

# Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Distância Euclidiana

Guilherme Torres de Alencar. Ricardo Caneloi dos Santos. Aline de Oliveira Neves Panazio

*Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil.*

*Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas*

(e-mail: [alencar.guilherme@ufabc.edu.br](mailto:alencar.guilherme@ufabc.edu.br), [ricardo.santos@ufabc.edu.br](mailto:ricardo.santos@ufabc.edu.br), [aline.panazio@ufabc.edu.br](mailto:aline.panazio@ufabc.edu.br))

**Abstract:** Transmission lines are the most vulnerable elements in power systems. Due to the length of the transmission lines, they are always exposed to many types of faults, caused by factors as weather conditions, equipment failures, accidents, among others. To ensure the power system availability and reliability, the fault location function should be performed as fast and efficiently as possible. Given the importance of this topic, a large number of studies have been developed to improve the fault location function in transmission lines, including the steps of fault detection and classification, performed before the fault location function. This paper presents a method based on Euclidean distance for detecting and classifying faults, by using only voltage signals from the transmission line. A large number of tests, considering the power system in different operational conditions were executed. All observed results show that the proposed method is able to correctly detect and classify the fault regardless the power system condition.

**Resumo:** As linhas de transmissão são os elementos mais vulneráveis do sistema elétrico. Devido ao comprimento das linhas de transmissão, estas estão sempre expostas a muitos tipos de falhas, causadas por fatores como: condições climáticas, falhas de equipamentos, acidentes, entre outros. Para assegurar a disponibilidade e confiabilidade do sistema elétrico, a função de localização de falhas deve ser executada da forma mais rápida e segura possível. Dada a importância desse assunto, muitos estudos são apresentados para melhorar a função de localização de falhas em linhas de transmissão, incluindo as etapas de detecção e classificação de falhas, que precedem a função de localização. Este artigo apresenta um método baseado em distância Euclidiana para detectar e classificar falhas, usando somente sinais de tensão da linha de transmissão. Um grande número de testes, considerando um sistema elétrico operando sob diferentes condições, foi executado. Todos os resultados observados mostram que o método proposto é capaz de detectar e classificar falhas corretamente, independentemente da condição operacional do sistema elétrico.

**Keywords:** fault detection; fault classification; transmission line protection; Euclidean distance; digital relay.

**Palavras-chaves:** detecção de falhas; classificação de falhas; proteção de linhas de transmissão; distância Euclidiana; relé digital.

## 1. INTRODUÇÃO

O correto desempenho e alta confiabilidade de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) são itens fundamentais para a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Contudo, interrupções da energia para os consumidores podem ocorrer por vários fatores e em diversos equipamentos do sistema. A linha de transmissão (LT) é o elemento do SEP mais susceptível a falhas, devido a sua extensão e exposição aos mais variados tipos de terrenos e intempéries (Coury, Oleskovicz and Giovanini, 2007).

As etapas de detecção e classificação de uma falha em uma LT são de grande importância na operação do SEP, sendo etapas que precedem o algoritmo de localização de falhas. Diversas abordagens para a detecção e classificação de falhas são consideradas na prática, sendo estas, em sua maioria, executadas nos relés digitais instalados nas subestações. Normalmente, tais relés processam os sinais de tensão e/ou

corrente provenientes dos terminais das LT para decidir sobre a condição operativa da LT e, em caso de falha, decidir sobre as fases envolvidas. Devido a importância da identificação de falhas, dentro do contexto de localização de falhas, atualmente diversos trabalhos são desenvolvidos com objetivo de aprimorar as etapas de detecção e classificação de falhas.

Em (Prasad and Nayak, 2019) os autores apresentam uma técnica baseada na distância euclidiana entre sucessivas amostras de corrente, visando a detecção e classificação de falhas em LT. Após inúmeros testes os resultados revelaram que o método é confiável e tem baixo tempo de resposta. A taxa de amostragem utilizada neste método foi de 1 kHz.

Além do trabalho mencionado e inúmeros outros encontrados na literatura (Chen, Hu and He, 2016; Ferreira *et al.*, 2016; Koley, Kumar and Ghosh, 2016; Rajaraman *et al.*, 2018), é possível observar que muito dos algoritmos propostos são complexos e sofisticados, necessitando de diversas

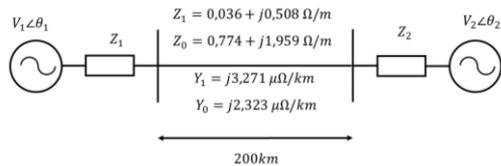


Fig. 1. LT de 500kV adotada. Fonte (Almeida *et al.*, 2017) adaptado.

informações para executar as tarefas de interesse. Além disso, devido a características citadas, tais algoritmos possuem alta carga computacional, impondo desafios para a sua implementação em hardware. Nesse sentido, a proposta deste trabalho é apresentar um método simples, porém robusto, para a detecção e classificação de faltas em LT. Tal método baseia-se exclusivamente nas medidas de distância euclidiana entre os sinais de tensão provenientes dos terminais da LT, podendo ser utilizado em um estágio anterior ao estágio de localização de faltas. Diferentemente do método empregado em (Prasad and Nayak, 2019), que calcula os fasores em cada instante de tempo, o método proposto utiliza apenas os sinais instantâneos de tensão, não necessitando calcular a Transformada de Fourier.

O trabalho será apresentado da seguinte forma. Na Seção 2 serão mostradas as características da LT modelo, bem como é efetuada a aquisição e o janelamento dos dados de tensão. Na Seção 3 serão definidas as distâncias euclidianas de detecção e de classificação para faltas em LT. Por fim, os resultados serão apresentados para a LT proposta na Seção 2 e também para um segundo modelo de linha, de forma a validar o método proposto.

## 2. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO E PROCESSO DE AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para que um algoritmo de localização de faltas seja executado de maneira precisa e confiável, deve-se, primeiramente, detectar e classificar a falta corretamente. Visando o desenvolvimento e testes do esquema proposto para a detecção e classificação de faltas, um SEP deve ser criteriosamente escolhido e modelado, permitindo a geração de sinais precisos das LT sob falta e em condições normais.

### 2.1 Linha de transmissão adotada

Para desenvolver e avaliar o esquema proposto, foram utilizados sinais de tensão disponíveis nas extremidades de uma LT de 500 kV e 200 km de comprimento. A LT adotada e seus principais parâmetros são apresentados na Figura 1, onde  $V_1$ ,  $Z_1$ ,  $V_2$  e  $Z_2$ , representam os sistemas equivalentes conectados em cada barra terminal. Para gerar os sinais de interesse, várias faltas foram simuladas ao longo da LT, considerando diferentes condições de falta e operativas do SEP. Os parâmetros da LT são utilizados para a sua modelagem computacional a partir de parâmetros distribuídos.

### 2.2 Aquisição dos dados de tensão

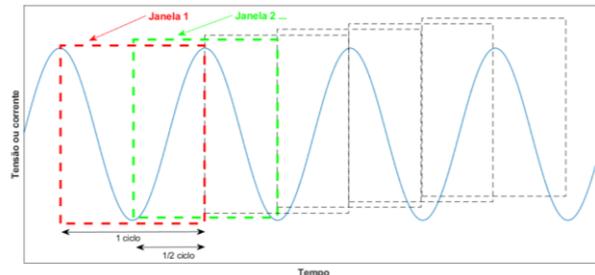


Fig. 2. Amostragem e janelamento do sinal.

Para desenvolver e analisar o método proposto, diversas situações de falta foram simuladas na LT adotada. Para cada situação de falta simulada, os sinais de tensão foram amostrados na barra terminal 1 da LT com uma frequência de amostragem de 100 kHz. Este valor é significativamente inferior a maioria dos sistemas projetados para o mesmo fim, que segundo (Marx, Johnson and Guzmán, 2013) usam frequências de amostragem entre 0,5 e 5 MHz.

A janela de dados utilizada pelo algoritmo proposto é de um ciclo, com deslocamento de meio ciclo, conforme mostra a Fig. 2. Desta forma, um distúrbio no SEP sempre aparecerá na janela analisada e será detectado em, no máximo, meio ciclo.

A tensão foi escolhida como sinal de entrada para o esquema proposto, visto que este sinal varia menos durante as faltas, bem como diante das diversas condições possíveis de carga, diferentemente dos sinais de corrente. Além disso, não há problemas relacionados a distorção dos sinais devido à saturação dos transformadores de corrente frente a faltas severas.

## 3. ESQUEMA DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### 3.1 Distância euclidiana na detecção e classificação de faltas

A título de exemplo, a Fig. 3 apresenta a tensão em uma das fases (na barra 1) da LT mostrada na Fig. 1, contendo apenas um ciclo da frequência fundamental do sinal. Como se trata de um sinal periódico, observa-se que a comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo invertido deve ser idealmente nula, conforme ilustra a Fig. 4.

Quando ocorre uma falta na LT, o sinal de tensão tende a sofrer alguma deformação, quando comparado ao mesmo sinal em operação normal, como indica a Fig. 5. Neste sentido, diferentemente do caso anterior (Fig. 4), observa-se que a diferença entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo invertido não é nula, conforme mostra a Fig. 6.

A distância entre as duas curvas da Fig. 6, pode ser calculada a partir de um método baseado na distância euclidiana, servindo como parâmetro para a detecção de um distúrbio na LT. Nesse sentido, considere um sinal de tensão representado pelo vetor  $V_1 = [v[1] \ \dots \ v[N]]$ , onde  $v[n]$  é a tensão

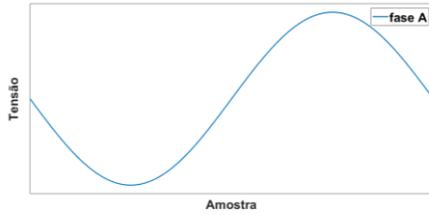


Fig. 3. Um ciclo do sinal de tensão.

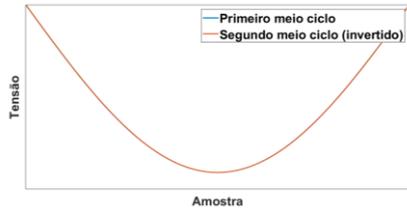


Fig. 4. Comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo da tensão em uma das fases.

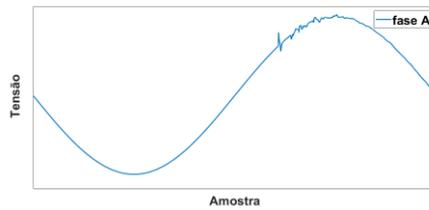


Fig. 5. Um ciclo do sinal de tensão após uma falta.

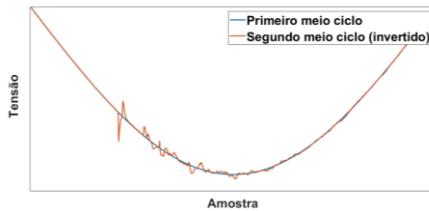


Fig. 6. Comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo de uma fase faltosa.

instantânea na  $n$ -ésima amostra e  $N$  corresponde a quantidade de amostras da sequência, sendo que este sinal corresponde a uma janela de um ciclo de tensão. O vetor  $V$  pode ser dividido em dois semiciclos com mesmo intervalo de tempo, conforme as equações 1 e 2.

$$V_1 = \left[ v[1] \quad \dots \quad v \left[ \frac{N}{2} \right] \right] = \left[ v_1[1] \quad \dots \quad v_1 \left[ \frac{N}{2} \right] \right] \quad (1)$$

$$V_2 = \left[ v \left[ \frac{N}{2} + 1 \right] \quad \dots \quad v[N] \right] = \left[ v_2[1] \quad \dots \quad v_2 \left[ \frac{N}{2} \right] \right] \quad (2)$$

A distância euclidiana entre o primeiro meio ciclo e o inverso do segundo meio ciclo pode ser calculada conforme a equação 3.

$$dist = \|V_1 + V_2\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{N/2} (v_1[k] + v_2[k])^2} \quad (3)$$

onde o operador  $\|\cdot\|$  corresponde a norma euclidiana.

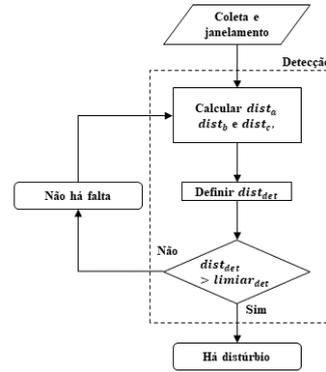


Fig. 7. Fluxograma de detecção de distúrbios.

Admitindo que o sinal de tensão seja trifásico, pode-se reescrever a equação 3 por fase, conforme a equação 4, onde  $f$  pode ser substituído pelas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

$$dist_f = \|V_{f1} + V_{f2}\| \quad (4)$$

### 3.2 Detecção de faltas

O objetivo em se definir a distância euclidiana dada pela equação 4 é mensurar o nível de perturbação ocorrido no SEP. Em casos onde não existe distúrbio ou nos casos em que o distúrbio é pequeno, o valor de  $dist_f$  será pequeno e pode ser desprezado. No entanto, em casos onde os distúrbios são mais expressivos a distância euclidiana será maior e um valor baseado nesta distância pode indicar a ocorrência de uma falta. Em um SEP operando com tensões e correntes trifásicas, a equação 5 pode ser utilizada como referência para a detecção de distúrbios.

$$dist_{det} = \text{máximo}(dist_a, dist_b, dist_c) \quad (5)$$

onde  $dist_a$ ,  $dist_b$  e  $dist_c$  correspondem ao valor de  $dist_f$  para as fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , conforme a equação 4.

Para declarar a existência de uma falta no SEP define-se um limiar de detecção  $limiar_{det}$  para diferenciar situações normais de situações de faltas. Assim, se  $dist_{det} > limiar_{det}$  existe falta, caso contrário não existe. O fluxograma da Fig. 7 mostra o método de detecção de faltas.

### 3.2 Classificação de faltas

A distância euclidiana  $dist_f$  da  $f$ -ésima fase também pode ser empregada para indicar em quais fases ocorreu a falta e, conseqüentemente, classificar as faltas na LT. Para construir um classificador de faltas preciso, não se pode apenas atribuir um limiar para valores de  $dist_f$ , já que faltas em uma fase podem influenciar nas outras fases. Nesse sentido, inicialmente, detecta-se a existência de uma falta, como discutido no item 3.1. Uma vez que faltas em SEP podem envolver a terra, a equação 6 é usada para acusar esse envolvimento, comparando o valor de  $dist_t$ , por meio de um valor de limiar, definido como  $limiar_t$  (limiar de terra). Caso

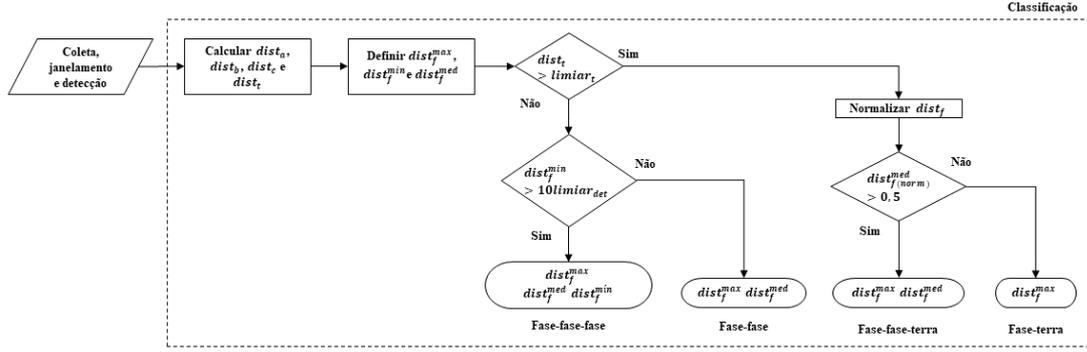


Fig. 8. Fluxograma de classificação de faltas.

exista o envolvimento da terra, a falta pode ser monofásica ou bifásica terra. Caso contrário, a falta pode ser bifásica ou trifásica.

$$dist_t = \|(V_{a1} + V_{b1} + V_{c1}) + (V_{a2} + V_{b2} + V_{c2})\| \quad (6)$$

Após a informação sobre o envolvimento da terra, define-se quais fases possuem maior valor, menor valor e valor mediano de distância euclidiana, conforme equações 7 a 9, que serão utilizados para definir as fases faltosas  $fase_{max}$ ,  $fase_{min}$  e  $fase_{med}$ , respectivamente.

$$dist_f^{max} = \text{máximo}(dist_a, dist_b, dist_c) \quad (7)$$

$$dist_f^{min} = \text{mínimo}(dist_a, dist_b, dist_c) \quad (8)$$

$$dist_f^{med} = \text{mediano}(dist_a, dist_b, dist_c) \quad (9)$$

Considerando que foi descartado o envolvimento da terra e como as faltas envolvem no mínimo duas fases (pois são bifásicas ou trifásicas), a classificação destes dois tipos de faltas consiste em determinar se a fase com menor distância euclidiana participa da falta. Em outras palavras, corresponde em calcular a fase da equação 8 e comparar com um limiar para determinação de faltas bifásicas e trifásicas, definido como  $limiar_{BT}$ . Esse limiar pode ser determinado em função do limiar de detecção, conforme equação 10.

$$limiar_{BT} = k \cdot limiar_{det} \quad (10)$$

Se  $dist_f^{min} > limiar_{BT}$  então a fase com menor distância euclidiana participa da falta, caso contrário não. Após inúmeras simulações e observações, o valor de  $k = 10$  se mostrou bastante oportuno.

Para as faltas que envolvem a terra (monofásicas e bifásicas terra) é necessário um método mais refinado, pois as fases são também afetadas de forma significativa. Primeiramente, as distâncias de classificação devem ser normalizadas, calculando as fases com menor e maior distância euclidiana, conforme as equações 11 e 12, respectivamente, salientando que a componente terra também participa do cálculo. A distância da  $f$ -ésima fase normalizada é determinada conforme equação 13.

$$dist^{min} = \text{mínimo}(dist_a, dist_b, dist_c, dist_t) \quad (11)$$

$$dist^{max} = \text{máximo}(dist_a, dist_b, dist_c, dist_t) \quad (12)$$

$$dist_{f(norm)} = \frac{dist_f - dist^{min}}{dist^{max} - dist^{min}} \quad (13)$$

Como se trata de uma falta monofásica ou bifásica, uma das fases está envolvida e outra não está, restando definir se a fase com distância mediana, denominada  $dist_{f(norm)}^{med}$  (equação 14) está sob condição de falta ou não. Nas faltas monofásicas a distância mediana tende a ser mais próxima de zero, enquanto que nas faltas bifásicas ela tende a ser próxima de um. Portanto, é possível atribuir a condição de  $dist_{f(norm)}^{med} > 0,5$  para faltas bifásicas e  $dist_{f(norm)}^{med} < 0,5$  para faltas monofásicas.

$$dist_{f(norm)}^{med} = \text{mediano}(dist_{a(norm)}, dist_{b(norm)}, dist_{c(norm)}) \quad (14)$$

O fluxograma da Fig. 8 resume o algoritmo de classificação de faltas.

## 4. RESULTADOS

Os resultados obtidos com o esquema de detecção e classificação de faltas apresentados nas seções anteriores são analisados e discutidos nesta seção. Além do SEP apresentado na Fig. 1 (LT de 500 kV e 200 km), também foi modelado um segundo SEP, constituído por uma LT de 440 kV e 330 km, com parâmetros significativamente diferentes do primeiro. Dessa maneira, será possível avaliar o esquema proposto diante de diferentes condições operativas em dois SEP distintos, conferindo aos resultados maior credibilidade.

### 4.1 Casos considerados para a LT de 500kV

O SEP adotado para este trabalho foi simulado no software PSCAD, onde várias situações de falta foram analisadas. Para avaliar o esquema proposto, foram realizadas alterações nos dados dos geradores (tensão e impedâncias das fontes), no local da falta, no tipo de falta e no ângulo de incidência da falta, mostrados na Tabela 1.

### 4.2 Resultados da detecção de faltas para a LT de 500kV

**Tabela 1. Características da LT 500kV e das faltas**

| Característica                              | Valores considerados                     |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| Tensão nas barras (pu)                      | 0,95; 1,05 e 1,05                        |
| Indutância nas barras (mH)                  | 5 e 10                                   |
| Local da falta (distância da barra 1 em km) | entre 5 e 195                            |
| Tipo de falta                               | A; B; C; AB; AC; BC; ABT; ACT; BCT e ABC |
| Ângulo de incidência (°)                    | -90; -60; -30; 30; 60 e 90               |
| Resistência de falta (Ω)                    | 0; 50 e 100                              |

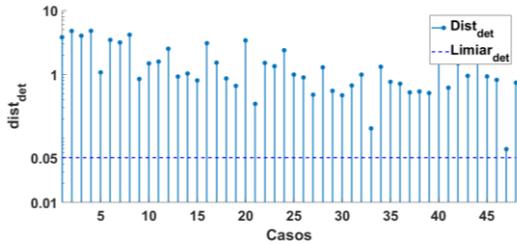


Fig. 9. Distância de detecção na LT de 500kV.

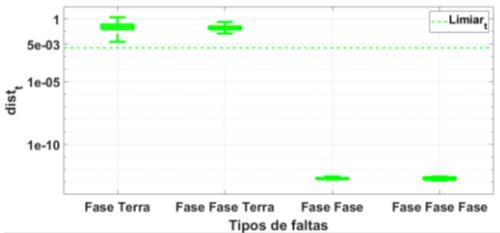


Fig. 10. Distância da classificação de terra na LT de 500kV.

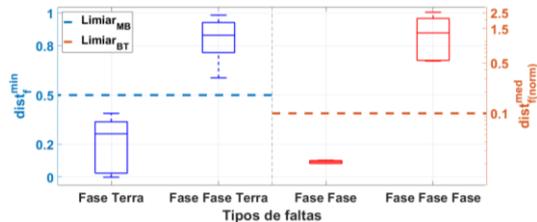


Fig. 11. Distância da classificação na LT de 500kV.

Para declarar a existência de falta no SEP é necessário definir o valor que  $dist_{det}$  (equação 5) deve assumir, permitindo diferenciar uma situação de falta de uma condição de operação normal. Após simuladas diversas situações de falta e condições de operação normal, o valor de 0,05 foi definido como limiar para a detecção da falta, ou seja, para valores abaixo deste limiar o SEP opera normalmente e não existe falta.

A Fig. 9 mostra que todos os 48 casos de falta foram detectados corretamente, uma vez que uma falta sempre resulta em um valor de limiar superior a 0,05. Para casos de operação normal e pequenos distúrbios no SEP os valores de  $dist_{det}$  são sempre inferiores a 0,05.

#### 4.3 Resultados da classificação de faltas para a LT de 500kV

Para a tarefa de classificação de faltas, após o cálculo das distâncias euclidianas de cada fase e da definição da mínima, mediana e máxima, calcula-se a distância euclidiana de terra, determinando em qual grupo a falta se enquadra: fase-terra/fase-fase-terra ou fase-fase/fase-fase-fase

Os resultados dos 48 casos foram agrupados de acordo com o tipo de falta na forma de *boxplot*, conforme a Fig. 10. Definindo-se um limiar de terra de 0,005, é possível observar que as faltas monofásicas e bifásicas-terra apresentam distância euclidiana de terra acima desse limiar, enquanto que as faltas bifásicas e trifásicas apresentam valores abaixo desse limiar. Desta forma é possível determinar qual distância euclidiana será calculada para classificação da falta:  $dist_f^{min}$  ou  $dist_f^{med(norm)}$ .

O gráfico da Fig. 11 mostra na forma de *boxplot*, para os 48 casos de falta, a distância euclidiana mínima para as faltas fase-terra e fase-fase-terra e a distância euclidiana mediana normalizada para as demais faltas.

Nota-se claramente que em todos os casos as faltas foram classificadas corretamente quanto ao tipo de falta, já que as faltas fase-terra e fase-fase-terra apresentaram  $dist_f^{min}$  abaixo e acima do limiar 0,5, respectivamente. Da mesma forma, as faltas fase-fase e fase-fase-fase apresentaram  $dist_f^{med(norm)}$  abaixo e acima do limiar 0,1, respectivamente.

#### 4.4 Casos considerados para a LT de 440kV

Para validar e conferir maior credibilidade aos resultados e análises obtidos nos itens anteriores, uma segunda LT foi modelada e simulada diante de diversas situações de faltas. Tal linha difere da anterior com relação à geometria das torres, nível de tensão (440 kV) e comprimento (330 km), conforme indica a Fig. 12.

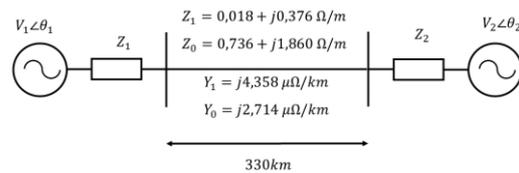


Fig. 12. LT de 440kV adotada. Fonte: (Coury, Oleskovicz and Giovanini, 2007) adaptado.

**Tabela 2. Características da LT 440kV e das faltas**

| Característica                              | Valores considerados                     |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| Tensão nas barras (pu)                      | 0,95; 1,05 e 1,05                        |
| Local da falta (distância da barra 1 em km) | entre 10 e 320                           |
| Tipo de falta                               | A; B; C; AB; AC; BC; ABT; ACT; BCT e ABC |
| Ângulo de incidência (°)                    | -90; -60; -30; 30; 60 e 90               |
| Resistência de falta (Ω)                    | 0; 30; 50 e 70                           |

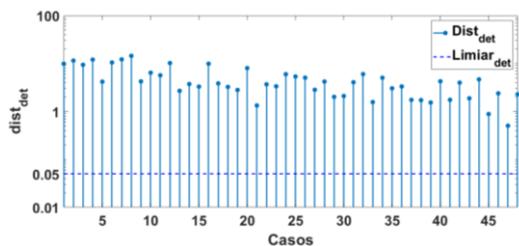


Fig. 13. Distância de detecção na LT de 440kV.

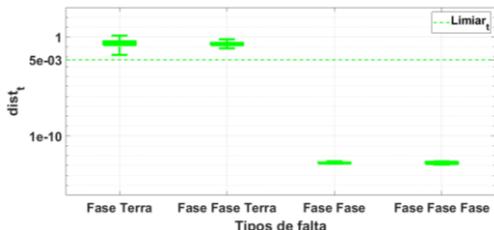


Fig. 14. Distância da classificação de terra na LT de 440kV.

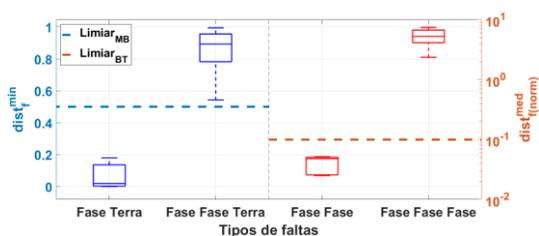


Fig. 15. Distância da classificação da falta na LT de 440kV.

Os casos de falta considerados foram simulados de acordo com as características mostradas na Tabela 2, que se diferenciam daquelas apresentadas na Tabela 1. Tal medida visa conferir maior variedade de casos ao estudo, mostrando a abrangência da solução proposta.

#### 4.5 Resultados na detecção de faltas para a LT de 440kV

Para a etapa de detecção das faltas os resultados são apresentados na Fig. 13, onde pode ser verificado que todos os casos detectaram a falha corretamente.

#### 4.6 Resultados na classificação de faltas para LT de 440kV

Os resultados para a etapa de classificação são mostrados nas Figs 14 e 15 em gráficos na forma de *boxplot*. Em todas as simulações da LT de 440kV, as faltas foram devidamente classificadas, mostrando que o esquema proposto responde corretamente para diferentes LT, condições operativas, locais de falta, tipo de falta e resistência de falta, podendo ser utilizado na etapa que precede a função de localização de faltas.

### 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho um esquema baseado em distância euclidiana foi proposto para as funções de detecção e classificação de faltas em LT. Diversos casos de faltas foram simulados ao

longo de uma LT de 500 kV e 200 km, considerando diversas condições de falta e operativas do SEP, visando desenvolver e avaliar o esquema proposto. Para confirmar e validar os resultados obtidos inicialmente, uma segunda LT de 440 kV e 330 km de comprimento foi modelada e simulada no PSCAD, possibilitando analisar os novos resultados em termos de detecção e classificação de faltas. Os resultados mostraram que para os 96 casos de falta simulados nas duas LT (48 para cada LT), o método proposto foi capaz de detectar a existência da falta e classificá-la corretamente, independentemente das condições operativas do SEP ou das características da falta (local, resistência e ângulo de incidência). Dessa forma, o esquema proposto mostra-se promissor para ser empregado em estágios anteriores ao de localização de faltas nos relés digitais.

### REFERÊNCIAS

- Almeida, A. R. et al. (2017) 'ICA feature extraction for the location and classification of faults in high-voltage transmission lines', *Electric Power Systems Research*, Elsevier B.V., 148, pp. 254–263. doi: 10.1016/j.epsr.2017.03.030.
- Chen, K., Hu, J. and He, J. (2016) 'Detection and Classification of Transmission Line Faults Based on Unsupervised Feature Learning and Convolutional Sparse Autoencoder', *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 1–1. doi: 10.1109/TSG.2016.2598881.
- Coury, D. V., Oleskovicz, M. and Giovanini, R. (2007) *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Dos Relés Eletromecânicos Aos Microprocessados Inteligentes*. Edited by E. da U. de S. Paulo. Editora da Universidade de São Paulo.
- Ferreira, V. H. et al. (2016) 'A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines', *Electric Power Systems Research*, 136, pp. 135–153. doi: 10.1016/j.epsr.2016.02.002.
- Koley, E., Kumar, R. and Ghosh, S. (2016) 'Low cost microcontroller based fault detector, classifier, zone identifier and locator for transmission lines using wavelet transform and artificial neural network: A hardware co-simulation approach', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, pp. 346–360. doi: 10.1016/j.ijepes.2016.02.015.
- Marx, S., Johnson, B. and Guzmán, A. (2013) 'Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results', *16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference Atlanta, Georgia*, pp. 1–14.
- Prasad, C. D. and Nayak, P. K. (2019) 'A DFT-ED based approach for detection and classification of faults in electric power transmission networks', *Ain Shams Engineering Journal*. Ain Shams University, 10(1), pp. 171–178. doi: 10.1016/j.asej.2018.02.004.
- Rajaraman, P. et al. (2018) 'Robust fault analysis in transmission lines using Synchrophasor measurements', *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3(1), p. 14. doi: 10.1186/s41601-018-0082-4.