOS DE UM E DOIS TERMINAIS APLICADAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

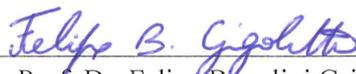
Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 3 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
UNIPAMPA



Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha filha Sofia,
por ser a razão da minha dedicação e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela força e coragem dada a mim durante esta jornada.

Quero agradecer também a todos os professores, que me guiaram e transmitiram seus conhecimentos durante a graduação. Agradecimento especial aos Professores Dr. Eduardo Machado dos Santos e Me. John Jefferson Antunes Saldanha, que acreditaram em mim e foram essenciais para a realização deste trabalho.

Dedico este trabalho para minha filha Sofia, que mesmo sem ter conhecimento deste documento, encheu meu coração de amor e esperança, encorajando-me e me tornando uma pessoa melhor.

Eduardo, meu amor, gostaria de agradecer todo carinho e paciência comigo neste período, não tenho palavras para descrever minha gratidão, você supriu minhas ausências sendo sempre um pai e esposo excelente, simplesmente te amo.

Gostaria de agradecer imensamente, a minha família, em especial a minha mãe Caren Alessandra, meu pai Romário e meus irmãos Lucas, Márcia e Marcelo. Sem o apoio de vocês nada disso seria possível.

Também, agradeço aos meus colegas e amigos do GESEP, em especial, às minhas amigas Bruna, Bianca, Naiani e Fabiana. Sem vocês eu teria enlouquecido. Obrigada pelo companheirismo e pelas palavras de motivação nos momentos de aflição.

*"Inteligência é a capacidade
de se adaptar à mudança."
(Stephen Hawking)*

RESUMO

As faltas em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são detectadas e isoladas por dispositivos de proteção do sistema. O tempo de interrupção de fornecimento de energia pode ser reduzido se a localização da falta for precisa. Neste contexto, uma vez que as Linhas de Transmissão (LT's) apresentam impedâncias características relativamente constantes por km, relés numéricos de proteção são dotados de lógicas para a estimação do local da falta, através do cálculo da impedância entre o ponto de instalação do equipamento até o ponto em curto-circuito. Tais lógicas computacionais operam processando sinais de tensão e corrente provenientes de um ou mais terminais. Este trabalho tem por objetivo expor e comparar o desempenho de métodos localizadores de falta (LFs) baseados no cálculo da impedância a partir de dados provenientes de um e dois terminais propostos na literatura especializada. Para tal, um sistema teste correspondente a uma linha de transmissão com fontes em ambos os terminais foi implementado no software ATPDraw, a partir do qual foram simulados diferentes tipos de curto-circuito, em diferentes taxas de amostragens, de modo a gerar um banco de sinais de tensão e corrente provenientes dessas simulações, os quais foram medidos em ambos os terminais da linha. Os LFs foram implementados no software Matlab[®], sendo testados para processamento dos sinais do referido banco de dados. A partir dessas simulações, pôde-se obter a resposta transitória de cada método, permitindo concluir que a estimação do local da falta por parte dos LFs varia de acordo com o tipo de falta, a taxa de amostragem e o tempo de abertura do disjuntor.

Palavras-chave: Desempenho. Localização de falta. Resposta Transitória. Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

Faults in Electrical Power Systems (EPS) are detected and isolated by system protection devices. The power supply interruption time may be shortened if the fault location is accurate. In this context, since the Transmission Lines (TL's) have relatively constant characteristic impedances per km, numerical protection relays are provided with logic for the estimation of the fault location, by calculating the impedance between the point of installation of the equipment until the short-circuit point. Such computational logics operate by processing voltage and current signals from one or more terminals. This work aims to expose and compare the performance of fault locator methods (FLs) based on the impedance calculation from data from one and two terminals proposed in the specialized literature. To this end, a test system corresponding to a transmission line with sources at both terminals was implemented in the ATPDraw software, from which different types of short circuits were simulated at different sampling rates, in order to generate a bank of voltage and current signals from these simulations, which were measured at both terminals of the line. The FLs were implemented in the Matlab[®] software, being tested for processing the signals of said database. From these simulations, it was possible to obtain the transient response of each method, allowing to conclude that the estimation of the fault location by the FLs varies according to the type of fault, sampling rate and circuit breaker opening time.

Keywords: Performance. Fault Location. Transient response. Electrical power system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Proteção de distância. (a) Zonas de proteção do relé R_{AB} . (b) Coordenação entre as zonas de proteção do relé R_{AB}	32
Figura 2 – Diagrama R-X.	34
Figura 3 – Tipos mais comuns de relés de distância. (a) Relé de impedância. (b) Relé de admitância ou mho. (c) Relé de reatância. (d) Relé quadrilateral.	35
Figura 4 – Relé de Impedância. (a) Relé de impedância sem unidade direcional. (b) Relé de impedância associado com uma unidade direcional.	36
Figura 5 – Relé de admitância ou Mho.	37
Figura 6 – Ajuste do relé de admitância.	37
Figura 7 – Região de operação do relé de reatância	38
Figura 8 – Relé de reatância associado a um relé de admitância	38
Figura 9 – Região de operação da característica quadrilateral.	39
Figura 10 – Diagrama unifilar e circuito equivalente de uma linha de transmissão em falta trifásica	40
Figura 11 – Diagrama mostrando as reflexões e refrações causadas pelas ondas em movimento em quanto a falta esta presente no sistema.	44
Figura 12 – Circuito de sequência negativa para falta em linha com dois terminais	52
Figura 13 – Circuito pós-falta para curto fase-terra	54
Figura 14 – Sistema Teste	61
Figura 15 – Resposta dos LFs de 1 terminal (Falta 1ϕ em 35% da LT, 32 am/ciclo).	65
Figura 16 – Resposta dos LFs de 2 terminais (Falta 1ϕ em 35% da LT, 32 am/ciclo).	66
Figura 17 – Resposta dos LFs de 1 terminal (Falta 1ϕ em 50% da LT, 64 am/ciclo).	71
Figura 18 – Resposta dos LFs de 2 terminais (Falta 1ϕ em 50% da LT, 64 am/ciclo).	72
Figura 19 – Resposta dos LFs de 1 terminal (Falta 1ϕ em 80% da LT, 32 am/ciclo).	75
Figura 20 – Resposta dos LFs de 2 terminais (Falta 1ϕ em 80% da LT, 32 am/ciclo).	76
Figura 21 – Erro absoluto final X local da falta (curtos monofásicos).	79
Figura 22 – Erro absoluto final X local da falta (curtos bifásicos).	80
Figura 23 – Erro absoluto final X local da falta (curtos trifásicos).	81
Figura 24 – Erro médio X tipo de falta.	83
Figura 25 – Erro médio X tempo de abertura do disjuntor.	84
Figura 26 – Erro médio X taxa de amostragem.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Loop de falta	34
Tabela 2 – Resultados para faltas em 35% da LT e taxa de 32 amostras/ciclo. . .	64
Tabela 3 – Resultados para faltas em 35% da LT e taxa de 64 amostras por ciclo.	67
Tabela 4 – Resultados para faltas em 50% da LT e taxa de 32 amostras por ciclo.	69
Tabela 5 – Resultados para faltas em 50% da LT e taxa de 64 amostras por ciclo.	70
Tabela 6 – Tabela de Resultados das simulações para 32 amostras por ciclo. . . .	74
Tabela 7 – Tabela de Resultados das simulações para 64 amostras por ciclo. . . .	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI	Instituto Nacional Americano de Padronização (do inglês <i>American National Standards Institute</i>)
EMTP	Programa de Transitórios Eletromagnéticos (do inglês <i>ElectroMagnetic Transient Program</i>)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
km	Quilômetros
LFIF	Localização de Falta Independente da Impedância da Fonte
LT	Linha de Transmissão
MBA2T	Método de Bretas Adaptado para Dois Terminais
M2TD	Método de Dois Terminais de Das
M2TR	Método de Dois Terminais de Radojević
M2TS	Método de Dois Terminais Sincronizados
M2TT	Método de Dois Terminais de Tziouvaras
M2TV	Método de Dois Terminais de Vieira
MATLAB [®]	<i>Software</i> de cálculo matricial (do inglês <i>MATrix LABoratory</i>)
MBS	Método de Bretas e Salim
MN	Método de Novosel
MRS	Método da Reatância Simples
MTM	Método de Takagi Modificado
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Parâmetro de influência da distância
ΔI_S	Variação de corrente da fonte
ΔV_S	Variação de tensão da fonte
γ	Ângulo resultante fator de carregamento do circuito
θ	Ângulo de defasagem entre os sinais amostrados
d_S	Fator de distribuição de corrente
I_0	Corrente de sequência zero
I_1	Corrente de sequência positiva
I_2	Corrente de sequência negativa
I_A	Corrente fase A
I_B	Corrente fase B
I_C	Corrente fase C
I_F	Corrente de falta
I_L	Corrente de carga pré-falta
I_R	Corrente residual
I_{SF}	Corrente de pós-falta da fonte
I_{SPF}	Corrente de pré-falta da fonte
I_X	Corrente contribuição fonte X
I_Y	Corrente contribuição fonte Y
K_0	Fator de compensação do sinal de corrente
l	Comprimento da linha
m	Distância até a falta
m_e	Distância estimada
m_r	Distância real
n_S	Fator de carregamento do circuito

r	Torque
R_F	Impedância de falta
R_{LT}	Parte real da impedância da linha
RTC	Relação do transformador de corrente
RTP	Relação do transformador de potencial
V_0	Tensão de sequência zero
V_1	Tensão de sequência positiva
V_{1F}	Tensão na de sequência positiva pós-falta
V_2	Tensão de sequência negativa
V_{2F}	Tensão na de sequência negativa pós-falta
V_A	Tensão fase A
V_B	Tensão fase B
V_C	Tensão fase C
V_F	Tensão na falta
V_{SF}	Tensão de pós-falta da fonte
V_{SPF}	Tensão de pré-falta da fonte
X_{LT}	Reatância da linha de transmissão
Z_{0L}	Impedância de sequência zero da linha
Z_{1L}	Impedância de sequência positiva da linha
Z_{LT}	Impedância da linha de transmissão
Z_{load}	Impedância da carga
Z_S	Impedância da fonte
$Z_{vista.X}$	Impedância aparente até o ponto de falta vista em no terminal X
Z_X	Impedância fonte X
Z_Y	Impedância fonte Y

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Considerações Gerais	25
1.2	Revisão Bibliográfica	26
1.3	Justificativa	28
1.4	Objetivos e Contribuições	29
1.5	Estrutura do Trabalho	30
2	RELÉS DE DISTÂNCIA E LOCALIZADORES DE FALTA	31
2.1	Considerações Gerais	31
2.2	Relés de Distância	31
2.2.1	Subalcance, Sobrealcance e Proteção de Distância	31
2.2.2	Impedância Aparente e Diagrama R-X	33
2.2.3	Crítérios para o de Relés de Distância	35
2.2.4	Tipos de Relés de Distância	35
2.2.4.1	Relé de Impedância	36
2.2.4.2	Relés de Admitância	36
2.2.4.3	Relés de Reatância	38
2.2.4.4	Relé Quadrilateral	39
2.3	Localizadores de Falta (LFs)	39
2.3.1	Localizadores de Falta com Base em Dados de Um Terminal	39
2.3.2	Localizadores de Falta com Base em Dados de Dois Terminais	42
2.3.3	Outros Localizadores de Falta	42
2.3.3.1	Patrulha de Linha	42
2.3.3.2	Ondas Viajantes	43
2.4	Considerações Finais	44
3	LOCALIZADORES DE FALTA ANALISADOS E METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO	47
3.1	Considerações Gerais	47
3.2	Técnicas Analisadas	47
3.2.1	Método da Reatância Simples (MRS)	48
3.2.2	Localização de Falta Independente da Impedância da Fonte (LFIIF)	49
3.2.3	Método de Takagi Modificado (MTM)	49
3.2.4	Método de Bretas e Salim (MBS)	50
3.2.5	Método de Novosel (MN)	50
3.2.6	Método de Localização de Faltas com Base em Dados de 2 Terminais para Fasores Sincronizados (M2TS)	52
3.2.7	Método de Tziouvaras (M2TT)	53

3.2.8	Método de Radojević (M2TR)	55
3.2.9	Método de Das (M2TD)	56
3.2.10	Método de Vieira (M2TV)	57
3.2.11	Método de Bretas Adaptado para Dois Terminais (MBA2T)	57
3.3	Metodologia de Comparação	58
3.3.1	Erro Absoluto (e_{abs})	58
3.3.2	Erro Relativo Baseado no Comprimento da Linha (e_l)	59
3.3.3	Erro Relativo Tradicional (e_T)	59
3.4	Considerações Finais	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Considerações Gerais	61
4.2	Sistema Teste	61
4.3	Resultados	62
4.3.1	Caso 1: Faltas em 35% da Linha de Transmissão	62
4.3.2	Caso 2: Faltas em 50% da Linha de Transmissão	68
4.3.3	Caso 3: Faltas em 80% da Linha de Transmissão	73
4.3.4	Análise do Erro Absoluto Final X Distância	78
4.3.5	Impacto da Variação das Condições de Operação	82
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
5.1	Conclusões	87
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

As linhas de transmissão são componentes muito vulneráveis nos Sistemas Elétricos de Potência, pois devido a sua extensão estas estão mais sujeitas a diversos fenômenos naturais, como descargas atmosféricas, queimadas, vendavais entre outros. Nos casos de faltas permanentes, o intervalo de tempo para restabelecimento do sistema, após a atuação de um relé de proteção, pode ser longo o bastante prejudicando o fornecimento de energia, devido à dificuldade de checagem e acesso ao local de falta para realização da manutenção necessária.

Por esse motivo, as metodologias para localização de falta assumem um papel imprescindível dentro da operação e proteção dos sistemas elétricos de potência, uma vez que a estimação da posição da falta reduz o tempo de deslocamento das equipes de manutenção, tendo em vista que esse deslocamento será direcionado ao local estimado. Dessa forma, pode-se reduzir o tempo de restabelecimento do sistema e, por consequência, reduzindo o tempo em que os consumidores ficam sem energia, o que contribui para o melhoramento dos índices de qualidade e continuidade do serviço.

Neste contexto, é essencial o contínuo desenvolvimento de metodologias cada vez mais precisas e robustas para localização de faltas. Assim, estudos acerca do desempenho dessas técnicas apresentam grande relevância, principalmente no que tange sua aplicação em tempo real, o que depende fundamentalmente do tempo de abertura do disjuntor, visto que esta ação determina o instante final para a determinação do local de falta.

Sendo assim, devido a necessidade de sistemas cada vez mais confiáveis destinados ao fornecimento de energia elétrica, diversas técnicas para a localização de faltas vêm sendo estudadas e divulgadas na literatura especializada, tendo em vista a crescente demanda por parte das concessionárias por sistemas mais robustos e com menor tempo de manutenção em caso de defeito.

Logo, o presente trabalho tem por objetivo comparar o desempenho de metodologias apresentadas na literatura especializada, as quais são destinadas à localização de faltas em sistemas de transmissão em termos do erro transitório da estimação. Para tal, foi considerado o intervalo de tempo entre a atuação de um relé de distância do tipo Mho e a abertura total do disjuntor como o período de estimação do ponto de falta por cada metodologia.

Por fim, destaca-se que, nesse estudo, foram testadas metodologias fundamentadas na aquisição de dados de um e dois terminais para sinais de tensão e corrente obtidos a partir de simulação computacional de uma linha de transmissão (LT), considerando-se diferentes taxas de amostragem, tipos de falta e tempos de abertura do disjuntor, bem como diferentes pontos de falta na LT em questão.

1.2 Revisão Bibliográfica

Em sua grande maioria, as técnicas para localização de falta fundamentam-se no cálculo da impedância vista pelo relé, desde o ponto de instalação do transformador de corrente, até o local da falta, utilizando os sinais de tensão e corrente da rede. Com esse intuito, metodologias vêm sendo desenvolvidas desde os anos 50, destacando-se os trabalhos divulgados em Stringfield, Marihart e Stevens (1957) e Sant e Paithankar (1979).

Ressalta-se que a proposta de Sant e Paithankar (1979) foi a primeira a introduzir esta tecnologia digital para estimação do local da falta, fundamentando-se no cálculo da reatância obtida a partir dos sinais de corrente e tensão, provenientes dos transformadores de corrente e de tensão em um dos terminais. Entretanto, embora seja proposta uma compensação do erro de estimação valendo-se dos dados de dois terminais, essa proposta apresenta erros elevados de estimação do local da falta para qualquer situação. Devido à dificuldade em estimar corretamente a posição das faltas, posteriormente, diversas técnicas foram propostas com diferentes abordagens.

Dentre as metodologias que utilizam o processamento de dados obtidos a partir de um dos terminais da linha de transmissão, destaca-se o trabalho de Takagi et al. (1982), o qual foi desenvolvido considerando o modelo monofásico da linha de transmissão sem considerar a impedância da fonte, sendo que os cálculos de impedância são realizados com as grandezas de fase. Embora, apresente erros consideráveis para situações envolvendo impedância de falta, a metodologia proposta em Takagi et al. (1982) torna-se uma alternativa atrativa para a aplicação, uma vez que é simples e não precisa de comunicação entre os terminais. O fato dessa metodologia não ser precisa para todas as condições de falta impulsionou o desenvolvimento de técnicas mais robustas e, até hoje, essa técnica é base para novos estudos.

Um exemplo disto é a modificação da metodologia proposta em Takagi et al. (1982) feita em Schweitzer (1983), na qual o autor comprova que o método original apresenta grande sensibilidade em relação ao ângulo do fator de distribuição, o qual foi considerado constante e igual a zero no trabalho original. Esse parâmetro é derivado do ângulo da impedância da fonte e promove grande melhora na resposta, aprimorando o desempenho da estimação do local da falta.

Outra modificação na proposta de Takagi et al. (1982) foi realizada no trabalho de Eriksson, Saha e Rockefeller (1985), onde passa-se a considerar as impedâncias da fonte no cálculo de impedância até o ponto da falta. Considerando esses parâmetros, a técnica torna-se insensível ao efeito da reatância, isto é, sem necessidade de compensação para os efeitos da carga, da resistência de falta e do ângulo do fator de distribuição da corrente. Entretanto, a mesma apresenta erros elevados caso as impedâncias da fonte sejam ajustadas inadequadamente.

Ainda, destaca-se a proposta de Srinivasan e Jacques (1989), a qual considera o ângulo do fator de distribuição implícito no equacionamento, apresentando grande

avanco em relação ao método de Takagi et al. (1982) permitindo a inclusão de cargas intermediárias entre a fonte e um terminal remoto passivo.

Nos anos 90, diversas metodologias fundamentadas no processamento de dados provenientes de um terminal da linha foram desenvolvidas. Dentre estas, citam-se os trabalhos de Novosel et al. (1994) e Novosel et al. (1998). Ressalta-se que este último apresenta uma solução para estimação adequada da impedância da fonte e o resultado da estimação é conseguido a partir da solução de uma equação quadrática complexa. Ainda, cabe destacar o método proposto por Saha et al. (1999), o qual apresenta uma proposta para localização de faltas em uma linha com compensação série, baseado nas componentes de fase dos sinais de tensão e corrente em um terminal da linha, eliminando os efeitos da compensação e da reatância incluídos pela fonte do terminal remoto. Já nos anos 2000, com o avanço das tecnologias aplicadas em relés digitais, metodologias cada vez mais precisas foram sendo desenvolvidas. Em Gopalakrishnan et al. (2000), é proposto um método para localização de faltas que utiliza os parâmetros distribuídos da linha em sua formulação, contrariando as modelagens comuns do problema, as quais utilizam os modelos de menos perdas das linhas de transmissão. Ainda neste período, uma contribuição importante no que tange os localizadores de falta fundamentados em dados de um terminal foi proposto em Bretas e Salim (2006). Neste trabalho, os autores propõem uma técnica que utiliza a impedância de sequência zero no equacionamento, promovendo grande precisão ao método tanto para faltas equilibradas quanto para curto-circuitos desequilibrados.

É importante ressaltar que, a partir dos anos 90, diversas técnicas que utilizam dados de múltiplos terminais foram apresentadas na literatura especializada, visto a possibilidade de comunicação entre subestações e a maior precisão dos métodos que utilizam este princípio. Nesse contexto, destacam-se os trabalhos de Johns e Jamali (1990) e Girgis, Hart e Peterson (1992), os quais além de utilizarem sinais de corrente e de tensão de linha, valem-se de parâmetros de linha em formulação, como as componentes de impedância e as respectivas constantes de propagação. No trabalho de Girgis, Hart e Peterson (1992), destaca-se o fato de que a técnica proposta pelos respectivos autores pode ser aplicada para linhas de dois e três terminais.

Também em Aggarwal et al. (1993), é proposta uma metodologia para localização de faltas em sistemas de transmissão de extra-alta tensão com dois ou três terminais. Além disso, Kezunovic, Perunicic e Mrkic (1993) e Philippot, Maun et al. (1995) propuseram técnicas fundamentadas no processo de dados provenientes dos dois terminais da linha, as quais utilizam medição sincronizada em ambos os terminais, aprimorando assim a resposta do respectivo localizador de falta. Nesse contexto, no ano seguinte, foi proposto em Kezunovic e Perunicic (1995a), um estudo provando a melhoria propiciada à estimação do local de falta utilizando a medição sincronizada. Entretanto, o trabalho de Kezunovic e Perunicic (1995b) apresenta uma metodologia de dois terminais que utiliza aquisição de dados dessincronizado, a qual apresenta boa precisão na estimação do local da falta.

No ano seguinte, em Kezunovic e Perunicic (1995a) é apresentada uma melhoria na técnica proposta no trabalho anterior, renovando a ideia de que a medição sincronizada em ambos os terminais da linha aprimora o desempenho dos localizadores de falta que utilizam essa abordagem. Em contrapartida a esta ideia, Novosel et al. (1996) propõe uma série de algoritmos para localização de faltas em linhas com compensação série, fundamentados em redes neurais e métodos determinísticos, os quais processam dados provenientes de medições dessincronizadas entre ambos os terminais da linha, que também apresenta bons resultados na estimação.

Também utilizando medição dessincronizada, Tziouvaras, Roberts e Benmouyal (2001) propõe uma técnica para localização de faltas em linhas com múltiplos terminais, utilizando os dados de tensão e corrente de sequência negativa em ambos os terminais, a partir de uma equação quadrática complexa.

Destaca-se também, a metodologia proposta em Luo, Kezunovic e Sevick (2004), a qual é fundamentada na medição esparsa de dados ao longo da linha, os quais são comparados com dados simulados através do processamento de um algoritmo genético que, por sua vez, fornece a estimação do local da falta.

Outra metodologia destinada à localização de faltas utilizando dados de dois terminais é a proposta em Radojević et al. (2009), a qual se destaca por utilizar parâmetros de linha para localização da falta, baseando-se somente nas medidas de tensão e corrente dos terminais sincronizados. Já o método proposto em Vieira, Oliveira e Lisboa (2013) apresenta modificações na formulação apresentada por Radojević et al. (2009) de modo a corrigir a falta de sincronismo normalmente existente entre os dois terminais envolvidos.

Por fim, deve-se destacar que, embora muitas metodologias tenham sido desenvolvidas, nenhuma delas apresenta grande precisão para todas as condições de falta possíveis. Além disso, cabe destacar que a taxa de amostragem e o tempo de abertura do disjuntor após a atuação do relé de proteção, são parâmetros que influenciam diretamente na resposta dos localizadores de falta, bem como a impedância de falta.

1.3 Justificativa

Como citado anteriormente, as Linhas de Transmissão são componentes suscetíveis a faltas permanentes e transitórias devido a sua extensão. Além disso, as Linhas de Transmissão localizam-se em diferentes áreas, contendo distintos tipos de terreno, vegetação e clima dificultando assim o monitoramento, a checagem e a manutenção no ponto de falta.

Neste contexto, é de suma importância o estudo de metodologias de localização de faltas, tornando-as cada vez mais robustas e precisas. Cabe ressaltar que, as técnicas de localização de falta são responsáveis por direcionar as equipes de manutenção para o ponto faltoso. Logo, quanto mais preciso o localizador de falta, menor será o tempo de interrupção de energia elétrica, menor o tempo de deslocamento das equipes de manutenção e maior

sera o índice de qualidade e continuidade de serviço. Assim, estudos sobre aplicações destas metodologias em tempo real, o que depende fundamentalmente do tempo de abertura do disjuntor, são relevantes e imprescindíveis.

1.4 Objetivos e Contribuições

Este trabalho tem por objetivo geral a comparação de metodologias destinadas a localização de falta, de modo a testar seus desempenhos considerando o tempo de abertura do disjuntor, ativado pela atuação de um relé de distância do tipo admitância. Por objetivos específicos, têm-se:

- Implementar um sistema teste no software EMTP-ATP, modelando uma linha de transmissão com dois terminais;
- Simular curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, em diferentes pontos da linha de transmissão, sem e com impedância de falta, de modo a se obter um banco de sinais de corrente e tensão para posterior avaliação do desempenho das técnicas implementadas;
- Implementar metodologias para localização de faltas, fundamentadas no processamento de sinais de corrente e tensão de um e dois terminais;
- Avaliar o desempenho das metodologias implementadas utilizando sinais de corrente e tensão durante o intervalo entre o trip do relé até a abertura total do disjuntor, frente a diferentes condições de falta e taxas de amostragem, em termos do erro absoluto e do erro relativo da estimação do local da falta.

Dentre as principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- Realização de estudo inédito sobre o desempenho das metodologias para localização de faltas, considerando a dinâmica da estimação desde a atuação do relé até a abertura total do disjuntor;
- Análise quantitativa do desempenho das metodologias implementadas para diferentes condições de falta e diferentes taxas de amostragem dos sinais.
- Análise da viabilidade de implementação em tempo real;
- Comparação do desempenho das metodologias implementadas, de modo a reconhecer as melhores para cada situação testada.

1.5 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica necessária para a realização deste trabalho, que tange temas como os relés de distância e os tipos de localizadores de falta, bem como os conceitos e considerações fundamentais para a realização desta tarefa.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada, destacando-se os localizadores de falta analisados e os parâmetros de comparação dos desempenhos dos localizadores de falta.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e as considerações a cerca destes, bem como é descrito o sistema teste utilizado no estudo.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 RELÉS DE DISTÂNCIA E LOCALIZADORES DE FALTA

2.1 Considerações Gerais

Com o advento dos relés microprocessados, além das funções de proteção que determinam a sua atuação, esses dispositivos podem ser programados com lógicas para localização de faltas. Sendo assim, é fundamental o entendimento a cerca do funcionamento, tanto dos relés, quanto das metodologias para localização de faltas, bem como sobre os problemas relacionados a essa função. Para o entendimento da atuação da proteção e dos localizadores de falta, é necessário compreender os principais conceitos para a implementação dos esquemas de proteção dotados de metodologias para estimação do local de falta. Dessa forma, o presente Capítulo apresenta os principais conceitos associados à proteção de distância e aos localizadores de falta, os quais foram estudados, consolidando a fundamentação teórica deste trabalho.

2.2 Relés de Distância

Relés de distância são normalmente usados para proteção de linhas de transmissão. Eles estimam a impedância entre a posição do relé e o local da falta. Como a impedância por quilômetro é relativamente constante, esses relés respondem à distância estimada da falta (impedância aparente vista pelo relé) numa linha de transmissão. Sob certas condições, é desejável que o relé responda a outro parâmetro como a admitância ou a reatância até o local da falta (KINDERMANN, 2005).

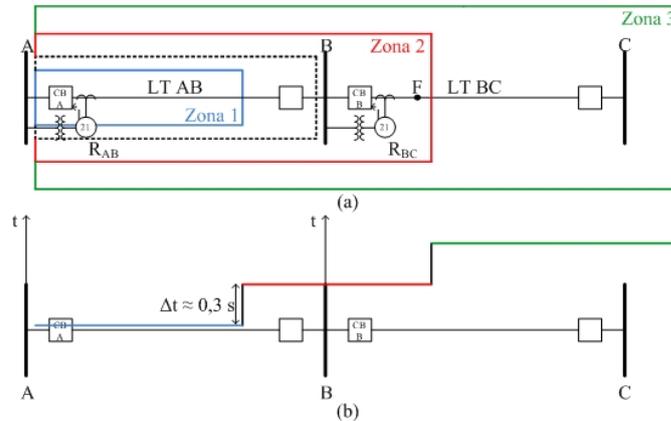
2.2.1 Subalcance, Sobrealcance e Proteção de Distância

Segundo Horowitz e Phadke (2008), proteção de subalcance é uma forma de proteção na qual os relés em um dado terminal não operam para faltas além do equipamento protegido. Por outro lado, a proteção de sobrealcance é uma forma de proteção na qual os relés de um terminal operam para faltas localizadas além do terminal remoto.

Nestes dois casos, o relé não deve operar para uma falta localizada fora da zona de ajuste, mas sim, quando a distância medida até a falta for menor do que a de ajuste (HOROWITZ; PHADKE,).

A Figura 1 (a) mostra as zonas de proteção do relé R_{AB} para uma linha de transmissão. A zona desejada para proteção é mostrada pela linha pontilhada, onde o ideal é que haja operação instantânea do relé. Como não é possível determinar precisamente o ponto remoto de alcance de um relé de distância, deve-se considerar uma Zona 1 de subalcance para garantir que não haja atuação além do primeiro trecho da linha (até a barra B). Geralmente, a Zona 1 é ajustada entre 80% a 90% do comprimento da linha AB e deve operar instantaneamente, segundo Roberts et al. (1993).

Figura 1 – Proteção de distância. (a) Zonas de proteção do relé R_{AB} . (b) Coordenação entre as zonas de proteção do relé R_{AB} .



Fonte: Autora.

Ainda observando a Figura 1 (a), percebe-se que somente a Zona 1 não protege todo o trecho AB da linha, de modo que a região entre o fim da Zona 1 e a barra B não está protegida. Conseqüentemente, o relé de distância deve ser equipado com outra zona que sobrealcance o terminal remoto do trecho AB.

Para uma falta no ponto F, a Zona 2 do relé R_{AB} deve ser ajustada de forma que a proteção do próximo trecho da linha opere antes do relé no terminal A. Esse tempo de coordenação é da ordem de 0,5 segundos para relés eletromecânicos e de 0,3 segundos para relés digitais, conforme mostra a Figura 1 (b).

O alcance da segunda zona é geralmente ajustado em 120% a 150% do comprimento da linha AB. A Zona 2 do relé R_{AB} não deve alcançar além da Zona 1 do relé R_{BC} , pois algumas faltas podem ocorrer simultaneamente nas segundas zonas de ambos os relés, o que poderia levar a um desligamento desnecessário das duas linhas Roberts et al. (1993). Esse conceito de coordenação por distância e tempo leva a um conjunto de zonas de proteção ilustradas na Figura 1 (b) para os dois trechos da linha.

Dessa forma, a segunda zona do relé de distância fornece proteção de retaguarda para a linha vizinha. Essa retaguarda depende do alcance ajustado para essa zona Lewis (2007). Com o intuito de prover proteção de retaguarda para toda a linha, é costume prover outra zona de proteção para o relé no terminal A. Essa terceira zona de proteção geralmente é ajustada para alcançar 120% a 180% do trecho seguinte da linha (BC) e deve ser coordenada em tempo e distância com a segunda zona do circuito vizinho, conforme Roberts et al. (1993). O tempo de coordenação da Zona 3 é geralmente da ordem de 1 segundo para relés eletromecânicos e 0,6 segundos para relés digitais.

Ainda, pode-se adicionar uma quarta zona de proteção ao relé de distância, que é reversa em relação ao sentido de proteção das demais zonas, de modo a exercer proteção de retaguarda para faltas localizadas a montante do relé (HOROWITZ; PHADKE,).

Sob diferentes condições de carregamento e impedância de falta, as impedâncias

aparentes vistas pelos relés podem ser afetadas, fazendo com que o relé sobre ou subalcance a zona de proteção ajustada, situações que não são desejáveis, uma vez que pode haver atuações indevidas ou falhas de operação do mesmo (ROBERTS et al., 1993).

2.2.2 Impedância Aparente e Diagrama R-X

A impedância aparente primária vista pelo relé é dada Equação 2.1.

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Onde V e I são, respectivamente, a tensão e a corrente, ambas medidas na barra adjacente ao relé e a impedância resultante é dada em ohms primários.

A impedância secundária vista pelo relé é dada conforme a Equação 2.2.

$$Z = \frac{V}{I} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (2.2)$$

Em (2.2):

RTC = relação do transformador de corrente;

RTP = relação do transformador de potencial.

Como a impedância aparente possui uma parte real (resistência aparente) e uma parte imaginária (reatância aparente), ela pode ser colocada em um plano complexo chamado diagrama R-X (ROBERTS et al., 1993).

Esse diagrama é uma ferramenta indispensável para análise do comportamento dos relés de distância, uma vez que as equações de conjugado dos diversos tipos de relés definem regiões de operação bem limitadas nesse plano. Através dessa ferramenta, pode-se analisar o comportamento dos relés para diferentes condições de carregamento e impedância de falta, determinando assim suas características de sub e sobrealcance, bem como as regiões de operação e não operação dos relés de distância.

A Figura 2 ilustra o diagrama R-X, onde Z_{LT} é a impedância da linha de transmissão.

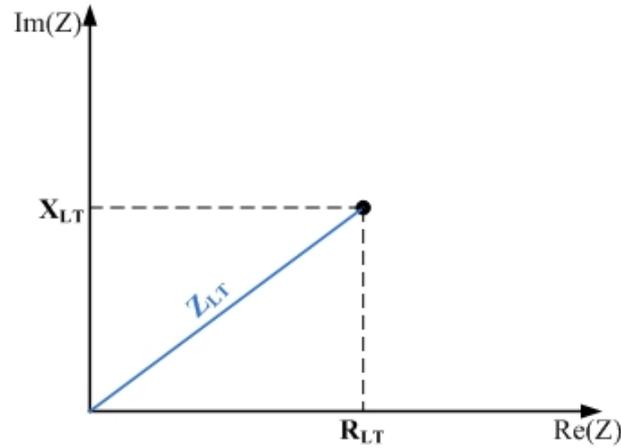
Na prática, relés digitais e numéricos calculam a impedância aparente segundo as Equações 2.3 e 2.4, as quais representam, respectivamente, os loops de falta fase-terra e fase-fase.

Em (2.3) e (2.4), os valores de impedância estão referenciados aos enrolamentos primários do TC e do TP. Para se obter os valores secundários de impedância vista pelo relé, basta multiplicar as referidas equações pela razão RTC/RTP.

$$Z = \frac{V_A}{I_A + k_0 \times I_R} \quad (2.3)$$

$$Z = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \quad (2.4)$$

Figura 2 – Diagrama R-X.



Fonte: Autora.

Ressalta-se que a Equação 2.3 refere-se ao cálculo da impedância aparente vista pelo relé para uma falta monofásica na fase A do sistema. Para faltas monofásicas nas outras fases, basta substituir V_A e I_A pelos valores de tensão e corrente correspondentes à fase em falta. Além disso, em 2.3, k_0 corresponde ao fator de compensação do sinal de corrente em função da corrente residual I_R . As variáveis k_0 e I_R podem ser obtidas a partir das Equações 2.5 e 2.6. Em 2.5, Z_{0L} e Z_{1L} representam, respectivamente, as impedâncias de sequência zero e de sequência positiva da LT protegida.

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3 \times Z_{1L}} \quad (2.5)$$

$$I_R = 3 \times I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (2.6)$$

Ainda, destaca-se que, em (2.4), o valor de impedância obtido refere-se a faltas entre as fases A e B. Para obtenção da impedância vista para faltas envolvendo as fases B e C e C e A, os valores de tensão e corrente devem ser devidamente substituídos na Equação 2.4. Por fim, para faltas trifásicas, basta o valor de impedância calculado a partir de 2.4. A Tabela 1 resume os loops de falta possíveis para os relés 21.

Tabela 1 – Loop de falta

loop	Equação
AN	$Z = \frac{V_A}{I_A + k_0 \times I_R}$
BN	$Z = \frac{V_B}{I_B + k_0 \times I_R}$
CN	$Z = \frac{V_C}{I_C + k_0 \times I_R}$
AB	$Z = \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B}$
ABC BC	$Z = \frac{V_B - V_C}{I_B - I_C}$
CA	$Z = \frac{V_C - V_A}{I_C - I_A}$

Fonte: Autora.

2.2.3 Critérios para o de Relés de Distância

Segundo KINDERMANN (2005), os relés de distância devem ser ajustados para três zonas de atuação conforme os seguintes critérios:

1ª zona

- $Z_{Ajuste1} = (80 \text{ a } 90)\%$ da LT a jusante do relé;
- $T_1 \cong \text{Zero}$, atua o elemento instantâneo do relé.

2ª zona

- $Z_{Ajuste2} = 100\%$ da LT a jusante + (50 a 60)% da LT seguinte;
- $T_2 = \Delta t$

3ª zona

- $Z_{Ajuste3} = 100\%$ da LT a jusante + 100% da LT2 + (20 a 30)% da LT3;
- $T_3 = \Delta t_2 + \Delta t = 2\Delta t$

Onde Δt representa o intervalo de coordenação sendo que, para relés digitais $\Delta t = 0,5$ s. Ainda, segundo KINDERMANN (2005), podem ser adotados os seguintes critérios:

1ª zona: 85 a 90 % da impedância da LT a jusante do relé;

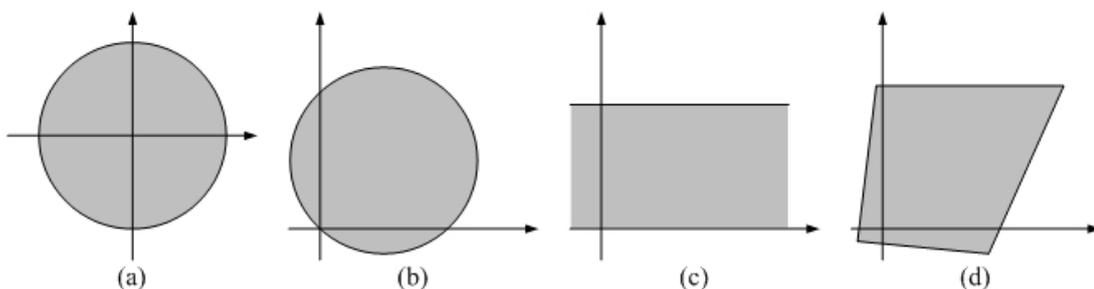
2ª zona: 120 a 150 % da LT a jusante do relé;

3ª zona: 120 a 180 % da LT seguinte.

2.2.4 Tipos de Relés de Distância

Os relés de distância, ANSI 21, operam sempre que a impedância vista por esses dispositivos encontra-se dentro de suas regiões de operação, as quais são bem definidas no diagrama e caracterizam o tipo de relé R-X. Nos relés eletromecânicos, a forma da região de operação tende a ser circular porque a equação do conjugado que promove o fechamento dos contatos do relé produz um limite dessa forma..

Figura 3 – Tipos mais comuns de relés de distância. (a) Relé de impedância. (b) Relé de admitância ou mho. (c) Relé de reatância. (d) Relé quadrilateral.



Fonte: Autora.

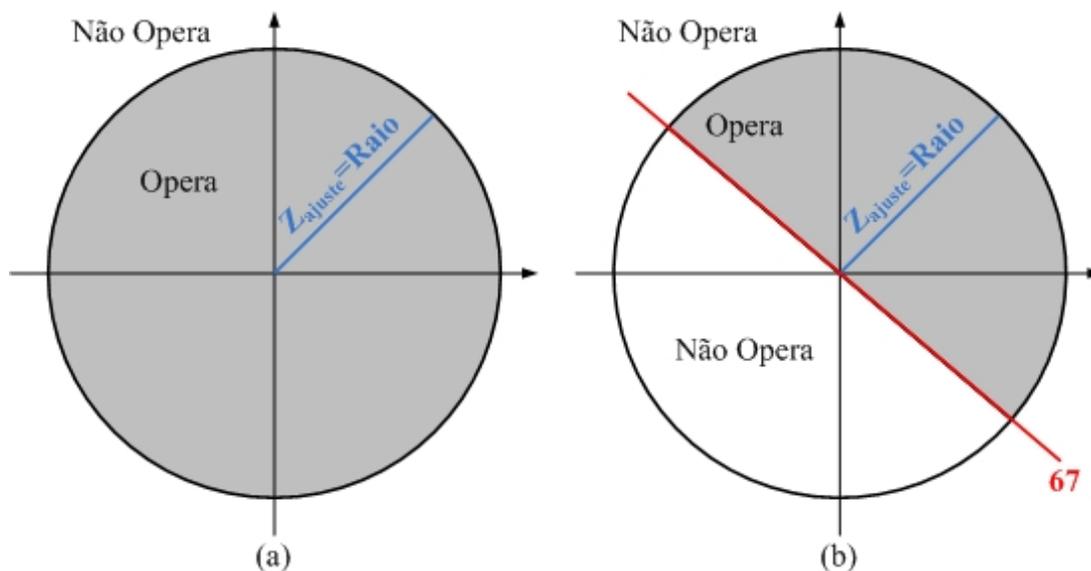
Os quatro tipos mais comuns de relés de distância têm suas formas características mostradas na Figura 3, sendo eles o relé de impedância, o relé de admitância ou Mho, o relé de reatância e o relé quadrilateral (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

2.2.4.1 RELÉ DE IMPEDÂNCIA

Também conhecido como relé Ohm, o relé de impedância apresenta região de operação circular no Diagrama R-X, sendo esta circunferência centrada na origem, com raio igual à impedância de ajuste, conforme a Figura 4 (a). Esse tipo de relé possui a desvantagem de não ter direcionalidade de operação, podendo atuar indevidamente para faltas a montante do trecho protegido, uma vez que sua região de operação ocupa os quatro quadrantes do diagrama R-X. Ressalta-se que as impedâncias vistas para faltas dentro do trecho protegido acomodam-se no primeiro quadrante deste diagrama.

Para contornar esse problema, deve-se utilizar um relé direcional (ANSI 67) devidamente ajustado, de modo a limitar a região de operação no sentido da linha a ser protegida, conforme mostrado na Figura 4 (b).

Figura 4 – Relé de Impedância. (a) Relé de impedância sem unidade direcional. (b) Relé de impedância associado com uma unidade direcional.



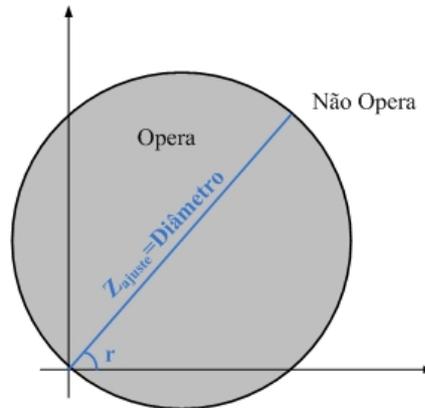
Fonte: Autora.

2.2.4.2 RELÉS DE ADMITÂNCIA

O relé de admitância (ou Mho) também apresenta uma região de operação circular no diagrama R-X, conforme mostrado na Figura 5. Entretanto, sua impedância de ajuste equivale ao diâmetro da circunferência, a qual passa pela origem do sistema, garantindo direcionalidade em sua operação. Esse fato explica o vasto uso desta característica, uma vez que sua direcionalidade representa uma vantagem da sua aplicação, visto que não é

necessária a aquisição de unidades direcionais para a proteção de distância com relés do tipo Mho.

Figura 5 – Relé de admitância ou Mho.



Fonte: Autora.

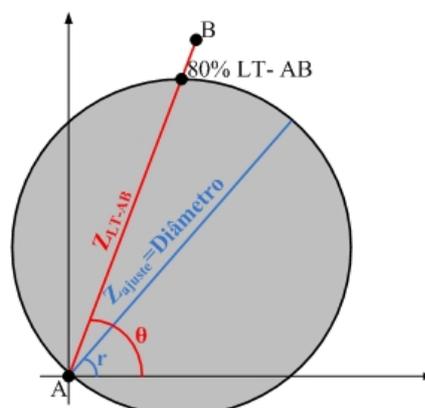
Além disso, é importante ressaltar que esses relés necessitam de um ajuste do ângulo de máximo torque (r), o qual define a extensão da região de operação sobre o primeiro quadrante do diagrama R-X. O ângulo de máximo torque produz uma alteração no alcance do relé, visto que ocorre uma correção em sua região de operação dada pela Equação 2.7. Isso pode ser percebido através da Figura 6.

$$Z_{ajuste} = \frac{|Z_{aj.critério}|}{\cos(\theta - r)} \quad (2.7)$$

Em 2.7, θ representa o ângulo de impedância da linha e $Z_{aj.critério}$ representa a impedância de ajuste obtida a partir de um dos critérios apresentados na Subseção 2.2.3, conforme a respectiva zona a ser ajustada.

Destaca-se que, neste trabalho, foi considerada a atuação da 1ª zona de um relé do tipo Mho como partida para o algoritmo de localização de faltas, uma vez que este tipo de relé é amplamente utilizado na proteção de linhas de transmissão.

Figura 6 – Ajuste do relé de admitância.

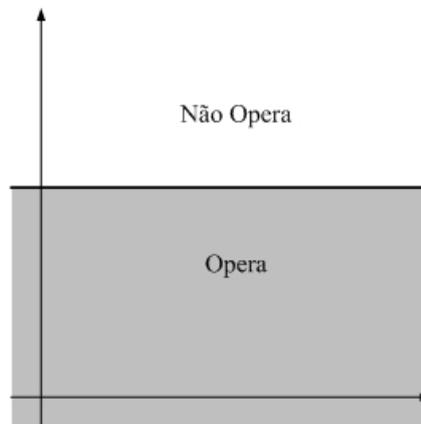


Fonte: Autora.

2.2.4.3 RELÉS DE REATÂNCIA

A região de operação desse relé é definida por uma linha paralela ao eixo R que passa pela reatância de ajuste, a qual se estende ao infinito em três direções conforme a Figura 7.

Figura 7 – Região de operação do relé de reatância

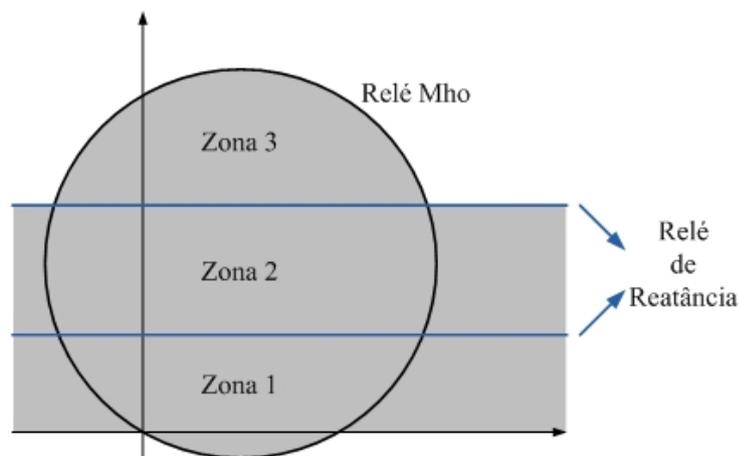


Fonte: Autora.

Esse tipo de relé opera com sensibilidade à reatância do sistema, atuando para uma impedância cuja reatância é menor do que a de ajuste, sendo que, do contrário, não atua.

Uma vantagem do relé de reatância é que este apresenta maior imunidade aos efeitos oriundos do arco elétrico, os quais podem provocar a não atuação dos relés de distância. Entretanto, esse tipo de relé pode operar indevidamente para oscilações de carga, e, por isso, é amplamente utilizado em conjunto com relés de admitância, de modo a amenizar os efeitos, tanto do arco elétrico, quanto das oscilações de carga. A Figura 8 mostra uma situação em que um relé de reatância, com duas zonas, é supervisionado por um relé de admitância.

Figura 8 – Relé de reatância associado a um relé de admitância

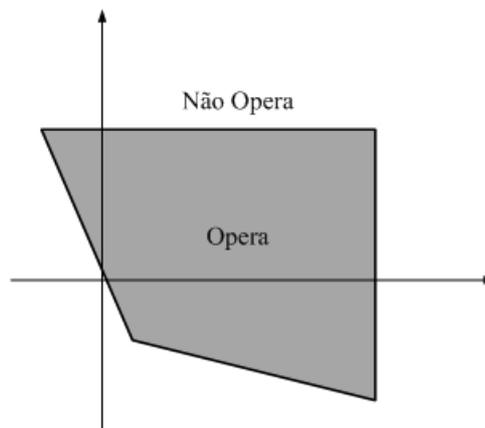


Fonte: Autora.

2.2.4.4 RELÉ QUADRILATERAL

Nesse caso, a região de operação é definida por quatro linhas retas. Um exemplo disto é mostrada na Figura 9. Relés deste tipo necessitam pelo menos de quatro comparadores, sendo um para cada lado do quadrilátero, podendo ser ajustados limites de reatância e resistência, além de características direcionais que delimitam o quadrilátero. Essa característica só pode ser obtida em relés digitais.

Figura 9 – Região de operação da característica quadrilateral.



Fonte: Autora.

2.3 Localizadores de Falta (LFs)

A necessidade de restabelecimento rápido do sistema após a atuação da proteção e o conseqüente desligamento do trecho em falta, torna essencial a utilização de técnicas para a localização do exato ponto de ocorrência do curto-circuito. Isso se faz necessário uma vez que, no caso de faltas permanentes, pode-se deslocar a equipe de manutenção diretamente ao ponto com defeito, reduzindo o tempo de restabelecimento do fornecimento de energia, obviamente, resguardando o tempo necessário para a devida manutenção.

Neste contexto, uma vez que as linhas de transmissão apresentam impedâncias características relativamente constantes por km, a estimação do local da falta é feita através do cálculo da impedância entre o ponto de instalação do equipamento dotado de um LF até o ponto em curto-circuito. Tais lógicas computacionais operam processando sinais de tensão e corrente provenientes de um ou mais terminais. As Subseções seguintes sintetizam os principais fundamentos dos diferentes tipos de localizadores de falta para sistemas de transmissão de energia elétrica.

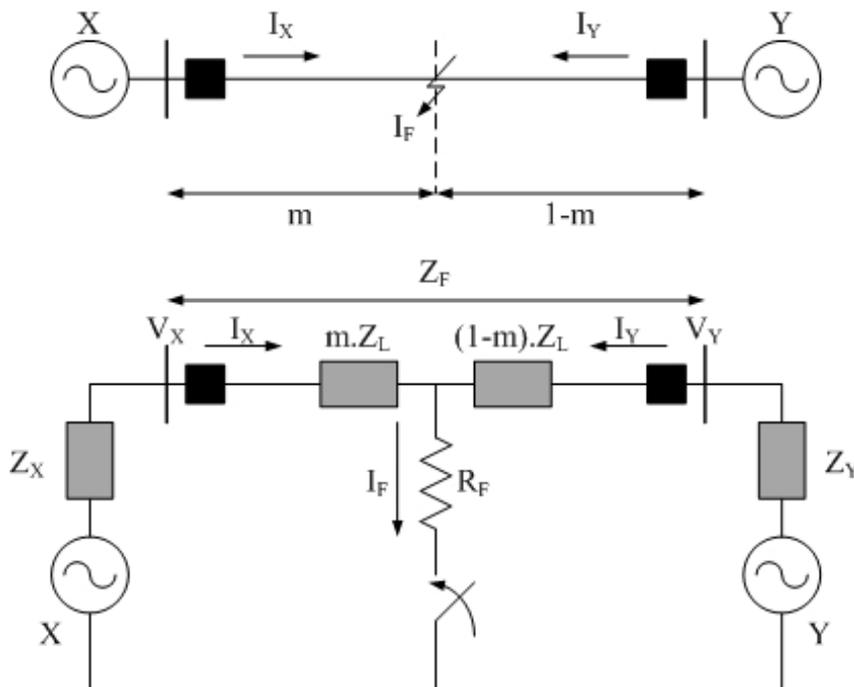
2.3.1 Localizadores de Falta com Base em Dados de Um Terminal

Segundo o IEEE (2014), LFs fundamentados na aquisição de dados do terminal local calculam a impedância aparente vista a partir do ponto de sua instalação até o ponto

em falta, visto que a impedância da linha é constante por km. Assim sendo, a medida da impedância até o ponto em falta resulta no local onde ocorre o curto-circuito.

Para a localização de todos os tipos de curtos-circuitos, as tensões e correntes fase-terra devem ser medidas em todas as fases. Ressalta-se que, caso só se tenha acesso às tensões entre fases, somente as faltas entre fases poderão ser localizadas. Se a resistência de falta for considerada igual a zero, a impedância aparente até o ponto da falta pode ser calculada para cada tipo de falta pela respectiva equações apresentada na Tabela 1. Por outro lado, se a resistência de falta for considerada a equação matemática correta para o cálculo da impedância aparente até o ponto em falta é expressa em (2.8), a qual pode ser deduzida a partir da Figura 10, conforme (IEEE, 2014).

Figura 10 – Diagrama unifilar e circuito equivalente de uma linha de transmissão em falta trifásica



Fonte: Autora.

$$Z_{vistaX} = m \times Z_L + R_F \times \frac{I_F}{I_X} \quad (2.8)$$

Na Equação 2.8, Z_{vistaX} representa a impedância aparente até o ponto de falta vista em no terminal X, Z_L é a impedância total da linha, R_F a impedância de falta, I_F a corrente de falta e I_X é a contribuição da fonte X para o curto-circuito. O fator m que multiplica Z_L indica a proporção da impedância total da linha até o ponto de falta.

Vale ressaltar que ao considerar o efeito da carga, a impedância vista no terminal X será dada por (2.9), uma vez que o fator de distribuição de corrente (d_S) e o fator de carregamento do circuito (nS) devem ser considerados. Esses fatores são dados, respectivamente pelas Equações 2.10 e 2.11.

$$Z_{vistaX} = m \times Z_L + R_F \times \frac{1}{d_s \times n_s} \quad (2.9)$$

$$d_s = \frac{Z_Y + (1 - m) \times Z_L}{Z_X + Z_L + Z_Y} = |d_s| \angle \beta \quad (2.10)$$

$$n_s = \frac{I_X}{I_X - I_L} = |n_s| \angle \gamma \quad (2.11)$$

Em (2.10) e (2.11), Z_X e Z_Y representam, respectivamente, as impedâncias das fontes X e Y. Além disso, I_L representa a corrente de carga pré-falta. destaca-se que o fator de distribuição de corrente é determinado pelas impedância do sistema e que, se o sistema for homogêneo, isto é, se todas as impedâncias envolvidas no sistema tiverem o mesmo ângulo, o valor de β será zero também, deve-se observar que, se houver fluxo de carga, γ será diferente de zero. Porém, se I_X for muito maior do que I_L , γ será aproximadamente igual a zero.

Observando as Equações 2.10 e 2.11, percebe-se que a estimação do local de falta através das equações da impedância aparente para cada loop de falta, apresentadas na Tabela 1, apresentaram grandes erros quando não forem considerados os fatores de distribuição de corrente e de carregamento do circuito, uma vez que estes em conjunto com a resistência de falta determinam a componente reativa da impedância vista no terminal X. Tendo em vista o fato de que a segunda parcela da Equação 2.9 é dada pela divisão entre R_F e o produto entre d_s e n_s , pode-se afirmar que a soma dos ângulos β e γ determina o erro da parcela reativa causado pela própria resistência de falta. A esse fenômeno atribui-se o nome de Efeito da Reatância.

Nesse contexto, além do efeito da reatância, outros fatores não representados nas Equações da Tabela 1 podem afetar a precisão dos localizadores de falta (IEEE, 2014). Dentre esses fatores, entre outros, destacam-se:

- A incorreta classificação do tipo de falta;
- Influência dos efeitos das indutâncias mútuas de sequência zero;
- A incerteza a cerca dos parâmetros de linha, principalmente de sequência zero;
- A imprecisão do modelo de linha considerado;
- A presença de reatores ou capacitores shunt;
- O desbalanço do fluxo de cargas;
- Linhas multi-terminais ou com compensação série;
- Erros de medição;
- A precisão dos filtros de extração fasorial aplicados aos sinais de corrente e tensão; e

- O clock da amostragem do dispositivo.

Dessa forma, para aprimorar a estimação do local da falta, os LFs devem considerar esses fatores, de modo a eliminar os erros causados por considerações inadequadas e pela imprecisão dos dados aplicados nos respectivos algoritmos.

2.3.2 Localizadores de Falta com Base em Dados de Dois Terminais

A expansão da tecnologia de comunicação permitiu a utilização de métodos que calculam a localização de faltas por impedância, utilizando dados provenientes de duas extremidades da Linha de Transmissão. A utilização dos dados de dois terminais melhora o desempenho das técnicas, porém, os métodos ficam suscetíveis a erros quando os dados são medidos de forma dessincronizada. Além disso, diferentemente dos métodos de um terminal, os de dois terminais necessitam de um armazenamento, bem como a análise dos dados medidos em algum lugar, que pode ser uma das extremidades da linha.

As componentes de sequências positiva, negativa ou zero, são utilizados para simplificar os cálculos e mitigar possíveis erros. Sendo assim, componentes de sequência positiva que estão presentes em todos os tipos de faltas simplificam o processo de classificação de falta. Já as componentes de sequência negativa amenizam os efeitos ocasionados pelo acoplamento mútuo, sendo estas componentes presentes na maioria das faltas, tendo como exceção as faltas trifásicas balanceadas. Também, as componentes de sequência zero são úteis, mesmo sendo presentes apenas nas faltas desbalanceadas. O diagrama unifilar exposto na Figura 10, também pode ser utilizado para a análise dos métodos de dois terminais. Onde na figura a falta está na posição m (por unidade) da linha do barramento X e $(1 - m)$ do barramento Y. A tensão na falta é denotada como V_F e as tensões dos respectivos barramentos, bem como as correntes correspondentes às contribuições de cada terminal, estão indicadas nessa Figura. O uso das relações tensão/corrente nas três fases a, b e c fornece os resultados encontrados nas Equações 2.12 e 2.13, sendo que a subtração destas equações resulta em (2.14).

$$(V_{XF})_{abc} = mZ_{Labc}(I_{XF})_{abc} + V_F \quad (2.12)$$

$$(V_{YF})_{abc} = (1 - m)Z_{Labc}(I_{YF})_{abc} + V_F \quad (2.13)$$

$$(V_{XF})_{abc} - (V_{YF})_{abc} = mZ_{Labc}(I_{XF})_{abc} + (1 - m)Z_{Labc}(I_{YF})_{abc} \quad (2.14)$$

2.3.3 Outros Localizadores de Falta

2.3.3.1 PATRULHA DE LINHA

A Patrulha de Linha é a técnica mais antiga e precisa para localização de faltas. Porém, esta demanda muito tempo e necessita de uma equipe de manutenção, a qual

precisa estar sempre a disposição. Além disso, esta alternativa só é válida para linhas curtas e de fácil acesso.

Mesmo sendo uma alternativa válida, o seu uso em conjunto com o uso de técnicas computacionais de localização de falta facilita significativamente o deslocamento da equipe para o local faltoso de forma precisa. Cabe ressaltar que, mesmo conhecendo o local da falta, a equipe de manutenção é importante para o reestabelecimento do fornecimento de energia elétrica.

Por fim, cabe ressaltar que o patrulhamento de linha também evoluiu com o tempo, pois o mesmo hoje é feito de diferentes maneiras, tais como: deslocamento a pé, automóvel, helicóptero e, mais recentemente, foram adotados os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

2.3.3.2 ONDAS VIAJANTES

O método de ondas viajantes determina a distância do local de falta a partir de um ponto de medição especificado em um sistema. Quando ocorre uma falta no sistema, surgem ondas de alta frequência (impulsos), também chamadas de ondas viajantes IEEE (2014). Essas ondas se propagam para longe do local faltoso, em ambas as direções, com destino aos terminais da Linha de Transmissão e velocidade próxima à velocidade da luz. Analisando assim, a chegada do impulso e sua reflexão ou o ponto de chegada e dois impulsos (frentes de onda) nos terminais da linha, pode-se obter os dados de comprimento e velocidade de propagação na Linha de Transmissão. Esse procedimento de detecção das ondas refletidas no ponto de falta, é considerado de difícil realização.

Existem cinco tipos de Localizadores de falta baseados em ondas viajantes, sendo que esses são comumente nomeados como de Tipo A, B, C, D e E, respectivamente.

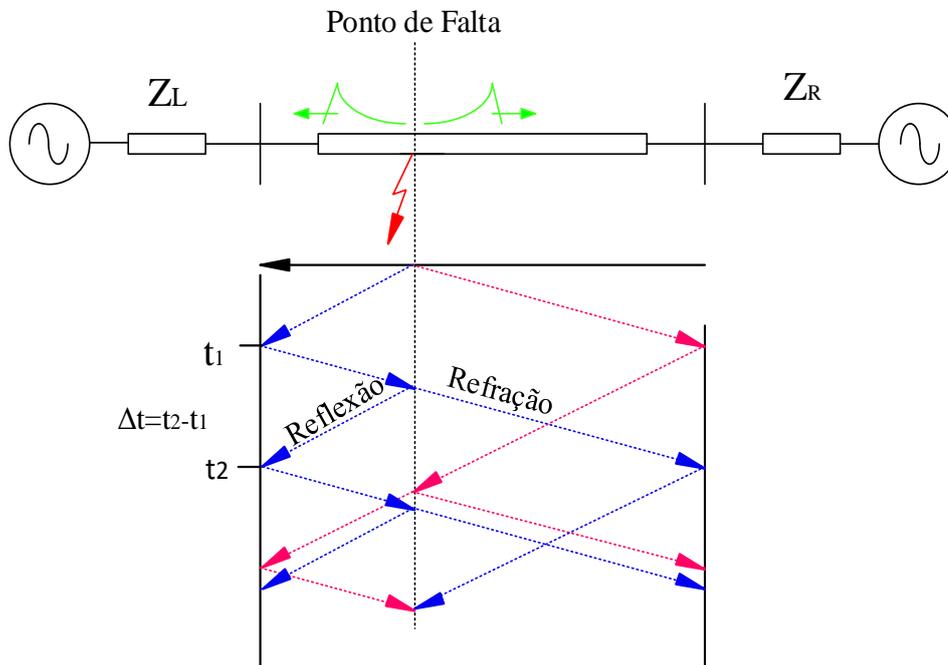
O localizador de falta de onda viajante tipo A é o método de localização que mede a diferença de tempo entre a chegada da frente da primeira onda e a reflexão, sendo que a localização de falta é proporcional à metade desta diferença de tempo. Dessa forma, tendo-se conhecimento da velocidade de propagação da onda viajante na linha de transmissão, o local de falta pode ser calculado com a Equação 2.15 (IEEE, 2014).

$$m = V_{onda} \times \frac{\Delta t}{2} \quad (2.15)$$

Onde em (2.15), V_{onda} é a velocidade de propagação da onda e Δt é a diferença de tempo entre a chegada da primeira onda viajante e sua reflexão. Além disso, a Figura 11 demonstra o diagrama que apresenta o princípio de operação do método.

Cabe ressaltar, que este método não depende das informações do terminal remoto, entretanto, o que dificulta sua utilização é a dificuldade de seleção entre as ondas que saem da falta e as que saem do terminal. Já o LF baseado em ondas viajantes do tipo B método também mede a diferença de tempo de chegada das ondas nos terminais da LT. Porém, este difere do tipo A por utilizar os dois terminais e possuir um temporizador, o

Figura 11 – Diagrama mostrando as reflexões e refrações causadas pelas ondas em movimento em quanto a falta esta presente no sistema.



Fonte: Autora.

qual é iniciado quando a onda viajante chega ao terminal local e finalizado quando um sinal de parada é recebido pelo terminal remoto. Cabe ressaltar que este sinal de parada é enviado quando a onda de deslocamento chega ao terminal remoto. Além disso, o tempo de atraso para enviar o sinal de parada entre o terminal local e o remoto é conhecido, logo pode ser subtraído do tempo total (IEEE, 2014)

Ainda, o método do tipo C possui apenas um terminal, sendo que este injeta um impulso na linha quando uma falta é detectada e a distância da falta é calculada de forma similar ao método tipo A (IEEE, 2014).

Ressalta-se também que métodos do tipo D requerem marcação de tempo com alta precisão (inferior a $1 \mu s$) em todos os terminais da linha e telecomunicação entre os dispositivos de ondas viajantes, além de uma unidade central. Este método calcula o a distância da falta de forma similar ao tipo B.

Por fim, técnicas do tipo E são aplicadas a um terminal, utilizando os transitórios criados em um treminal da linha quando a LT é reenergizada ao fechar o disjuntor. Este tipo tanto pode ser usado para localizar faltas permanentes, quanto para medir comprimento de LT saudáveis.

2.4 Considerações Finais

O presente Capítulo apresenta os principais fundamentos associados à implementação e características dos localizadores de falta, bem como descreve os principais conceitos

a cerca dos relés de distância. Além disso, apresenta um breve embasamento sobre os tipos de localizadores de Falta utilizados e propostos em literatura.

Ambos os temas são essenciais à metodologia aplicada na realização deste trabalho, uma vez que se assume a atuação do relé de distância tipo Mho como ponto de partida para o cálculo do local da falta. O Capítulo seguinte apresenta as técnicas analisadas neste estudo, bem como a metodologia de comparação adotada. Por fim, destaca-se que, neste trabalho, apenas metodologias para localização de faltas com base em dados de um e dois terminais foram analisadas.

3 LOCALIZADORES DE FALTA ANALISADOS E METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO

3.1 Considerações Gerais

O presente Capítulo apresenta os métodos de localização de falta analisados, os quais foram propostos na literatura especializada, bem como a metodologia adotada para a comparação de seus desempenhos, a qual é fundamentada no cálculo de erro da estimação.

É importante ressaltar que, nesse trabalho, foi considerado que a falta é corretamente classificada de modo a beneficiar a atuação dos métodos, visto que, alguns deles, apresentam equações diferentes para faltas fase-terra e fase-fase. Também, cabe destacar que os LFs calculam a razão entre a impedância medida até o ponto da falta e a impedância de toda a linha de transmissão. Uma vez que as linhas apresentam impedância constante por km, torna-se possível calcular a distância até o ponto faltoso, multiplicando o valor da referida razão, a qual representa a porcentagem do comprimento total da linha até o ponto de falta, pela impedância característica da respectiva linha.

Por fim, ressalta-se que foram analisados métodos fundamentados no processamento de sinais adquiridos em um e em dois terminais das linhas de transmissão.

3.2 Técnicas Analisadas

O presente trabalho propõe a análise dos desempenhos de LFs que atuam com base em dados de um e dois terminais da linha de transmissão. Esses métodos são comparados de modo a determinar quais apresentam a maior precisão frente a diferentes tipos de curto-circuito, bem como sua atuação para diferentes taxas de amostragem e diferentes tempos de abertura dos disjuntores. Os métodos analisados com base em dados de um terminal, além da impedância vista pelo relé (IVR) dada conforme as Equações da Tabela 1, são:

- Método da Reatância Simples (MRS), proposto por Sant e Paithankar (1979);
- A técnica de Localização de Falta Independente da Impedância da Fonte (LFIIF), proposto em Takagi et al. (1982);
- O Método de Takagi Modificado (MTM), proposto por Schweitzer (1983);
- O Método de Bretas e Salim de 2006 (MBS), proposto em Bretas e Salim (2006); e
- O Método de Novosel (MN), proposto em Novosel et al. (1998).

Além destes, os métodos de localização de faltas que utilizam dados de dois terminais analisados neste Trabalho são:

- O Método de Dois Terminais Sincronizados (M2TS), exposto em IEEE (2014);

- O Método de fasores dessincronizados (M2TT), proposto por Tziouvaras, Roberts e Benmouyal (2001);
- O Método de localização de falta independente dos parâmetros de linha (M2TR), proposto por Radojević et al. (2009);
- Método de Dois Terminais (M2TV), proposto por Vieira, Oliveira e Lisboa (2013);
- Método de Dois Terminais Fasores Sincronizados de Das et al. (2014) (M2TD); e
- Método de Bretas Adaptado para Dois Terminais (MBA2T) aqui proposto.

As Subseções seguintes descrevem as características e formulações de cada uma destas técnicas.

3.2.1 Método da Reatância Simples (MRS)

Proposto por Sant e Paithankar (1979), o método da reatância simples calcula a parte imaginária da impedância vista até o ponto da falta e determina a razão entre a reatância calculada e reatância total da linha. Essa razão é proporcional ao local da falta.

É importante ressaltar que essa técnica considera que a corrente através da resistência de falta está em fase com a corrente medida no terminal de instalação do LF. Também, é assumido que não há corrente de carga antes da falta.

Uma vantagem desse método é o fato de medir apenas a reatância até o ponto de falta, compensando o efeito da resistência de falta explicado na Seção 2.3.1. Para as faltas entre fases (bifásica, bifásica-terra e trifásica), a Equação 3.1 fornece a porcentagem da linha em que ocorre a falta.

$$m = \frac{Im\left(\frac{V_A - V_B}{I_A - I_B}\right)}{Im(Z_{1L})} \times 100\% \quad (3.1)$$

Em (3.1), V_A , V_B , I_A e I_B representam as tensões e correntes medidas no terminal local (X) para as fases A e B, respectivamente. Z_{1L} representa a impedância de toda a linha. Para faltas fase-terra, o MRS estima o local da falta através da Equação 3.2.

$$m = \frac{Im\left(\frac{V_A}{I_A + k_0 \times I_R}\right)}{Im(Z_{1L})} \times 100\% \quad (3.2)$$

Em 3.2, k_0 é o fator de compensação do sinal de corrente em função da corrente residual I_R , sendo que k_0 é dado pela Equação 3.3 e I_R , por (3.4).

$$k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3 \times Z_{1L}} \quad (3.3)$$

$$I_R = 3 \times I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (3.4)$$

O erro dessa metodologia será zero se a resistência de falta for zero ou se a corrente medida no terminal estiver em fase com a corrente de falta. Na presença de resistência de falta, o método apresentará elevados erros em função do efeito da reatância discutido na Subseção 2.3.2, o qual aumenta ou reduz a reatância aparente até o ponto da falta (IEEE, 2014).

3.2.2 Localização de Falta Independente da Impedância da Fonte (LFIIF)

Proposta por Takagi et al. (1982), essa técnica elimina a corrente de carga, valendo-se da variação de corrente (ΔI_X) no terminal de medição no momento da falta, dada pela subtração entre a corrente de fase pós-falta (I_X) e a corrente de carga pré-falta na respectiva fase (I_L), conforme a Equação 3.5.

$$\Delta I_X = I_X - I_L \quad (3.5)$$

Considerando o circuito da Figura 10 e utilizando o fator de distribuição de corrente (d_S) para representar a queda de tensão sobre a resistência de falta, pode-se escrever a equação da tensão no terminal X como (3.6).

$$V_X = m \times Z_{1L} \times I_X + R_F \times \frac{\Delta I_X}{d_s} \quad (3.6)$$

Multiplicando ambos os lados de (3.6) pelo conjugado complexo de ΔI_X , considerando somente a parte imaginária, chega-se a Equação 3.7.

$$\text{Im}(V_X \times \Delta I_X^*) = m \times \text{Im}(Z_{1L} \times I_X \times \Delta I_X^*) + R_F \times \text{Im}\left(\frac{1}{d_s}\right) \quad (3.7)$$

Se o sistema for considerado homogêneo, o ângulo de d_S será aproximadamente igual zero. Assim, pode-se considerar que $\text{Im}(1/d_S)$ será igual a zero. Dessa forma, isolando-se m na Equação 3.7, chega-se a 3.8, que representa a estimativa do local da falta, em porcentagem segundo o método proposto por (TAKAGI et al., 1982).

$$m = \frac{\text{Im}(V_X \times \Delta I_X^*)}{\text{Im}(Z_{1L} \times I_X \times \Delta I_X^*)} \times 100\% \quad (3.8)$$

Ressalta-se que essa metodologia é também conhecida por Método de Takagi, a qual serviu de base para a formulação de muitas outras técnicas para localização de faltas.

3.2.3 Método de Takagi Modificado (MTM)

Esse método é uma modificação do LFIIF. Proposto por Schweitzer (1983), considera a corrente residual (I_R) ao invés da variação de corrente no momento da falta (ΔI_X) em sua formulação. Além disso, considera um ângulo de correção β , assumido igual

ao ângulo da impedância da fonte. Como consequência dessas considerações, o erro em função do efeito da reatância é reduzido. Entretanto, ao considerar β igual ao ângulo de impedância da fonte, a estimação do local da falta para curtos-circuitos monofásicos pode ser imprecisa, visto que o valor ideal de β a ser ajustado varia para cada ponto da linha.

A Equação 3.9 representa o local da falta estimado segundo esse método.

$$m = \frac{\text{Im}(V_X \times I_R^* \times e^{-j\beta})}{\text{Im}(Z_{1L} \times I_X \times I_R^* \times e^{-j\beta})} \times 100\% \quad (3.9)$$

3.2.4 Método de Bretas e Salim (MBS)

O Método proposto por Bretas e Salim (2006) utiliza dados de um terminal e calcula o a impedância aparente de sequência positiva até o local da falta. Este método, foi proposto com intuito de amenizar os efeitos da Geração Distribuída (GD), já que a cogeração e a autoprodução modificam os sistemas que possuem apenas um fluxo, criando assim novas fontes de energia no sistema. Esta técnica estima o ponto de falta segundo a Equação 3.10.

$$m = \frac{\text{Im}(V_X \times I_X^*)}{\text{Im}\{[Z_{0L} \times I_0 + Z_{1L} \times (I_1 + I_2)] \times I_X^*\}} \times 100\% \quad (3.10)$$

Em 3.10, I_0 , I_1 e I_2 , representam as correntes de sequência zero, positiva e negativa, tomadas a partir do terminal X. Além disso, Z_{0L} representa a impedância de sequência zero da linha.

3.2.5 Método de Novosel (MN)

O método proposto por Novosel et al. (1998) calcula a distância até o ponto de falta com base no fator de distribuição (d_S), dado pela Equação 1, e na tensão pós-falta (V_{SF}) aplicada pela fonte no trecho de linha anterior ao ponto faltoso, conforme 3.12.

$$d_S = \frac{\Delta I_S}{I_F} = \frac{Z_{load} + (1 - m) \cdot Z_{1L}}{Z_S + Z_{load} + Z_{1L}} \quad (3.11)$$

$$V_{SF} = m \cdot Z_{1L} \cdot I_{SF} + R_F \cdot \frac{\Delta I_S}{d_S} \quad (3.12)$$

Em 3.11, ΔI_S representa a variação de corrente da fonte em relação aos períodos pré e pós-falta, dado por (3.13), e Z_S , Z_{load} e Z_{1L} representam as impedâncias da fonte, da carga e da linha, respectivamente. Já, na Equação 3.12, I_{SF} representa a contribuição da fonte no terminal de referência para a falta e R_F , a resistência de falta.

$$\Delta I_S = I_{SF} - I_{SPF} \quad (3.13)$$

Na Equação 3.13, I_{SPF} representa a corrente de pré-falta da fonte conectada a ao terminal de referência. Sendo assim, combinando as Equações 3.11 e 3.12, pode-se estimar

o local da falta, a partir de uma equação quadrática em função de m , a qual é obtida separando tal equação em parte real e imaginária, bem como eliminando a resistência de falta. Assim, a localização da falta será dada em p.u. Substituindo (3.11) em (3.12) e rearranjando os termos, chega-se a (3.14).

$$m^2 + m.k_1 + k_2 - k_3.R_F = 0 \quad (3.14)$$

Em (3.14), k_1 , k_2 e k_3 são dados, respectivamente, pelas Equações 3.15, 3.16 e 3.17.

$$k_1 = \frac{V_{SF}}{I_{SF}.Z_{1L}} + \frac{Z_{load}}{Z_{1L}} + 1 \quad (3.15)$$

$$k_2 = \frac{V_{SF}}{I_{SF}.Z_{1L}} \cdot \left(\frac{Z_{load}}{Z_{1L}} + 1 \right) \quad (3.16)$$

$$k_3 = \frac{1}{Z_{1L}} \cdot \left(\frac{Z_S + Z_{load}}{Z_{1L}} + 1 \right) \quad (3.17)$$

As impedâncias da fonte (Z_S) e da carga (Z_{load}) são calculadas conforme as Equações 3.18 e 3.19, respectivamente.

$$Z_S = -\frac{\Delta V_S}{\Delta I_S} \quad (3.18)$$

$$Z_{load} = \frac{V_{SPF}}{I_{SPF}} - Z_{1L} \quad (3.19)$$

Em (3.18), ΔV_S representa a variação de tensão entre os períodos pré e pós-falta, dada conforme a Equação 3.20.

$$\Delta V_S = V_{SF} - V_{SPF} \quad (3.20)$$

A Equação 3.14 apresenta duas variáveis desconhecidas, sendo estas m e R_F . Essa Equação pode ser separada em parte real e imaginária. Eliminando R_F em (3.14) (NOVOSEL et al., 1998), m será dada por (3.21), a qual retorna duas raízes. Conforme Novosel et al. (1998), a solução apropriada para a distância até a falta é dada pela raiz obtida segundo a Equação 3.22, já em porcentagem em relação ao comprimento total da linha.

$$m = \frac{-b_N \pm \sqrt{b_N^2 - 4.a_N.c_N}}{2.a_N} \quad (3.21)$$

$$m = \frac{-b_N - \sqrt{b_N^2 - 4.a_N.c_N}}{2.a_N} \cdot 100\% \quad (3.22)$$

Nas Equações 3.21 e 3.22 , os valores de a_N , b_N e c_N podem ser obtidos, respectivamente, segundo (3.23), (3.24) e (3.25).

$$a_N = 1 \quad (3.23)$$

$$b_N = - \left[\text{Re}(k_1) - \frac{\text{Im}(k_1) \cdot \text{Re}(k_3)}{\text{Im}(k_3)} \right] \quad (3.24)$$

$$c_N = -\text{Re}(k_2) - \frac{\text{Im}(k_2) \cdot \text{Re}(k_3)}{\text{Im}(k_3)} \quad (3.25)$$

Uma vez obtido um valor adequado para m , a resistência de falta R_F pode ser determinada segundo a Equação 16, a qual resulta da parte imaginária de (3.14).

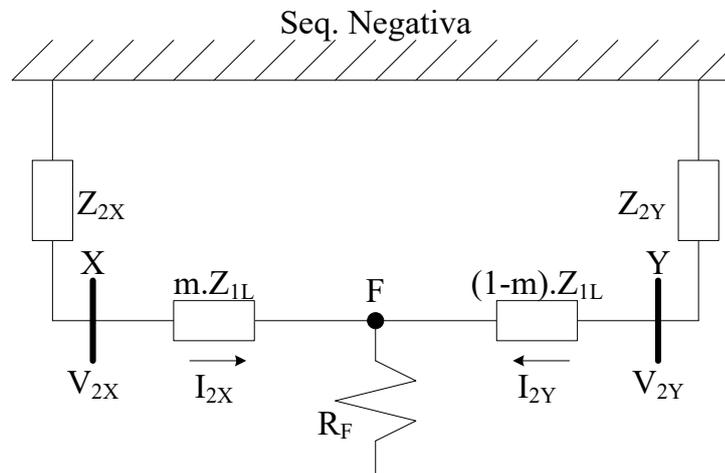
$$R_F = m \cdot \frac{\text{Im}(k_1)}{\text{Im}(k_2)} + \frac{\text{Im}(k_2)}{\text{Im}(k_3)} \quad (3.26)$$

Cabe ressaltar que a metodologia proposta por Novosel et al. (1998) apresenta erros elevados para faltas monofásicas e erros baixos para faltas entre fases. Além disso, destaca-se que, nesse trabalho, a etapa de determinação da resistência de falta não realizada, uma vez que as faltas foram simuladas sem este parâmetro.

3.2.6 Método de Localização de Faltas com Base em Dados de 2 Terminais para Fasores Sincronizados (M2TS)

Considerando que a localização de falta seja realizada a partir do circuito de sequência negativa mostrado na Figura 12, onde Z_{1L} representa a impedância de sequência positiva da linha, a qual é igual à respectiva impedância de sequência negativa, e R_F representa a resistência de falta, tem-se a relação dada pela Equação 3.27, levando-se em conta a tensão no ponto em falta tomada a partir de cada terminal.

Figura 12 – Circuito de sequência negativa para falta em linha com dois terminais



Fonte: Autora.

$$V_{2X} - m \cdot Z_{1L} \cdot I_{2X} = V_{2Y} - (1 - m) \cdot Z_{1L} \cdot I_{2Y} \quad (3.27)$$

Na Equação 3.27, V_{2X} e I_{2X} representam, respectivamente, os fasores de tensão e de corrente de sequência negativa medidos no terminal X. Analogamente, V_{2Y} e I_{2Y} representam os fasores de tensão e corrente de sequência negativa medidos no terminal Y, respectivamente. Além disso, m representa a porcentagem do comprimento total da linha tomada a partir do terminal X.

Fazendo o devido tratamento matemático em (3.27), ao se isolar m , obtém-se a Equação 3.28, a qual permite o cálculo da distância até o ponto faltoso. Por fim, ressalta-se que o cálculo da distância até a falta a partir de (3.28) assume que os fasores sejam amostrados de forma sincronizada em ambos os terminais da linha.

$$m = \frac{V_{2X} - V_{2Y} + Z_{1L} \times I_{2Y}}{Z_{1L} \times (I_{2X} + I_{2Y})} \times 100\% \quad (3.28)$$

3.2.7 Método de Tziouvaras (M2TT)

O método proposto por Tziouvaras, Roberts e Benmouyal (2001) é imune aos erros causados problemas de sincronismo na amostragem dos sinais nos dois terminais da linha, não necessitando de métodos iterativos para obtenção do ângulo de defasagem entre os sinais de ambos os terminais. Assim, este método independe de sistemas de sincronização, os quais são caros e complexos.

Tendo como base o circuito da Figura 13, pode-se deduzir a metodologia de Tziouvaras, Roberts e Benmouyal (2001). Nessa Figura, está representada a ligação dos circuitos de sequência para uma falta fase-terra. Assim, neste método, toma-se a tensão de sequência negativa no ponto da falta (V_{2F}), vista dos terminais X e Y, a qual é dada, respectivamente, por (3.29) e (3.30).

$$V_{2FX} = -I_{2X} \cdot (Z_{2X} + m \cdot Z_{2L}) \quad (3.29)$$

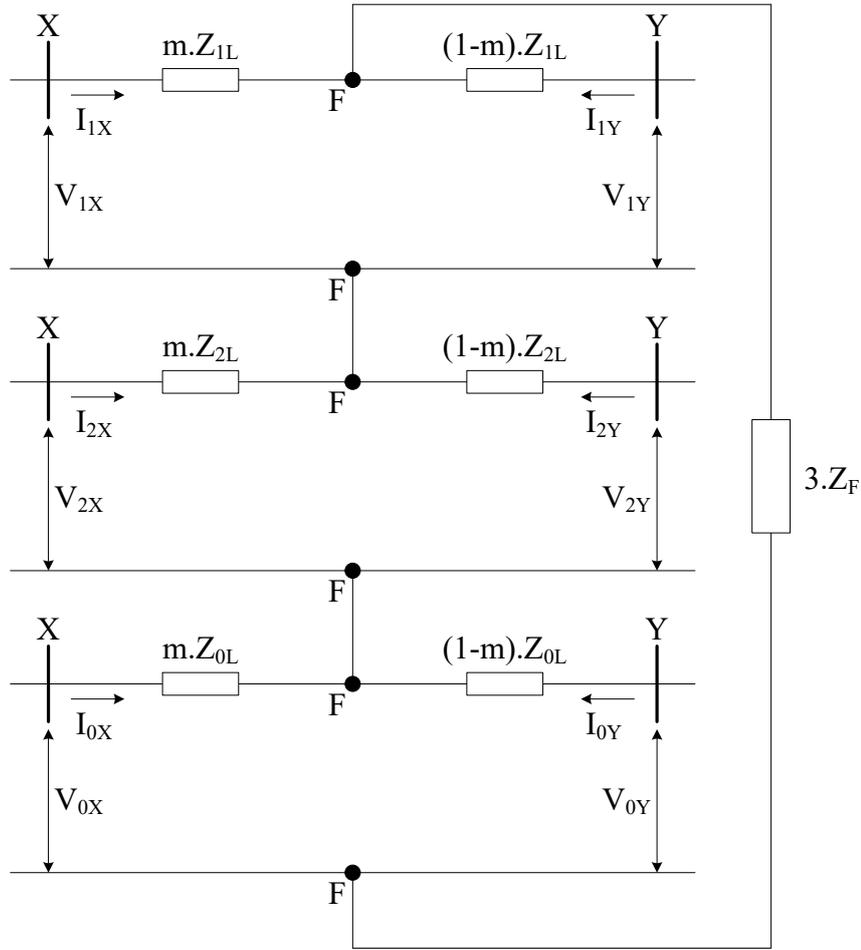
$$V_{2FY} = -I_{2Y} \cdot [Z_{2Y} + (1 - m) \cdot Z_{2L}] \quad (3.30)$$

Igualando as expressões (3.29) e (3.30) e tomando o módulo em ambos os lados da equação, chega-se a (3.31), a partir da qual se obtém uma equação de segundo grau, dada por (3.32), sendo que sua raiz entre zero e um representa a distância em por unidade até o ponto faltoso, em relação ao comprimento total da linha.

$$|I_{2Y}| = \left| \frac{I_{2X} \cdot (Z_{2X} + m \cdot Z_{2L})}{Z_{2Y} + (1 - m) \cdot Z_{2L}} \right| \quad (3.31)$$

$$a \cdot m^2 + b \cdot m + c = 0 \quad (3.32)$$

Figura 13 – Circuito pós-falta para curto fase-terra



fonte: Autora.

Em (3.32), a, b e c são dadas respectivamente por (3.33), (3.34) e (3.35).

$$a = d.(c_1 + c_2) - (c_3 + c_4) \quad (3.33)$$

$$b = d.(b_1 - 2.c_1 + b_2 - 2.c_2) + b_3 + b_4 \quad (3.34)$$

$$c = d.(a_1 - b_1 + c_1 + a_2 - b_2 + c_2) - a_3 + a_4 \quad (3.35)$$

Nas Equações acima, os coeficientes a_i , b_i , c_i e d são dados pelas Equações 3.36 a 3.48, sendo que Z_{2L} é igual a Z_{1L} .

$$a_1 = \left[\operatorname{Re} \left(\frac{V_{2Y}}{I_{2Y}} \right) \right]^2 \quad (3.36)$$

$$a_2 = \left[\operatorname{Im} \left(\frac{V_{2Y}}{I_{2Y}} \right) \right]^2 \quad (3.37)$$

$$a_3 = [\operatorname{Re}(V_{2X})]^2 \quad (3.38)$$

$$a_4 = [Im(V_{2X})]^2 \quad (3.39)$$

$$b_1 = 2.Re\left(\frac{V_{2Y}}{I_{2Y}}\right).Re(Z_{1L}) \quad (3.40)$$

$$b_2 = 2.Im\left(\frac{V_{2Y}}{I_{2Y}}\right).Im(Z_{1L}) \quad (3.41)$$

$$b_3 = 2.Re(V_{2X}).Re(Z_{1L}) \quad (3.42)$$

$$b_4 = 2.Im(V_{2X}).Im(Z_{1L}) \quad (3.43)$$

$$c_1 = [Re(Z_{1L})]^2 \quad (3.44)$$

$$c_2 = [Im(Z_{1L})]^2 \quad (3.45)$$

$$c_3 = [Re(Z_{1L}.I_{2X})]^2 \quad (3.46)$$

$$c_4 = [Im(Z_{1L}.I_{2X})]^2 \quad (3.47)$$

$$d = |I_{2Y}|^2 \quad (3.48)$$

Uma vantagem deste método é que ele utiliza apenas grandezas de sequência negativa, não afetado pelo acoplamento mútuo de sequência zero (TZIOUVARAS; ROBERTS; BENMOUYAL, 2001). Por fim, esta técnica não utiliza grandezas pré-falta, além de poder ser aplicada em linhas com três terminais.

3.2.8 Método de Radojević (M2TR)

Proposta em Radojević et al. (2009), esta técnica não considera parâmetros de linha em sua formulação, utilizando apenas as componentes simétricas de tensão e corrente de ambos os terminais da linha, conforme o circuito equivalente da Figura 1. Nesse caso, considera-se que a linha possui comprimento l e que suas impedâncias de sequência positiva, negativa e zero são dadas, respectivamente, por Z_{1L} , Z_{2L} e Z_{0L} . Decompondo os fasores de corrente e tensão obtidos em cada um dos terminais da linha, é possível se obter as componentes de sequência. A partir dessas componentes, aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff nas malhas de sequência positiva e negativa do circuito da Figura 13, pode-se chegar a Equação 3.49, a qual permite determinar a distância até o ponto em falta

(RADOJEVIĆ et al., 2009), admitindo que Z_{2L} igual Z_{1L} e que a linha é totalmente transposta.

$$m = \frac{(V_{1X} - V_{1Y}) \cdot I_{2Y} - (V_{2X} - V_{2Y}) \cdot I_{1Y}}{(V_{1X} - V_{1Y}) \cdot (I_{2X} - I_{2Y}) - (V_{2X} - V_{2Y}) \cdot (I_{1X} - I_{1Y})} \quad (3.49)$$

O valor da distância até o ponto da falta é tomado em porcentagem do comprimento da linha, conforme a Equação 3.50. Por fim, é importante que ressaltar que o método proposto por (RADOJEVIĆ et al., 2009) apresenta precisão prejudicada pela falta de sincronismo entre as amostragens em ambos os terminais da linha.

$$m\% = \frac{m}{l} \cdot 100\% \quad (3.50)$$

3.2.9 Método de Das (M2TD)

Uma vez que o processo de amostragem entre os dois terminais da linha pode não ser sincronizado e que próprio canal de comunicação entre barras pode introduzir uma defasagem nos sinais de corrente e tensão medidos, Das et al. (2014) propôs uma técnica para localização de faltas que faz a compensação da defasagem através de um operador de sincronização $e^{j\delta}$, sendo que a tensão de pós-falta no ponto do curto-circuito é dada por (3.51) e (3.52), respectivamente para os terminais X e Y da linha de transmissão.

$$V_{Fi} = V_{Xi} \cdot e^{j\delta} - m \cdot Z_{Li} \cdot I_{xi} \cdot e^{j\delta} \quad (3.51)$$

$$V_{Fi} = V_{Yi} - (1 - m) \cdot Z_{Li} \cdot I_{Yi} \quad (3.52)$$

Em (3.51) e (3.52), o subscrito i representa a i -ésima componente simétrica. Já os subscritos X e Y se referem ao terminal de medição. Utilizando as Equações 3.51 e 3.52, pode-se determinar o operador de sincronização segundo (3.53).

$$e^{j\delta} = \frac{V_{Yi} - (1 - m) \cdot Z_{Li} \cdot I_{Yi}}{V_{Xi} - m \cdot Z_{Li} \cdot I_{Xi}} \quad (3.53)$$

Como o valor absoluto de $e^{j\delta}$ é igual a 1, este pode ser eliminado do cálculo do local de falta tomando-se o valor absoluto nos dois lados da Equação 3.53, conforme (3.54).

$$\left| e^{j\delta} \right| = 1 = \left| \frac{V_{Yi} - (1 - m) \cdot Z_{Li} \cdot I_{Yi}}{V_{Xi} - m \cdot Z_{Li} \cdot I_{Xi}} \right| \quad (3.54)$$

Simplificando e rearranjando os termos na Equação 4, a distância até a falta (m) é dada pela equação quadrática dada por (3.55). Ressalta-se que, neste método, as componentes de sequência negativa devem ser utilizadas para a determinação do local de faltas desequilibradas, enquanto que as componentes de sequência positiva devem ser utilizadas para a localização de faltas trifásicas.

$$m = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (3.55)$$

Em (3.56), os termos A, B e C, são dados, respectivamente, pelas Equações 3.56, 3.57 e 3.58. Resolvendo a Equação 5, obtém-se dois valores para m. Destes, o valor que representa a distância até a falta é aquele que apresenta valor entre 0 e 1 p.u.

$$A = |Z_{Li} \cdot I_{Xi}|^2 - |z_{Li} \cdot I_{Yi}|^2 \quad (3.56)$$

$$B = -2 \cdot \text{Re}[V_{Xi} \cdot (Z_{Li} \cdot I_{Xi})^* + (V_{Yi} - Z_{Li} \cdot I_{Yi}) \cdot (Z_{Li} \cdot I_{Yi})^*] \quad (3.57)$$

$$C = |V_{Xi}|^2 - |V_{Yi} - Z_{Li} \cdot I_{Yi}|^2 \quad (3.58)$$

3.2.10 Método de Vieira (M2TV)

O método apresentado em Vieira, Oliveira e Lisboa (2013) utiliza a mesma formulação feita em Radojević et al. (2009), porém, incluindo novos elementos para solucionar os problemas de sensibilidade em relação ao falta de sincronismo entre as amostragens em ambos os terminais. Assim, a localização da falta é dada em função de $y=e^{j\theta}$, onde θ representa o ângulo de defasagem entre os sinais amostrados em cada terminal da linha. Dessa forma, o local da falta é dado conforme (3.59).

$$m = l \cdot \frac{(V_{1X} - y \cdot V_{1Y}) \cdot y \cdot I_{2Y} - (V_{2X} - y \cdot V_{2Y}) \cdot y \cdot I_{1Y}}{(V_{1X} - y \cdot V_{1Y}) \cdot (I_{2X} + y \cdot I_{2Y}) - (V_{2X} - y \cdot V_{2Y}) \cdot (I_{1X} + y \cdot I_{1Y})} \quad (3.59)$$

Em (3.59), l representa o comprimento total da linha de transmissão. Além disso, para determinação do valor de θ , é montado um sistema de equações de quarta ordem em termos dessa defasagem, assumindo que o resultado da Equação 3.59 é um valor real. Isso corresponde a se extrair o conjugado complexo de m, conforme a Equação 3.60, o que resulta no referido sistema de equações (VIEIRA; OLIVEIRA; LISBOA, 2013). Esse sistema é resolvido de forma analítica para os dados de pré-falta, retornando quatro valores. O valor de θ é aquele que satisfaz o valor da impedância estimada no período de pré-falta. Dessa forma, o valor obtido para θ no período de pré-falta é utilizado para a localização do ponto faltoso no período pós-falta.

$$m - m^* = 0 \quad (3.60)$$

3.2.11 Método de Bretas Adaptado para Dois Terminais (MBA2T)

Este método é baseado no proposto por Bretas e Salim (2006), com a diferença que esse LF utiliza os dados de dois terminais, calculando separadamente o Local da Falta no terminal local e no terminal remoto, sendo o resultado do segundo referido ao terminal local. Cabe ressaltar que esta aplicação é possível em fontes com fasores sincronizados e que possuam comunicação de dados.

Dessa forma, a resposta do LF é a média aritmética das respostas do método de Bretas e Salim (2006), aplicada aos dois terminais. Sendo assim, este método é proposto para propiciar uma melhora significativa da estimação do local de falta. As Equações 3.61 e 3.62 demonstram o cálculo do local da falta no terminal X e Y, e a Equação 3.63 demonstra a média aritmética dos resultados calculados em (3.61) e (3.62).

$$m_x = \frac{Im(\dot{V}_{aX} \cdot \dot{I}_{a^*X})}{Im\{\{\bar{Z}_{0L} \cdot \dot{I}_{0X} + \bar{Z}_{1X} \cdot (\dot{I}_{1X} + \dot{I}_{2X})\} \cdot \dot{I}_{a^*X}\}} \cdot 100\% \quad (3.61)$$

$$m_Y = \frac{Im(\dot{V}_{aY} \cdot \dot{I}_{a^*Y})}{Im\{\{\bar{Z}_{0L} \cdot \dot{I}_{0Y} + \bar{Z}_{1Y} \cdot (\dot{I}_{1Y} + \dot{I}_{2Y})\} \cdot \dot{I}_{a^*Y}\}} \cdot 100\% \quad (3.62)$$

$$m = \frac{m_X + (100 - m_Y)}{2} \quad (3.63)$$

3.3 Metodologia de Comparação

A metodologia de comparação adotada neste trabalho é proposta em IEEE (2014) e inclui três tipos de erro:

- Erro absoluto;
- Erro relativo baseado no comprimento da linha; e
- Erro relativo tradicional.

Obviamente, a metodologia que apresenta os menores erros é considerada mais adequada para aplicação como LF. Uma vez que o erro absoluto diz respeito ao comprimento da linha, erros relativos são considerados mais adequados para a comparação de desempenhos entre diferentes LF_S , independentemente da grandeza da linha de transmissão. Isso ocorre porque, para uma linha longa, um erro absoluto pequeno pode representar uma grande distância. Por exemplo, um erro absoluto de 5% em uma linha de 10 km representa uma distância muito menor do que o mesmo erro representa para uma linha de 100 km. As subseções descrevem cada um dos tipos de erro citados.

3.3.1 Erro Absoluto (e_{abs})

É definido pela Equação 3.64. Para uma dada linha de transmissão, conhecendo-se a faixa de valores de erro do LF utilizado, pode ser útil ao encaminhamento de uma equipe de manutenção, caso seja necessário desloca-la até o local da falta para reparação da linha.

$$e_{abs} = |m_e - m_r| \quad (3.64)$$

Em 3.55, e_{abs} é o erro absoluto, m_e indica a posição estimada para a falta m_r representa a posição real da falta.

3.3.2 Erro Relativo Baseado no Comprimento da Linha (e_l)

É calculado a partir da Equação 3.65.

$$e_l = \frac{|m_e - m_r|}{l} \quad (3.65)$$

Onde, l representa o comprimento da linha em porcentagem.

3.3.3 Erro Relativo Tradicional (e_T)

É calculado conforme a Equação 3.66, sendo útil para análise estatística e menos prático para o encaminhamento de equipe de manutenção ao local da falta.

$$e_T = \frac{|m_e - m_r|}{m_r} \quad (3.66)$$

3.4 Considerações Finais

Neste Capítulo, os métodos para localização de falta analisados foram detalhadamente descritos, bem como os erros calculados, os quais formam a base para comparação dos desempenhos dos LFs em questão. Ressalta-se que os resultados apresentados no Capítulo seguinte foram obtidos com base no erro absoluto e no erro relativo tradicional, sendo descartado o erro relativo com base no comprimento da linha, que, em porcentagem, seria igual ao erro absoluto. Também, no Capítulo seguinte o sistema teste e as condições de simulação de faltas são descritas, assim como as condições de amostragem e tempo de abertura do disjuntor utilizadas neste estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

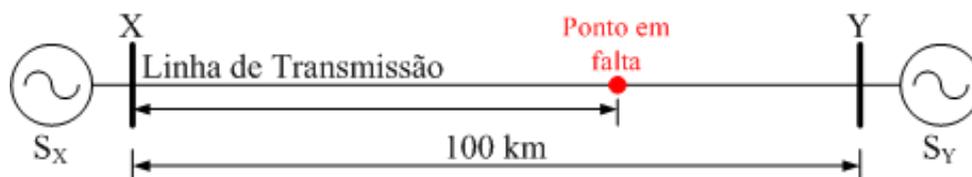
4.1 Considerações Gerais

Este Capítulo apresenta o sistema teste utilizado para gerar os sinais de tensão e corrente dos terminais X e Y. Também, apresenta as condições de falta utilizadas para gerar os sinais. Além disso, este capítulo apresenta o cronograma das atividades a serem realizadas até a defesa deste trabalho. Além disso, são apresentados os resultados das simulações para os métodos de um e dois terminais para diferentes condições de falta, amostragem e tempo de abertura do disjuntor. Por fim, são realizadas análise da variação do erro em função da distância da falta, da amostragem, do tipo de falta e do tempo de abertura do disjuntor.

4.2 Sistema Teste

A Figura 14 ilustra o sistema teste, implementado no software EMTP-ATP[®], utilizado para obtenção dos sinais de tensão e corrente utilizados neste estudo. Tal sistema representa uma linha de transmissão com fontes equivalentes nos dois terminais, cujas impedâncias de sequência zero e positiva são, respectivamente, $Z_{S0} = 3,681 + j24,515 \Omega$ e $Z_{S1} = 0,819 + j7,757 \Omega$. O valor eficaz de tensão é de 190 kV e o ângulo de S_X esta atrasado 30° em relação ao ângulo de S_Y . A linha de transmissão tem comprimento total de 100 km, com impedância de sequência zero igual a $0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$ e de sequência positiva igual a $0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$. Os sinais foram medidos nos terminais X e Y para diferentes tipos de curto-circuito e distâncias até o ponto da falta.

Figura 14 – Sistema Teste



Fonte: Autora.

Ressalta-se todos os LFs analisados foram implementados no software Matlab[®], sendo que todos os métodos apresentados calculam a distância até o ponto da falta desde o instante de sua detecção até a abertura disjuntor, dado pelo instante de atuação do relé somado ao tempo de extinção do arco-elétrico pelo disjuntor. Os métodos foram avaliados em termos dos erros absoluto e relativo da estimação do local da falta, bem como em função da distância estimada no instante da extinção do arco, considerando um disjuntor com tempo de abertura de 8 ciclos, para amostragens (N) de 32 e 64 amostras por ciclo, para uma falta em 35 % da Linha de Transmissão.

4.3 Resultados

Os resultados obtidos a partir da análise do comportamento transitório dos Localizadores de Falta, sendo essas técnicas expostas a diferentes tipos de curto-circuitos, taxas de amostragem e pontos de incidência de falta na LT, são apresentados nas subseções seguintes. Os resultados discutidos a seguir demonstram o desempenho das metodologias para faltas em um ponto próximo ao terminal local (35%), bem como no ponto central da LT (50%) e em um ponto próximo ao terminal remoto (80%). São apresentados estes casos, dentre todos os analisados, de modo a demonstrar o comportamento dos LF para diferentes trechos da linha. Além disso, os resultados são mostrados para amostragens de 32 e 64 amostras por ciclo, pois, para essas taxas, alguns métodos apresentaram desempenhos distintos e com o objetivo de destacar os melhores resultados estão destacados em verde. Já as piores respostas estão destacadas na cor vermelha. Por fim, cabe ressaltar que os casos aqui apresentados foram obtidos considerando um tempo de abertura do disjuntor igual a 8 ciclos.

4.3.1 Caso 1: Faltas em 35% da Linha de Transmissão

A Tabela 2, apresenta os casos de curtos-circuitos monofásico, bifásico e trifásico em 35% da LT, para 32 amostras/ciclo. Assim, pode-se verificar que, para esse caso, o método M2TS obteve o menor erro absoluto para as faltas monofásicas e bifásicas, sendo as distâncias finais estimadas iguais a, respectivamente, 35,002% e 35,0005%. Já para a falta trifásica, o método MBA2T obteve o melhor resultado, estimando a distância até a falta como 34,974%, o que representa um erro absoluto de 0,0260%.

Ainda, cabe ressaltar que, para a falta monofásica, o método LFIIF apresentou o pior desempenho, estimando a falta em 58,7859% da LT, o que totaliza um erro de 23,7859% na estimação do ponto faltoso. esse erro porque em sua formulação o LFIIF, não leva em conta o desequilíbrio gerado durante faltas monofásicas.

Já para o curto bifásico, o pior desempenho foi obtido pelo MN, o qual apresentou um erro absoluto na estimação de 3,6427%. Nesse caso, o erro ocorre porque o MN também não leva em conta o desequilíbrio da rede para estimar o local da falta. Além disso, para a falta trifásica, M2TT e M2TD apresentaram os maiores erros de estimação, sendo que ambos obtiveram erro absoluto de 1,6412% na determinação da distância até o ponto de ocorrência do curto-circuito. Isso se deve ao fato de que ambos são feitos segundo a mesma formulação, diferenciando-se apenas pelo fato de que o M2TT utiliza a parte imaginária dos fasores envolvidos, enquanto o M2TD utiliza a parte real destes. Outro fator que explica o elevado erro desses métodos para a falta trifásica é que essas técnicas são formuladas com base nos fasores de sequência negativa obtidos em ambos os terminais da linha, os quais tendem a zero à medida que a componente DC deixa de existir, lembrando que as componentes de sequência zero são nulas em faltas balanceadas.

As respostas transitórias de estimação do local da falta por parte dos métodos de baseados em dados de um e dois terminais podem ser observadas nas Figuras 15 e 16, respectivamente, para a falta monofásica, com os sinais de tensão e corrente amostrados a uma taxa de 32 amostras por ciclo. Além disso, essas Figuras apresentam o comportamento dos erros absoluto e relativo para cada método. Cabe ressaltar que a escolha dessas imagens se deu para demonstrar a pior resposta obtida para esse caso, a qual foi conseguida pelo LFIIF, conforme comentado anteriormente. Ainda, ressalta-se que as Figuras 16d e 16m mostram que, embora apresentem a mesma resposta final para a estimação, as técnicas M2TT e M2TD apresentam respostas transitórias distintas.

Tendo em vista os resultados apresentados nas Figuras 15 e 16, verifica-se que o IVR apresenta resposta transitória que parte de um valor máximo e decresce até convergir para o valor final. O mesmo é verificado para os métodos M2TS e M2TV. As técnicas MRS, MBS e MN apresentam oscilações nos instantes iniciais da estimação, convergindo de forma amortecida para os resultados finais. Também, destaca-se que, inicialmente, o MTM apresenta grande variação do valor estimado, convergindo rapidamente para a solução final. Ainda, o LFIIF, o qual obteve a pior resposta dentre os métodos para o respectivo caso, tem sua resposta transitória que parte de um valor negativo, convergindo para o valor inapropriado de, aproximadamente, 59%. Um comportamento similar de resposta transitória é verificado para M2TT, que, no entanto, obtém excelente desempenho para a estimação do local da falta (34,9929%). Por fim, destaca-se a resposta oscilatória apresentada pelo M2TR. Dessa forma, evidencia-se a necessidade da análise da resposta transitória dos LFs, visto que diferentes tempos de abertura do disjuntor podem provocar respostas diferentes das aqui observadas.

A Tabela 3 apresenta os resultados para as mesmas faltas, porém, com uma taxa de amostragem de 64 amostras/ciclo. Para essa taxa, a técnica MBA2T obteve o menor erro para curto monofásico, sendo este valor igual a 0,0017%. Em contrapartida, o pior desempenho foi verificado para o método LFIIF, o qual apresentou erro absoluto final de 23,6452% nessa situação. Considerando que a linha de transmissão simulada é possui 100 km de extensão, isso representa um erro de mais de 23,5 km em relação ao ponto faltoso, o que promoveria um deslocamento indevido das equipes de manutenção e dependendo do local, como no caso de locais de difícil acesso, aumentaria ainda mais o tempo de restabelecimento de energia.

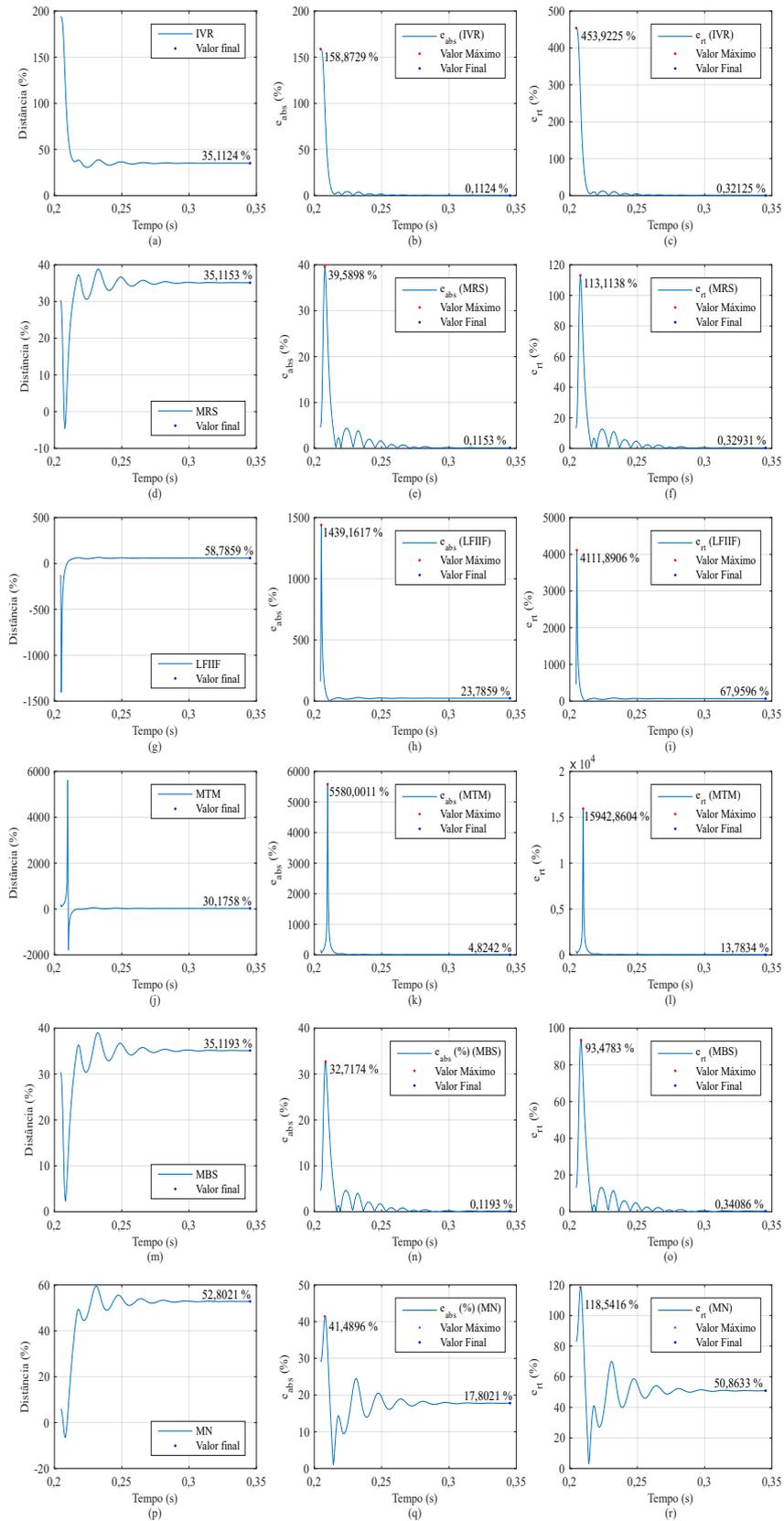
Além disso, para o curto bifásico, ocorrido nesta mesma distância, a melhor resposta foi obtida pelo método M2TS, que estimou a distância até o ponto da falta como sendo igual a 35,0009%, isto é, com um erro de 0,0009%. Ainda nesse caso, pode-se observar que o pior desempenho foi verificado para o MN, o qual obteve o erro absoluto de 3,7237%. Por fim, para a falta trifásica, o método localizador de falta que atuou melhor foi o MBS, sendo que a técnica M2TT apresentou, novamente, o pior desempenho, mesmo com a variação da taxa de amostragem.

Tabela 2 – Resultados para faltas em 35% da LT e taxa de 32 amostras/ciclo.

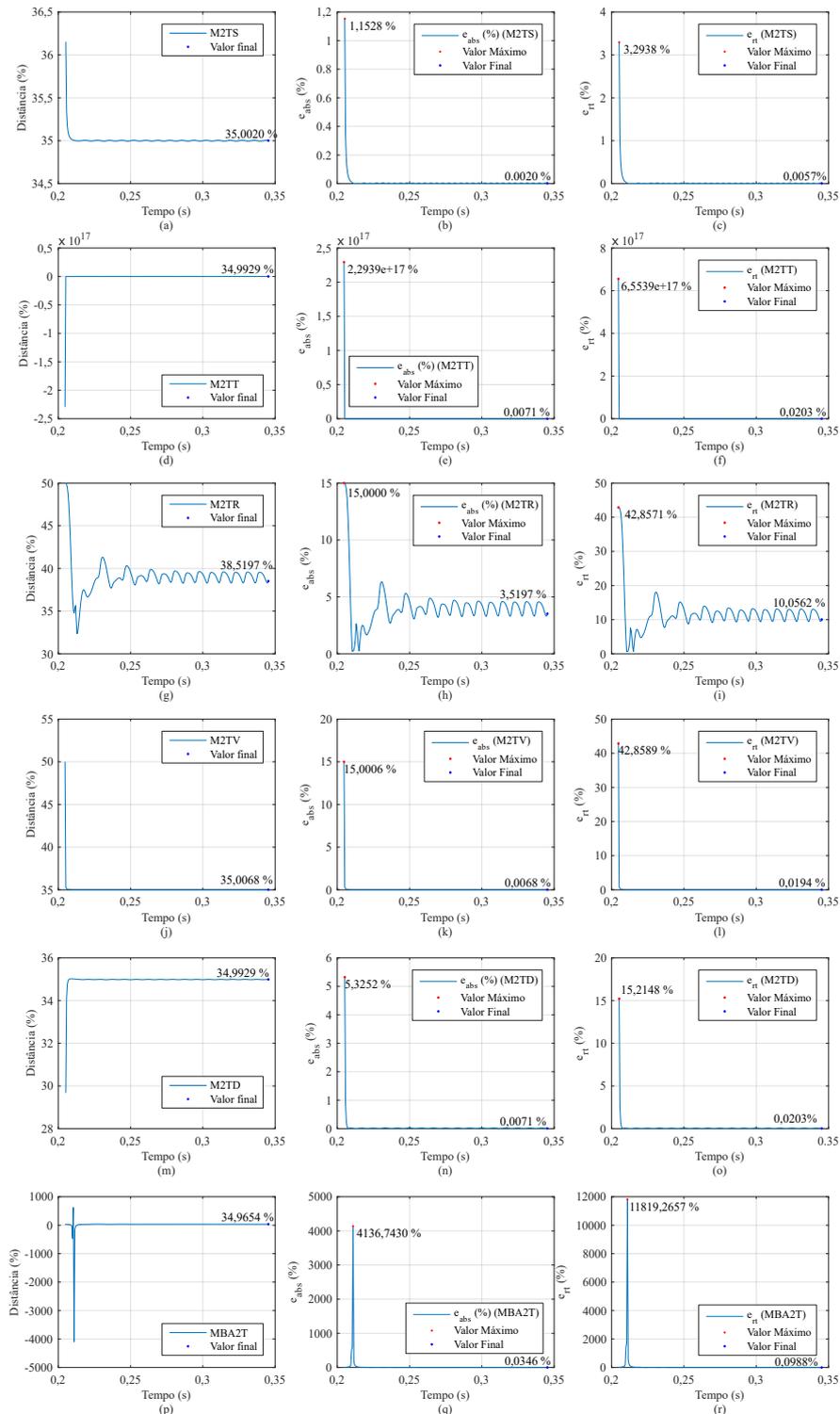
Casos	N	32 amostras/ciclo					
		LF	Dist (%)	Erro abs (%)		Erro rel (%)	
				Máximo	Final	Máximo	Final
1f 35 % LT	IVR	35,1124	158,8729	0,1124	453,9225	0,3212	
	MRS	35,1153	39,5898	0,1153	113,1138	0,3293	
	LFIF	58,7859	1439,1617	23,7859	4111,8906	67,9596	
	MTM	30,1758	5580,0011	4,8242	15942,8604	13,7834	
	MBS	35,1193	32,7174	0,1193	93,4783	0,3408	
	MN	52,8021	41,4896	17,8021	118,5416	50,8633	
	M2TS	35,002	1,1528	0,002	3,2938	0,0057	
	M2TT	34,9929	2,2938e+17	0,0071	6,5539e+17	0,0203	
	M2TR	38,5197	15	3,5197	42,8571	10,0562	
	M2TV	35,0068	15,0006	0,0068	42,8589	0,0194	
	M2TD	34,9929	5,3252	0,0071	15,2100	0,0203	
	MBA2T	34,9654	4136,743	0,03457	11819,2657	0,0987	
2f 35% LT	IVR	35,1142	158,8717	0,1142	453,9192	0,3263	
	MRS	35,1169	28,1229	0,1169	80,351	0,3342	
	LFIF	35,1122	225,2149	0,1121	643,471	0,3205	
	MTM	35,1104	642,2942	0,1104	1835,1264	0,3410	
	MBS	35,1194	47,6938	0,1194	136,2681	0,3410	
	MN	31,3573	49,6151	3,6427	141,7574	10,4079	
	M2TS	35,0005	0,3172	0,0005	0,9061	0,0014	
	M2TT	34,9892	2,2938e+17	0,0108	6,5539e+17	0,0308	
	M2TR	35,5035	15	0,5035	42,8571	1,4386	
	M2TV	35,0067	15,0006	0,0067	42,8589	0,0192	
	M2TD	34,9892	0,2955	0,0108	0,8444	0,0307	
	MBA2T	34,9593	6428,8935	0,0407	18368,2671	0,1162	
3f 35% LT	IVR	35,1145	158,8717	0,1145	453,9192	0,3273	
	MRS	35,1188	28,1229	0,1188	80,351	0,3394	
	LFIF	35,1114	225,2148	0,1114	643,471	0,3184	
	MTM	35,2	12991,0458	0,1999	37117,2736	0,5713	
	MBS	35,0996	40,8515	0,09964	116,7185	0,2847	
	MN	35,1137	46,3756	0,1137	132,5018	0,3248	
	M2TS	35,8217	1,043	0,8217	2,9799	2,3478	
	M2TT	33,3588	2,2939e+17	1,6412	6,5539e+17	4,6892	
	M2TR	35,4892	15	0,4892	42,8571	1,3977	
	M2TV	35,4887	15,0006	0,4887	42,8589	1,3963	
	M2TD	33,3588	2,17	1,6412	6,2	4,6892	
	MBA2T	34,974	325,8855	0,0260	931,1014	0,0743	

Fonte: Autora.

Figura 15 – Resposta dos LFs de 1 terminal (Falta 1 ϕ em 35% da LT, 32 am/ciclo).



Fonte: Autora.

Figura 16 – Resposta dos LF's de 2 terminais (Falta 1ϕ em 35% da LT, 32 am/ciclo).

Fonte: Autora.

Tabela 3 – Resultados para faltas em 35% da LT e taxa de 64 amostras por ciclo.

Casos	N	64 amostras/ciclo				
		Dist (%)	Erro abs (%)		Erro rel (%)	
			Máximo	Final	Máximo	Final
1f 35 % LT	IVR	35,0281	158,4107	0,0281	452,6019	0,0804
	MRS	35,0298	39,543	0,0298	112,9801	0,0851
	LFHIF	58,6452	9434,1905	23,6452	26954,8299	67,5578
	MTM	30,044	154725,217	4,956	442072,0486	14,1599
	MBS	35,0322	32,8287	0,0322	93,7963	0,0920
	MN	52,6619	41,6747	17,6619	119,0706	50,4626
	M2TS	35,0023	234,6219	0,0023	670,3483	0,0066
	M2TT	34,9926	2,3721e +17	0,0073	6,7774e+17	0,0211
	M2TR	38,4497	15	3,4497	53,5161	0,0199
	M2TV	35,007	18,7306	0,0069	53,5161	0,0199
	M2TD	34,9926	33,6967	0,0074	96,2764	0,0211
MBA2T	34,9983	3686,4912	0,0017	10532,8321	0,0049	
2f 35 % LT	IVR	35,0261	158,4091	0,0260	452,5975	0,0744
	MRS	35,0298	32,4648	0,0297	92,7565	0,0850
	LFHIF	35,0233	368,1025	0,0233	1051,7215	0,0667
	MTM	35,021	491,7671	0,0209	1405,0489	0,0598
	MBS	35,0232	52,02	0,0231	148,6285	0,0662
	MN	31,2763	51,8885	3,7237	148,2528	10,639
	M2TS	35,0009	1,3817	0,0009	3,9477	0,0028
	M2TT	34,989	2,3721e +17	0,0110	6,7774e +17	0,0314
	M2TR	35,4944	15	0,4944	42,8571	1,4126
	M2TV	35,007	15	0,0070	42,8583	0,0200
	M2TD	34,989	2,1751	0,01101	6,2146	0,0314
MBA2T	35,007	6183,5161	0,0070	17667,1888	0,0200	
3f 35 % LT	IVR	35,0261	158,4091	0,0260	452,5975	0,0744
	MRS	35,0298	32,4648	0,0297	92,7565	0,0850
	LFHIF	35,0233	368,1025	0,0233	1051,7215	0,0666
	MTM	35,0496	11259,3183	0,0496	32169,481	0,1418
	MBS	35,0090	40,8392	0,0090	116,6835	0,0258
	MN	35,0198	46,3855	0,0197	132,5301	0,056
	M2TS	35,8208	1,0463	0,8208	2,9893	2,3452
	M2TT	33,3638	2,3721e +17	1,6362	6,7774e +17	4,6747
	M2TR	35,4894	15	0,4894	42,8571	1,3984
	M2TV	35,4885	15,0004	0,4885	42,8583	1,3958
	M2TD	33,3638	2,1646	1,6362	6,1847	4,6747
MBA2T	35,0112	2076,0815	0,0112	5931,6615	0,0320	

Fonte: Autora.

4.3.2 Caso 2: Faltas em 50% da Linha de Transmissão

Os resultados obtidos por cada LF analisado, para faltas ocorridas em 50% da LT, são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente para as amostragens de 32 e 64 amostras/ciclo. Observando a Tabela 4, nota-se que o melhor desempenho para a falta monofásica foi atingido pelo M2TV, o qual apresentou erro absoluto final de $2,1672e-5\%$, enquanto que os piores resultados foram obtidos, respectivamente, pelos métodos LFIIF e MN. Essas técnicas alcançaram erros absolutos finais de $34,2133\%$ e $19,2588\%$. O elevado erro atingido por essas metodologias se deve aos mesmos fatos discutidos na Subseção 4.3.1.

Já para a falta bifásica, com base na Tabela 4, novamente, o M2TV apresentou o melhor desempenho com erro absoluto final de $0,0001\%$, em contrapartida ao erro apresentado pelo MN, $7,2384\%$, o que atribuiu o pior desempenho a este método. Para a falta trifásica, a melhor performance foi apresentada pelo MBA2T, o qual apresentou erro absoluto igual $0,0141\%$. Ressalta-se ainda que, para essa falta, o M2TS obteve o pior resultado, com erro absoluto final igual a $1,3782\%$.

Em 64 amostras/ciclo, a partir da Tabela 5, pode-se notar que o desempenho das técnicas que alcançaram o melhor e o pior resultado para a falta monofásica foi mantido em relação ao verificado para 32 amostras/ciclo. O M2TV apresentou o menor erro absoluto final ($5,0265E-5\%$) e o LFIIF o maior ($34,0137\%$), seguido pelo M2TR ($23,5583\%$). O mesmo ocorre para a falta bifásica, sendo o melhor resultado obtido também pelo M2TV, com erro absoluto final igual a $0,0002\%$, enquanto o pior foi observado para o MN, cujo respectivo erro foi de $7,3548\%$. Por fim, para o curto trifásico, a melhor estimativa do local da falta foi verificada para o MBA2T, o qual apresentou erro absoluto final igual a $0,0138\%$. Para essa falta, a pior performance foi verificada para o M2TS, com erro absoluto final de $1,3768\%$.

Ainda, as Figuras 17 e 18 apresentam a resposta transitória dos LFs para a falta monofásica, a uma taxa de 64 amostras/ciclo. Nessas Figuras, pode-se notar comportamentos transitórios semelhantes àqueles observados para a mesma falta em 35% da linha. Entretanto, destacam-se as variações apresentadas ao longo da estimativa pelo M2TR (Figura 18g), o qual é prejudicado pelo tempo de abertura do disjuntor, o qual coincide com uma de suas oscilações.

Tabela 4 – Resultados para faltas em 50% da LT e taxa de 32 amostras por ciclo.

Casos	N	32 amostras/ciclo					
		LF	Dist (%)	Erro abs (%)		Erro rel (%)	
				Máximo	Final	Máximo	Final
1f 50% LT	IVR	50,1666	143,8729	0,1666	287,7457	0,3333	
	MRS	50,1703	46,1472	0,1703	92,2943	0,3406	
	LFHIF	84,2133	1502,0824	34,2133	3004,1647	68,4267	
	MTM	45,2567	14073,6724	4,7433	28147,3447	9,4867	
	MBS	50,1773	41,078	0,1773	82,1561	0,3546	
	MN	69,2588	52,7256	19,2588	105,4513	38,5176	
	M2TS	49,9992	2,1191	0,0008	4,2383	0,0016	
	M2TT	49,9876	2,2938e+17	0,0124	4,5878e+17	0,0247	
	M2TR	49,5122	275,1084	0,4878	550,2167	0,9756	
	M2TV	50	1,2718	2,1672e-5	2,5437	4,3343e-5	
	M2TD	49,9879	9,6742	0,0121	19,35	0,0247	
MBA2T	50,0112	355,2306	0,0112	710,4613	0,0223		
2f 50% LT	IVR	50,1786	14,8717	0,1756	287,7434	0,3571	
	MRS	50,1841	38,2493	0,1841	76,4986	0,3683	
	LFHIF	50,1701	243,0286	0,1701	486,0571	0,3403	
	MTM	50,1665	897,3409	0,1665	1794,6819	0,3329	
	MBS	50,1854	54,3309	0,1854	108,6618	0,3708	
	MN	42,7616	60,4444	7,2384	120,8888	14,4768	
	M2TS	49,9992	0,3899	0,0008	0,7799	0,0002	
	M2TT	49,983	2,2938e+17	0,017	4,5877e+17	0,0339	
	M2TR	49,9314	39,8363	0,0686	79,6726	0,1372	
	M2TV	50,0001	0,2097	0,0001	0,4193	0,0002	
	M2TD	49,983	0,3392	0,017	0,6783	0,034	
MBA2T	50,0132	693,6011	0,0132	1387,2021	0,0263		
3f 50% LT	IVR	50,1786	143,8717	0,1786	287,7434	0,3571	
	MRS	50,1841	38,2493	0,1841	76,4986	0,3683	
	LFHIF	50,1701	243,0286	0,1701	486,0571	0,3403	
	MTM	50,1937	5832,9529	0,1937	11665,0571	0,3875	
	MBS	50,1643	47,3294	0,1643	94,6588	0,3287	
	MN	50,192	56,4823	0,192	112,9646	0,384	
	M2TS	51,3782	1,3782	1,3782	2,7564	2,7564	
	M2TT	49,1844	2,2937e+17	0,8156	4,5877e+17	1,6312	
	M2TR	50,0053	23,5181	0,0053	47,0362	0,0106	
	M2TV	50,5667	0,7667	0,7667	1,5335	1,5335	
	M2TD	49,1844	2,3796	0,8156	4,7593	1,6312	
MBA2T	50,0141	336,0451	0,0141	672,0901	0,0283		

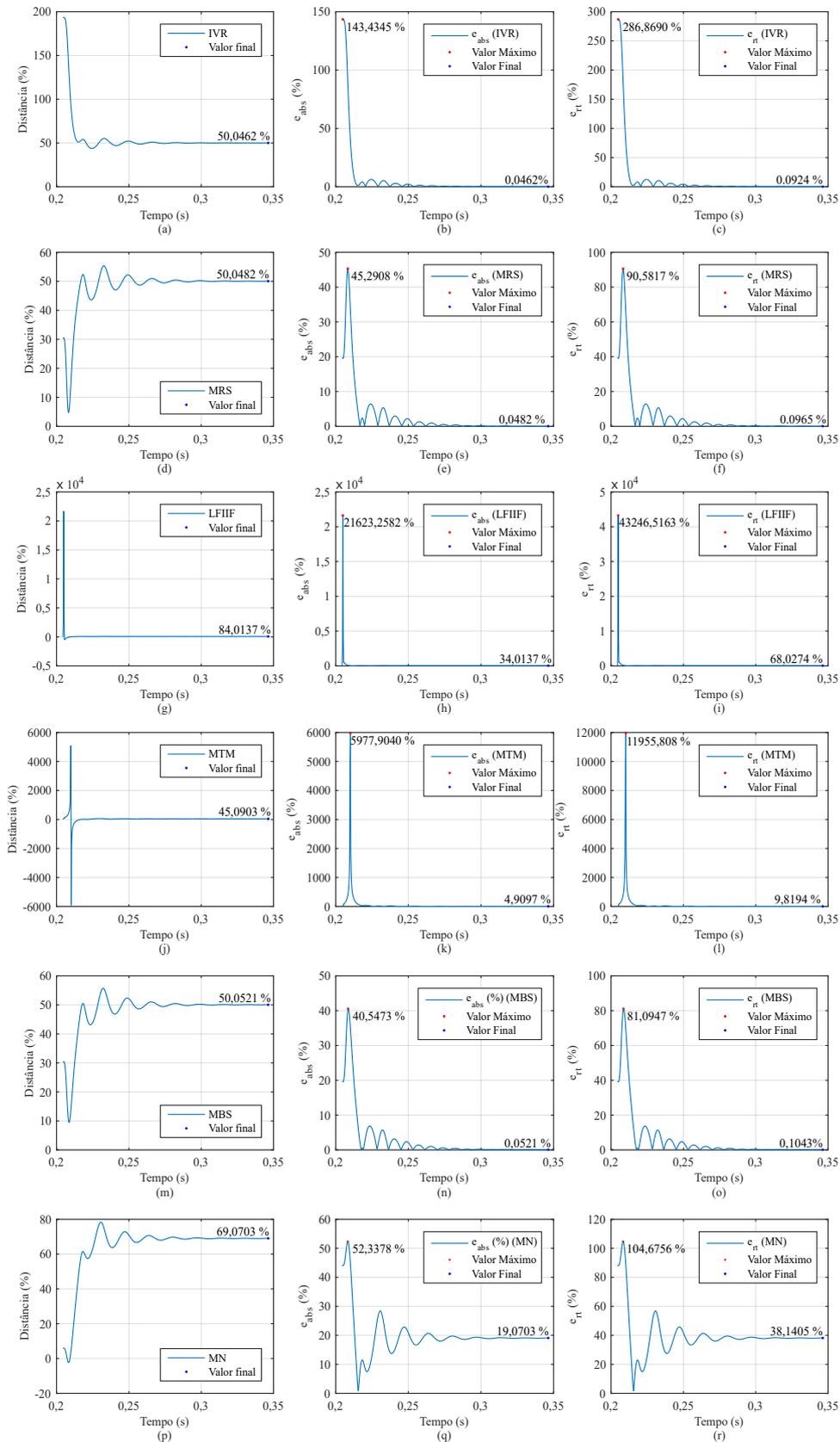
Fonte: Autora.

Tabela 5 – Resultados para faltas em 50% da LT e taxa de 64 amostras por ciclo.

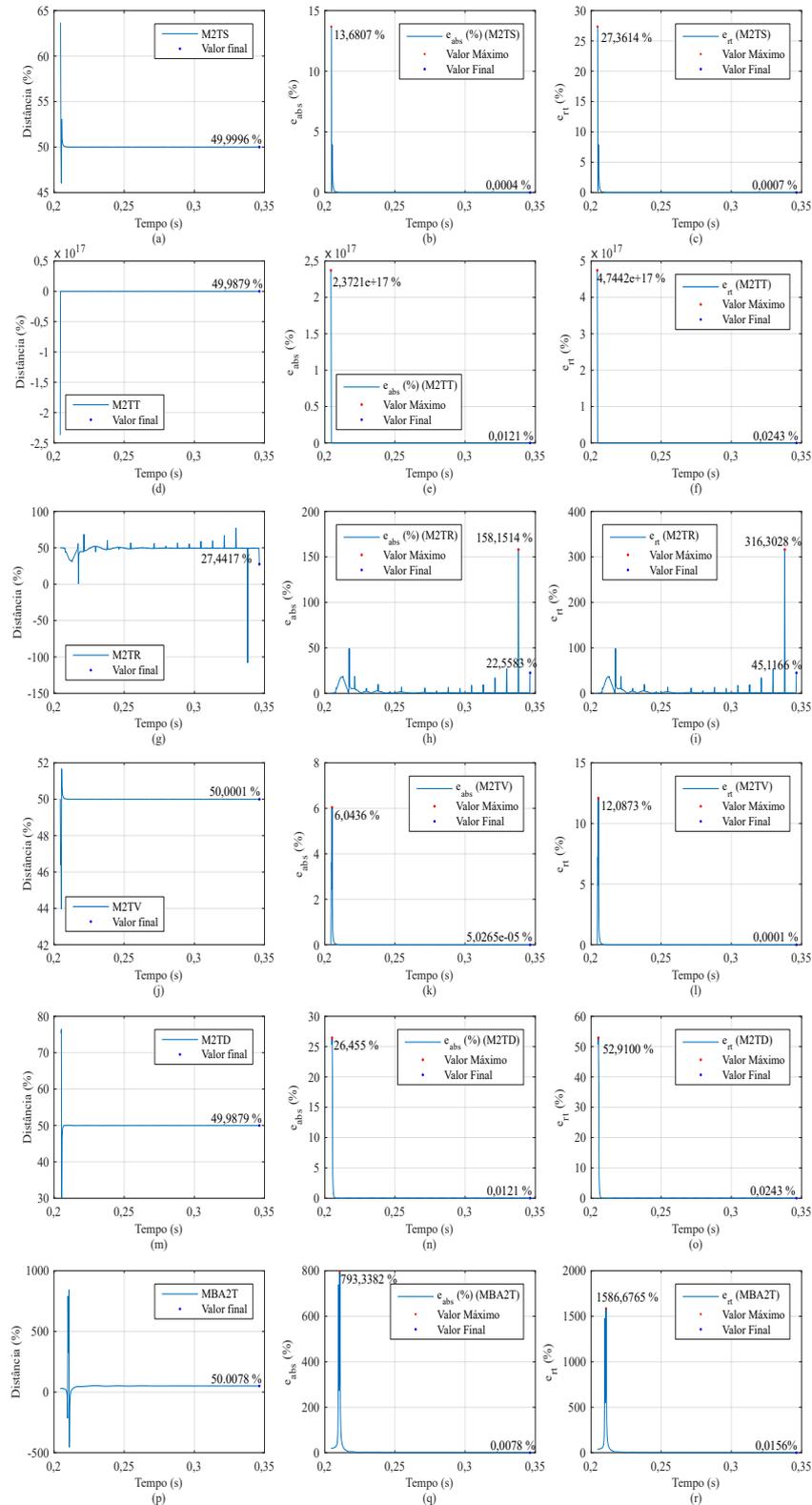
Casos	N	64 amostras/ciclo					
		LF	Dist (%)	Erro abs (%)		Erro rel (%)	
				Máximo	Final	Máximo	Final
1f 50% LT	IVR	50,0462	143,4345	0,0462	286,829	0,0924	
	MRS	50,0482	45,2908	0,0482	90,5817	0,0965	
	LFIIF	84,0137	21623,2582	34,0137	43246,5163	68,0274	
	MTM	45,0903	5977,904	4,9097	11955,808	9,8194	
	MBS	50,0521	40,5473	0,0521	81,0947	0,1043	
	MN	69,0703	52,3378	19,0703	104,6756	38,1405	
	M2TS	49,9996	13,6807	0,0004	27,3614	0,0007	
	M2TT	49,9879	2,3721e+17	0,0121	4,7442e+17	0,0243	
	M2TR	27,4417	158,1514	23,5583	316,302	45,1166	
	M2TV	50,0001	6,0436	5,0265e-5	12,0873	0,0001	
	M2TD	49,9879	26,455	0,0121	52,91	0,0243	
	MBA2T	50,0078	793,3382	0,0078	1586,6765	0,0156	
2f 50% LT	IVR	50,0547	143,4091	0,0547	286,8183	0,1093	
	MRS	50,0596	41,6433	0,0596	83,2865	0,1192	
	LFIIF	50,0472	386,2352	0,0472	772,4705	0,0944	
	MTM	50,044	627,4557	0,0440	1254,9114	0,0879	
	MBS	50,0523	57,0093	0,0523	114,0186	0,1047	
	MN	42,6452	61,7209	7,3548	123,4418	14,7094	
	M2TS	49,9998	1,8226	0,0002	3,6453	0,0004	
	M2TT	49,9835	2,3721e+17	0,0165	4,7442e+17	0,0330	
	M2TR	49,9728	1586,9424	0,0271	3173,8847	0,0543	
	M2TV	50,0002	1,0053	0,0002	2,0106	0,0004	
	M2TD	49,9835	2,5901	0,0165	5,1802	0,0330	
	MBA2T	50,0137	1467,2771	0,0137	2934,5543	0,0275	
3f 50% LT	IVR	50,0547	143,4091	0,0547	286,8183	0,1093	
	MRS	50,0596	41,6433	0,0596	83,2865	0,1192	
	LFIIF	50,0472	386,2352	0,0472	772,4705	0,0944	
	MTM	50,0472	4029,0215	0,0472	8058,0431	0,0943	
	MBS	50,0353	46,4029	0,0353	92,8059	0,0706	
	MN	50,0578	56,0094	0,0578	112,0188	0,1155	
	M2TS	51,3768	1,3768	1,3768	2,7535	2,7535	
	M2TT	49,1883	2,3721e+17	0,8117	4,7442e+17	1,6233	
	M2TR	50,0053	23,3685	0,0053	46,7370	0,0107	
	M2TV	50,7666	0,8209	0,7666	1,6418	1,5333	
	M2TD	49,1883	2,3735	0,8117	4,7470	1,6233	
	MBA2T	50,0138	1316,7188	0,0138	2633,4375	0,0277	

fonte: Autora.

Figura 17 – Resposta dos LFs de 1 terminal (Falta 1 ϕ em 50% da LT, 64 am/ciclo).



Fonte: Autora.

Figura 18 – Resposta dos LF's de 2 terminais (Falta 1 ϕ em 50% da LT, 64 am/ciclo).

Fonte: Autora.

4.3.3 Caso 3: Faltas em 80% da Linha de Transmissão

Os resultados obtidos para as faltas em 80% da LT, são apresentados nas Tabelas 6 e 7. De forma análoga ao demonstrado nos casos anteriores, também são apresentados os resultados para amostragens de 32 e 64 amostras/ciclo. Sendo assim, analisando os resultados demonstrados na Tabela 6, nota-se que, para faltas monofásicas, o método que atingiu o menor erro de estimação foi o M2TS, o qual apresentou erro absoluto final de 0,0010%, enquanto que o pior dos resultados foi obtido pela técnica de localização de falta LFIIF, sendo seu erro absoluto final igual a 59,2353%. Este valor elevado representa um erro de 59,2353 km em relação ao local faltoso, já que cada 1% de erro é equivalente a 1km. Para o curto bifásico, analisando a Tabela 6, o M2TS também apresentou o melhor desempenho, com erro absoluto final de 0,0007%. Já o erro apresentado pelo MN foi de 17,5825%, atribuindo o pior desempenho a este método. Para a falta trifásica, a melhor performance foi apresentada pelo MBA2T, o qual apresentou erro absoluto igual 0,0903%. Já os maiores erros foram auferidos aos métodos M2TT e M2TD, ambos com erro de 0,8454%.

A Tabela 7 apresenta os resultados para as mesmas faltas, porém, com taxa de amostragem de 64 amostras/ciclo. Para essa taxa, a técnica MBA2T obteve o menor erro para curto monofásico, sendo este valor igual a 0,0197%. Entretanto, o pior desempenho foi conferido para o método LFIIF, o qual alcançou o erro absoluto final igual a 58,9136%. Já para o curto bifásico, a melhor resposta foi obtida pelo método M2TS, com erro equivalente a apenas 50 cm em uma linha de 100 km. O pior desempenho foi verificado para o MN. Para a falta trifásica, o método localizador de falta que atuou melhor foi o MBA2T, sendo que a técnica M2TS apresentou o pior desempenho. Porém, cabe ressaltar que, mesmo com o pior erro, a técnica M2TS obteve um resultado satisfatório, com erro absoluto igual a 0,8174%, tendo pouca diferença em relação ao melhor resultado que foi de 0,0197%.

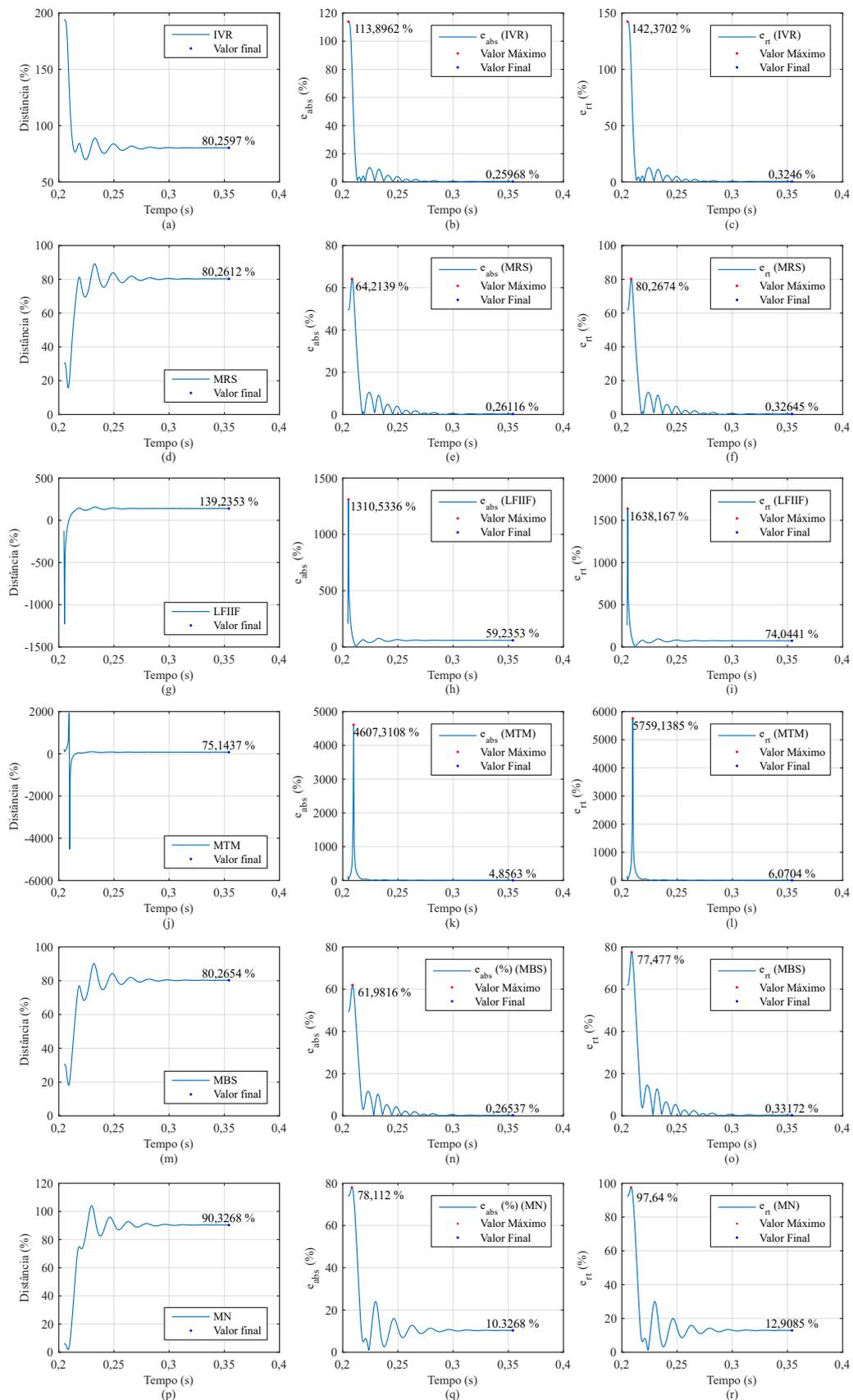
As Figuras 19 e 20 apresentam a resposta transitória dos LFs para a falta monofásica, a uma taxa de 32 amostras/ciclo. Nota-se que, na Figura 19, o comportamento do método LFIIF, possui uma peculiaridade, tendo ele partido de um local estimado negativo e após convergido para um valor que atribui a ele o pior erro entre todos métodos.

Tabela 6 – Tabela de Resultados das simulações para 32 amostras por ciclo.

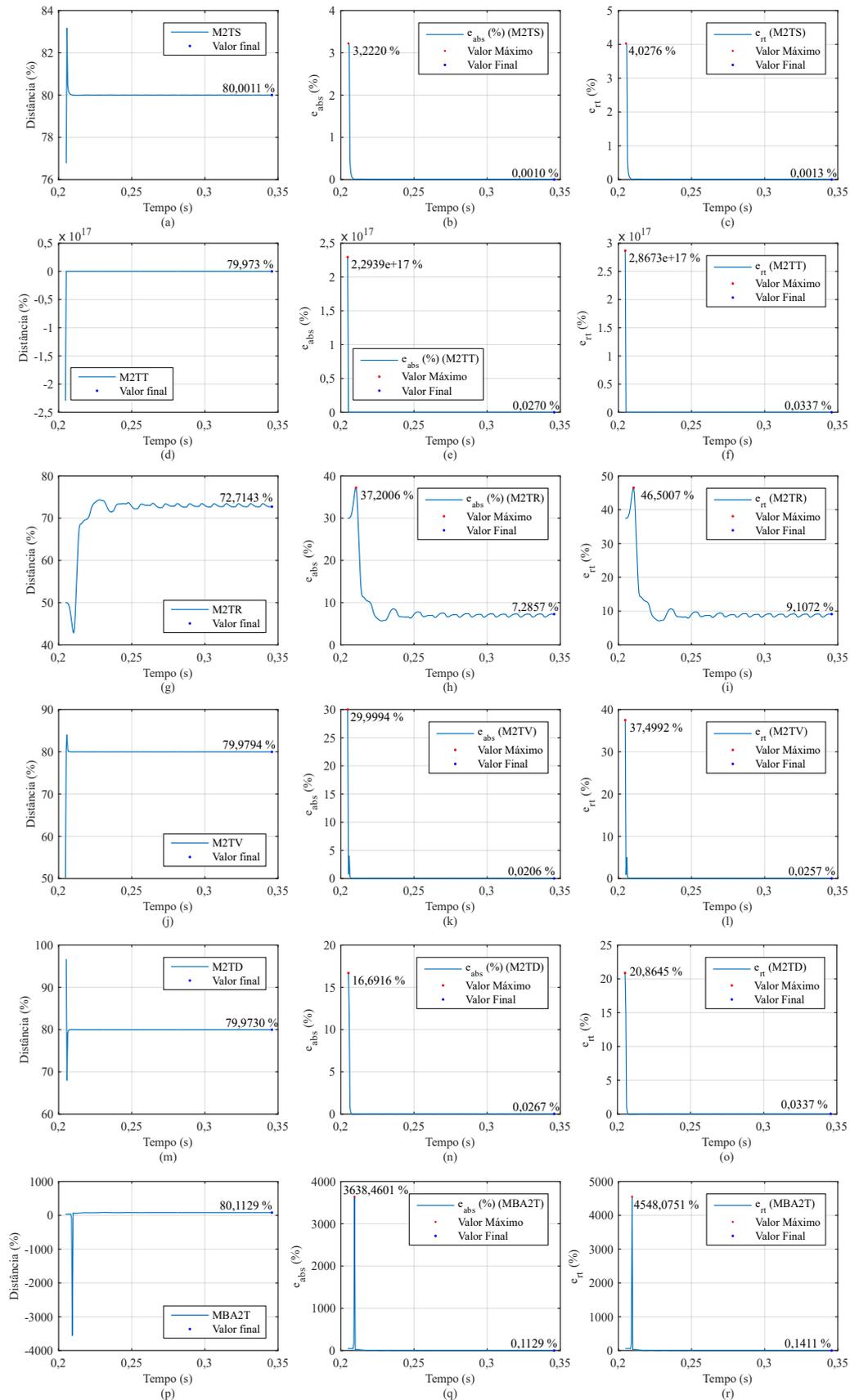
Casos	N	32 amostras/ciclo					
		LF	Dist (%)	Erro abs (%)		Erro rel (%)	
				Máximo	Final	Máximo	Final
1f 80% LT	IVR	80,2597	113,8962	0,2597	142,3702	0,3246	
	MRS	80,2612	64,2139	0,2612	80,2674	0,3264	
	LFHIF	139,2353	1310,53	59,2353	1638,1670	74,0441	
	MTM	75,1437	4607,3108	4,8563	5759,1385	6,0704	
	MBS	80,2654	61,9816	0,2654	77,4770	0,3317	
	MN	90,3268	78,1120	10,3268	97,6400	12,9085	
	M2TS	80,0010	3,2220	0,0010	4,0276	0,0013	
	M2TT	79,9730	2,1939e+17	0,0270	2,8673e+17	0,0337	
	M2TR	72,7143	37,2006	7,2857	46,5007	9,1072	
	M2TV	79,9794	29,9994	0,0206	37,4992	0,0257	
	M2TD	79,9730	16,9616	0,0270	20,8645	0,0337	
MBA2T	80,1129	3638,4601	0,1129	4548,0751	0,1411		
2f 80% LT	IVR	80,2473	113,8717	0,2472	142,3396	0,3090	
	MRS	80,2441	61,9469	0,2441	77,4336	0,3051	
	LFHIF	80,2571	276,2648	0,2571	345,3310	0,3214	
	MTM	80,2595	2784,6889	0,2595	3480,8611	0,3243	
	MBS	80,2721	72,5067	0,2721	90,6334	0,3401	
	MN	62,4175	84,4280	17,5825	105,5350	21,9781	
	M2TS	80,0007	0,3251	0,0007	0,4064	0,0008	
	M2TT	79,9701	2,2939e+17	0,0299	2,8673e+17	0,0373	
	M2TR	79,1678	40,1914	0,8322	50,2392	1,0403	
	M2TV	79,9823	29,9994	0,0177	37,4992	0,0221	
	M2TD	79,9701	0,2400	0,0299	0,3000	0,0374	
MBA2T	80,1060	304,9536	0,1060	381,1920	0,1325		
3f 80% LT	IVR	80,2473	113,8717	0,2473	142,3396	0,3091	
	MRS	80,2441	61,9469	0,2441	77,4336	0,3051	
	LFHIF	80,2571	276,2648	0,2571	345,3310	0,3214	
	MTM	80,1217	1508,3345	0,1217	1885,4181	0,1521	
	MBS	80,2753	64,9726	0,2753	81,2157	0,3441	
	MN	80,2561	80,4073	0,2561	100,5091	0,3201	
	M2TS	80,7021	0,7340	0,7021	0,9175	0,8776	
	M2TT	79,1546	2,2939e+17	0,8454	2,8673e+17	1,0567	
	M2TR	80,3920	32,2797	0,3920	40,3496	0,4900	
	M2TV	80,3954	29,9994	0,3954	37,4992	0,4943	
	M2TD	79,1546	1,4929	0,8454	1,8662	1,0567	
MBA2T	80,0903	246,1994	0,0903	307,7492	0,1128		

fonte: Autora.

Figura 19 – Resposta dos LFs de 1 terminal (Falta 1 ϕ em 80% da LT, 32 am/ciclo).



Fonte: Autora.

Figura 20 – Resposta dos LF's de 2 terminais (Falta 1 ϕ em 80% da LT, 32 am/ciclo).

Fonte: Autora.

Tabela 7 – Tabela de Resultados das simulações para 64 amostras por ciclo.

Casos	N	64 amostras/ciclo					
		LF	Dist (%)	Erro abs (%)		Erro rel (%)	
				Máximo	Final	Máximo	Final
1f 80% LT	IVR	80,0682	113,9382	0,0682	142,4228	0,0853	
	MRS	80,0671	61,4600	0,0671	76,8250	0,0839	
	LFHIF	138,9136	278496,7877	58,9136	348120,9847	73,642	
	MTM	74,9101	10703,5550	5,0899	13379,4437	6,3624	
	MBS	80,0640	60,0808	0,0640	75,1010	0,0800	
	MN	90,0721	77,0952	10,0721	96,2690	12,5901	
	M2TS	80,0013	1,2025	0,0013	1,5032	0,0016	
	M2TT	79,9729	2,3721e+17	0,0271	2,9651e+17	0,0339	
	M2TR	72,7059	36,6604	7,2941	45,8255	9,1176	
	M2TV	79,9754	29,9996	0,0246	37,4995	0,0339	
	M2TD	79,9729	13,5811	0,0271	16,9763	0,0339	
MBA2T	80,0349	1681,1969	0,0349	2101,4961	0,0436		
2f 80% LT	IVR	80,0642	113,4091	0,0642	141,7614	0,0802	
	MRS	80,0585	63,8993	0,0585	79,8741	0,0731	
	LFHIF	80,0817	424,0259	0,0817	530,0324	0,1021	
	MTM	80,0858	1244,8740	0,0858	1556,0926	0,1073	
	MBS	80,0761	72,9147	0,0761	91,1434	0,0952	
	MN	62,2514	84,8432	17,7486	106,0540	22,1858	
	M2TS	80,0005	1,8515	0,0005	2,3144	0,0007	
	M2TT	79,9702	2,3721e+17	0,0298	2,9651e+17	0,0372	
	M2TR	79,1693	41,8256	0,8307	52,2821	1,0384	
	M2TV	79,9792	29,9996	0,0208	37,4995	0,0259	
	M2TD	79,9702	1,8564	0,0298	2,3205	0,0372	
MBA2T	80,0312	578,6970	0,0312	723,3713	0,0390		
3f 80% LT	IVR	80,0642	113,4091	0,0642	141,7641	0,0802	
	MRS	80,0585	63,8993	0,0585	79,8741	0,0731	
	LFHIF	80,0817	424,0259	0,0817	530,0324	0,1021	
	MTM	80,1099	1316,5518	0,1099	1645,6897	0,1374	
	MBS	80,0894	62,2859	0,0894	77,8574	0,1117	
	MN	80,0614	78,7769	0,0614	98,4712	0,0767	
	M2TS	80,8174	0,8174	0,8174	1,0218	1,0218	
	M2TT	79,4340	2,3721e+17	0,5660	2,9651e+17	0,7075	
	M2TR	80,4512	32,2382	0,4512	40,2978	0,5639	
	M2TV	80,4510	29,9996	0,4510	37,4995	0,5637	
	M2TD	79,4340	1,4893	0,5660	1,8616	0,7075	
MBA2T	80,0197	393,1746	0,0197	491,4683	0,0247		

Fonte: Autora.

4.3.4 Análise do Erro Absoluto Final X Distância

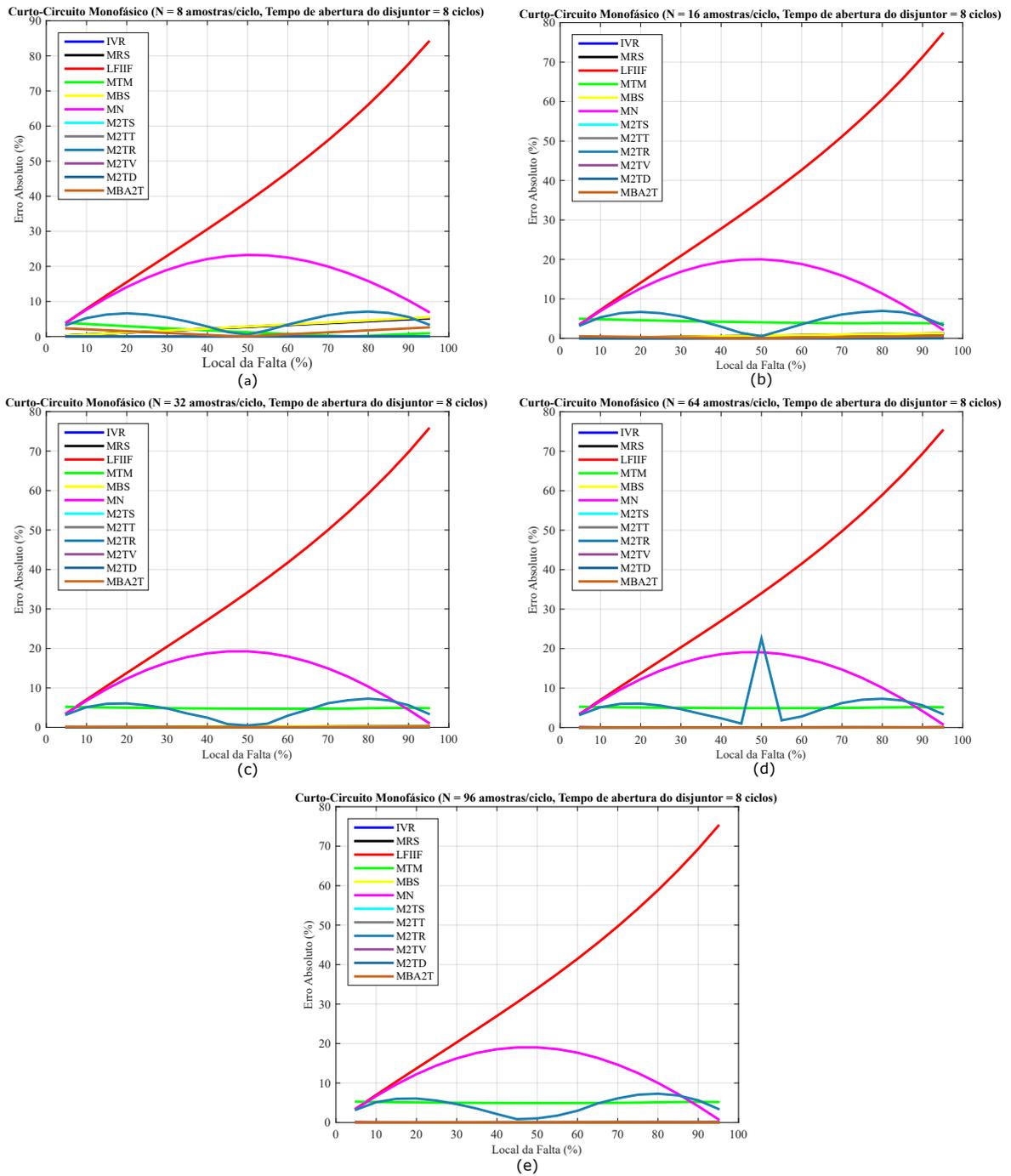
As Figuras 21, 22 e 23 apresentam o comportamento dos erros absolutos finais de todos os métodos, em relação a distância do local da Falta. Cabe ressaltar que o tempo de abertura do disjuntor escolhido foi de 8 ciclos e as referidas figuras mostram os resultados para todas as amostragens testadas.

Analisando o comportamento do método LFIIF para curto-circuito monofásico na Figura 21, nota-se que o seu valor de erro absoluto cresce de forma aproximadamente linear, quando comparado com os outros métodos, conforme o local da falta se distancia do terminal local, independentemente da taxa de amostragem. Além disso, analisando o desempenho do método MN, nota-se que o comportamento do erro absoluto varia de forma parabólica com a concavidade para baixo, o que se justifica pela sua formulação quadrática.

Outra particularidade em relação aos métodos, é que o M2TR, em 50% da LT, para 64 amostras/ciclo, aumenta seu erro absoluto de forma significativa e repentina, o que não acontece nas demais amostragens. Salienta-se o fato que a técnica M2TR possui uma particularidade em relação a sua resposta transitória, a qual varia muito em relação ao tempo. Logo, entende-se que esta proeminência na resposta do erro absoluto em função da distância se dá pelo fato de a amostragem não favorecer o método, que, provavelmente, neste ponto e tempo, estaria medindo um local de falta errado, sendo que, logo após ou imediatamente antes, a resposta convergia para a real distância. Isso pode ser concluído a partir da Figura 18, a qual demonstra as oscilações numéricas da estimação do local da falta para essa amostragem. Além disso, cabe destacar que os demais métodos não variam de forma tão significativa em relação a distância do ponto de falta, apresentando erros praticamente constantes em relação à posição do curto-circuito.

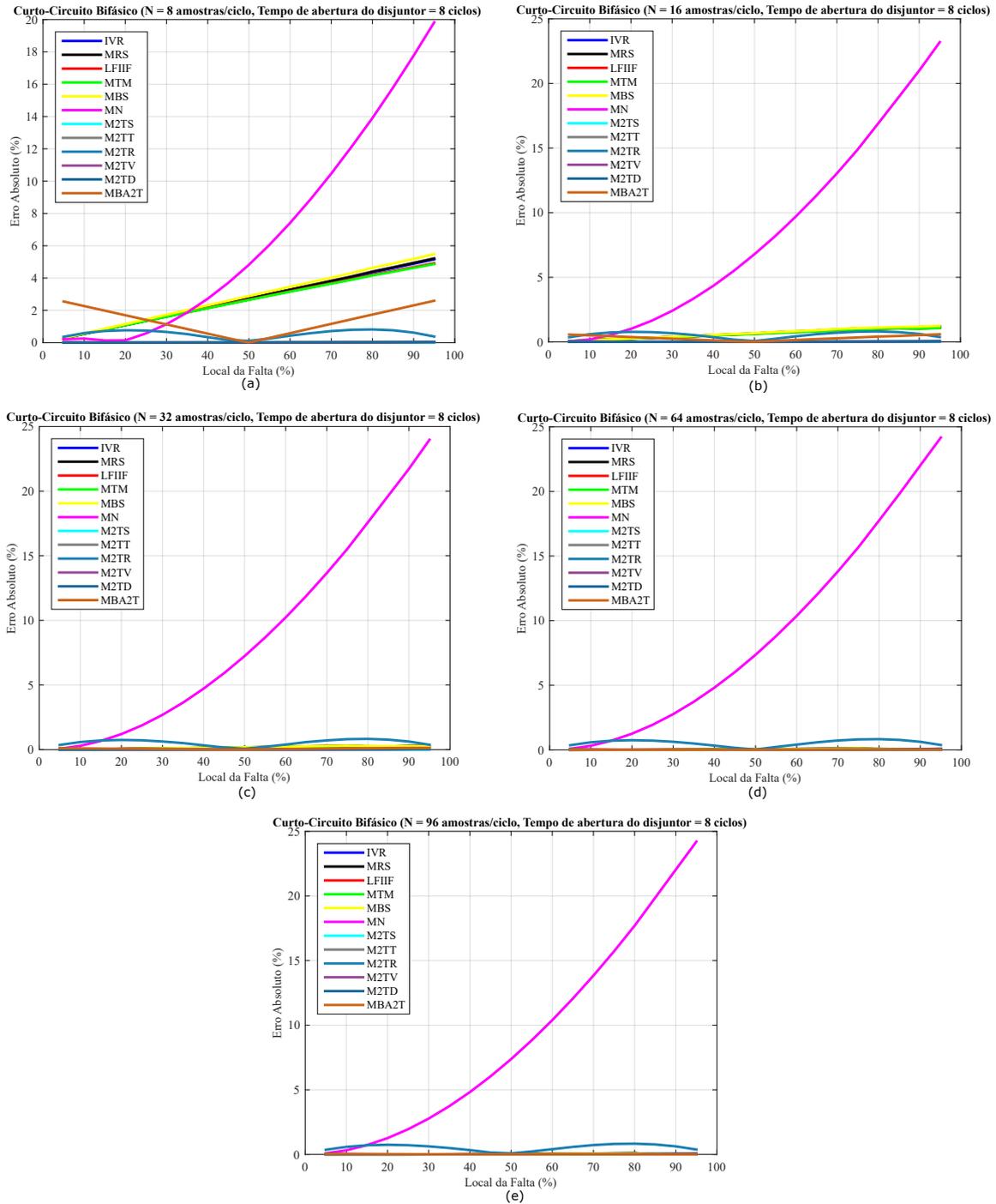
Ainda, analisando a Figura 22, pode-se notar que o erro absoluto do MN, para faltas bifásicas, cresce consideravelmente com o aumento da distância do ponto de falta, independentemente da taxa de amostragem. As demais metodologias, apresentam comportamentos semelhantes aos verificados para 8 amostras/ciclo (Fig. 22a), nas outras amostragens. Já para as faltas trifásicas, não apresentam comportamento bem definido em relação a distância da falta (Fig.23).

Figura 21 – Erro absoluto final X local da falta (curtos monofásicos).



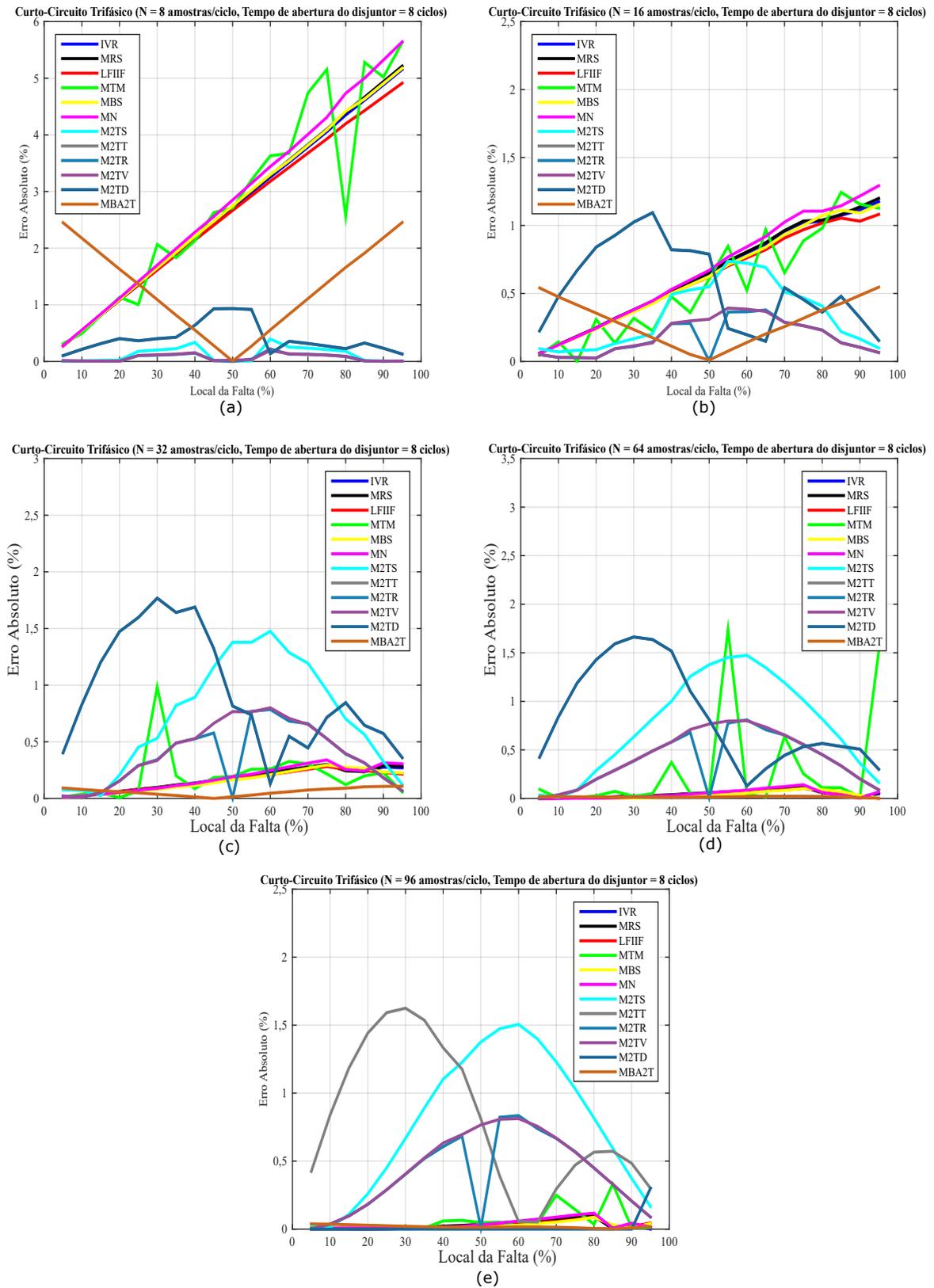
Fonte: Autora.

Figura 22 – Erro absoluto final X local da falta (curtos bifásicos).



Fonte: Autora.

Figura 23 – Erro absoluto final X local da falta (curtos trifásicos).



Fonte: Autora.

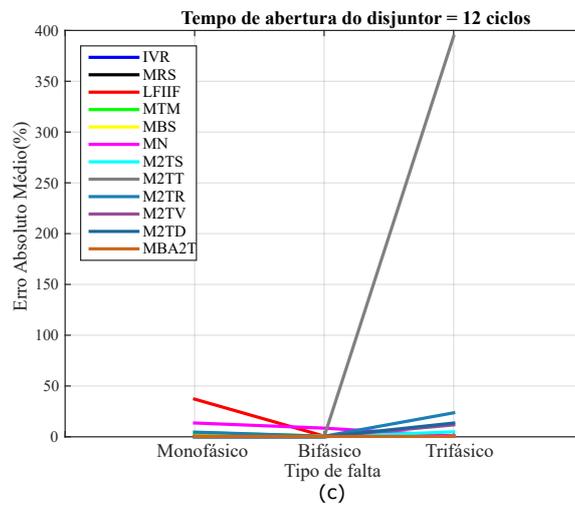
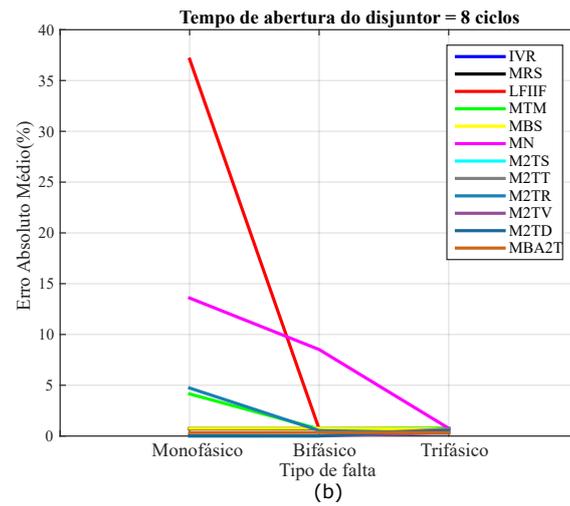
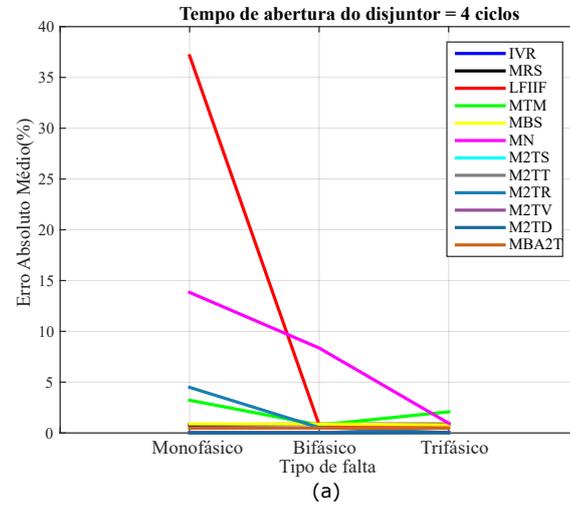
4.3.5 Impacto da Variação das Condições de Operação

Inicialmente, foi verificada a variação do erro médio em relação ao tipo de curto-circuito para diferentes tempos de abertura do disjuntor. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 24. Nessa figura, pode-se notar que o erro médio dos métodos diminui com o aumento do número de fases envolvidas na falta. Exceto o M2TT, o qual tem o erro médio aumentado para faltas trifásicas quando o tempo de abertura do disjuntor é igual a 12 ciclos. É importante ressaltar que, nesse caso, o erro médio é calculado com base nos valores de erro absoluto final de todas as faltas do mesmo tipo, independente do local da falta, para a dada amostragem.

Já a Figura 25 apresenta o erro médio calculado com base nos erros absolutos finais atingidos pelos LFs, independentemente do tipo de falta e da distância do ponto de curto-circuito, em função do tempo de abertura do disjuntor, para diferentes amostragens. Nessa Figura, pode-se notar que o erro médio das estimações é praticamente constante para 4 e 8 ciclos para todos os LFs. Entretanto, com o aumento da taxa de amostragem, os métodos M2TT, M2TD, M2TV e M2TS sofrem incremento significativo do erro médio para tempos de abertura do disjuntor iguais a 12 ciclos. Ainda, ressalta-se que, com tempo de abertura igual a 8 ciclos, os erros médios das respostas não apresentam discrepâncias significativas de desempenho, o que justifica a análise para esse tempo de abertura do disjuntor nas Subseções anteriores.

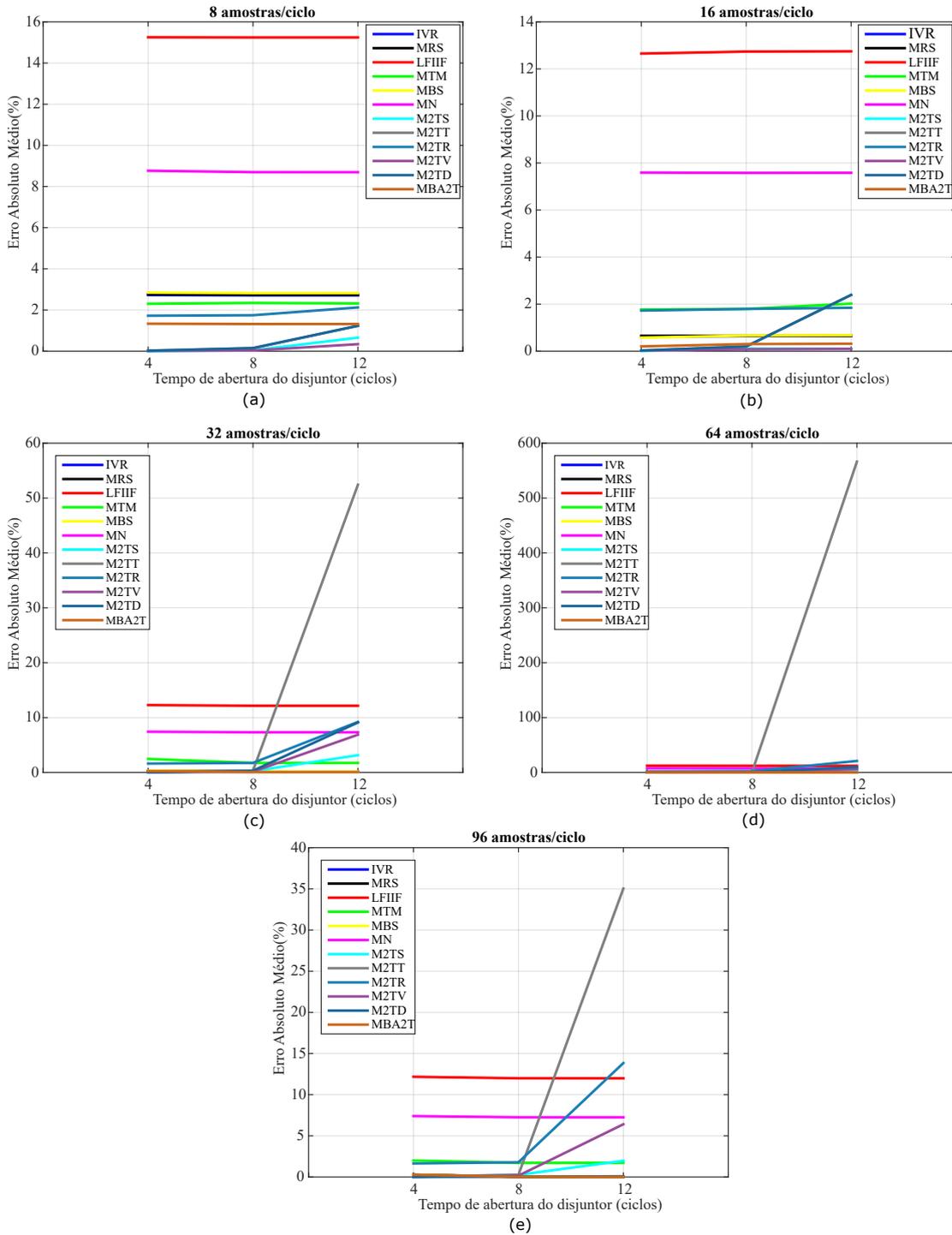
Por fim, foi feita uma análise do erro médio em função da taxa de amostragem, sendo esse erro calculado com base nos erros absolutos finais atingidos por cada técnica, indiferentemente do tipo de falta, para uma mesma amostragem e tempo de abertura do disjuntor. Os resultados referentes a essa análise podem ser vistos na Figura 26. A partir dessa Figura, pode-se perceber que o erro médio das estimações reduz com o aumento da taxa de amostragem, independentemente do tempo de abertura do disjuntos, exceto para a resposta do MTM em 32 amostras/ciclo, para um tempo de abertura do disjuntor de 4 ciclos. O mesmo é verificado para o M2TR em 64 amostras/ciclo e tempos de abertura do disjuntor iguais a 8 e 12 ciclos. Finalmente, destaca-se o comportamento do erro médio para o M2TT, o qual aumenta significativamente para amostragens de 32, 64 e 96 amostras/ciclo, com um tempo de abertura do disjuntor igual a 12 ciclos.

Figura 24 – Erro médio X tipo de falta.



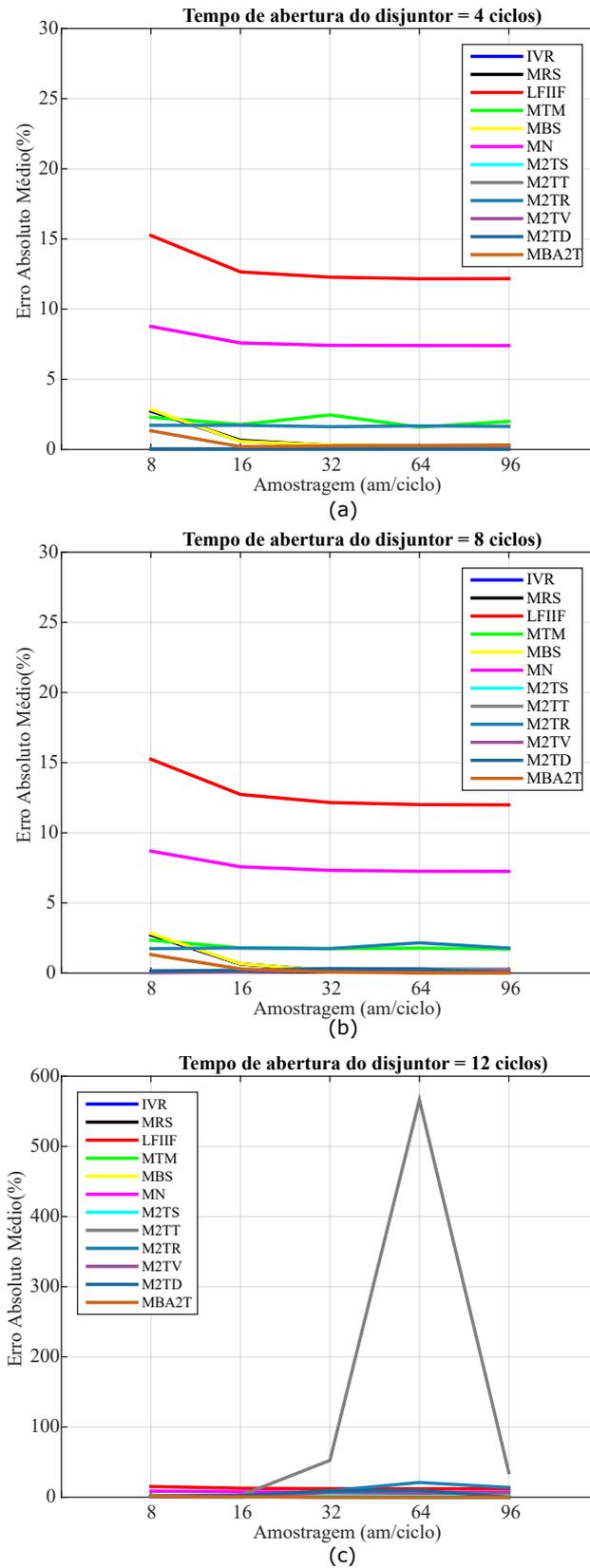
Fonte: Autora.

Figura 25 – Erro médio X tempo de abertura do disjuntor.



Fonte: Autora.

Figura 26 – Erro médio X taxa de amostragem.



Fonte: Autora.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresenta o desempenho de 12 metodologias para localização de faltas, sendo 11 propostas na literatura especializada e uma delas a adaptação para dois terminais de uma das técnicas existentes, inicialmente formulada para dados de um terminal, a qual foi proposta nesse Trabalho (MBA2T). Para tal, um banco de dados composto por sinais de corrente e tensão foi gerado a partir da simulação de curtos-circuitos em diferentes pontos de uma linha de transmissão. Essas simulações foram feitas para um sistema teste implementado no software ATPDraw, representando uma linha de transmissão com dois terminais e extensão de 100 km. Os sinais de tensão e corrente foram amostrados em diferentes taxas e tomados a partir de ambos os terminais da linha. Além disso, os LFs foram implementados no software Matlab[®] e foram submetidos ao processamento dos sinais do banco, resultando na estimação do local da falta. Os resultados foram avaliados em termos erro absoluto e do erro relativo da estimação referenciado ao local real da falta.

Tendo em vista os resultados, foi observado que o método M2TS apresenta melhor desempenho para faltas monofásicas e bifásicas, enquanto que o método MBA2T foi o melhor para faltas trifásicas, em amostragens de 32 e 64 amostras por ciclo, com o tempo de abertura do disjuntor igual a 8 ciclos. O mesmo foi verificado para as demais amostragens e tempos de abertura do disjuntor. Já os piores desempenhos foram verificados para o LFIIF em faltas monofásicas, para o MN em faltas bifásicas. Já para faltas trifásicas, o pior desempenho foi alternado entre o M2TS, M2TT e M2TD. O desempenho ruim desses métodos pode ser atribuído às considerações feitas na formulação dos mesmos.

Analisando o erro absoluto final atingido pelos LFs em relação à distância do ponto da falta, pôde-se concluir que este não varia muito com a taxa de amostragem para faltas monofásicas e bifásicas, sendo bastante aleatório para faltas trifásicas. O método LFIIF apresenta erro crescente de forma praticamente linear com o aumento da distância do ponto faltos em faltas monofásicas. Já para o MN, essa variação se dá de modo parabólico com concavidade para baixo, o que é característico de sua formulação quadrática. Outra observação destacável é o fato de que o M2TR, em 50% da LT e 64 amostras/ciclo aumenta seu erro absoluto de forma significativa e repentina. Além disso, para faltas bifásicas, o MN apresenta erro crescente com o aumento da distância do local do curto-circuito.

Também, o erro médio das estimações do local da falta foi analisado em termos do tipo de falta, do tempo de abertura do disjuntor e da taxa de amostragem. Assim, em função do tempo de abertura do disjuntor, pôde-se concluir que o erro médio é reduzido com o aumento do número de fases envolvidas na falta. Uma exceção a isto é o comportamento apresentado pelo M2TT, o qual tem seu erro aumentado quando o referido parâmetro é igual a 12 ciclos.

Ainda, no que diz respeito ao desempenho do erro médio em função do tempo

de abertura do disjuntor, foi possível verificar que esse parâmetro não sofre alterações significativas de 4 para 8 ciclos. Entretanto, os métodos M2TT, M2TD, M2TV e M2TS sofrem incremento significativo do erro médio para abertura do disjuntor em 12 ciclos.

Com relação ao comportamento do erro médio em função da taxa de amostragem, concluiu-se que esse parâmetro reduz com o aumento da amostragem para a maioria dos métodos, independentemente do tempo de abertura do disjuntor. No entanto, para um tempo de abertura de 4 ciclos, o LFIIF tem seu erro médio aumentado, assim como o M2TR para 64 amostras/ciclo e aberturas do disjuntor de 8 e 12 ciclos. Também, foi verificado que o erro médio do M2TT aumenta significativamente para as amostragens de 32, 64 e 96 amostras/ciclo, com tempo de abertura do disjuntor igual a 12 ciclos.

Por fim, ressalta-se que, embora a diferença entre os desempenhos seja pequena na maioria dos casos e que em alguns poucos casos houveram grandes divergências, ainda assim pode-se afirmar que os métodos MBS, M2TS e MBA2T apresentam maior robustez para a maioria dos casos, enquanto que o MN e o M2TT apresentam os maiores problemas em relação a estimação do local da falta. Sendo assim, dado o desempenho atingido pela metodologia proposta, acredita-se que esta ferramenta possa auxiliar as equipes de manutenção como localizador de falta, melhorando assim a confiabilidade e disponibilidade das linhas de transmissão.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para a continuação deste Trabalho, citam-se:

- Implementar outras metodologias para localização de faltas;
- Testar os LFs com filtros para extração da componente DC;
- Testar os métodos frente a curtos-circuitos envolvendo resistência de falta;
- Testar os LFs associados a metodologias para classificação de faltas;
- Implementar técnicas fundamentadas em ondas viajantes e
- Propor novas metodologias de localização de falta.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, R. et al. A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 3, p. 874–883, 1993. Citado na página 27.
- BRETAS, A. S.; SALIM, R. H. A new fault location technique for distribution feeders with distributed generation. *WSEAS Transactions on Power Systems*, WSEAS Press, v. 1, n. 5, p. 894, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 27, 47, 50, 57 e 58.
- DAS, S. et al. Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, IEEE, v. 2, p. 537–557, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 56.
- ERIKSSON, L.; SAHA, M. M.; ROCKEFELLER, G. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 2, p. 423–436, 1985. Citado na página 26.
- GIRGIS, A. A.; HART, D. G.; PETERSON, W. L. A new fault location technique for two-and three-terminal lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 98–107, 1992. Citado na página 27.
- GOPALAKRISHNAN, A. et al. Fault location using the distributed parameter transmission line model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 15, n. 4, p. 1169–1174, 2000. Citado na página 27.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power system relaying*. [S.l.: s.n.]. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power system relaying*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. v. 22. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 36.
- IEEE. IEEE guide for determining fault location on ac transmission and distribution lines. *IEEE Std C37.114-2014*, IEEE, p. 1–36, 2014. Citado 8 vezes nas páginas 39, 40, 41, 43, 44, 47, 49 e 58.
- JOHNS, A.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. In: IET. *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. [S.l.], 1990. v. 137, n. 6, p. 395–402. Citado na página 27.
- KEZUNOVIC, M.; PERUNICIC, B. Automated transmission line fault analysis using synchronized sampling at two ends. In: IEEE. *Power Industry Computer Application Conference, 1995. Conference Proceedings., 1995 IEEE*. [S.l.], 1995. p. 407–413. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- KEZUNOVIC, M.; PERUNICIC, B. Synchronized sampling improves fault location. *IEEE Computer Applications in Power*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 30–33, 1995. Citado na página 27.
- KEZUNOVIC, M.; PERUNICIC, B.; MRKIC, J. An accurate fault location using synchronized sampling at two ends of a transmission line. In: *Applications of Synchronized Phasors Conference*. [S.l.: s.n.], 1993. Citado na página 27.
- KINDERMANN, G. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência-volume 1*. 2ª. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 35.

- LEWIS, J. *Protective relaying: principles and applications*. [S.l.]: CRC Press, 2007. Citado na página 32.
- LUO, S.; KEZUNOVIC, M.; SEVICK, D. R. Locating faults in the transmission network using sparse field measurements, simulation data and genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 71, n. 2, p. 169–177, 2004. Citado na página 28.
- NOVOSEL, D. et al. Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 1728–1736, 1996. Citado na página 28.
- NOVOSEL, D. et al. *System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads*. [S.l.]: Google Patents, 1998. US Patent 5,839,093. Citado 5 vezes nas páginas 27, 47, 50, 51 e 52.
- NOVOSEL, D. et al. Accurate fault location using digital relays. In: *Proc. of the IICPST Conference*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 1120–1124. Citado na página 27.
- PHILIPPOT, L.; MAUN, J. et al. An application of synchronous phasor measurement to the estimation of the parameters of an overhead transmission line. *Fault Disturbance Analysis & Precise Measurements in Power Systems*, 1995. Citado na página 27.
- RADOJEVIĆ, Z. et al. New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. In: *International Conference on Power System Transients Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 5 vezes nas páginas 28, 48, 55, 56 e 57.
- ROBERTS, J. et al. $Z = v/i$ does not make a distance relay. In: *Schweitzer engineering laboratories, inc. Pullman, Washington. 20th Annual Western Protective Conference*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 19–21. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.
- SAHA, M. et al. A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 789–797, 1999. Citado na página 27.
- SANT, M.; PAITHANKAR, Y. Online digital fault locator for overhead transmission line. In: *IET. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. [S.l.], 1979. v. 126, n. 11, p. 1181–1185. Citado 3 vezes nas páginas 26, 47 e 48.
- SCHWEITZER, E. O. Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information. *Computers & electrical engineering*, Elsevier, v. 10, n. 4, p. 269–278, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 26, 47 e 49.
- SRINIVASAN, K.; JACQUES, A. S. A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 4, n. 3, p. 1676–1682, 1989. Citado na página 26.
- STRINGFIELD, T.; MARIHART, D.; STEVENS, R. Fault location methods for overhead lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 76, n. 3, p. 518–529, 1957. Citado na página 26.
- TAKAGI, T. et al. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power apparatus and systems*, IEEE, n. 8, p. 2892–2898, 1982. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 47 e 49.

TZIOUVARAS, D. A.; ROBERTS, J. B.; BENMOUYAL, G. New multi-ended fault location design for two-or three-terminal lines. In: IET. *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE)*. [S.l.], 2001. p. 395–398. Citado 4 vezes nas páginas 28, 48, 53 e 55.

VIEIRA, D. A.; OLIVEIRA, D. B.; LISBOA, A. C. A closed-form solution for untransposed transmission-lines fault location with nonsynchronized terminals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 28, n. 1, p. 524–525, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 28, 48 e 57.