

Técnica de localização de faltas em linhas de transmissão empregando o método dos mínimos quadrados**Transmission line fault location technique using the least squares method**

DOI:10.34117/bjdv5n7-203

Recebimento dos originais: 14/06/2019

Aceitação para publicação: 31/07/2019

Gustavo Vinícius Duarte Barbosa

Mestre em Engenharia Elétrica pela UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
Instituição: Cindacta 1, Comando da Aeronáutica, DTCEA - Destacamento de Controle do Espaço
Aéreo - Confins

Endereço: Aeroporto Internacional de Confins km 9 s/n, LMG-800, 7, Confins – MG, Brasil
E-mail: gustavogvdb@fab.mil.br

Clever Sebastião Pereira Filho

Doutor em Engenharia Elétrica pela UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituição: UFMG - LRC - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas
Atmosféricas

Endereço: Avenida Presidente Antônio Carlos 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG, Brasil
E-mail: clever@ppgee.ufmg.br

Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho

Doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica

Instituição: UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto - Campus João Monlevade
Endereço: Rua 36, 115, Loanda, João Monlevade – MG, Brasil
E-mail: f_baracho@yahoo.com.br

José Ronaldo Tavares Santos

Mestre em Engenharia em Gestão de Processos e Sistemas pelo IETEC - Instituto de Educação
Tecnológica

Instituição: Centro Universitário UNA - Cidade Universitária UNA Aimorés
Endereço: Rua Aimorés, 1451, Lourdes, Belo Horizonte – MG, Brasil
E-mail: jose.tavares@prof.una.br

Laerty João dos Santos Damião

Graduando em Engenharia Elétrica pela UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto
Instituição: UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto - Campus João Monlevade
Endereço: Rua 36, 115, Loanda, João Monlevade – MG, Brasil
E-mail: laertyjs@gmail.com

RESUMO

A investigação de diferentes tipos de faltas em linhas de transmissão é uma tarefa complexa e de extrema importância para o Sistema Elétrico de Potência (SEP). A modelagem da linha de transmissão deve ser estabelecida da forma mais rigorosa possível, visando à precisão das distâncias de faltas simuladas a partir dos modelos levantados. Neste trabalho será modelada uma linha de transmissão em circuito simples usando o programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATPDraw® e, posteriormente, o algoritmo de localização de falta baseado no emprego do método dos mínimos quadrados será implementado no MATLAB®. O desempenho do método será discutido em termos de precisão e robustez dos resultados.

Palavras-chaves: Localização de Faltas – Linha de Transmissão (LT) – ATPDraw® – Mínimos Quadrados.

ABSTRACT

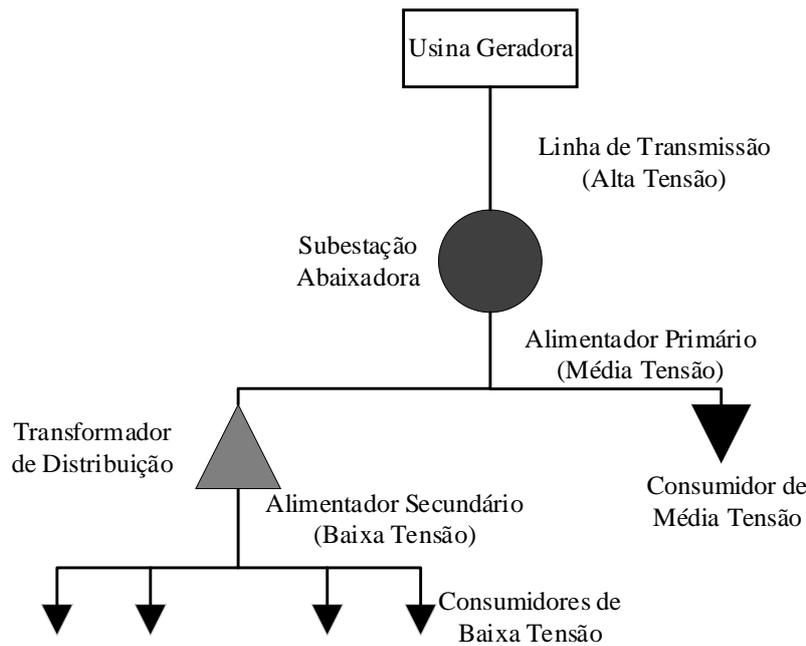
The investigation of different types of faults in transmission lines is a complex and extremely important task for the Electric Power System (EPS). The modeling of the transmission line should be established as rigorously as possible, aiming at the accuracy of simulated fault distances from the models surveyed. In this work, a simple circuit transmission line will be modeled using the ATPDraw® electromagnetic transient program, and later the fault localization algorithm based on the use of the least squares method will be implemented in MATLAB®. The performance of the method will be discussed in terms of accuracy and robustness of the results.

Keywords: Fault location – Transmission Line (TL) - ATPDraw® - Least Squares.

1 INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência é composto de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Uma ilustração do seu uso é mostrada na Figura 1. As linhas de transmissão se destinam a transmitir o bloco de energia gerada nas usinas até os grandes centros de carga que estão localizados a quilômetros de distância. O rápido crescimento dos sistemas elétricos de potência ao longo das últimas décadas resultou em um expressivo aumento do número de linhas de transmissão em operação e no aumento do comprimento dessas linhas (PARMAR,2015).

Figura 1 – Esquema básico de um sistema de transmissão de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

As linhas de transmissão e de distribuição sofrem falhas devidas às tempestades, descargas atmosféricas, neve, chuva, falhas de isolamento e falhas causadas por curtos circuitos provocados por pássaros, galhos de árvores e outros objetos externos. Na maioria dos casos, as falhas elétricas acarretam danos mecânicos, os quais devem ser reparados antes do retorno da linha à sua operação normal. Qualquer falha, se não for detectada rapidamente, poderá se propagar pelo sistema causando interrupções generalizadas e até mesmo apagões subsequentes.

Neste trabalho, o método dos mínimos quadrados será utilizado para determinação da distância de falta e a abordagem adotada será discutida no que tange à precisão e à robustez dos resultados. Na implementação do método em epígrafe serão utilizados dados provenientes dos dois terminais da LT. Esses dados serão oriundos de simulações no ATPDraw®, através da modelagem de uma linha de transmissão em circuito simples.

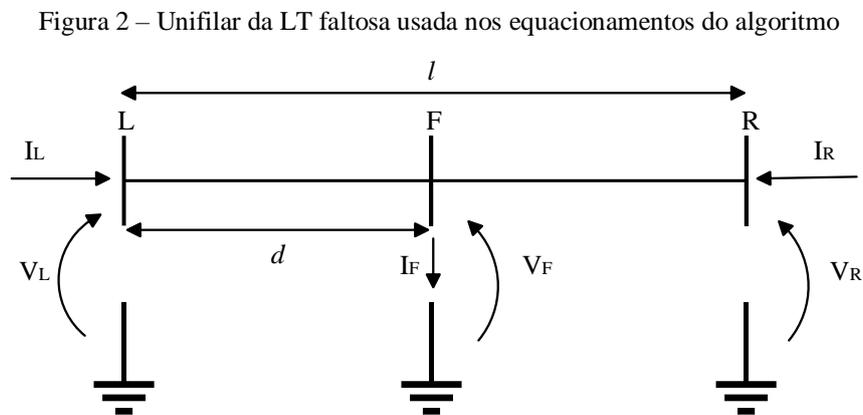
2 METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM LT UTILIZANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

A equação que fornece a distância de falta a ser desenvolvida na próxima seção baseou-se no método de mínimos quadrados. Por conseguinte, esta seção destina-se a fazer uma breve introdução desse método, buscando ilustrar a fundamentação matemática que resultou na equação outrora mencionada.

O método de mínimos quadrados é um dos mais conhecidos e mais utilizados nas mais diversas áreas de ciência e tecnologia. A origem da ideia básica pode ser encontrada nos trabalhos de Gauss sobre estudos astronômicos (AGUIRRE, 2004).

2.1 A LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE FALTA

Serão demonstrados, na presente seção, os princípios concernentes à técnica de localização de faltas usando os fasores fundamentais de tensão e corrente trifásicos coletados de dois terminais da linha de transmissão, conforme abordado em Girgis *et al* (1992), baseando-se no equacionamento de tensões e correntes no ponto de ocorrência da falta e fazendo uso da matriz de impedância série da LT. Na apresentação será considerada a LT descrita na Figura 2.



Fonte: Adaptado de Girgis *et al.*, 1992

Estando sincronizados os fasores trifásicos de tensão e corrente nos barramentos L e R, os vetores trifásicos de tensão podem ser representados em função dos vetores de corrente da seguinte maneira:

$$[V_F] = [V_L] - d[Z_{a,b,c}] [I_L] \quad (1)$$

$$[V_F] = [V_R] - (\ell - d) \cdot [Z_{a,b,c}] \cdot [I_R] \quad (2)$$

Igualando-se (1) e (2),

$$[V_L] - [V_R] + \ell \cdot [Z_{a,b,c}] \cdot [I_R] = d \cdot [Z_{a,b,c}] \cdot ([I_R] + [I_L]) \quad (3)$$

Equação (3) pode ser expressa da seguinte maneira:

$$Y = M \cdot d \quad (4)$$

$$Y = [V_L] - [V_R] + \ell \cdot [Z_{a,b,c}] \cdot [I_R] \quad (5)$$

$$M = [Z_{a,b,c}] \cdot ([I_R] + [I_L]) \quad (6)$$

Com o uso do método dos mínimos quadrados pode-se descobrir o valor da incógnita **d** em (4):

$$d = (\overline{M}^T \cdot M)^{-1} \cdot \overline{M}^T \cdot Y \quad (7)$$

Sendo \overline{M}^T a transposta da matriz M com os seus elementos conjugados, $[V_R]$ e $[I_R]$ os vetores de tensão e corrente trifásicos fundamentais coletados no terminal remoto da LT, $[V_L]$ e $[I_L]$ os vetores de tensão e corrente trifásicos fundamentais medidos no terminal local da linha, $[Z_{a,b,c}]$ a matriz de impedância série da LT e **d** a distância de falta. Por conseguinte, o método em epígrafe adota cálculos simples, não sendo influenciado por fatores como ângulos de incidência da falta, tipos de faltas e resistências de falta. Destarte, o método não considera a capacitância da linha e, portanto, a sua aplicação só é aceitável com níveis de precisão satisfatórios em linhas curtas, onde o efeito capacitivo pode ser desprezado. O valor da distância encontrado, **d**, é um número complexo, onde se considera somente a parte real desse número.

Conforme explicado em Aguirre (2004), a matriz $(\overline{M}^T \cdot M)^{-1} \cdot \overline{M}^T$ é a matriz de mínimos quadrados, também denominada de matriz pseudo-inversa.

2.2 O MODELO DA LT EMPREGADO NA SIMULAÇÃO NO ATPDRAW®

Os dados altimétricos de uma linha de transmissão são fundamentais na análise do seu desempenho. O comportamento de uma linha de transmissão é dependente quase que exclusivamente de suas características físicas, determinando o seu comportamento em regime normal e sua resposta dinâmica quando submetida às sobretensões (STEVENSON, 1982). Dessa maneira, as especificações dos cabos que constituem o sistema e as configurações da torre de transmissão devem ser fornecidas ao software.

2.2.1 As características físicas da LT modelada no ATPDraw®

As dados altimétricos e demais características físicas da linha de transmissão modelada no ATPDraw® para o estudo da aplicabilidade do algoritmo de localização de faltas são detalhadas a seguir:

Condutores de fase: Cabo Grosbeak

- a) Raio externo do condutor: 1,2573 cm;
- b) Resistência em corrente contínua: 0,0913 Ω/km

Cabos para-raios: EHS 3/8"

- a) Raio externo do condutor: 0,47625 cm;
- b) Resistência em corrente contínua: 3,913 Ω /km

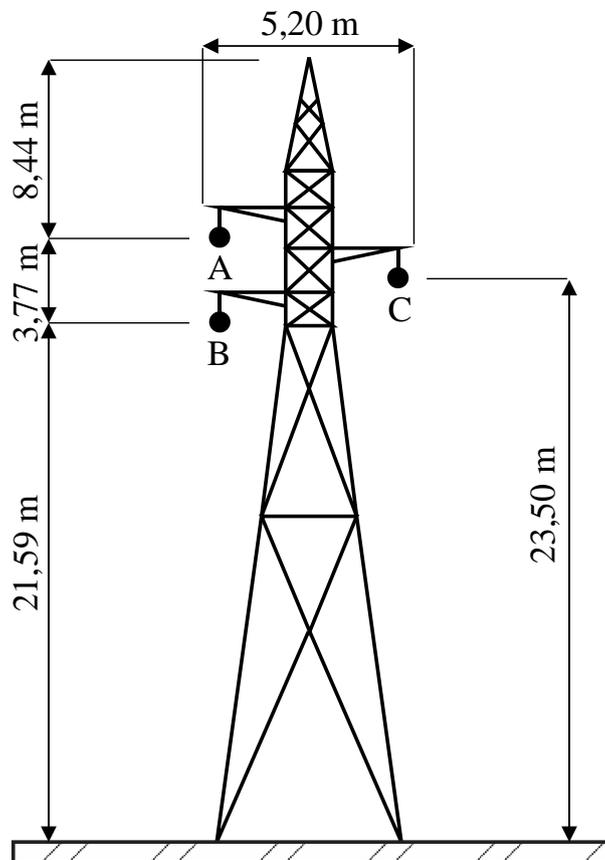
Flecha a meio vão:

- a) Fase A: 11,360 m Fase B: 7,585 m Fase C: 9,500 m
- b) Para-raios: 17,800 m

Resistividade do solo: 250 Ω .m

A Figura 3 ilustra a silhueta da LT utilizada na modelagem e o posicionamento relativo dos condutores.

Figura 3 – Silhueta da LT empregada na modelagem do SEP



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Figura 4 – Parâmetros do Modelo da LT no ATPDraw®

Line/Cable Data

Model | Data

System type
 #Ph:

Transposed
 Auto bundling
 Skin effect
 Segmented ground
 Real transf. matrix

Standard data
 Rho [ohm*m]
 Freq. init [Hz]
 Length [km]

Units
 Metric
 English

Model
 Type
 Bergeron
 PI
 JMarti
 Semlyen
 Noda

Data
 Printed output [C] print out
 Output Z
 [Z] [Z]-1
 [Ze] [Ze]-1
 [Zs] [Zs]-1
 Output C
 [C]-1 [C]
 [Ce]-1 [Ce]
 [Cs]-1 [Cs]

Comment: Order: Label: Hide

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Fonte: Simulação no ATPDraw®, 2019.

Figura 5 – Dados Altimétricos da LT Modelada no ATPDraw®

Line/Cable Data

Model | Data

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0	1.2573	0.0913	-2.6	25.36	14
2	2	0	1.2573	0.0913	-2.6	2.59	14
3	3	0	1.2573	0.0913	2.6	23.50	14
4	0	0	0.47625	3.913	0	33.8	16

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Fonte: Simulação no ATPDraw®, 2019.

As Figuras 4 e 5 ilustram a entrada de dados do modelo de LT empregado na simulação no ATPDraw®.

2.2.2 O Cálculo dos Parâmetros da LT

O algoritmo de localização abordado neste trabalho utiliza a matriz de impedância série da LT para a determinação da distância de falta. Visando obter a matriz de impedância série, a sub-rotina Line Constants do ATPDraw® foi executada com uma frequência de operação de 60 Hz, fornecendo o seguinte resultado:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0,1895656 + j \cdot 0,8716764 & 0,09064471 + j \cdot 0,3723912 & 0,0959934 + j \cdot 0,2956957 \\ 0,0988669 + j \cdot 0,3412067 & 0,1780013 + j \cdot 0,8758379 & 0,0900291 + j \cdot 0,3623730 \\ 0,0962395 + j \cdot 0,3984308 & 0,0900291 + j \cdot 0,3623730 & 0,1880962 + j \cdot 0,872209 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

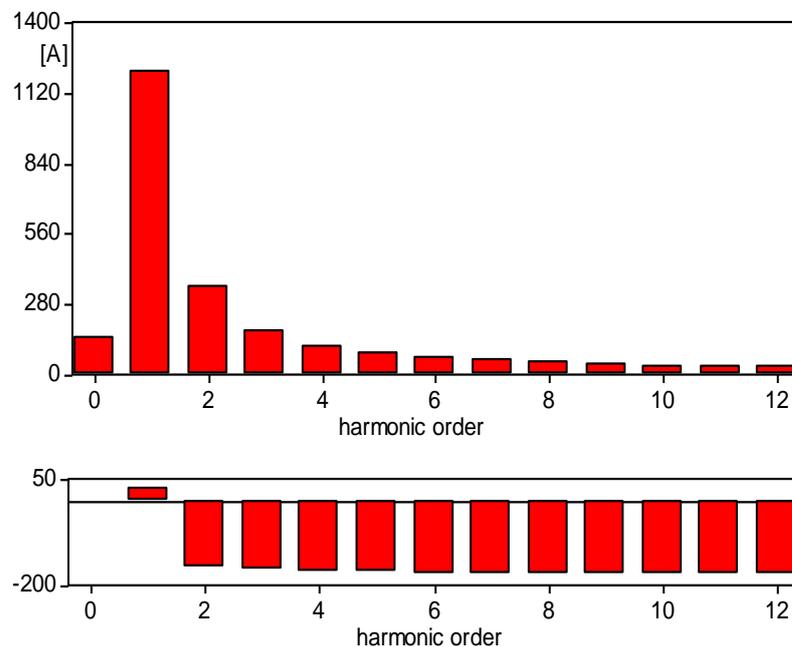
Os vetores $[V_R]$ e $[I_R]$ de tensões e correntes trifásicas fundamentais são obtidos a partir do recurso de análise de Fourier do ATPDraw®, fornecendo o módulo e a fase da frequência fundamental das tensões e correntes pós-falta, conforme ilustrado na Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Análise de Fourier no ATPDraw®

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 19/03/2018

File curto_teste2.pl4 Variable c:X0022A-X0024A [rms]

Initial Time: 0,18 Final Time: 0,2



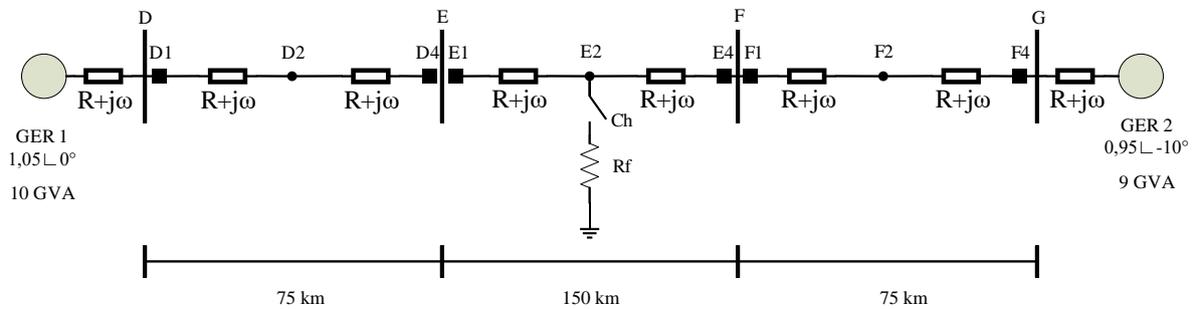
Fonte: Simulação no ATPDraw®, 2019.

2.2.3 A Simulação de Faltas no Programa ATPDraw®

Na Figura 7 é apresentado o diagrama elétrico da LT modelada no ATPDraw®. Nessa figura pode-se observar a configuração dos barramentos, as especificações dos geradores em p.u, as

impedâncias dos trechos da LT, os nós que definem as conexões dos elementos, a chave e a resistência de falta que foram usadas na modelagem das situações de faltas abordadas nos testes do algoritmo de localização tratado neste trabalho.

Figura 7 – Diagrama elétrico simulado para o estudo de casos de faltas



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Para os geradores do sistema consideraram-se os valores de amplitude eficaz da forma de onda da tensão gerada e o ângulo de geração, conforme as especificações consubstanciadas na Figura 7. A tensão nominal de cada gerador foi obtida considerando uma tensão base de 138 kV na conversão de valores em pu.

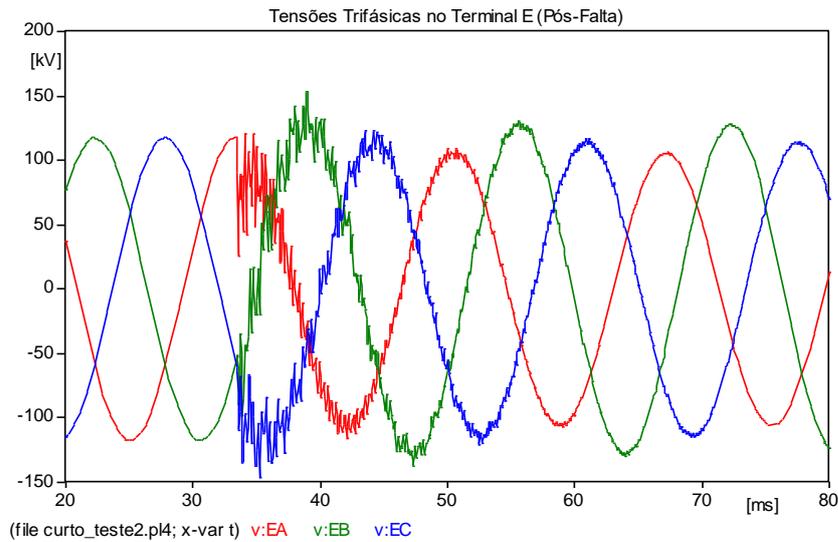
3 RESULTADOS DOS TESTES

Os testes realizados com o algoritmo de localização de faltas serão apresentados neste capítulo. O algoritmo foi implementado conforme os princípios detalhados no seção 2.1 usando a linguagem MATLAB® e os testes foram efetuados com os dados oriundos das simulações de casos de faltas utilizando o programa ATPDraw® para o modelo de LT mostrado na subseção 2.3.3.

O algoritmo de localização de faltas abordado neste trabalho usa sinais de tensão e correntes adquiridos de dois terminais para a determinação da distância de falta. Esses sinais foram obtidos por meio de simulações de faltas implementadas através do programa ATPDraw®, no sistema descrito nas seções anteriores. As Figuras 8 e 9, por exemplo, ilustram os sinais de tensões e correntes do terminal E obtidos com o ATPDraw® para uma falta do tipo fase A-terra, situada a 15 km desse mesmo terminal, com resistência de falta igual a 50 Ω. Considerou-se nos testes do algoritmo faltas com as seguintes variações:

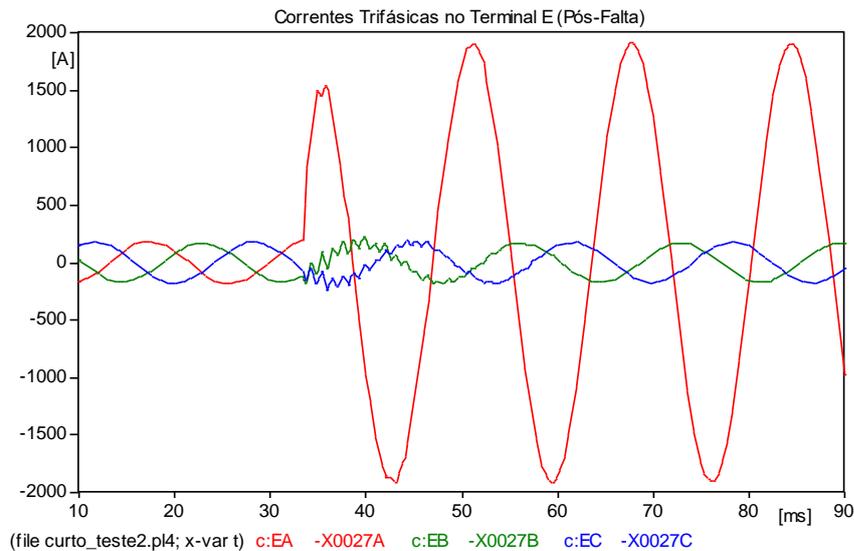
- Faltas do tipo fase A-terra, fases BC-terra, fases BC e faltas trifásicas;
- Resistências de falta de 0 Ω, 10 Ω, 25 Ω, 50 Ω, 150 Ω e 200 Ω ;
- Distâncias de 15 km, 30 km, 75 km e 135 km em relação ao terminal E da linha; e
- Ângulos de incidência de 0° e 90°.

Figura 8 – Sinais de tensões provenientes do terminal E obtidos através de simulações no ATPDraw® para uma falta do tipo fase A-terra situada a 15 km desse terminal, com resistência de 50 Ω e ângulo de incidência de 90°



Fonte: Simulação no ATPDraw®, 2019.

Figura 9 – Sinais de corrente provenientes do terminal E obtidos através de simulações no ATPDraw® para uma falta do tipo fase A-terra situada a 15 km desse terminal, com resistência de 50 Ω e ângulo de incidência de 90°



Fonte: Simulação no ATPDraw®, 2019.

O algoritmo implementado no MATLAB® calcula a distância do ponto de falta usando (4), (5), (6) e (7) e a impedância série da LT calculada através do ATPDraw®. Os resultados apresentados levaram em conta as variações quanto à resistência de falta e ângulo de incidência. Os testes foram efetuados considerando uma taxa de amostragem de 2 kHz. As tabelas a seguir demonstram os valores auferidos nos testes realizados com o algoritmo de localização de faltas abordado neste trabalho.

TABELA 1 – Os resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fase A-terra com ângulo de incidência de 90° e frequência de amostragem de 2kHz

Resistência Ω	Distância (km)	Distância Estimada (km)	Classificação da Falta	Erro (%)
0	15	14,52	Fase A-terra	0,32
0	30	29,3	Fase A-terra	0,47
0	75	74,62	Fase A-terra	0,26
0	135	134,75	Fase A-terra	0,17
10	15	14,66	Fase A-terra	0,23
10	30	29,64	Fase A-terra	0,24
10	75	74,65	Fase A-terra	0,24
10	135	134,66	Fase A-terra	0,23
25	15	14,67	Fase A-terra	0,22
25	30	29,73	Fase A-terra	0,18
25	75	74,6	Fase A-terra	0,27
25	135	134,46	Fase A-terra	0,36
50	15	14,94	Fase A-terra	0,05
50	30	29,96	Fase A-terra	0,03
50	75	74,46	Fase A-terra	0,37
50	135	133,87	Fase A-terra	0,76
100	15	15,36	Fase A-terra	0,24
100	30	30,32	Fase A-terra	0,22
100	75	74,26	Fase A-terra	0,5
100	135	133,07	Fase A-terra	1,29
150	15	15,76	Fase A-terra	0,51
150	30	30,54	Fase A-terra	0,36
150	75	74,03	Fase A-terra	0,65
150	135	132,24	Fase A-terra	1,84
200	15	16,14	Fase A-terra	0,76
200	30	30,83	Fase A-terra	0,56
200	75	73,86	Fase A-terra	0,76
200	135	131,57	Fase A-terra	2,29

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

TABELA 2 – Os resultados obtidos com o algoritmo de localização de faltas para faltas fases BC-terra com ângulo de incidência de 90° e frequência de amostragem de 2kHz

Resistência Ω	Distância (km)	Distância Estimada (km)	Classificação da Falta	Erro (%)
0	15	16,47	Fase BC-terra	0,98
0	30	31,15	Fase BC-terra	0,77
0	75	74,91	Fase BC-terra	0,07
0	135	133,74	Fase BC-terra	0,84
10	15	16,68	Fase BC-terra	1,12
10	30	31,23	Fase BC-terra	0,82
10	75	74,84	Fase BC-terra	0,11
10	135	133,27	Fase BC-terra	1,16
25	15	16,74	Fase BC-terra	1,16
25	30	31,37	Fase BC-terra	0,92
25	75	75,08	Fase BC-terra	0,06
25	135	133,22	Fase BC-terra	1,19
50	15	17,06	Fase BC-terra	1,38
50	30	31,57	Fase BC-terra	1,05
50	75	75,12	Fase BC-terra	0,09
50	135	133,31	Fase BC-terra	1,13
100	15	17,74	Fase BC-terra	1,83
100	30	32,04	Fase BC-terra	1,36
100	75	75,08	Fase BC-terra	0,06
100	135	133,14	Fase BC-terra	1,25
150	15	17,77	Fase BC-terra	1,85
150	30	32,09	Fase BC-terra	1,4
150	75	75,13	Fase BC-terra	0,09
150	135	133,15	Fase BC-terra	1,24
200	15	17,78	Fase BC-terra	1,86
200	30	32,18	Fase BC-terra	1,46
200	75	75,16	Fase BC-terra	0,11
200	135	132,66	Fase BC-terra	1,56

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

4 CONCLUSÕES

Conforme o capítulo anterior, onde foram apresentados os resultados dos testes efetuados, é possível observar que o algoritmo abordado apresentou uma boa precisão na localização dos casos de falta simulados. Mesmo em situações que envolviam altas resistências de falta (150 Ω e 200 Ω), o algoritmo manteve uma precisão satisfatória, tornando essa característica especial, já que a localização de faltas com valores de impedância relativamente elevados apresenta-se como um transtorno para as concessionárias de energia elétrica, uma vez que os efeitos desses tipos de falta no sistema muitas vezes não são detectados pelos dispositivos de proteção.

Para os casos simulados no ATPDraw®, o algoritmo não apresentou influência de fatores como localização do ponto de ocorrência da falta ao longo da LT, resistência de falta, ângulo de incidência e taxa de amostragem envolvida. Essa característica é um diferencial desta abordagem em relação aos algoritmos que utilizam componentes fundamentais de sinais de tensão e corrente de

somente um terminal da LT na estimação do ponto da falta. Geralmente, tais algoritmos apresentam uma grande influência da posição do ponto de ocorrência da falta em seus resultados, apresentando maiores imprecisões quando a falta ocorre em posições da linha mais distantes do terminal de medição. A resistência de falta é outro fator que influencia na precisão dessa metodologia, onde erros maiores são obtidos para faltas que envolvem resistências mais elevadas.

Finalmente, características como simplicidade do algoritmo e confiabilidade demonstrados através da avaliação dos resultados obtidos são importantes e viabilizam a implementação prática em um hardware computacional. Como continuidade e aprimoramento deste trabalho, propõem-se a realização de testes considerando as influências da capacidade de curto-circuito das fontes envolvidas, do instante de detecção da falta no processo de localização e do sincronismo dos dados entre os dois terminais da LT. Ademais, uma proposta interessante seria a de utilizar a metodologia descrita em linhas com derivação e também circuito duplo.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução a identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2004.

A. A. Girgis, D. G. Hart, and W. L. Peterson, **A New Fault Location Technique For Two-and Three-Terminal Lines** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 98–107, January 1992.

ATPDraw, Dr. Hans Kr. Høidalen, SINTEF Energy Research – Norwegian University of Science and Technology.

MATLAB, User's Guides. Natick, USA: The MathWorks Inc.

PARMAR, S. Fault location algorithms for electrical power transmission lines - Methodology, design and testing. Intelligent electrical power grids - EWI, Delft, 8 July 2015.

STEVENSON, W Jr.; **Elements of Power System Analysis**. Fourth Edition, 1982.