



Artigo

Determinação da distância de ponto em falta em linha de transmissão trifásica

Gabriel Ternus Gilioli ^[1]

^[1] Universidade Comunitária da Região de Chapecó; Gabrielgilioli03@gmail.com

Recebido: 14/04/2026;

Aceito: 29/06/2026;

Publicado: 15/07/2026;

Resumo: A estabilidade de sistemas elétricos é diretamente dependente do funcionamento constante das linhas de transmissão, que interligam matrizes geradoras e centros consumidores. No caso de uma falha, é imprescindível uma metodologia adequada para determinar onde a falta ocorreu, propiciando ações de manutenção de maneira eficaz. Dessa forma, o presente artigo propõe um método capaz de localizar faltas a partir de dados de dois relés de medição em linhas de transmissão trifásicas simuladas, nas quais se considera o modelo distribuído de linhas de transmissão, juntamente com um método iterativo para modelagem. As simulações foram realizadas em MATLAB/Simulink. Os resultados mostraram que o método desenvolvido se manteve preciso em testes com diferentes tipos de falta, e alterações nas características da linha, tendo acurácia inferior apenas quando fora submetido a um modelo de linha assimétrico.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão; Localização de Faltas; Modelo de Parâmetros Distribuídos; Proteção de Sistemas Elétricos; Redes de Sequência.

Fault distance determination in a three-phase transmission line

Abstract: The stability of electrical power systems directly depends on the continuous operation of transmission lines, which interconnect generation sources and load centers. In the event of a fault, an appropriate methodology to determine its location is essential to facilitate effective maintenance actions. Therefore, this paper proposes a method capable of locating faults using data from two measurement relays in simulated three-phase transmission lines, considering the distributed parameter line model alongside an iterative modeling approach. The simulations were performed in the MATLAB/Simulink environment. The results demonstrated that the developed method remained accurate across tests involving different fault types and variations in line characteristics, yielding lower accuracy only when applied to an asymmetrical line model.

Key-words: Transmission Lines; Fault Location; Distributed Parameter Model; Power System Protection; Sequence Networks.

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é composto de diversas matrizes geradoras e consumidoras, entre as quais as linhas de transmissão são os elementos responsáveis pela conexão elétrica através de longas distâncias. No Brasil, a maior delas é a de Xingu-Rio, que, de acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica, conta com aproximadamente 2.518 quilômetros de extensão, conectando a subestação Xingu em Anapu, no Pará, ao Terminal Rio em Paracambi, no Rio de Janeiro [1].

Porém, como qualquer elemento do sistema elétrico, elas não estão isentas de falhas. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico, em 2023 as principais causas de perturbações em Linhas de Transmissão foram: condições meteorológicas adversas, queimadas, vegetação, equipamentos e acessórios, e falhas humanas [2]. Tais fatores, em suma, ocasionam a remoção temporária da linha, causando desabastecimento de parte do sistema elétrico, podendo evoluir até sua totalidade. No caso da ocorrência de uma falta, é essencial a disponibilidade de um projeto capaz de isolá-la e continuar suprindo a demanda, sem comprometer o restante do sistema.

O equipamento capaz de detectar faltas é o relé de proteção, que monitora constantemente a tensão e corrente de cada fase da linha de transmissão, e a partir disso, é capaz de agir sobre ela, enviando solicitação de abertura dos disjuntores, visando isolar o ponto em falha, protegendo assim o restante do sistema. Para tal, existem diversos métodos de proteção de distância, entre os quais, o mais simples deles consiste na medição do equivalente do sistema antes e durante a ocorrência da falta, sendo obtida a partir da tensão e corrente informadas pelos transformadores de instrumentação ao relé. Esta, por fim, é comparada à impedância conhecida da linha e, caso a impedância de falta seja menor que a da linha, a proteção é acionada. Essa ação aplica o conceito de seletividade, isolando o trecho falho, permitindo a operação do restante do sistema elétrico [3].

Apesar de sua ampla aplicação em cenários reais, o sistema de proteção descrito tem a atuação limitada ao isolamento da linha de transmissão em falha. Consequentemente, carece da capacidade de prover informações estratégicas à concessionária, visando a ações futuras de reintegração da linha à rede elétrica. Nesse contexto, é de suma importância o conhecimento da distância relativa da falta ao equipamento de medição, informação essa crucial para orientar o trabalho da equipe de campo, propiciando uma ação rápida e efetiva no reparo da linha. Dessa forma, com sistemas capazes de isolar a linha e informar a localização do problema, o sistema elétrico na totalidade se torna mais seguro e estável.

Este artigo procura elaborar um algoritmo de dois terminais para representar uma linha de transmissão de forma iterativa, utilizando conceitos de redes de sequência e circuitos elétricos para estimar valores de tensão e corrente em qualquer ponto da linha. E tal modelo será aplicado à resolução de sistemas em curto, com intuito de estimar a distância da falha em relação aos equipamentos de medição. O equacionamento foi desenvolvido e implementado em um *software* de simulação no ambiente MATLAB/Simulink.

A metodologia é elaborada de forma que, na Seção 2, a partir da análise de uma linha de transmissão modelo (parâmetros distribuídos), é estabelecido um equacionamento capaz de determinar a tensão em um ponto qualquer da linha, e consequentemente, ao aplicá-lo para dados de dois terminais distintos, é possível determinar a distância até a falta. Na Seção 3, o modelo desenvolvido é simulado, visando aplicar o algoritmo em diferentes situações de operação, com intuito de visualizar seu comportamento tanto em situações usuais quanto em adversas. Já na Seção 4, apresentam-se as conclusões no que tange à aplicabilidade e às limitações do método desenvolvido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O algoritmo de dois terminais utiliza dados provenientes de sistemas de medição alocados em ambas as extremidades da linha de transmissão, como é representado pela Figura 1. Esse método se demonstra mais preciso quando comparado com aqueles que se baseiam em medições de terminal único, uma vez que sua formulação desconsidera a influência de impedâncias de falta, e reduz o impacto da assimetria da linha no cálculo da distância de falta. Além disso, ele também permite que não seja necessário conhecer especificidades dos elementos fora do espaço estipulado, de forma que condições externas como flutuações nos geradores não reduzem a precisão do algoritmo [4].

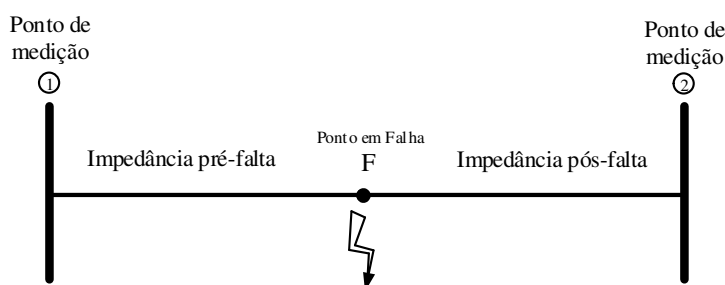


Figura 1: Modelo de dois terminais simplificado. Fonte: Autoria própria.

Tendo definido o modelo base, também é preciso definir quais informações estarão disponíveis para a resolução do problema. Para isso, além dos dados de tensão e corrente obtidos pelos sistemas de medição descritos, com a corrente medida na direção barra à linha, também são conhecidas as informações construtivas da linha de transmissão, sendo elas a distância total em quilômetros (Dt), a impedância série por quilômetro (Z_{km}) e a capacitância shunt por quilômetro (C_{km}). Tais dados são posteriormente utilizados para obter a distância (D) da barra 1 até o ponto em falta.

A geometria de linhas de transmissão aéreas sempre implica um sistema assimétrico, o qual não poderia ser estudado por meio de um circuito equivalente de sequência positiva. A possibilidade de tornar a linha simétrica, por exemplo, através de transposições de fases, nem sempre é viável. De qualquer forma, é bem conhecido que as aproximações introduzidas ao tratar a linha como perfeitamente simétrica são totalmente aceitáveis como uma primeira orientação [5].

Dessa forma para a modelagem, a linha de transmissão será analisada a partir de redes de sequência, as quais permitem representar um sistema desequilibrado a partir de três sistemas equilibrados. Para tal, serão consideradas as relações fundamentais de sistemas de potência, vistas em [6], as quais definem que é possível obter o fasor tensão de qualquer fase (V_a , V_b e V_c) segundo a soma de seus componentes simétricos, como apresentado pela Eq. (1). Este, por sua vez, pode ser representado pela tensão de uma fase específica, tal qual a fase A (V_{a0} , V_{a1} e V_{a2}), caso compensado o seu defasamento angular (α), descrito como um valor unitário, com defasamento de 120 graus, como demonstra a Eq. (2).

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (1)$$

$$V_b = V_{a0} + \alpha^2 V_{a1} + \alpha V_{a2} \quad (2)$$

O sistema trifásico composto pelas fases A, B e C pode ser representado matricialmente, fazendo uma relação direta entre os fasores de tensão e os componentes simétricos ao aplicar o conceito de equivalente monofásico, como na Eq. (3), na qual a matriz que multiplica o vetor de sequências pode ser simplificada como uma matriz T . Como a expressão é inversível, possibilita-se obter os vetores tensão e corrente de sequência a partir das tensões e correntes de fase nos pontos de interesse. Ao utilizar as componentes de sequência, é possível simplificar o modelo trifásico, em um monofásico de sequência específica.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ao longo do artigo, as grandezas de tensão, corrente e impedância utilizadas na formulação dos métodos referem-se exclusivamente aos valores de sequência positiva, de modo a simplificar a notação e evitar repetições desnecessárias.

2.1. Modelagem da Linha de Transmissão

Os modelos a parâmetros distribuídos consideram a natureza distribuída das grandezas elétricas ao longo da linha, sendo cada elemento infinitesimalmente pequeno, conferindo maior rigor à representação [7].

Na Figura 2 está representada uma seção da linha aplicando o modelo de parâmetros distribuídos. Em acordo com conceitos de linha de transmissão, a forma de onda da tensão e corrente em qualquer posição e instante de tempo na linha de transmissão depende dos parâmetros (resistência, indutância, capacitância e a condutância de isolamento G) [8].

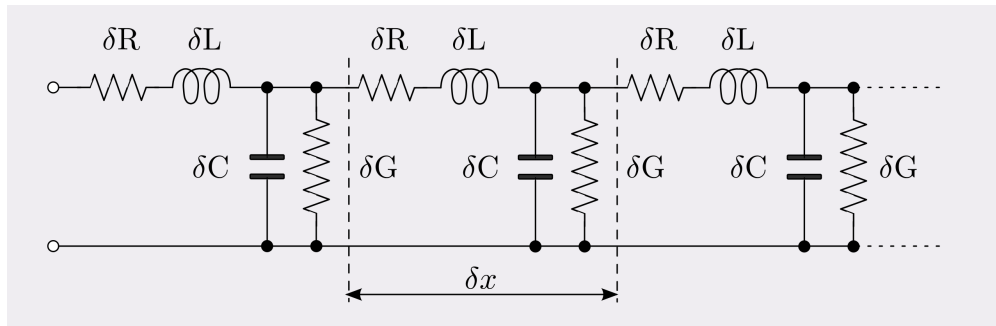


Figura 2: Modelo de Parâmetros Distribuídos. Fonte <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=122641076>

É comum que, a partir do modelo de parâmetros distribuídos, sejam feitas análises utilizando equações diferenciais, resultando em funções hiperbólicas para modelagem da linha, como pode ser visto em [9]. Porém, cumprindo a proposta do trabalho, o equacionamento para obter tensão e corrente em qualquer ponto da linha será feito de modo iterativo, a partir de uma aproximação do modelo de parâmetros distribuídos, em que o número de ramificações é limitado para um valor n , para o exemplo de um $n = 2$, existem duas ramificações de impedância shunt, e três elementos série, como pode ser visto pela Figura 3. Para o caso de $n = 3$, é adicionada uma ramificação shunt, e um componente série ao sistema, conforme visto na Figura 4.

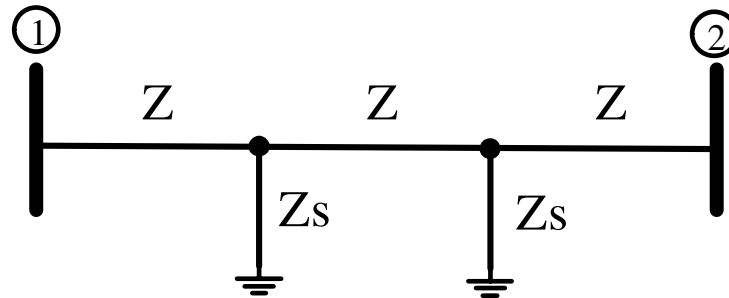


Figura 3: Modelo infinitesimal com $n = 2$. Fonte: Autoria própria.

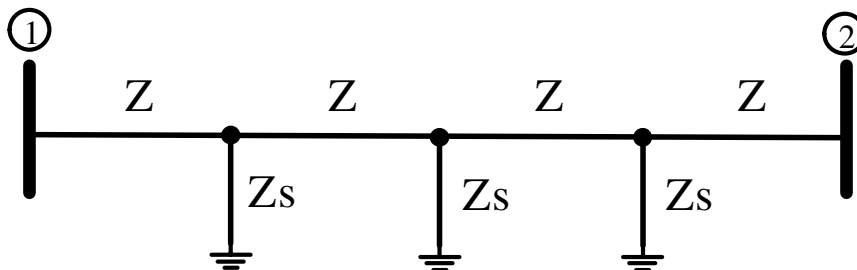


Figura 4: Modelo infinitesimal com $n = 3$. Fonte: Autoria própria.

Uma linha de transmissão tem seus parâmetros distribuídos uniformemente ao longo de seu comprimento. Portanto, para que a natureza distribuída das constantes seja considerada, é necessária a utilização de modelos matemáticos [10]. Dessa forma, é possível escrever os valores Z e Z_s em referência à distância D . Sabe-se que Z pode ser escrito como a impedância total de 1 até 2, dividida pelo valor $n + 1$, como está na Eq. (4). Quanto à impedância shunt, será tratada como puramente capacitiva, por se tratar de um valor em $pu \cdot km$ que, quanto menor for a distância, maior o valor da impedância, o valor é dividido por D , e multiplicado por n como mostra a Eq. (5). Assume-se n como um valor natural diferente de zero.

$$Z = \frac{D Z_{km}}{n + 1} \quad (4)$$

$$Z_s = \frac{n Z_{s_{km}}}{D} \quad (5)$$

Em seguida, serão feitas análises para circuitos com diferentes valores de n , com o intuito de encontrar um padrão que resolva para um valor n qualquer. Assim, são definidas as variáveis a ser úteis em qualquer circuito analisado. Será denominada de V_{B1} a tensão encontrada na barra 1, e V_{B2} a encontrada na barra 2. Em relação às tensões em cada nó, elas serão denominadas de V_1 até V_n , com numeração sentido barra 1–2. Por exemplo, para um $n = 3$ (Figura 4), as tensões em cada nó, são da esquerda para direita, escritas como V_1 , V_2 e V_3 .

Também serão definidas as correntes que passam por cada impedância Z , como sendo uma corrente I , com numeração de 1 até n , seguindo o mesmo padrão das tensões nos nós, de maneira que, saindo da barra 1, existe uma corrente I_{B1} , após o primeiro nó, segue uma corrente I_1 , e assim por diante, até a barra 2. Para o exemplo de $n = 3$, as correntes que atravessam cada impedância Z são escritas como I_{B1} , I_1 , I_2 e I_3 .

Para definir as correntes que percorrem as impedâncias Z_s , indicam-se valores I_s , numerados de 1 até n , com o mesmo sentido das variáveis anteriores, sendo 1 aquela a passar pela primeira derivação, e I_n a atravessar a última. De modo a, com o exemplo de $n = 3$ as correntes que atravessam Z_s são, I_{s1} , I_{s2} e I_{s3} . Ao utilizar as variáveis estabelecidas, podemos visualizar pela Figura 5 um esquema de $n = 3$ com todas as variáveis úteis atribuídas e localizadas no sistema.

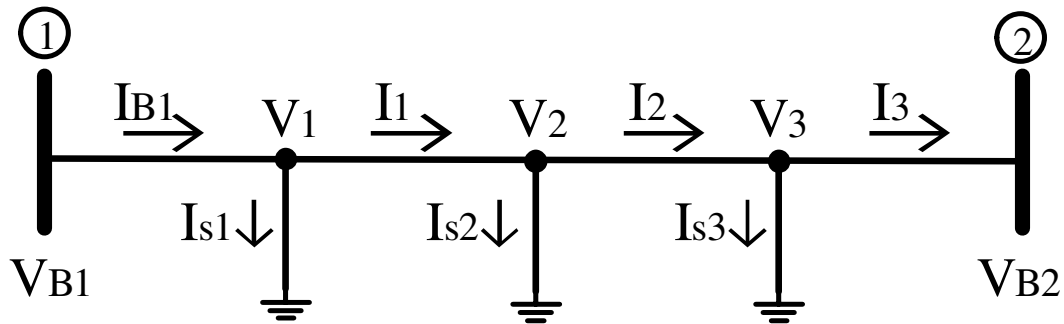


Figura 5: Modelo infinitesimal com $n = 3$ e definição de variáveis. Fonte: Autoria própria.

A partir das variáveis estipuladas, é possível elaborar equações capazes de descrever a tensão na barra 2, em função da tensão e corrente da barra 1 (V_{B1} e I_1). Primeiramente formulando equações que resolvam o circuito de $n = 3$. Essas equações são elaboradas a partir de conceitos simples de circuitos elétricos, como lei de Ohm, e leis de Kirchhoff, aplicados às redes de sequência, conceitos esses amplamente abordados em [11].

$$V_1 = V_{B1} - I_{B1} Z \quad V_2 = V_1 - I_1 Z \quad V_3 = V_2 - I_2 Z \quad (6)$$

$$I_{s1} = \frac{V_1}{Z_s} \quad I_{s2} = \frac{V_2}{Z_s} \quad I_{s3} = \frac{V_3}{Z_s} \quad (7)$$

$$I_1 = I_{B1} - I_{s1} \quad I_2 = I_1 - I_{s2} \quad I_3 = I_2 - I_{s3} \quad (8)$$

Analisando as equações, nota-se a existência de um padrão para as variáveis do sistema. Este por sua vez, pode ser expresso, em novas equações, dependentes do valor n .

$$V_n = V_{n-1} - I_{n-1} Z \quad n \in \mathbb{Z}, n \geq 2 \quad (9)$$

$$I_{s_n} = \frac{V_n}{Z_s} \quad n \in \mathbb{Z}, n \geq 1 \quad (10)$$

$$I_n = I_{n-1} - I_{s_n} \quad n \in \mathbb{Z}, n \geq 2 \quad (11)$$

Tendo as fórmulas para o n -ésimo valor, é possível estabelecer que, a tensão na barra 2, pode ser escrita como V_{n+1} , e ao aplicar a fórmula da tensão, como demonstra a Eq. (9), percebe-se que a variável V_{B2} depende de todas as tensões anteriores, e por suas partes, dependem das correntes e impedâncias. Portanto, é necessário para obter o valor desejado, resolver as equações para todos os valores de 1 até n .

Para tornar a opção viável, basta sintetizar o método, de maneira a cumprir um passo a passo. Este se inicia ao inserir os valores conhecidos, de V_{B1} e I_{B1} (Tensão e correntes presentes na barra 1). Seguindo, define-se V_1 , como mostra a Eq. (6), em sequência, faz-se o mesmo para I_{s1} pela Eq. (10), e por fim, para I_1 , Eq. (11). Tendo definidos os valores para $n = 1$, é possível continuar o método, aplicando as fórmulas dependentes de n , seguindo a mesma ordem apresentada ($V_n - I_{s_n} - I_n$).

A metodologia descrita pode ser codificada em um ambiente computacional como o MATLAB por meio de um laço *for*. Este calcula os valores de tensão e corrente iterativamente, gerando vetores com os dados de todos os pontos especificados. Obtém-se, assim, um modelo capaz de estimar essas grandezas elétricas em qualquer ponto do sistema. Como o objetivo principal é determinar a tensão, basta executar o laço até o nó V_{n+1} , conforme estipulado anteriormente.

Tal sistema possui suas limitações, sendo a principal delas a dificuldade do programa em gerar resultados para valores de n elevados (quanto maior o valor de n mais preciso tende a ser o resultado), afinal, o laço descrito precisa resolver todos os valores de 1 até n , simplificando tudo para as variáveis conhecidas (V_{B1} , I_{B1} , Z , Z_s). Para minimizar o poder computacional necessário, e aumentar o valor de n que pode ser trabalhado, será feita uma análise a partir dos resultados obtidos com diferentes valores de n , com intuito de gerar uma fórmula capaz de encontrar a tensão V_{B2} de maneira direta.

Assim, são geradas 3 equações pelo código desenvolvido, atribuindo n com valores de 2 até 4, sendo feitas simplificações nos resultados com intuito de facilitar a observação dos padrões, evidenciando a tensão V_{B2} em função das variáveis de tensão, corrente e impedâncias conhecidas. Como mostram as equações Eq. (12), Eq. (13) e Eq. (14).

$$V_{B2} = \frac{V_{B1}(Z^2 + 3Z Z_s + Z_s^2) - I_{B1} Z (Z^2 + 4Z Z_s + 3Z_s^2)}{Z_s^2} \quad n = 2 \quad (12)$$

$$V_{B2} = \frac{V_{B1}(Z^3 + 5Z^2 Z_s + 6Z Z_s^2 + Z_s^3) - I_{B1} Z (Z^3 + 6Z^2 Z_s + 10Z Z_s^2 + 4Z_s^3)}{Z_s^3} \quad n = 3 \quad (13)$$

$$V_{B2} = \frac{V_{B1}(Z^4 + 7Z^3 Z_s + 15Z^2 Z_s^2 + 10Z Z_s^3 + Z_s^4) - I_{B1} Z (Z^4 + 8Z^3 Z_s + 21Z^2 Z_s^2 + 20Z Z_s^3 + 5Z_s^4)}{Z_s^4} \quad n = 4 \quad (14)$$

Nota-se que as equações desenvolvidas compreendem uma fração, na qual o denominador representa a impedância shunt (Z_s) elevada ao grau n . Quanto ao numerador, é composto de 2 elementos, um sendo a tensão V_{B1} , multiplicada a um polinômio com graus de Z e Z_s . O segundo elemento, que está sendo subtraído, representa a corrente na barra 1 (I_{B1}) multiplicada pela impedância série (Z), este por sua vez, está multiplicando outro polinômio, com diferente lei de formação, porém, com os mesmos graus e variáveis do anterior.

Para definir a lei de formação dos polinômios, basta constatar a sua semelhança com as equações obtidas a partir da aplicação do Binômio de Newton, indicando que o uso de combinações nas fórmulas podem gerar o resultado esperado. Dessa forma ao aplicar a fórmula da combinação simples para os valores obtidos nas equações, foi possível obter coeficientes binomiais generalizados, sendo encontrados como $\binom{2n-k}{k}$ para o termo que multiplica V_{B1} e $\binom{2n-k+1}{k}$ para o referente a I_{B1} . Isso possibilita formar uma expressão geral capaz de determinar a tensão na barra 2 (V_{B2}), de maneira direta, dependente do valor n , como é mostrado pela Eq. 15.

$$V_F = \frac{1}{Z_s^n} \left[V_{B1} \sum_{k=0}^n \binom{2n-k}{k} Z^{n-k} Z_s^k - I_{B1} Z \sum_{k=0}^n \binom{2n-k+1}{k} Z^{n-k} Z_s^k \right] \quad (15)$$

2.2. Aplicação do Modelo para Determinar o Ponto em Falta

O princípio utilizado para resolução do problema se baseia no método desenvolvido em [12], o qual trabalha com os dados de tensão e corrente de ambas as barras para determinar um ponto da linha, no qual a tensão equacionada se iguala. Partindo pela Figura 1, o ponto F representa um ponto comum para ambas as barras, em que, a partir dos dados individuais de cada barra, são aplicadas as equações para encontrar a tensão no ponto F, e consequentemente a distância (D) até o ponto em falta.

Então, ao invés de utilizar a fórmula desenvolvida na Eq. (15) para determinar V_{B2} , supõe-se a existência de um ponto em falta F , e um modelo equivalente da linha referente a cada barra. Sendo que, entre a barra 1 e o ponto em falta, existe uma distância D , e entre a barra 2 e o ponto em falta, uma distância D' , o mesmo padrão de nomenclatura é aplicado para as impedâncias. Assim a fórmula elaborada será utilizada para calcular a tensão no ponto F , supondo n derivações antes do ponto em falta, e n após o ponto em falta, como mostra a Figura 6.

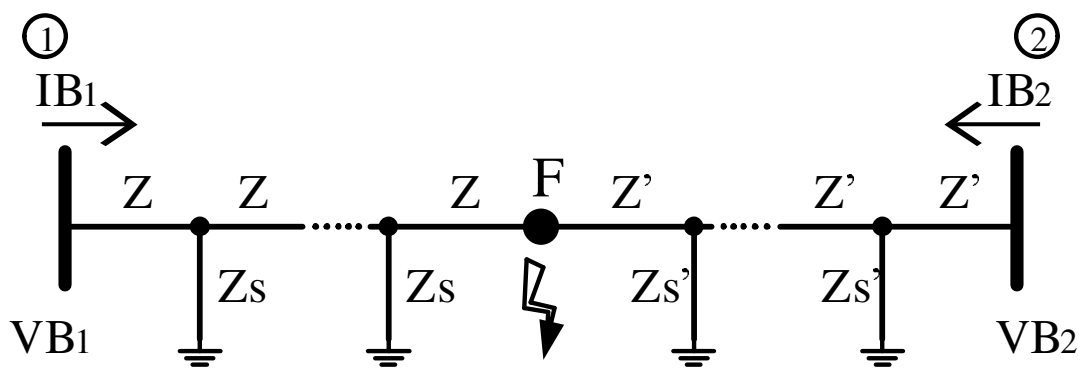


Figura 6: Modelo infinitesimal com ponto em falta. Fonte: Autoria própria.

Como fora estipulado, tanto os valores de impedância série e shunt por quilômetro quanto a distância total da linha são conhecidos. Dessa forma, é possível definir a distância de F até a barra 2, como sendo a total da linha (Dt) subtraindo a da barra 1 até F (D). Como ainda existem valores desconhecidos em cada equação (Impedâncias e V_F), primeiramente deve-se substituir as equações Eq. (4) e Eq. (5) na Eq. (15). De forma que, a tensão V_F é definida a partir da distância D . Quanto à equação do ponto em falta referente à barra 2, deve-se substituir as Eq. (16) e Eq. (17) em Eq. (18), com o mesmo intuito de reduzir variáveis desconhecidas.

$$Z' = \frac{(Dt - D) Z_{km}}{n + 1} \quad (16)$$

$$Zs' = \frac{n Zs_{km}}{Dt - D} \quad (17)$$

$$V_F = \frac{1}{Zs'^n} \left[V_{B2} \sum_{k=0}^n \binom{2n-k}{k} Z'^{n-k} Zs'^k - I_{B2} Z' \sum_{k=0}^n \binom{2n-k+1}{k} Z'^{n-k} Zs'^k \right] \quad (18)$$

Após feitas as substituições é possível igualar as equações Eq. (15) e Eq. (18), com intuito de isolar a variável D , e consequentemente, resolver a equação resultante, possibilitando obter um valor numérico para a distância. Em concordância com o Teorema Fundamental da Álgebra, pode-se afirmar que, para valores elevados de n , existirão diversas possíveis soluções complexas para D . Dessa forma, é necessário filtrar os resultados, para tal, o valor da distância encontrada deve estar entre 0 e a total da linha (Dt). Caso exista mais de um valor capaz de cumprir tal requisito, o valor utilizado como resposta, deve ser aquele que possui o menor coeficiente imaginário.

2.3. Elaboração da Simulação

Para o desenvolvimento da simulação, primeiramente foram definidas as bases do sistema, adotando-se 2 zonas, uma externa a linha de transmissão (média tensão), e uma interna (alta tensão). Foi estipulada uma potência base de 250MVA , e tensões-base para cada zona de 25kV para a de média tensão e 169kV para a de alta (definidos como fase-fase, RMS).

Após estabelecer as bases, foi feita a definição dos valores construtivos do sistema a ser ensaiado. Primeiramente, foi determinada a tensão para a geração, sendo de 25kV . Para a linha de transmissão, foi especificada uma distância entre os transformadores de 400 quilômetros. Referente ao cabeamento, foi designado o condutor *Owl*, que, segundo valores tabelados do fabricante, possui uma resistência de $0,301\Omega/\text{km}$ operando a $75^\circ 60\text{Hz}$, uma reatância indutiva de $0,3837\Omega/\text{km}$, e reatância capacitiva de $0,2303\text{M}\Omega \cdot \text{km}$ [13].

Como mencionado anteriormente, o modelo desenvolvido deve ser capaz de determinar com precisão a distância até a falta, independentemente dos elementos exteriores à linha. Dessa forma o sistema elaborado em Simulink, que pode ser visto pela Figura 7, visa comprovar essa tese, foi desenvolvido baseado em um sistema em anel, para simular com maior fidelidade uma rede elétrica complexa, com vários pontos de geração e carga. Ele representa a ocorrência da falta entre duas linhas de transmissão, o trecho à esquerda da falta correspondente à distância D , enquanto a impedância à direita da falta corresponde ao restante da linha $Dt - D$.

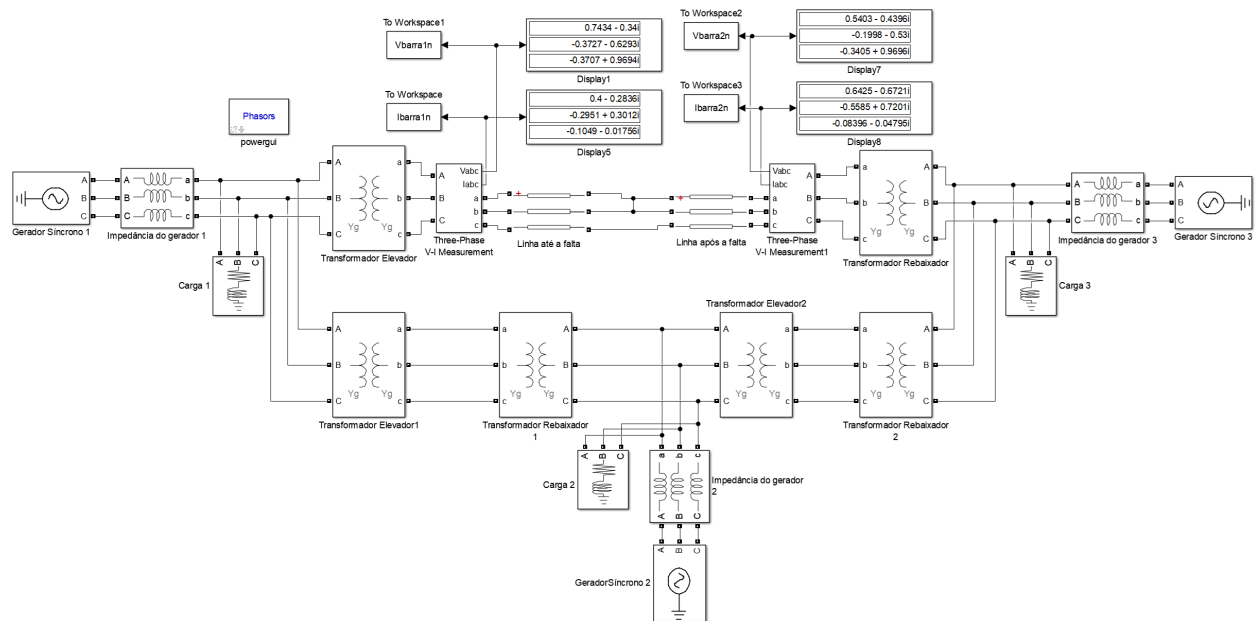


Figura 7: Sistema Teste em Simulink. Fonte: Autoria própria.

Os transformadores utilizados são idênticos, tipo núcleo de três colunas, com impedância interna não nula e relação de transformação de $25/169\text{kV}$ (similar às tensões de base previamente estipuladas). As impedâncias dos elementos do sistema teste, suas potências nominais e tensões estão representadas na Tabela 1. Ressalta-se que todos os componentes presentes no sistema possuem conexão estrela aterrada.

Tabela 1: Dados referentes aos elementos inseridos no sistema. Fonte: Autoria própria.

Dados Construtivos	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	Transformadores	Carga 1	Carga 2	Carga 3
$R1 (\Omega)$	0,05	0,05	0,05	2,33	12,49	6,25	6,25
$R0 (\Omega)$	0,05	0,05	0,05	2,33	—	—	—
$X_{L1} (\text{H})$	$3,3\mu$	$3,3\mu$	$3,3\mu$	$30,9\mu$	1,65	1,65	0,82
$X_{L0} (\text{H})$	$1,3\mu$	$1,3\mu$	$1,3\mu$	$61,8\mu$	—	—	—
Potência Nominal (MVA)	150	70	30	250	50	100	100
Tensão Nominal (kV)	25	25	25	25/169	25	25	25

Com o intuito de proporcionar uma visão sistemática e facilitar a reprodutibilidade desta pesquisa, a Figura 8 apresenta o fluxograma metodológico estrutural das atividades desenvolvidas. O diagrama ilustra o fluxo lógico do processo, dividindo-o em quatro fases principais: a aquisição e o tratamento inicial dos dados elétricos, a modelagem

matemática da linha baseada na aproximação do modelo de parâmetros distribuídos, a estruturação da lógica de localização a partir da igualdade das tensões projetadas por ambos os terminais, e por fim, a validação do método por meio de simulações computacionais. Essa síntese visual permite compreender de forma clara a concatenação entre a fundamentação teórica proposta e a sua aplicação prática na localização de faltas.

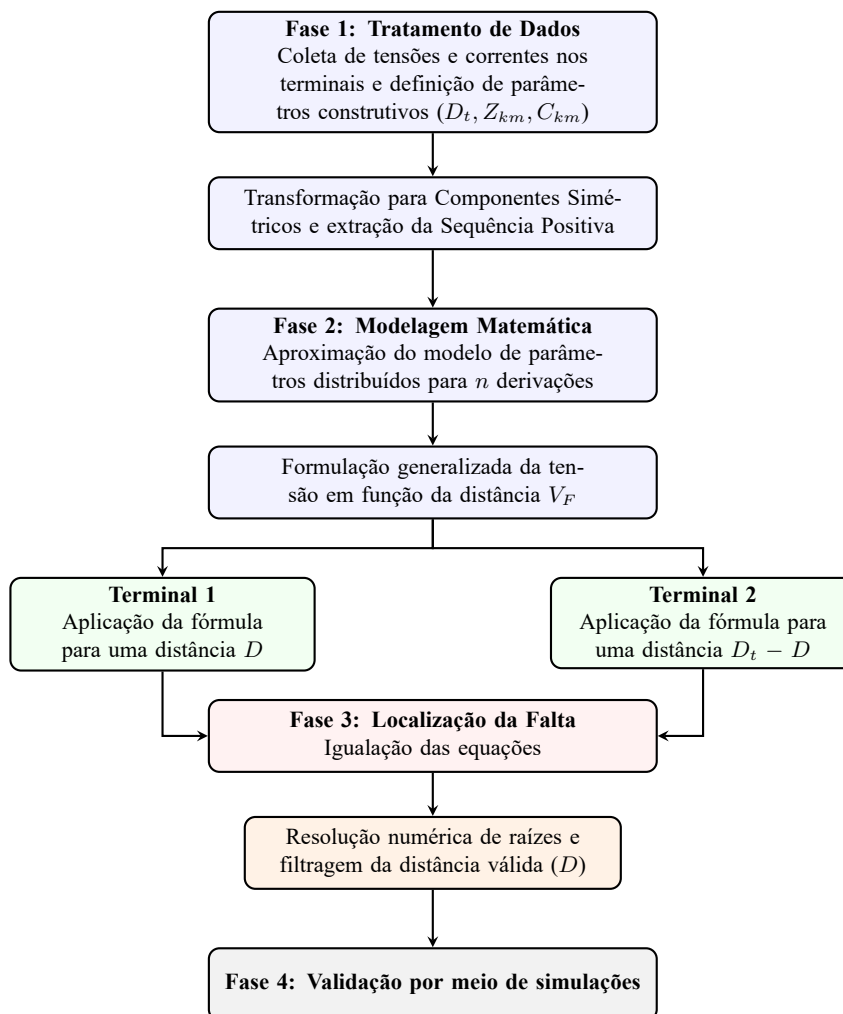


Figura 8: Fluxograma metodológico das etapas de desenvolvimento.

3. RESULTADOS

Inicialmente, foram desenvolvidos estudos de convergência, para avaliar os erros presentes no equacionamento da tensão. O primeiro deles visa avaliar a precisão do método conforme se varia a quantidade de ramificações do sistema n . O teste é baseado na simulação já construída, sem a presença da falta, de forma a utilizar os dados do primeiro terminal para estimar a tensão no segundo, que está a 400 quilômetros de distância (equação desenvolvida em Eq. (15)), resultando assim no gráfico expresso pela Figura 9. A partir da análise dos dados, percebe-se que o modelo apresenta maior precisão conforme o valor de n aumenta. Com $n \geq 18$, a precisão já é de 99%, e com o maior valor simulado, de $n = 100$, a precisão foi de aproximadamente 99,8%. Porém, cabe ressaltar que, conforme se eleva o valor de n , maior se torna o custo computacional. Dessa forma, nas simulações subsequentes será adotado o valor de $n = 25$, que apresentou precisão de 99,3%.

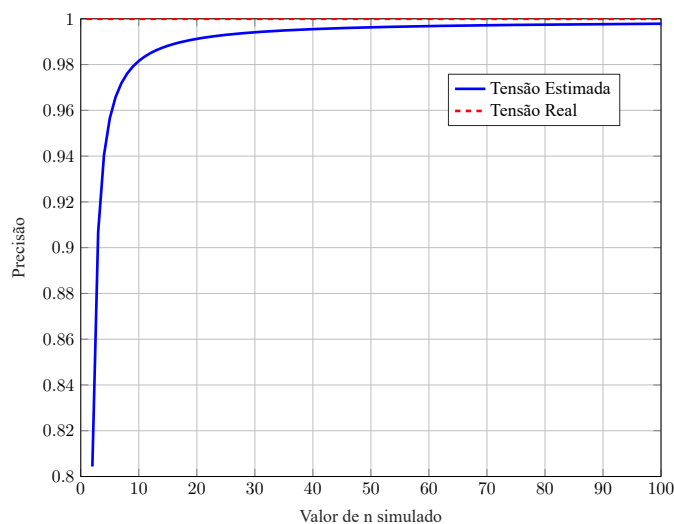


Figura 9: Análise de Precisão para um n variante. Fonte: Autoria própria.

O segundo teste elaborado visa verificar o crescimento do erro conforme a distância total da linha é variada. Dessa forma, foram feitas simulações desde uma linha de 10 km até a de 400, usando também a equação desenvolvida em 15, com $n = 25$, utilizando os dados do primeiro terminal para estimar a tensão medida no segundo, em que o erro representa o desvio observado entre as tensões. Como pode ser visto pela Figura 10, o comportamento do erro se demonstra próximo de uma função exponencial. Observa-se, assim, que quanto maior a distância da linha, maior o erro previsto. Também é possível notar que o agravamento do erro ocorre após a metade da linha, chegando a um erro máximo de aproximadamente 0,11 %, denotando assim uma limitação matemática do algoritmo.

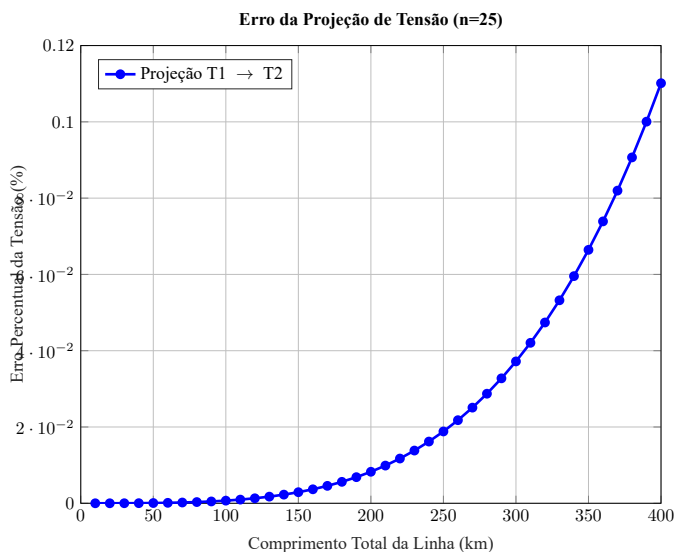


Figura 10: Análise de Precisão para uma linha de comprimento variante. Fonte: Autoria própria.

Os resultados a serem apresentados nesta seção serão extraídos a partir da aplicação do método proposto ao modelo simulado. Serão consideradas três condições operacionais distintas. A primeira consiste em um cenário com características construtivas normais, a segunda introduz assimetria entre as fases, já a terceira considera uma impedância de falta não nula. O objetivo dessas variações é testar a eficácia e a precisão do algoritmo tanto em situações ideais quanto em cenários severos.

3.1. Testes com características construtivas normais

Para validar a funcionalidade da teoria desenvolvida, foi gerado um gráfico a partir das equações elaboradas, exibindo 2 curvas, uma referente à tensão vista pela barra 1, a uma distância D da mesma (Eq. 15, com $n = 25$), já a outra, representa a tensão vista pela barra 2, a uma distância de $400 - D$ (Eq. 18 com $n = 25$), como mostra a Figura

11. Dessa forma, é visível que, quando há a ocorrência de falta, existe um ponto em comum, na qual a tensão vista por ambas as barras se iguala, sendo esse o ponto em falta. Concluindo assim que, para esta situação, o ponto em falta se encontra a 100 km da barra 1, e a 300 km da barra 2.

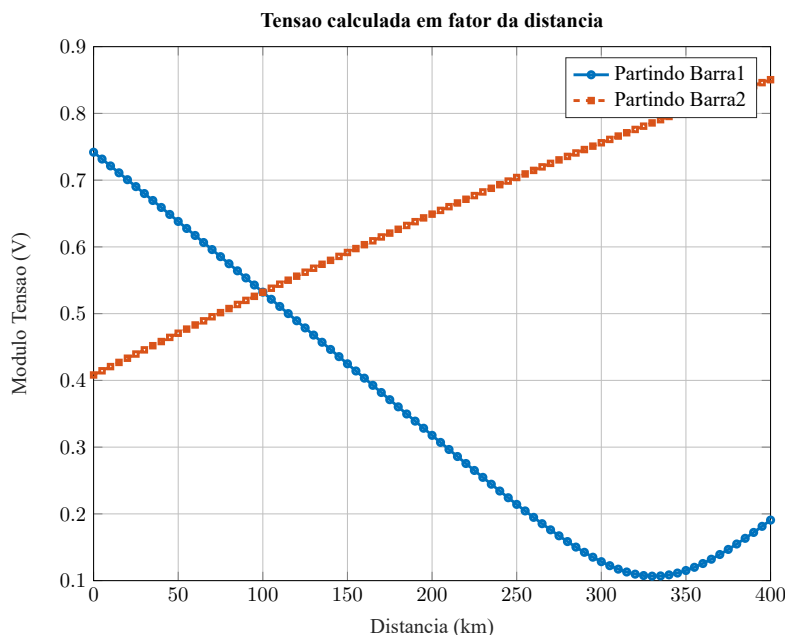


Figura 11: Tensão em função da distância, para falta AB em 100km. Fonte: Autoria própria.

Ao representar os resultados das simulações, os valores de distância são expressos em quilômetros, e o erro como valor percentual, referente a distância total da linha. Em primeiro momento, o modelo é testado com valores construtivos habituais, semelhantes aos apresentados pela Tabela 1. A ocorrência da falta é considerada um curto franco, sem impedância de falta. Assim, foi elaborado um comparativo de precisão entre as distâncias simuladas e o tipo de falta, mantendo os valores de impedância construtiva da linha constantes para todas as situações, simulado para distâncias que variam de 10, até 390 quilômetros, representando faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas. Todos esses dados são expressos na Tabela 2.

A partir dos resultados apresentados, nota-se que o método possui alta precisão na determinação da distância da falta. Contudo, ocorre uma degradação de desempenho nas extremidades da linha quando comparadas à região central, fenômeno que pode ser observado nas Figuras 12, 13 e 14. Tal comportamento decorre diretamente do erro de modelagem previamente discutido na Figura 10. Para faltas localizadas nas extremidades, a estimativa de tensão projetada a partir do terminal mais distante acumula um erro expressivamente maior do que a projetada pelo terminal mais próximo. Essa discrepância assimétrica entre as duas estimativas acaba por gerar um desvio na localização da falta nas extremidades da linha. Em contrapartida, para faltas nas zonas centrais, as estimativas de ambos os terminais percorrem distâncias semelhantes, resultando em erros menores e simétricos que tendem a se compensar, gerando um erro de localização quase nulo.

Apesar dessa limitação, os resultados evidenciam que o método, apesar de não compensar o erro da projeção de tensão, ainda demonstrou boa precisão, incluindo nas regiões consideradas mais severas. Tal fato é notável ao comparar os resultados obtidos com outros modelos, tanto para os baseados em cálculo de impedância como em [14], quanto os fundamentados em ondas viajantes como em [15] ou [16]. Observa-se que os algoritmos citados nessas referências apresentam erros próximos ou até superiores aos do método desenvolvido neste artigo, situando-se predominantemente na casa das centenas de metros, e em alguns casos na ordem de dezenas.

No que tange à aplicabilidade dos valores obtidos pelo algoritmo, na falta Fase-Terra, a média dos erros foi de 0,068% , ou de 273,2 metros, com valor máximo de 0,118% ou 472 metros. Sendo assim, uma equipe de campo tem uma área de busca, supondo o pior caso, inferior a 950 metros, tendo em vista que a variação obtida pode ser tanto negativa quanto positiva. Já para as faltas bifásica e trifásica, foi obtida uma média dos erros de 0,038% e 0,023%, respectivamente (em metros, 151,55 m e 92,65 m), com valores máximos de 360 e 220 metros. Isso confere áreas de busca significativamente menores ao compará-las com o pior caso. Dessa forma, nota-se que em um cenário considerado normal, a área de busca se manteve sempre inferior a 1 quilômetro, um resultado positivo tendo em vista que uma linha de 400 km já é considerada uma linha longa.

Tabela 2: Comparação de resultados para características construtivas normais. Fonte: Autoria própria.

Distância Real (km)	Falta AT		Falta AB		Falta ABC	
	Est. (km)	Erro (%)	Est. (km)	Erro (%)	Est. (km)	Erro (%)
10	10.362	0.091	10.291	0.073	10.202	0.051
30	30.37	0.093	30.248	0.062	30.166	0.042
50	50.357	0.089	50.207	0.052	50.135	0.034
70	70.328	0.082	70.17	0.043	70.107	0.027
90	90.287	0.072	90.135	0.034	90.083	0.021
110	110.24	0.060	110.1	0.025	110.06	0.015
130	130.18	0.045	130.08	0.020	130.05	0.013
150	150.12	0.030	150.05	0.013	150.03	0.008
170	170.06	0.015	170.02	0.005	170.02	0.005
190	190	0.000	190	0.000	190	0.000
210	209.94	0.015	209.98	0.005	209.99	0.003
230	229.87	0.033	229.95	0.013	229.97	0.008
250	249.81	0.048	249.92	0.020	249.96	0.010
270	269.74	0.065	269.89	0.028	269.94	0.015
290	289.68	0.080	289.86	0.035	289.92	0.020
310	309.62	0.095	309.82	0.045	309.9	0.025
330	329.57	0.108	329.78	0.055	329.88	0.030
350	349.54	0.115	349.74	0.065	349.85	0.038
370	369.53	0.118	369.69	0.078	369.81	0.048
390	389.54	0.115	389.64	0.090	389.78	0.055

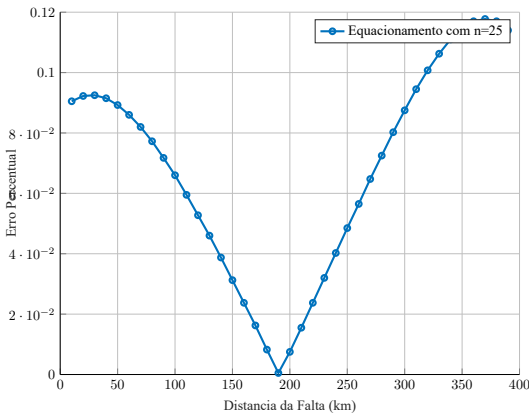


Figura 12: Erro resultante para falta monofásica AT em situação normal. Fonte: Autoria própria.

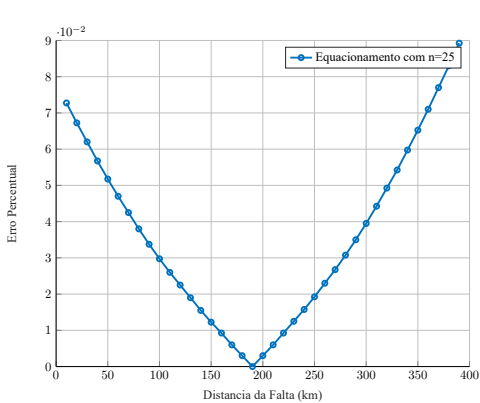


Figura 13: Erro resultante para falta bifásica AB em situação normal. Fonte: Autoria própria.

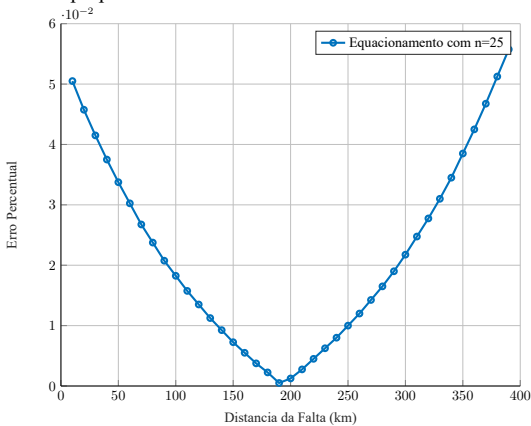


Figura 14: Erro resultante para falta trifásica ABC em situação normal. Fonte: Autoria própria.

3.2. Testes com assimetria entre as fases

Tendo visto o modelo operando com aspectos construtivos usuais, nesse momento será testado com uma característica assimétrica nas impedâncias de fase. Para tal a impedância série da fase B será alterada, gerando uma diferença de 20 %, já as fases A e C não sofrerão alterações. Também sendo simulada para uma linha de 400 quilômetros de extensão. Esse teste busca testar o método para uma situação mais severa, porém ainda realista, tendo em vista que, devido à geometria das linhas de transmissão, tende a existir uma assimetria entre as fases de linhas reais, grande parte em decorrência das impedâncias mútuas tendo impactos severos na distribuição de energia [17].

Fora novamente elaborado um gráfico visando relacionar as tensões obtidas ao variar a distância, se utilizando das fórmulas desenvolvidas, com intuito de verificar se a assimetria da linha, impede o equacionamento de determinar um ponto cujas tensões se igualam. Como pode ser visualizado na Figura 15, o método foi capaz de determinar um ponto de convergência das tensões a uma distância próxima de 100 quilômetros da barra 1, assim como fora simulado.

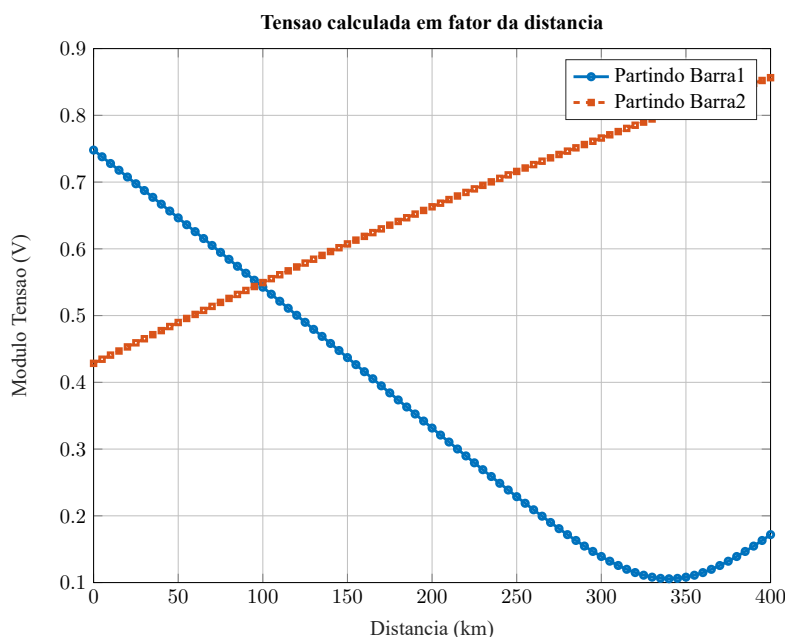


Figura 15: Tensão em função da distância, para falta AB em 100km com sistema assimétrico. Fonte: Autoria própria.

Com intuito de comparar com a situação anterior, também foi elaborada uma tabela, apresentando a distância real da simulação, e as distâncias obtidas por cada tipo de falta simulada, nesse caso, para uma linha assimétrica, na qual a impedância série da fase B é 20 % maior quando comparada com as fases A e C. Tal análise visa verificar de que modo o método reage a essa alteração na característica construtiva da linha. Esses novos dados podem ser observados na Tabela 3. Sabendo que, pelo método se basear em conceitos de redes de sequência, esse representa as 3 fases como simétricas e equilibradas [6], sendo esperado assim, precisão inferior em relação a situação simétrica.

A partir dos dados expressos, é possível constatar que, o método apresenta precisão aceitável para determinar a distância, novamente, sendo menos preciso para as extremidades da linha, porém, o erro médio aumentou consideravelmente em relação à situação anterior. Referente ao tipo de falta, a bifásica foi a que apresentou menor precisão, já a trifásica a maior. Tais aferições referentes aos erros, podem ser percebidas ao visualizar as figuras 16, 17 e 18

Referente aos valores práticos, para a falta Fase-Terra, a média dos erros foi de 0,566% (2265,55 m), para a bifásica de 0,775% (3098,55 m) já na trifásica de 0,393% (1570,40 m). Com a maior área de busca atingindo aproximadamente 11,5 quilômetros, presente na extremidade da falta bifásica. Observa-se, assim, que as áreas de busca são substancialmente maiores ao compará-las à situação anterior, chegando a uma área de busca aproximadamente doze vezes maior. Tal fato é resultado direto da limitação do algoritmo ao tratar de linhas assimétricas, que podem corresponder, na realidade, a sistemas nos quais não há transposição de fases.

Tabela 3: Comparação de resultados para linha assimétrica. Fonte: Autoria própria.

Distância Real (km)	Falta AT		Falta AB		Falta ABC	
	Est. (km)	Erro (%)	Est. (km)	Erro (%)	Est. (km)	Erro (%)
10	6.268	0.933	4.227	1.443	7.068	0.733
30	26.453	0.887	24.772	1.307	27.365	0.659
50	46.712	0.822	45.336	1.166	47.666	0.584
70	67.036	0.741	65.918	1.021	67.972	0.507
90	87.42	0.645	86.516	0.871	88.281	0.430
110	107.85	0.538	107.13	0.718	108.59	0.353
130	128.33	0.418	127.75	0.563	128.91	0.273
150	148.84	0.290	148.39	0.403	149.23	0.193
170	169.37	0.158	169.03	0.243	169.55	0.113
190	189.91	0.023	189.67	0.083	189.87	0.033
210	210.45	0.113	210.32	0.080	210.19	0.048
230	230.98	0.245	230.96	0.240	230.51	0.128
250	251.48	0.370	251.59	0.398	250.83	0.208
270	271.96	0.490	272.22	0.555	271.14	0.285
290	292.38	0.595	292.83	0.708	291.45	0.363
310	312.76	0.690	313.43	0.858	311.76	0.440
330	333.07	0.768	334.01	1.003	332.06	0.515
350	353.32	0.830	354.58	1.145	352.36	0.590
370	373.5	0.875	375.12	1.280	372.65	0.663
390	393.6	0.900	395.65	1.413	392.94	0.735

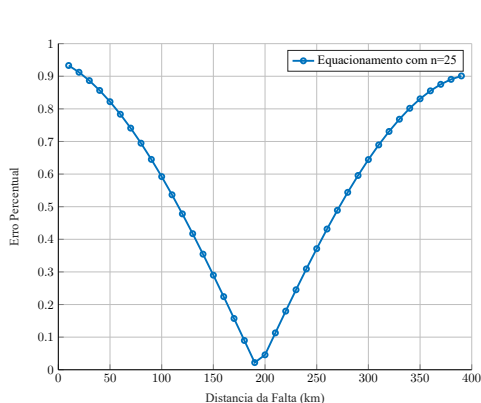


Figura 16: Erro resultante dos métodos para uma falta monofásica AT. Fonte: Autoria própria.

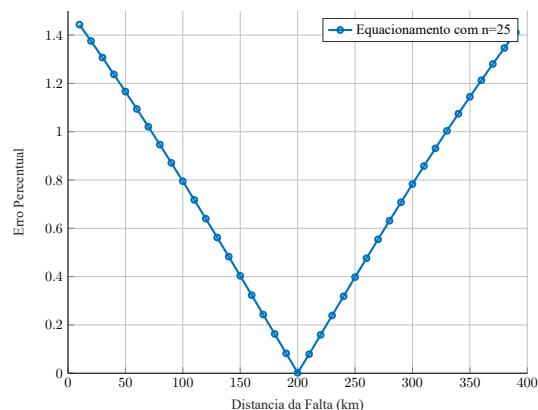


Figura 17: Erro resultante dos métodos para uma falta bifásica AB. Fonte: Autoria própria.

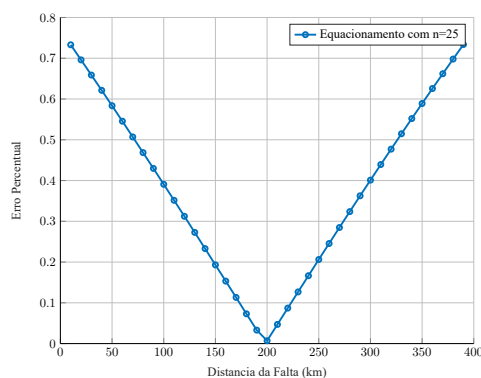


Figura 18: Erro resultante dos métodos para uma falta trifásica ABC. Fonte: Autoria própria.

3.3. Testes com impedância de falta não nula

Para a próxima bateria de testes, não serão feitas modificações nas características construtivas da linha, revertendo a alteração anterior do teste de assimetria, apenas será inserida uma impedância de falta para todos os tipos de falta. Com intuito de comprovar que o método é capaz de lidar com uma impedância de falta não nula, e entregar resultados precisos. Tendo em vista que, para a maioria das faltas reais, tende a existir uma impedância entre o ponto a linha e o terra, ou entre as fases do sistema. Muitas vezes composta pela impedância do arco elétrico, e de aterramento [18], como por exemplo, o choque de um cabo com uma árvore, ou a própria torre, sempre irá ocasionar uma impedância não nula. Para a simulação, foi utilizado um valor constante de $30\ \Omega$ como impedância de falta.

Também foi elaborado um gráfico para visualizar o ponto em falta, se utilizando das equações para obter a tensão a partir da distância, como visto pela Figura 19. Tendo como objetivo visualizar se a presença da impedância de falta dificulta o método a encontrar um ponto de convergências. Sendo uma falta fase-terra com impedância de curto não nula, estando localizada a 300 quilômetros da barra 1. Ao analisar o resultado obtido, é perceptível a existência de um ponto de convergência para as tensões, este representa a distância até a falta, e consequentemente, é observável que a existência de uma impedância de curto não impede o método de determinar o ponto em falta.

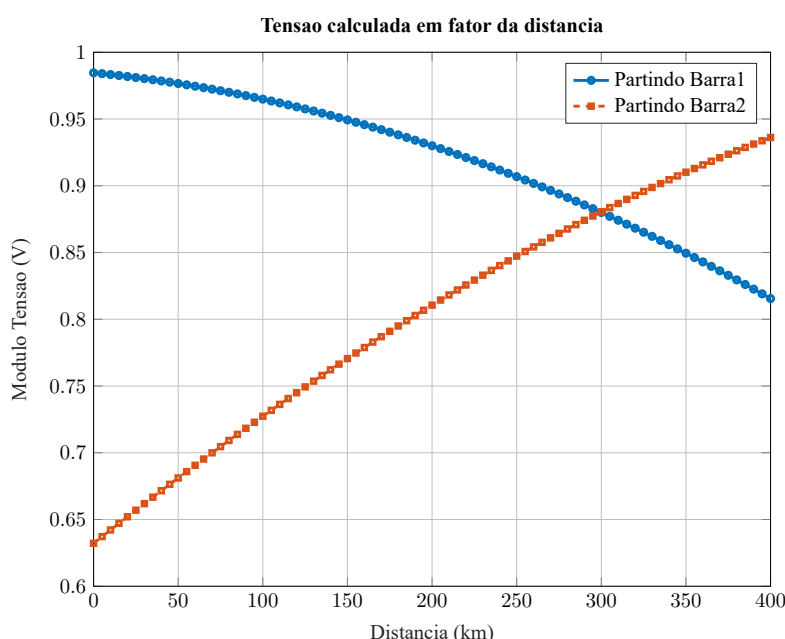


Figura 19: Tensão em função da distância, para falta AT em 300km. Fonte: Autoria própria.

Para fazer o teste comparativo do método com diferentes valores de distância e tipos de falta, foi elaborada outra tabela. Também com intuito de verificar se a existência de uma impedância de falta compromete, ou torna imprecisa a determinação da distância de falta. Esses dados podem ser observados na Tabela 4. A partir deles, percebe-se que o comportamento é similar a primeira situação estudada, apenas possuindo uma precisão levemente inferior. O método segue o padrão de precisão reduzida para valores nas extremidades da linha, e resultados mais precisos para distâncias centrais. Essas mesmas considerações sobre os erros dos métodos, podem ser percebidas ao visualizar as figuras 20, 21 e 22.

Também se constata que os valores de erro médio para as faltas fase-terra, bifásica e trifásica simuladas foram respectivamente: 0,092% (368,10 m), 0,046% (182,90 m) e 0,031% (123,05 m), com uma maior área de busca de 1,35 quilômetros, presente na extremidade da falta monofásica. Dessa forma, percebe-se que a área de busca é maior ao comparar com a situação ideal, contudo, o método ainda apresenta resultados satisfatórios e um bom desempenho para aplicações em situações reais.

Tabela 4: Comparação de resultados para situação com 30 Ω de resistência de falta. Fonte: Autoria própria.

Distância Real (km)	Falta AT		Falta AB		Falta ABC	
	Est. (km)	Erro (%)	Est. (km)	Erro (%)	Est. (km)	Erro (%)
10	10.559	0.140	10.357	0.089	10.268	0.067
30	30.536	0.134	30.303	0.076	30.222	0.056
50	50.496	0.124	50.254	0.064	50.181	0.045
70	70.442	0.111	70.208	0.052	70.146	0.037
90	90.379	0.095	90.166	0.042	90.114	0.029
110	110.31	0.078	110.13	0.033	110.09	0.023
130	130.24	0.060	130.09	0.023	130.06	0.015
150	150.16	0.040	150.06	0.015	150.04	0.010
170	170.09	0.023	170.03	0.008	170.02	0.005
190	190.01	0.003	190	0.000	190	0.000
210	209.93	0.018	209.97	0.008	209.99	0.003
230	229.85	0.038	229.94	0.015	229.97	0.008
250	249.76	0.060	249.91	0.023	249.95	0.013
270	269.68	0.080	269.87	0.033	269.92	0.020
290	289.6	0.100	289.83	0.043	289.9	0.025
310	309.52	0.120	309.79	0.053	309.87	0.033
330	329.45	0.138	329.74	0.065	329.83	0.043
350	349.39	0.153	349.69	0.078	349.8	0.050
370	369.35	0.163	369.63	0.093	369.75	0.063
390	389.33	0.168	389.57	0.108	389.7	0.075

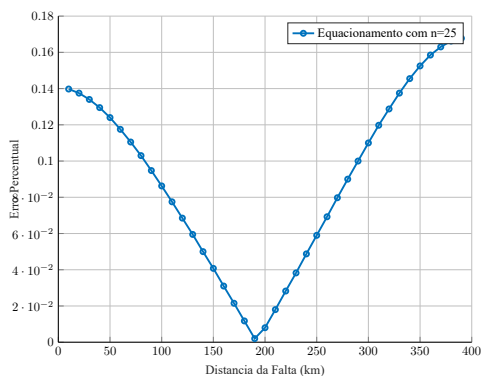


Figura 20: Erro resultante dos métodos para uma falha monofásica AT. Fonte: Autoria própria.

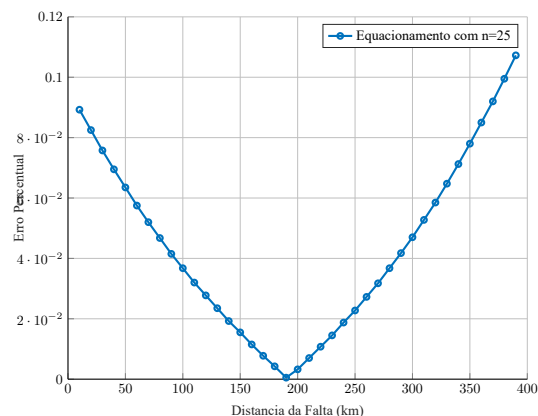


Figura 21: Erro resultante dos métodos para uma falha bifásica AB. Fonte: Autoria própria.

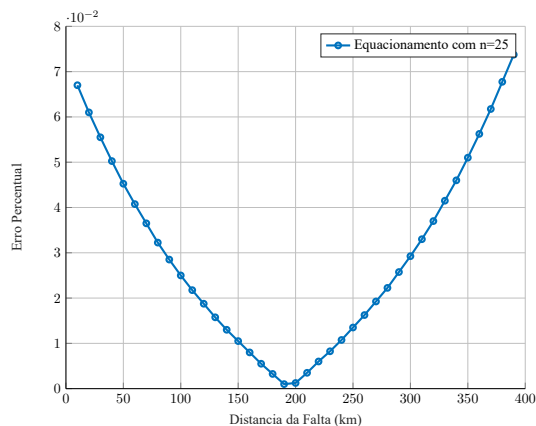


Figura 22: Erro resultante dos métodos para uma falha trifásica ABC. Fonte: Autoria própria.

4. CONCLUSÃO

Este artigo propôs o desenvolvimento de um modelo matemático iterativo para a representação de linhas de transmissão e a sua consequente aplicação para cálculo de distância de falta, juntamente com a validação computacional. Os procedimentos de validação foram realizados por meio de simulações no ambiente MATLAB/Simulink, submetendo o algoritmo a diferentes cenários operacionais, como variações de distância, assimetria da linha e inclusão de resistência de falta. Para verificar a robustez do método, os resultados foram comparados diretamente com trabalhos da literatura, os quais contemplam tanto métodos baseados no cálculo de impedância quanto abordagens fundamentadas na teoria de ondas viajantes.

Para a avaliação de desempenho e validação do modelo, foram explicitadas métricas quantitativas, notadamente o erro percentual médio relativo ao comprimento total da linha e o erro absoluto em metros, que oferecem uma base sólida para estimar as áreas de busca que uma equipe de campo teria de verificar no caso de falha. Em condições construtivas simétricas e ideais, o modelo obteve excelentes indicadores, apresentando um erro percentual médio de apenas 0,068% para faltas monofásicas, 0,038% para bifásicas e 0,023% para trifásicas. Na prática, tais resultados delimitam áreas de busca restritas a poucos vãos de torre, facilitando a inspeção pelas equipes de manutenção.

Apesar do desempenho satisfatório, é necessário delimitar as condições de aplicabilidade e as limitações do método proposto. O algoritmo apresenta sua maior precisão na região central da linha, mas sofre perda de exatidão, sendo observado que, conforme a discrepância entre as distâncias projetadas de cada terminal aumenta, o erro observado se eleva. Além disso, a aplicabilidade ideal do modelo pressupõe linhas com transposição de fases (simétricas), tendo em vista que, quando submetido a linhas assimétricas, o erro de localização eleva-se de forma substancial. Sendo observado na pior situação, como doze vezes maior ao ser comparado com o caso ideal, indicando, assim, um limite prático para a aproximação através do uso fundamental das redes de sequência.

Tendo em vista essas delimitações, vislumbram-se diversas perspectivas para a continuidade desta pesquisa. Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se a validação do algoritmo empregando dados reais de oscilografia fornecidos por concessionárias de energia. Isso permitiria aferir a resposta do modelo diante de ruídos e incertezas inerentes aos equipamentos de medição, bem como avaliá-lo frente a dados obtidos em regime transitório. Ademais, recomenda-se o desenvolvimento de um estudo visando compensar tanto o erro inerte à projeção matemática da tensão ao longo da distância quanto o observado para situações assimétricas, com o objetivo de mitigar a imprecisão da localização de faltas nas extremidades da linha.

REFERÊNCIAS

- [1] XINGU RIO TRANSMISSORA DE ENERGIA S.A. **Demonstrações contábeis regulatórias**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://stategrid.com.br/wp-content/uploads/2024/11/XINGU-RIO-TRANSMISSORA-DE-ENERGIA.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2026.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório Anual 2023**. [S. l.]. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2023-Relatorio-Anual-acessivel_21032024.pdf. Acesso em: 25 mar. 2026.
- [3] ZIEGLER, Gerhard. **Numerical Distance Protection: Principles and Applications**. [S. l.]: Publicis, 2006.
- [4] BUKVISOVA, Zuzana *et al.* Two-Terminal Algorithm Analysis for Unsymmetrical Fault Location on 110 kV Lines. **Energies**, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/7/1193>.
- [5] BENATO, R.; DAMBONE SESSA, Sebastian. The Ossanna's Theorem for Educational Purposes: Impact of Distributed Parameter Transmission Lines on Power Systems. **IEEE Access**, PP, 2021.
- [6] STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. [S. l.]: McGraw-Hill, 1978.
- [7] FERREIRA, Kécio Patrick Delgado. **Avaliação da Qualidade de Modelos de Linhas de Transmissão para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande.
- [8] SHI, Zongyang *et al.* Applying Transmission Line Theory to Study the Transmitting Turn-OFF Current in a Long Grounded Wire. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 65, 2017.
- [9] ANDERSON, Paul M. **Power System Protection**. [S. l.]: McGraw-Hill, 1999.
- [10] MONTEMEZZO, João Felipe. **Influência dos Parâmetros e Modelos de Linhas na Solução do Fluxo de Carga de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2016. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Foz do Iguaçu.
- [11] OLIVEIRA, Newton B. de. **Circuitos Elétricos no Domínio do Tempo e da Frequência**. [S. l.]: Edufba, 2008.
- [12] JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. **IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution**, PAS-137, n. 6, p. 395–402, 1990.
- [13] NEXANS. **Ficha Técnica de Condutor de Alumínio com Alma de Aço Owl, ABNT NBR 7270/88**. [S. l.]. Disponível em: <https://www.nexans.com.br/.rest/catalog/v1/product/pdf/ID540012745>. Acesso em: 1 abr. 2026.
- [14] IDRIS, muhd hafizi *et al.* Effective Two-Terminal Single Line to Ground Fault Location Algorithm. **2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2012 - Conference Proceedings**, 2012.
- [15] SANTANA, Lucas Tomaz. **Localização de faltas em linhas de transmissão baseada na teoria das ondas viajantes e em componentes de alta frequência**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188371>.
- [16] LOPES, Felipe *et al.* Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2017.
- [17] PAVLOV, L'Uboš *et al.* Impact of impedance unbalance on the efficiency of electricity transmission and distribution - A case study. **Journal of Electrical Engineering**, v. 68, 2017.
- [18] DE ANDRADE SUÁREZ, José; SORRENTINO, Elmer. Typical expected values of the fault resistance in power systems. In: 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, T&D-LA 2010. [S. l.: s. n.], 2010.