

Artigo

Desempenho Entre os Algoritmos de Localização de Faltas Completo e Simplificado Para Linhas de Transmissão Com 3 Terminais e Parâmetros Elétricos Diferentes

Cleydson A. de C. Nascimento ^[1], Nikolas I. F. de Oliveira ^[2] e Iggor B. da Silva ^[3]

^[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; cleydson.adller@ifce.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nikolas.oliveira@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; iggor.silva@ufersa.edu.br

Recebido: 21/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: A linha de transmissão é o equipamento do sistema elétrico mais propício a uma falta elétrica. Com base nas condições difíceis de acesso a essas linhas, como o distanciamento das cidades e por possuir grandes dimensões, torna-se imprescindível localizar uma falta elétrica com precisão e rapidez. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre duas vertentes do Algoritmo de Girgis, Hart e Peterson (1992) para localizar uma falta elétrica: o modo completo e o simplificado. Para simular a linha de transmissão foi utilizado o *software* ATP® e os algoritmos foram desenvolvidos em um *software* voltado para cálculos numéricos. Os cenários de simulação levaram em consideração variações nos parâmetros resistivos e indutivos de alguns trechos da linha de transmissão, em busca da localização do ponto de falta e do respectivo erro de localização devido a essas modificações.

Palavras-chave: Localização de Faltas; Erros de Localização; Simulação Computacional

Abstract: The transmission line is the equipment of the electrical system most conducive to an electrical fault. Based on the difficult conditions of access to these lines, such as the distance from cities and because of its large dimensions, it is essential to locate an electrical fault accurately and quickly. The objective of this work is to carry out a comparative analysis between two aspects of the Girgis, Hart, and Peterson (1992) Algorithm to locate an electrical fault: the complete and the simplified model. To simulate the transmission line, the ATP® software was used and the algorithms were developed in software aimed at numerical calculations. The simulation scenarios took into account variations in the resistive and inductive parameters of some sections of the transmission line, in search of the location of the fault point and the respective location error due to these changes.

Key-words: Fault Location; Location Errors; Computational Simulation.

1. INTRODUÇÃO

A linha de transmissão é o componente do sistema elétrico responsável pelo transporte da energia da geração em direção as subestações, e conseqüentemente, aos consumidores. De acordo com [1], além de elemento intermediador, as linhas de transmissão garantem a estabilidade e confiabilidade da rede elétrica.

No Brasil, os investimentos nas linhas de transmissão se apresentam no Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029), que trata das estratégias para o desenvolvimento energético no decênio 2019-2029. O PDE 2029 prevê um acréscimo de 56 mil quilômetros de novas linhas (totalizando 204 mil quilômetros de extensão) e conseqüentemente um investimento de R\$ 103,7 bilhões, sendo R\$ 73,6 bilhões em linhas de transmissão [1].

Ao avaliar os problemas que podem ocorrer em um sistema elétrico de transmissão, uma falta elétrica se apresenta como uma real preocupação. Isso acontece pois, durante esse sinistro, torna-se possível comprometer (totalmente ou parcialmente) o fornecimento dos blocos de energia elétrica para os consumidores finais.

Devidos a essas grandes extensões e a sua exposição (normalmente de forma aérea), a linha de transmissão torna-se um elemento passível de sofrer com faltas elétricas. Em números, [2] afirma que a linha aérea é o equipamento com maior probabilidade de ocorrência de uma falta, como exibido na Tabela 1.

TABELA 1. Probabilidade de ocorrência de falta nos equipamentos de um sistema elétrico

<i>Equipamentos do Sistema de Potência</i>	<i>Probabilidade de ocorrências</i>
Linhas Aéreas	50%
Cabos Subterrâneos	9%
Transformadores e reatores	10%
Geradores	7%
Disjuntores	12%
Transformadores de instrumento e equipamentos de controle	12%

Dessa forma, o estudo para localizar uma falta em uma linha de transmissão é altamente relevante, devido a ser o equipamento mais provável de ocorrer essa situação, além da própria natureza de uma falta elétrica que pode prejudicar a qualidade e continuidade do serviço elétrico.

Existem reais dificuldades para localizar uma falta elétrica em linhas de transmissão, devido as suas grandes extensões e estarem localizadas em locais com mobilidade comprometida. De acordo com [3], os autores abordam dificuldades em localizar uma falta utilizando o método convencional por patrulha ou helicóptero, além da lentidão em se obter uma localização correta devido ao deslocamento dos meios de transporte.

Com base nessas adversidades, o processamento digital de sinais se apresenta como solução na forma de impulsionar a construção de algoritmos computacionais. Esses algoritmos trabalham com dados discretos e com objetivos de determinar o local da falta de forma rápida e precisa. Dentre as diversas técnicas de localização de faltas dispostas na literatura, o algoritmo proposto por [4] se apresenta como uma técnica consolidada para localizações de faltas em diferentes topologias de rede.

Sendo assim, o presente trabalho se propõe utilizar-se do algoritmo proposto por [4] para três terminais e analisar o seu desempenho fazendo-se o uso do seu modo completo e simplificado, para trechos de linhas de transmissão com parâmetros elétricos diferentes. O objetivo torna-se em tirar conclusões sobre a precisão do método simplificado para variações de parâmetros elétricos em diferentes trechos de uma linha de transmissão.

2. ALGORITMO DE [4] PARA TRÊS TERMINAIS

O método de localização de faltas proposto por [4] utiliza dados sincronizados de tensão e corrente elétrica de três terminais (sendo eles os terminais S, R e P). Cada trecho de linha de transmissão (LS, LR e LP) são definidos e em quaisquer deles, pode ocorrer uma falta elétrica.

Além disso, por se tratar de trechos diferentes, cada um possui sua matriz de impedância série trifásica que dependem de seus parâmetros elétricos e representadas respectivamente por Z_S^{abc} , Z_R^{abc} e Z_P^{abc} . As medições de tensões e correntes elétricas em cada terminal são apresentadas através das expressões V_S^{abc} , V_R^{abc} , V_P^{abc} , I_S^{abc} , I_R^{abc} e I_P^{abc} . A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar do sistema analisado.

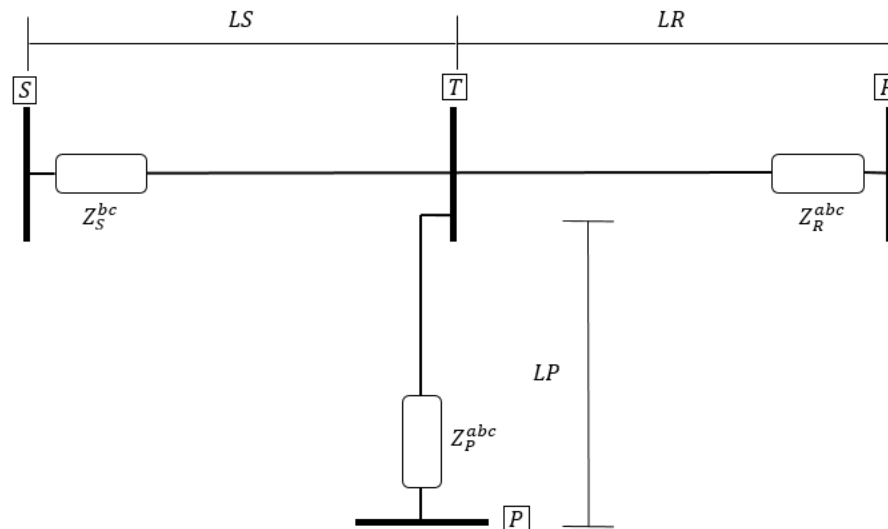


FIGURA 1. Sistema com três terminais de medição.

A técnica proposta desenvolve três equações trifásicas possíveis durante uma falta elétrica para o sistema analisado, na forma de encontrar equações que preencham o padrão $[Y]=[M]*D$, onde D é a distância da falta, $[Y]$ é a matriz que contém os termos trifásicos não dependentes da distância de falta e $[M]$ é a matriz que compreende os termos trifásicos dependentes da distância de falta.

Tendo conhecimento dos termos das matrizes trifásicas $[Y]$ e $[M]$, e utilizando um par das equações de falta, [4] propôs a solução de encontrar o ponto de falta (D) utilizando o método dos mínimos quadrados, como apresentado na Equação 1.

$$D=(M^+.M)^{-1}.M^+.Y \quad (1)$$

Onde: M^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M .

Torna-se possível também, utilizar outros dois pares diferentes de equações, obter as matrizes $[Y']$ e $[M']$, e utilizar novamente os mínimos quadrados para obter a solução do ponto de falta, através da Equação 2.

$$D'=(M'^+.M')^{-1}.M'^+.Y' \quad (2)$$

Onde: M'^+ é a matriz conjugada transposta da matriz M' .

Dessa forma, possibilita-se obter o ponto de falta através de qualquer uma das duas soluções encontradas (D e D'), visto que a solução do sistema é garantida. Em simulações computacionais percebe-se que esse par de respostas podem apresentar comportamentos diferentes (como velocidade de convergência e precisão) e dessa forma será analisado sempre os pares das respostas (D e D').

2.1. Algoritmo de [4] para uma modelagem completa

A descrição matemática para o algoritmo de [4] considerando os parâmetros elétricos individuais de cada trecho (LS , LR e LP) é apresentada em [5]. Para esse estudo, respeita-se as características elétricas dos trechos protegidos (Z_S^{abc} , Z_R^{abc} e Z_P^{abc}) podendo ser utilizado de forma mais genérica.

2.1.1. Falta elétrica em LS

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LS , como se mostra na Figura 2, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 3,4 e 5.

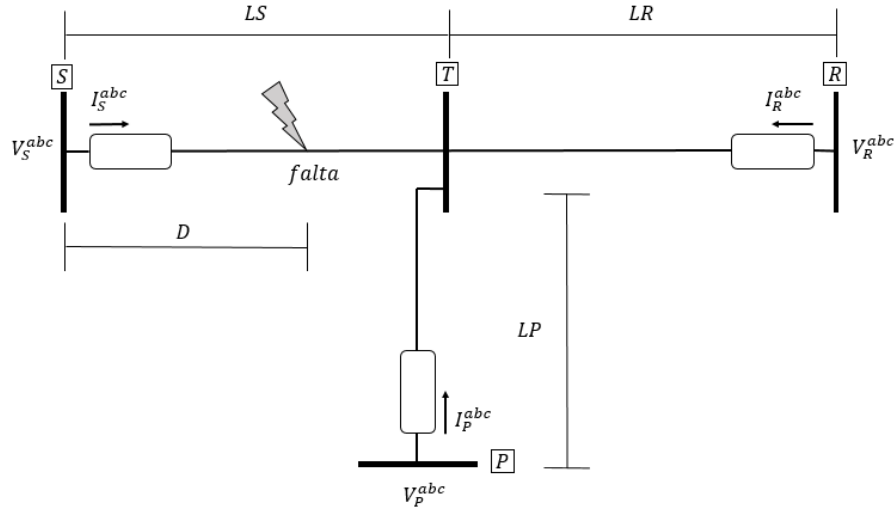


FIGURA 2. Falta elétrica ocorrida no trecho LS.

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - D \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} \quad (3)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - LR \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (LS - D) \cdot Z_S^{abc} \cdot (I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (4)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - LP \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} - (LS - D) \cdot Z_S^{abc} \cdot (I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (5)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 3 e 4, apresentando a Equação 6.

$$V_S^{abc} - V_R^{abc} + (LS \cdot Z_S^{abc} + LR \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_R^{abc} + Z_S^{abc} \cdot LS \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (6)$$

A Equação 6 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 7.

$$\begin{bmatrix} Y1_a \\ Y1_b \\ Y1_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (7)$$

Onde: $Y1_j = V_S^j - V_R^j + \sum_{k=a,b,c} (LS \cdot Z_S^{jk} + LR \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_R^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_S^{jk} \cdot I_P^k);$

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} Z_S^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k);$$

$$j=a,b,c \text{ e } k=a, b, c.$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 1.

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 3 e 5 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 8.

$$V_S^{abc} - V_P^{abc} + (LS \cdot Z_S^{abc} + LP \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_P^{abc} + Z_S^{abc} \cdot LS \cdot I_S^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (8)$$

A Equação 8 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 9,

$$\begin{bmatrix} Y2_a \\ Y2_b \\ Y2_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (9)$$

Onde: $Y2_j = V_S^j - V_P^j + \sum_{k=a,b,c} (LS \cdot Z_S^{jk} + LP \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_P^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_S^{jk} \cdot I_S^k);$

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} Z_S^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k);$$

$$j=a,b,c \text{ e } k=a, b, c.$$

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 2. Segundo [4], se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $D < LS$ e $D' < LS$.

2.1.2. Falta elétrica no trecho LR

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LR, como se mostra na Figura 3, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 10, 11 e 12.

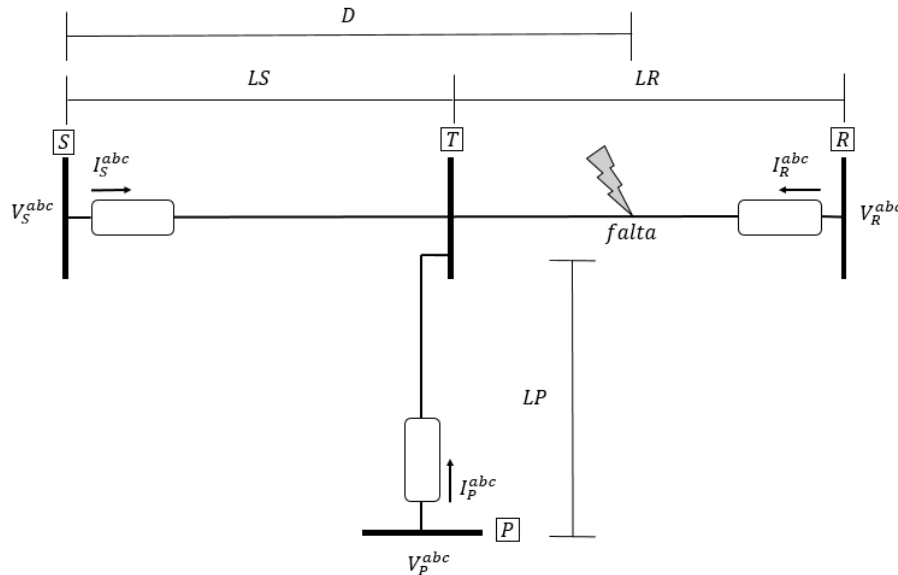


FIGURA 3. Falta elétrica ocorrida no trecho LR.

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - LS \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} - (D - LS) \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_P^{abc}) \quad (10)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - (LS + LR - D) \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} \quad (11)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - LP \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} - (D - LS) \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_P^{abc}) \quad (12)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 10 e 11, apresentando a Equação 13.

$$V_S^{abc} - V_R^{abc} + (-LS \cdot Z_S^{abc} + LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS + LR) \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} + LS \cdot Z_R^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_R^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (13)$$

A Equação 13 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 14.

$$\begin{bmatrix} Y3_a \\ Y3_b \\ Y3_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2_a \\ M2_b \\ M2_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (14)$$

Onde: $Y3_j = V_S^j - V_R^j + \sum_{k=a,b,c} (-LS \cdot Z_S^{jk} + LS \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_S^k + (LS + LR) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_R^k + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M2_j = \sum_{k=a,b,c} Z_R^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j = a, b, c$ e $k = a, b, c$.

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 1.

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 11 e 12 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 15.

$$V_P^{abc} - V_R^{abc} + (LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS+LR) Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (LP \cdot Z_P^{abc} - LS \cdot Z_R^{abc}) \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_S^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (15)$$

A Equação 15 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 16.

$$\begin{bmatrix} Y4_a \\ Y4_b \\ Y4_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M2_a \\ M2_b \\ M2_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (16)$$

Onde: $Y4_j = V_P^j - V_R^j + LS \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_S^k + (LS+LR) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_R^{jk}) \cdot I_R^k - \sum_{k=a,b,c} (LP \cdot Z_P^{jk} - LS \cdot Z_R^{jk}) \cdot I_P^k$;

$$M2_j = \sum_{k=a,b,c} Z_R^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k);$$

$$j=a,b,c \text{ e } k=a, b, c.$$

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 2. De acordo com [4], se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $LS < D < (LS+LR)$ e $LS < D' < (LS+LR)$.

2.1.3. Falta elétrica em LP

Caso ocorra uma falta no trecho que compreende LP, como se mostra na Figura 4, é possível encontrar 3 expressões que relacionem os fasores de cada terminal com a tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra as Equações 17, 18 e 19.

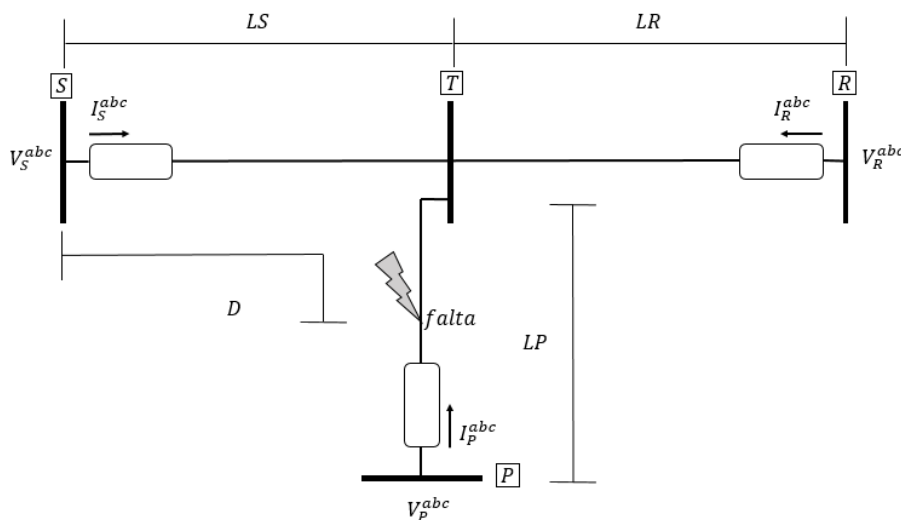


Figura 4. Falta elétrica ocorrida no trecho LP.

$$V_F^{abc} = V_S^{abc} - LS \cdot Z_S^{abc} \cdot I_S^{abc} - (D-LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (17)$$

$$V_F^{abc} = V_R^{abc} - LR \cdot Z_R^{abc} \cdot I_R^{abc} - (D-LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc}) \quad (18)$$

$$V_F^{abc} = V_P^{abc} - (LS+LP-D) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} \quad (19)$$

Com intuito de eliminar a tensão de falta (V_F^{abc}) que é desconhecida, iguala-se as Equações 17 e 19, apresentando a Equação 20.

$$V_S^{abc} - V_P^{abc} + (-LS \cdot Z_S^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_S^{abc} + (LS) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_R^{abc} + (LS+LP) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_P^{abc} \cdot (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (20)$$

A Equação 20 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 21.

$$\begin{bmatrix} Y5_a \\ Y5_b \\ Y5_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M3_a \\ M3_b \\ M3_c \end{bmatrix} \cdot D \quad (21)$$

Onde: $Y5_j = V_S^j - V_P^j + \sum_{k=a,b,c} (-LS \cdot Z_S^{jk} + LS \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_S^k + (LS) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_R^k + (LS+LP) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M3_j = \sum_{k=a,b,c} Z_P^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j=a,b,c$ e $k=a, b, c$.

A solução da expressão pode ser obtida utilizando o método dos mínimos quadrados, como é apresentada na Equação 1.

Seguindo a linha de raciocínio, iguala-se as Equações 18 e 19 para eliminar o valor desconhecido da tensão no ponto de falta (V_F^{abc}), como mostra a Equação 22.

$$V_R^{abc} - V_P^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc} \cdot I_S^{abc} + (-LR \cdot Z_R^{abc} + LS \cdot Z_P^{abc}) \cdot I_R^{abc} + (LS+LP) \cdot Z_P^{abc} \cdot I_P^{abc} = D \cdot Z_P^{abc} (I_S^{abc} + I_R^{abc} + I_P^{abc}) \quad (22)$$

A Equação 22 pode ser reescrita, em termos trifásicos, através da expressão contida na Equação 23.

$$\begin{bmatrix} Y6_a \\ Y6_b \\ Y6_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M3_a \\ M3_b \\ M3_c \end{bmatrix} \cdot D' \quad (23)$$

Onde: $Y6_j = V_R^j - V_P^j + (LS) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_S^k + \sum_{k=a,b,c} (-LR \cdot Z_R^{jk} + LS \cdot Z_P^{jk}) \cdot I_R^k + (LS+LP) \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_P^{jk}) \cdot I_P^k$;
 $M3_j = \sum_{k=a,b,c} Z_P^{jk} \cdot (I_S^k + I_R^k + I_P^k)$;
 $j=a,b,c$ e $k=a, b, c$

O método dos mínimos quadrados pode ser novamente aplicado, para se determinar o valor da localização de falta D' como é apresentada na Equação 2. É afirmado em [4] que se a falta ocorreu verdadeiramente no trecho, tem-se que $LS < D < (LS+LP)$ e $LS < D' < (LS+LP)$.

2.2. Algoritmo de [4] para uma modelagem simplificada

De forma a simplificar a análise, [4] apresenta processo de localização da falta ao considerar que todos os trechos de linha possuam parâmetros elétricos idênticos e consequentemente a mesma matriz de impedância trifásica (Z_{abc}).

Com esse artifício, um estudo que envolveria um método de localização para todos os percursos (LS, LR e LP) agora poderia ser resumido a uma análise trifásica unicamente para o trecho LS (Equações 7 e 9) e obedecendo um indicativo da simplificação apresentada na Figura 5. A limitação dessa simplificação é de que, em sua modelagem, não se leva em consideração linhas com parâmetros elétricos diferentes.

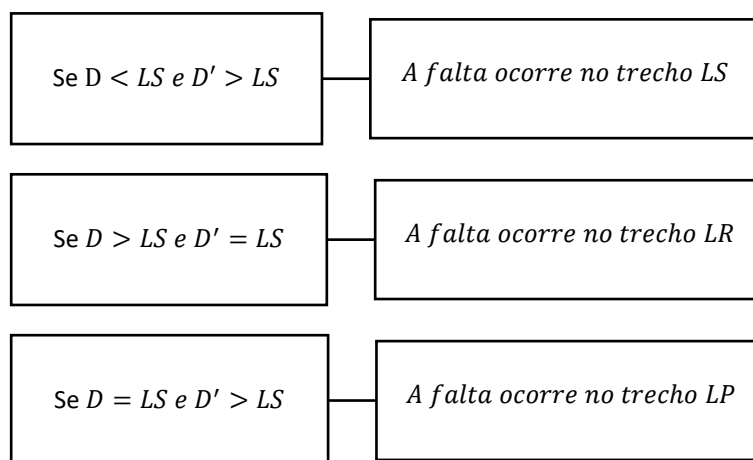


FIGURA 5. Simplificação proposta por [4].

3. METODOLOGIA

Esta seção apresenta as etapas iniciais necessárias para obtenção dos resultados computacionais ao desenvolver as técnicas apresentadas em algoritmos de programação, sendo essas: o modelo da rede adotada, os parâmetros elétricos das linhas de transmissão, e as características de amostragem dos sinais analisados.

3.1. Modelo da Rede Adotada

Para simular o sistema desejado e obter os dados de tensão e corrente, foi utilizado o *software Alternative Transients Programs*® (ATP®). A Figura 6 apresenta essa rede adotada para simulação, formada por: três geradores (G_S , G_R e G_P), três impedâncias equivalentes que representam as características do SEP a montante (ZTH_S , ZTH_R e ZTH_P), e a zona de detecção de falta localizada entre os três terminais (S , R e P), onde será obtido os sinais de tensões e correntes do comportamento do sistema.

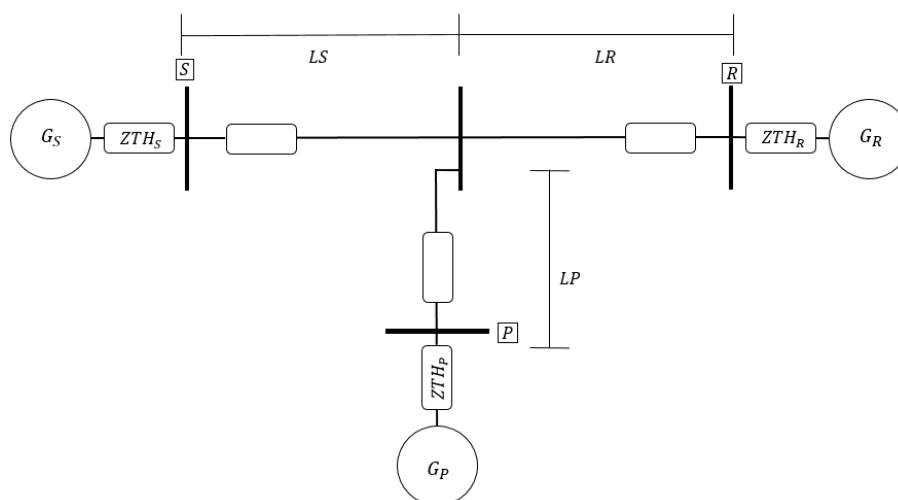


FIGURA 6. Sistema de 3 terminais simulado no *software* ATP®.

Esses dados discretizados são conduzidos para o Algoritmo de Estimação Fasorial de Fourier de Ciclo Completo e a partir daí os fasores obtidos nos terminais medidores (S, R e P) posteriormente podem ser utilizados no método proposto por [4].

3.2. Parâmetros Elétricos da Linha de Transmissão Simulada

O estudo foi baseado em uma linha de transmissão de 138 kV com parâmetros elétricos de linhas típicas da Eletrosul, exposto por [6] e apresentados na Tabela 2. A escolha de uma linha de 138 kV acontece devido ao algoritmo de [4] ser mais indicado para aplicações em linhas curtas e por não considerar o ramo de admitância *shunt* em sua modelagem, como afirmado por [7].

TABELA 2. Parâmetros para uma Linha de Transmissão de 138 kV.

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Capacitância (nF/km)
Zero	0,4163817	1,69306	5,5
Positiva	0,115674	0,46218	9,54

3.3. Performance do Algoritmo de Localização

Com o objetivo de avaliar a precisão do algoritmo de localização trabalhado, utiliza-se o parâmetro de erro de localização de faltas (E). Essa informação é obtida através da diferença absoluta entre a distância estimada pelo algoritmo (D_{estimado}) e a distância real (D_{real}) com base no comprimento do trecho protegido (L). A Equação 24 quantifica o respectivo índice.

$$E(\%) = \frac{|D_{\text{estimado}} - D_{\text{real}}| \cdot 100}{L} \quad (24)$$

3.4. Parâmetros para simulação

A Tabela 3 apresenta os parâmetros básicos para as simulações, modificando apenas características específicas de cada cenário.

TABELA 3. Parâmetros básicos para simulação.

<i>Parâmetros</i>	<i>Opção Escolhida</i>
Tipos de Dados (com relação a sincronismo)	Sincronizados
Comprimento das LTs	LS = LR = LP = 90km
Impedância dos circuitos equivalentes ($Z_{TH_{SRP}}$)	$Z_{TH_0}=17,435 \angle 76,18^\circ$ V $Z_{TH_+}=4,764 \angle 75,94^\circ$ V
Nível de tensão nos terminais (S, R e P)	$V_S=1,00 \angle 0^\circ$ p.u $V_R=0,98 \angle -10^\circ$ p.u $V_P=0,99 \angle 10^\circ$ p.u
Frequência da rede	60 Hz
Frequência de Amostragem dos Sinais	15360Hz
Nº Amostras por Ciclo	256
Tipo da Falta Elétrica	Monofásica – Fase A
Local da Falta (Teórico)	112,5km (entre S e P)

4. RESULTADOS

Os resultados contidos nesse artigo são divididos em dois cenários de simulação. Com o objetivo de tirar as melhores conclusões sobre esses resultados, foi considerado que o trecho LS obedece aos parâmetros elétricos padrões da Tabela 3 e ocorrerão variações dos parâmetros elétricos dos trechos LR e LP.

Essas variações ocorrerão apenas nos parâmetros de resistência e indutância e serão individuais por cada trecho. Devido ao próprio algoritmo de localização não considerar o ramo *shunt* em sua modelagem, não foi modificado os parâmetros de capacitância de nenhum percurso de linha.

O primeiro cenário realiza-se uma variação nas resistências da linha de transmissão, de forma que o trecho LR será incrementado em 20% e o percurso LP será decrementado em 20%. O segundo, por sua vez, apresenta variações na indutância da linha de transmissão, incrementando 20% para o trecho LR e decrementando em 20% a indutância do trecho LP.

Independentemente da técnica completa ou simplificada, o algoritmo de [4] produz um par de soluções para localização da falta (D e D'), como apresentado nas Equações 1 e 2, gerando assim quatro soluções possíveis (duas por cada método). Ambas as soluções serão apresentadas para os métodos graficamente. O erro de localização de faltas também será apresentado em gráfico mostrando a precisão para as soluções encontradas pelos algoritmos utilizados.

4.1. Variação das resistências nos trechos LR e LP

A Figura 7 apresenta o resultado da localização encontrada para os métodos completo e simplificado do algoritmo de [4] quando ocorre uma variação dos parâmetros de resistência nos trechos LR e LP em +20% e -20%, respectivamente. Como apresentado na Tabela 3, a distância teórica da falta é de 112,5 km.

Graficamente é perceptível que as soluções providas dos algoritmos completo e simplificado convergem para próximo do valor teórico. A Tabela 4 apresenta os resultados pontuais quando a localização da falta se encontra em regime permanente.

TABELA 4. Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas.

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
112,4 km	112,4 km	112,7 km	112,9 km

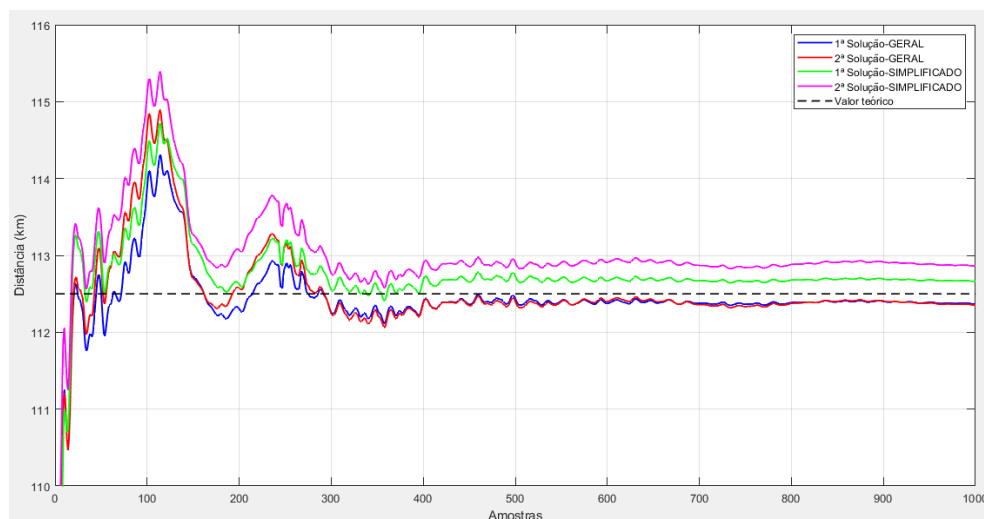


FIGURA 7. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

A Figura 8, por sua vez, exibe graficamente o erro de localização (E) considerando a mesma análise. A Tabela 5 apresenta os erros de localização pontuais para os valores em regime permanente, ficando perceptível a precisão de ambos os métodos (erros menores que 0,21%).

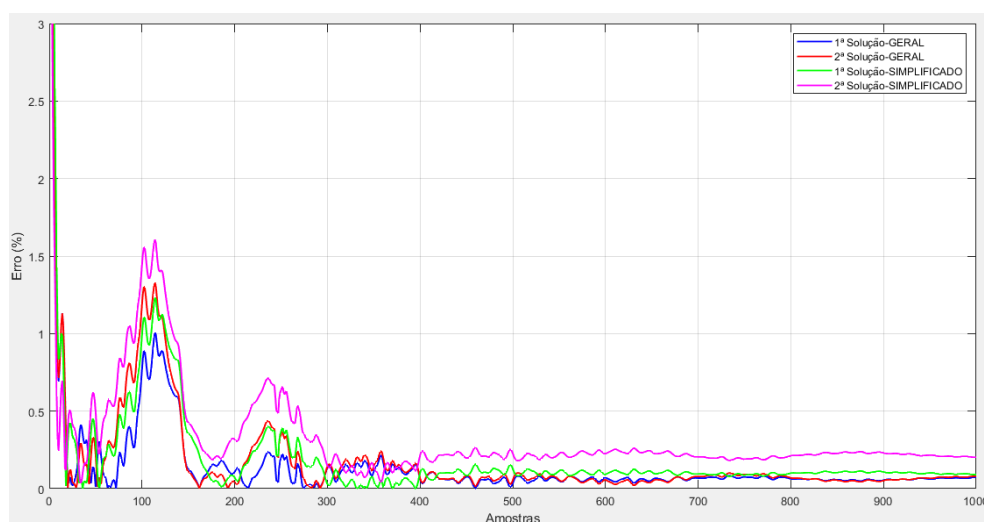


FIGURA 8. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

TABELA 5. Erro de Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas.

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
0,07426%	0,07426%	0,09015%	0,2018%

4.2. Variação das indutâncias nos trechos LR e LP

A Figura 9 apresenta o resultado da localização encontrada para os métodos completo e simplificado do Algoritmo de [4] quando ocorre uma variação dos parâmetros de indutâncias nos trechos LR e LP em +20% e -20%, respectivamente. Como apresentado na Tabela 3, a distância teórica da falta é de 112,5 km.

Graficamente é perceptível que as soluções providas do algoritmo completo apresentam melhores resultados e se aproximam do valor teórico, já o algoritmo simplificado estabiliza-se acima da respectiva referência. A Tabela 6 apresenta os resultados pontuais quando a localização da falta se encontra em regime permanente.

TABELA 6. Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
112,4 km	112,4 km	117 km	120,7 km

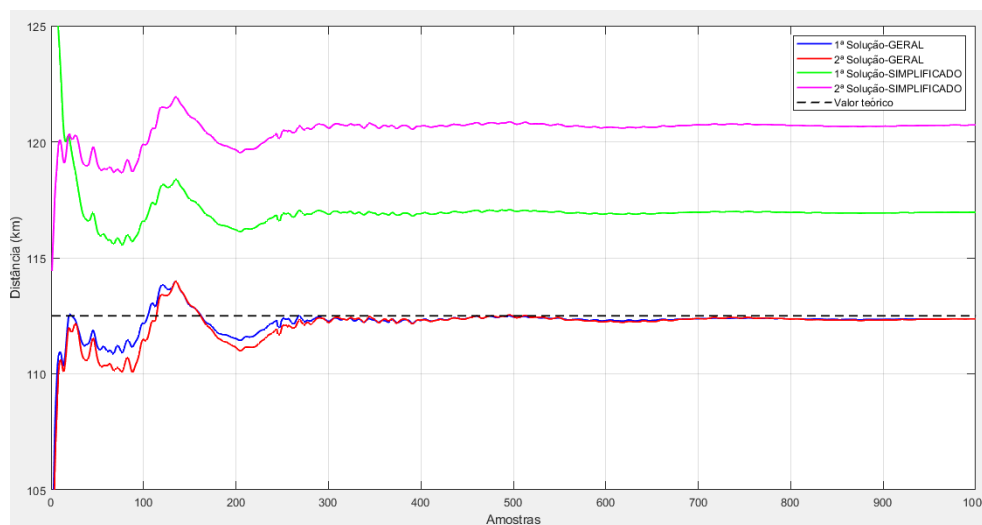


FIGURA 9. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

A Figura 10, por sua vez, exibe graficamente o erro de localização (E) considerando a mesma análise. A Tabela 7 apresenta os erros de localização pontuais para os valores em regime permanente, ficando perceptível a precisão do método generalizado (0,07426%) e a apresentação de erros máximos próximos a 5% com o método simplificado.

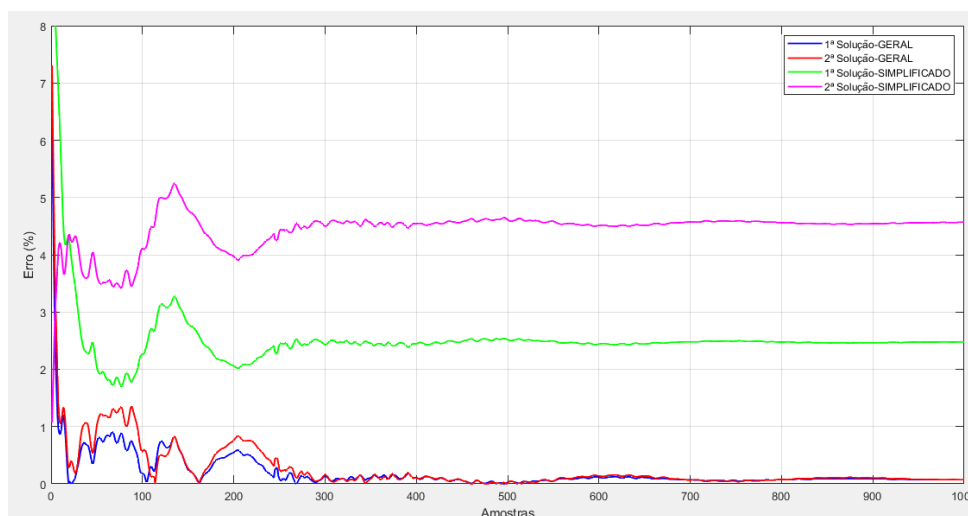


FIGURA 10. Localização de Falta pelo Algoritmo de [4] no modo completo e simplificado.

TABELA 7. Erro de Localização de faltas em regime permanente para as técnicas simuladas.

<i>1ª Solução – Geral</i>	<i>2ª Solução- Geral</i>	<i>1ª Solução- Simplificado</i>	<i>2ª Solução - Simplificado</i>
0,07426%	0,07426%	2,48%	4,567%

5. CONCLUSÃO

Este estudo procurou verificar o desempenho dos algoritmos simplificados e completos propostos por [4] com três terminais para situações onde ocorre variações dos parâmetros elétricos em diferentes trechos.

Para o cenário 1, onde foi feito modificações dos parâmetros de resistência da linha, percebe-se que essas variações pouco afetaram a precisão do algoritmo. Neste caso, os algoritmos gerais e simplificados se

comportaram de maneira equivalente, como mostra as Figuras 7 e 8. Os erros foram considerados satisfatórios para ambas as técnicas aplicadas, ficando abaixo de 0,21%.

O cenário 2, por sua vez, foi simulado com variações nos parâmetros de indutância da linha de transmissão e notou-se que essa modificação afetou consideravelmente a precisão do ponto de falta encontrado pelo algoritmo. Enquanto o método completo apresentou erros inferiores a 0,1 %, o método simplificado apontou erros na faixa de 4,5% (um erro 45 vezes maior). As Figuras 9 e 10, juntamente com as Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados pertinente a essa simulação.

O algoritmo de [4] em seu modo completo, que considera os parâmetros individuais de cada trecho protegido, apresentou resultados precisos. Para as situações simuladas, erros sempre abaixo de 0,1%.

Já o método simplificado do algoritmo de [4], apresentou pouca influência devido a variações dos parâmetros de resistência elétrica dos trechos. Por outro lado, a precisão do mesmo é diretamente influenciada por variações na natureza indutiva da linha de transmissão, considerando as simulações realizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. 2019. 382 p.
- [2] PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi: Phi, 2003. 287 p.
- [3] RAYBOLT, Ana Carolina da Silva. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão em Circuito Duplo Utilizando Redes Neurais Artificiais*. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coppe, Rio de Janeiro, 2011.
- [4] GIRGIS, A.a.; HART, D.g.; PETERSON, W.l.. *A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Liness*. IEEE Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 98-107, 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [5] NASCIMENTO, Cleydson Adller de Castro. *Simulador Didático de Estimação Fasorial e Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Trifásicas (SELF3F)*. 2020. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020.
- [6] CAMARGO, C. Celso de Brasil. *Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos fundamentais*. 3. ed. Florianópolis: UFSC, 2006. 277 p.
- [7] SILVEIRA, Eduardo Gonzaga da. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas*. 2007. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.