

Algorithm based on Euclidean Distance for Detecting Faults in Transmission Lines

Alisson Mesquita da Silva, UFABC, Ricardo Caneloi dos Santos, UFABC e Guilherme Torres de Alencar
Universidade federal do ABC - UFABC.

Abstract-- In electrical power systems, transmission lines (TLs) are critical components that are often susceptible to different types of faults. Once a fault occurs, a fast restoration procedure is crucial and depends on accurate fault detection and classification functions. This study presents a new method, based on Euclidean Distance (ED) measurements, for fault detection using either voltage or current signals. Various disturbance scenarios in the power system were simulated, including faults, reactor insertion, and capacitor insertion. The simulated cases and the ED-based algorithm were modeled and executed in RTDS, allowing real-time simulations. The results showed that the developed algorithm is accurate in differentiating between fault conditions and other possible operational situations in power systems. To analyze the behavior of the proposed ED-based algorithm, the K-means technique was used, which confirmed the potential of the method presented in this paper.

Index Terms-- Fault detection; fault diagnosis; power system protection; Euclidean Distance; digital relay.

I. INTRODUÇÃO

A localização de faltas em Linhas de Transmissão (LT) é essencial para evitar danos aos equipamentos, interrupções no fornecimento de energia, bem como assegurar a estabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP) [1]. Em geral, os relés convencionais instalados nas LTs são capazes de localizar as faltas, porém, para maior precisão, muitas vezes é necessário recorrer a métodos mais sofisticados. Dependendo do método utilizado, a localização é precedida por duas importantes etapas: a detecção da falta (DF) e classificação da falta (CF) [2].

Em [3] os autores simularam um SEP com uma linha real de 115 kV e utilizaram um algoritmo baseado em Transformada Wavelet embarcado em um Arduino Due para proteger a LT. A corrente de sequência positiva foi usada para detectar as faltas, enquanto a corrente trifásica e a corrente de sequência zero foram usadas para classificá-las.

Os autores em [4] utilizaram três transformadas para o processamento dos sinais de corrente de uma LT. As Transformadas Ortonormal Stockwell Discreta (DOST), FFT e a Transformada Hilbert (HT) decompõem os sinais de corrente das fases e geram os valores de índice para cada transformada. Esses índices são multiplicados para encontrar um valor de limiar que indica se o sistema está operando em condição de falta.

Em [5] os autores propõem um método de localização de faltas a partir da medição de sinais em um terminal da linha. Os sinais foram analisados no domínio da frequência com o uso da FFT, de forma a identificar a primeira harmônica após a falta. A teoria das ondas viajantes foi utilizada para a localização das faltas.

Com a popularização da Inteligência Artificial (IA) vários trabalhos utilizam essas técnicas na proteção de SEP. Em [6] os valores RMS das correntes e tensões trifásicas da LT são enviadas para um bloco de detecção e classificação de faltas constituído por RNAs (Rede Neurais Artificiais). Para detecção de faltas, é utilizada uma RNA com três entradas (correntes trifásicas) e uma saída. Já na RNA para classificação de faltas, são utilizadas seis entradas e quatro saídas. Os autores concluíram que as RNAs desenvolvidas apresentam bom desempenho na detecção e classificação das faltas, visto que as faltas foram todas detectadas entre 8 ms e 10 ms.

Em [7] uma rede *Long Short Term Memory* (LSTM) é utilizada para a classificação de faltas. As LSTM são adequadas para dados de séries temporais, pois conseguem recordar sinais anteriores para classificar novos sinais. Uma LT foi desenvolvida no MATLAB e possui tensão nominal de 400 kV e 100 km de comprimento. Os autores concluíram que a rede LSTM é capaz de classificar com precisão 10 diferentes tipos de faltas em LT.

Os métodos supracitados utilizam algoritmos sofisticados que necessitam de alta capacidade de processamento, impondo maior complexidade e custo adicional ao projeto. No entanto, de forma alternativa, este trabalho apresenta a implementação de um algoritmo simples, baseado em medidas de Distância Euclidiana (DE), para a detecção de faltas em LT. Adicionalmente, para diferenciar faltas de outros possíveis distúrbios na LT, também se propõe um procedimento baseado em K-means e cálculo da DE.

II. METODOLOGIA

A. Sistema de transmissão adotado

Para implementação da proposta baseada em DE, foi considerada uma LT de 500 kV e 200 km, modelada com parâmetros distribuídos dependentes da frequência, conforme ilustra a Figura 1. A geometria das torres utilizadas é apresentada na Figura 2.

O SEP foi modelado no software RSCAD e executado RTDS, que permite a simulação das faltas em tempo real. Foram realizadas diversas simulações que consideraram

diferentes cenários, incluindo situações de falta e condições normais de operação. Durante essas simulações, os valores de tensão e corrente foram cuidadosamente registrados.

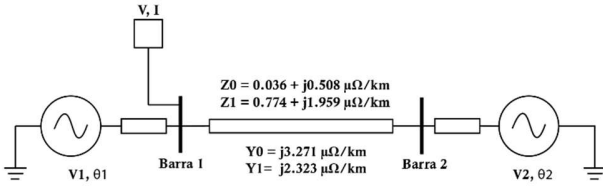


Fig.1 Modelo de SEP adotado [2].

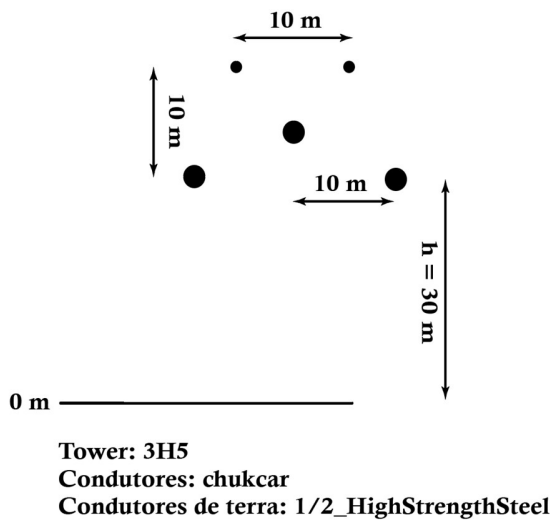


Fig.2. Geometria da torre da LT [2].

B. Aquisição de dados

A execução dos casos planejados e a aquisição de dados foram realizadas de maneira automatizada para cada simulação considerada. O SEP executado no RTDS é mostrado na Fig. 3, sendo preparado no RSCAD a partir do unifilar mostrado na Fig. 1. Os sinais de corrente e tensão foram medidos no terminal local da LT com uma frequência de amostragem de 20 kHz, como destacado na Fig. 1 (Barra 1). O equipamento RTDS utilizado para executar as simulações em tempo real é apresentado na Fig. 4 e está disponível no Laboratório de Redes Inteligentes (LARI) da Universidade Federal do ABC (UFABC).

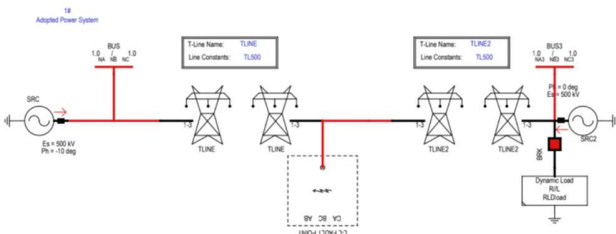


Fig.3 Modelo da LT no RSCAD.



Fig.4. RTDS instalado no LARI - UFABC.

C. Algoritmo de detecção de falta

O sinal de cada uma das fases é amostrado no terminal (Barra 1) da LT, sendo a cada novo ciclo executada a comparação entre os seus dois semiciclos (o positivo e o negativo invertido). Essa comparação permite avaliar a similaridade entre os semiciclos, que representa a condição operativa do SEP. Em tese, se os dois semiciclos forem iguais, a diferença é zero e não há falta/distúrbio. Caso contrário, se existe diferença entre os semiciclos, uma falta é declarada. No entanto, diferenças provenientes de situações operativas normais (entrada de carga, capacitores, etc) devem ser acomodadas e não resultar em declaração de falta. Para se determinar um claro e seguro limiar de operação, a DE se mostrou uma excelente ferramenta, superando algumas dificuldades encontradas nos domínios do tempo ou frequência para se definir tal limiar. Para cada simulação executada, as DE indicando a similaridade entre os semiciclos foram calculadas, permitindo a análise e definição do melhor valor de limiar para se distinguir entre faltas e as demais condições operativas do SEP.

O procedimento para o cálculo da distância euclidiana entre dois semiciclos consecutivos de sinais de tensão ou corrente é detalhado em [2]. A principal premissa da técnica é que um sinal de tensão (ou corrente) amostrado a uma frequência adequada (suficientemente alta) pode refletir a ocorrência de eventos no SEP. A hipótese fundamental é que por meio do nível de similaridade entre semiciclos consecutivos é possível discriminar precisamente uma falta na LT das demais condições operativas do SEP.

A distância euclidiana é definida conforme a equação (1) (considerando apenas a tensão na fase A), onde $V_1 = [v1[1] \dots v1[N/2]]$ são as amostras de tensão do primeiro semiciclo (positivo) e $V_2 = [v2[1] \dots v2[N/2]]$ são as amostras do segundo semiciclo (negativo).

Em condições normais de operação ou sob leves transitórios, $V_1 + V_2 \cong 0$, porém uma falta é declarada para valores acima de um dado limiar. As equações (1) e (2) mostram o cálculo da DE para sinais de tensão e corrente, respectivamente.

$$DE_{va} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N/2} (v_1[n] + v_2[n])^2} \quad (1)$$

$$DE_{ia} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N/2} (i_1[n] + i_2[n])^2} \quad (2)$$

A Fig.5a mostra um exemplo de oscilografia para o SEP em condições normais de operação (sem falta na LT), enquanto a Fig. 5b mostra o mesmo SEP diante da ocorrência de uma falta monofásica (Fase A) na LT. Espera-se que a ocorrência do evento de falta provoque alterações significativas nos valores da DE, quando comparado à DE calculada para as condições normais (ou esperadas/possíveis) do SEP.

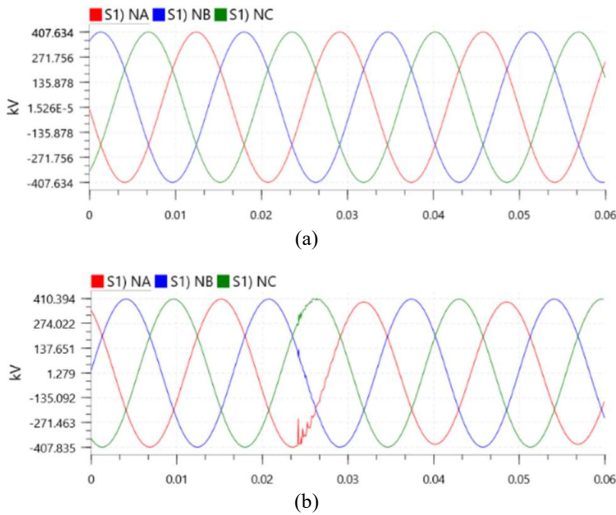


Fig. 5 - (a) Sistema em condição normal de operação. **(b)** Sistema sob falta monofásica (Fase A - Terra) na LT.

As Fig. 6 e Fig. 7 apresentam as alterações na DE, provocadas em função da mudança da condição operativa do SEP, que passou da condição normal de operação para a condição de falta monofásica. Essas figuras mostram uma diferença significativa desta pesquisa com relação à proposta apresentada em [2], visto que utilizando o RTDS é possível calcular a DE em tempo real, amostra a amostra. Ainda, analisando essas figuras, observa-se que a DE calculada não é

constante e oscila em torno de um valor pequeno ($< 2,0$). Isso ocorre porque a janela móvel “sem sincronismo” mantém uma ligeira diferença na captura dos dois semiciclos, que não estão defasados exatamente de 180° . Essa característica é totalmente controlada e não afeta o desempenho do método, como será mostrado por meio de inúmeros testes. Além disso, tal característica pode ser alterada assumindo uma janela de dados “sincronizada” para a captura dos dados, ou seja, a captura somente é iniciada após a passagem por zero do sinal de tensão (ou corrente).

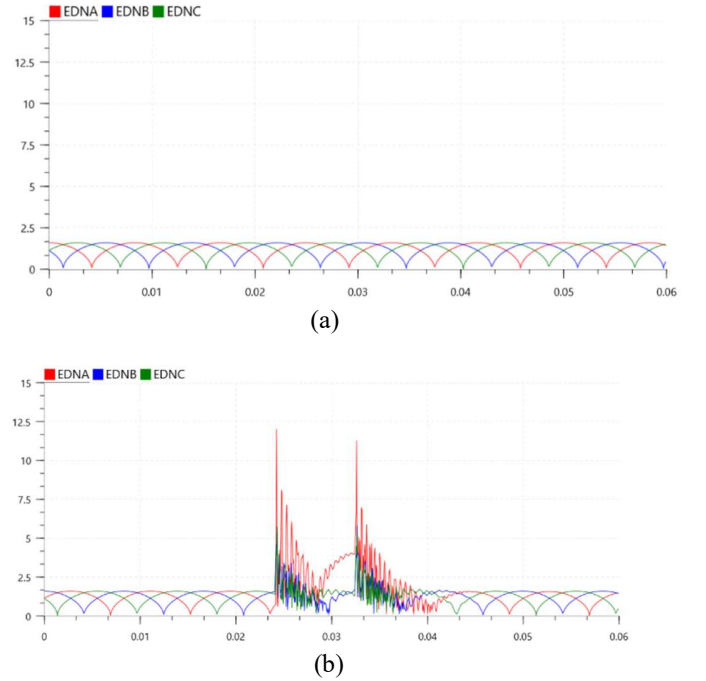


Fig. 6. (a) DE para condição normal de operação. **(b)** DE para uma falta monofásica na LT.

O valor máximo extraído da curva que representa a variação da DE é utilizado para definir a condição operativa do SEP (sob falta ou em condições normais). A equação (3) é utilizada para a extração do valor máximo da DE.

$$DE_{\max_a} = \max (DE_{va}) \quad (3)$$

Alguns aspectos importantes com relação à Fig. 6 devem ser ressaltados. O primeiro aspecto é a eliminação da falta após 20 ms, impactando a DE durante um intervalo de tempo limitado. Já o segundo aspecto, diz respeito a possibilidade de classificar o tipo de falta, além de detectar a mesma. No entanto, para executar a classificação, as DE das três fases devem ser simultaneamente avaliadas e processadas.

III. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Foram simuladas vinte e cinco situações operativas do SEP, entre casos de falta e não falta. Dentre as simulações

executadas, quinze representam condições de falta monofásica na LT, cinco representam casos que envolvem a entrada de um reator no terminal remoto da LT e cinco simulam a entrada de um capacitor no terminal remoto da LT. A inserção desses elementos no terminal remoto da LT (reatores e capacitores) visa avaliar o comportamento do método diante de transitórios no SEP que não representam situações de falta.

A realização de simulações com o RTDS é fundamental para a análise dos sistemas elétricos modernos. O RTDS permite a reprodução precisa de condições reais de operação em um ambiente controlado, o que é crucial para testar e validar novos métodos de proteção e sistemas de controle, sem a necessidade de intervenção direta em sistemas reais, evitando riscos e custos associados a possíveis falhas.

A iniciativa de modelagem e avaliação do algoritmo de DE no RTDS surge como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de novos esquemas e métodos de proteção. Dessa forma, o método pode ser testado de forma eficiente e confiável, permitindo a sua precisa comparação com outros métodos, realmente evidenciando o custo-benefício da atual proposta baseada em DE.

TABELA I
 CASOS SIMULADOS NO RSCAD

Caso	RF	Local da falta(%)	Ângulo (V) ou (I)	Condição	Potência (MVar)
1	0	15	45	FN	
2	0	30	45	FN	
3	0	50	45	FN	
4	0	70	45	FN	
5	0	85	45	FN	
6	10	70	45	FN	
7	30	70	45	FN	
8	50	70	45	FN	
9	70	70	45	FN	
10	100	70	45	FN	
11	0	70	0	FN	
12	0	70	30	FN	
13	0	70	45	FN	
14	0	70	60	FN	
15	0	70	90	FN	
16	-	100	0	Reator	100
17	-	100	30	Reator	100
18	-	100	45	Reator	100
19	-	100	60	Reator	100
20	-	100	90	Reator	100
21	-	100	60	Capacitor	80
22	-	100	60	Capacitor	60
23	-	100	60	Capacitor	40
24	-	100	60	Capacitor	20
25	-	100	60	Capacitor	10

A. Resultados para a detecção de faltas

Os valores máximos de DE foram calculados, segundo a equação (3) para os casos da Tabela I. A Fig. 7 mostra os valores de DE para as faltas monofásicas e para os demais casos simulados. Observa-se que os valores da DE podem ser utilizados para diferenciar a condição operativa do SEP, adotando-se, por exemplo, um valor de limiar de 0.7.

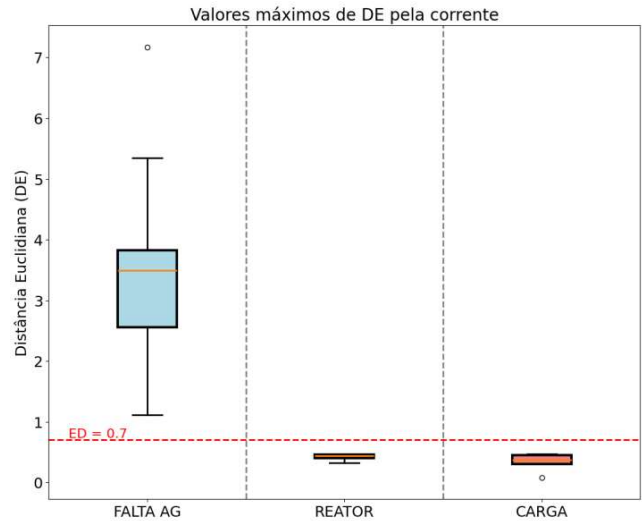


Fig. 7 - Valores de DE para tensão na fase A.

A mesma análise foi realizada para corrente na fase A. Os valores de ED para situações de falta também se mantiveram mais altos, quando comparados com os valores relacionados à entrada de reator ou capacitor. A Fig. 8 mostra os valores de ED obtidos com o processamento do sinal de corrente da fase A. Comparando a Fig. 7 e a Fig. 8, observa-se que, para as simulações executadas, ou seja, para os casos considerados na Tabela I, a margem para ajuste da DE é maior quando se considera os sinais de corrente, proporcionando maior segurança na detecção da falta e reduzindo a possibilidade de falso trip.

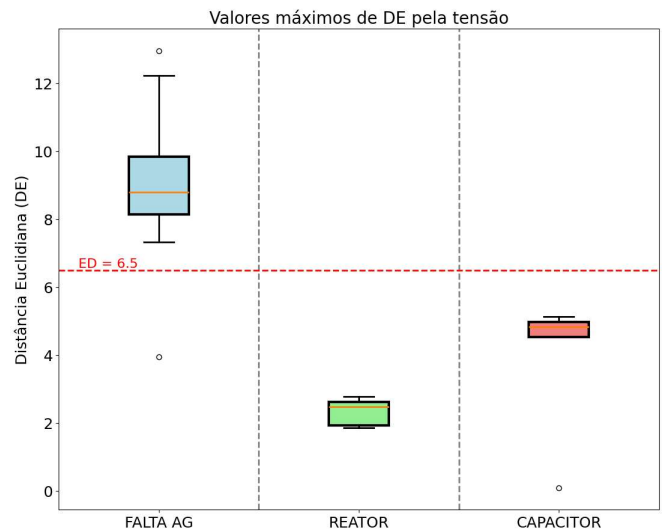


Fig. 8 - Valores de DE para corrente na fase A.

B. Identificação de faltas com K-means

Uma outra possibilidade para se discriminar os casos de falta e não falta é a utilização do algoritmo *K-means*, cujo objetivo é a clusterização de dados, identificando por si só padrões que caracterizam os sinais analisados. Como entrada para o processo de clusterização foram utilizados os valores calculados de DE. Novamente, destaca-se que os sinais de

tensão e corrente foram gerados no RTDS e o *K-means* foi implementado em Python.

A clusterização dos casos simulados através do *K-means* pode ser observada nas Figs. 9 e 10. A linha tracejada indica o limite entre os casos de falta e outros distúrbios.

As cores dos pontos do gráfico da Fig. 9 foram atribuídas pelo algoritmo *K-means*, mostrando que o algoritmo agrupou corretamente os casos de falta e não falta, após o processamento dos sinais de tensão.

Para a corrente, o algoritmo categorizou incorretamente apenas uma das amostras, se for considerado um valor de limiar e não uma reta que separa as regiões. Isso ocorreu porque o caso 15 da Tabela I é um caso de não falta, que foi classificado como um caso de falta, como pode ser observado na Fig. 10.

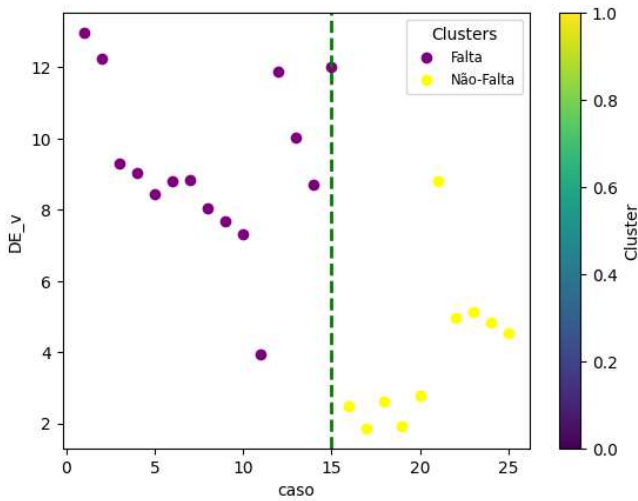


Fig 9. Gráfico da clusterização com de DE para sinal de tensão.

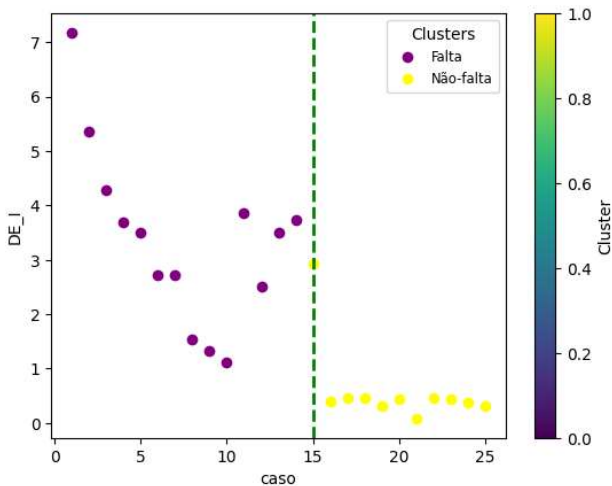


Fig 10. Gráfico da clusterização dos dados com DE para sinais de corrente.

C. Comparação com outros trabalhos

Visando comparar os resultados encontrados pelo método baseado em DE com outros métodos disponíveis na literatura, foi elaborada a Tabela II. Os seguintes atributos e características foram considerados para comparar diferentes métodos: o

sistema elétrico utilizado, a técnica empregada, o domínio da solução, os sinais de entrada e a complexidade da proposta.

TABELA II
 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE FALTAS

Referências	Sistema de teste	Algoritmo	Domínio	Sinal de entrada	Complexidade
Método proposto	500kV, 200 km	Distância Euclidiana (DE)	Tempo	V ou I	Baixa
[3]	115kV, 40 km	Discrete Wavelet Transform (DWT)	Frequência	apenas I	Moderada
[3]	115kV, 40 km	Short Fourier Transform (STFT)	Frequência	Apenas I	Moderada
[4]	345kV, 239 km	DOST, FFT	Frequência	Apenas I	Elevada
[5]	400kV, 200 km	Travelling Wave, FFT	Frequência	V ou I	Moderada
[7]	400kV, 100 km	LSTM (Long Short Term Memory Neural Network)	Tempo	V e I	Moderada

A partir da Tabela II observa-se que o algoritmo proposto tem complexidade baixa, quando comparado aos demais, visto que ele não requer nenhuma transformada ou pré-processamento. Na solução apresentada os sinais são utilizados diretamente no domínio do tempo. O método proposto também possui flexibilidade com relação à escolha dos sinais de entrada, sendo possível utilizar exclusivamente tensão ou corrente. Utilizar a corrente no método baseado em DE amplia a margem de ajuste, aumentando a segurança da atuação (evitando falso *trip*). No entanto, utilizar a tensão gerar maior simplicidade para a seleção dos transdutores, dado que a especificação do TP é menos crítica do que a especificação do TC. Observa-se que [3], [4] e [7] utilizam sinais de corrente e possuem algum tipo de pré-processamento, elevando a complexidade dos mesmos. Em [5] pode ser utilizada apenas a tensão, entretanto o algoritmo tem complexidade moderada e utiliza a FFT. Assim a solução proposta, baseada em DE, possui as seguintes vantagens: (1) uso da tensão ou corrente, podendo ser utilizado um dos dois sinais; (2) boa precisão e baixa complexidade; (3) utilização dos sinais no domínio do tempo, sem qualquer necessidade de pré-processamento mais sofisticado.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um novo método baseado em DE para a detecção de faltas em LTs. O algoritmo foi testado em tempo real, com um modelo de LT dependente da frequência e simulado no RSCAD/RTDS. As simulações e testes assumem a implementação do método com sinais de corrente ou tensão, possibilitando uma comparação entre os seus desempenhos. Além das faltas, também foram simuladas ocorrências de entrada de capacitores e reatores, visando avaliar a robustez do método para discriminar situações de faltas de outros possíveis transitórios no SEP. A partir dos testes realizados foi possível

definir os valores limites de DE para tensão e corrente, capazes de caracterizar o sistema elétrico em situação de falta e não falta. Adicionalmente, para identificar os casos de faltas e não faltas, foi utilizada a técnica *K-means* considerando os valores das DE calculadas. Os resultados mostraram que foi possível o agrupamento correto dos sinais, evidenciando a possibilidade de definir valores de limiares de forma alternativa à primeira abordagem, porém com margens menores.

V. REFERÊNCIAS

- [1] P.M. Anderson. Power System Protection, McGraw-Hill, 1999.
- [2] G. T. Alencar., R. C. Santos and A. Neves. Euclidean Distance-Based Method for Fault Detection and Classification in Transmission Lines. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00918-x>.
- [3] P. Chiradeja, S. Ananwattanaporn, P. Lertwanitrot, A. Ngaopitakkul, and A. Kunakorn, "Comparative fault detection between DWT and STFT in overcurrent relays," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 65287-65297, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3397336.
- [4] D. Gupta, O. P. Mahela, and S. Ali, "Current based transmission line protection algorithm using signal processing techniques," in *Proceedings of the 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.14.
- [5] M. S. Mamiş, M. Arkan, and C. Keleş, "Transmission lines fault location using transient signal spectrum," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 714-718, 2013. doi: 10.1016/j.ijepes.2013.05.045.
- [6] M. R. Bishal, S. Ahmed, N. M. Molla, K. M. Mamun, A. Rahman, and M. A. A. Hysam, "ANN based fault detection & classification in power system transmission line," in *Proceedings of the 2021 International Conference on Science & Contemporary Technologies (ICSCCT)*, Dhaka, Bangladesh, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICSCCT53883.2021.9642410.
- [7] A. M. S. Omar, M. K. Osman, M. N. Ibrahim, and Z. Hussain, "Fault classification on transmission line using LSTM network," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 20, no. 1, pp. 231-238, 2020. doi: 10.11591/ijeecs.v20.i1.pp231-238.

VI. BIOGRAPHIES



Alisson Mesquita recebeu o bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Piauí (UESPI) em 2023. É mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do ABC (UFABC) na área de Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em modelagem e simulações computacionais.



Ricardo Caneloi dos Santos recebeu o título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade de Santa Cecília (UNISANTA) em 1996 e os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP) em 2000 e 2004, respectivamente. É professor titular na Universidade Federal do ABC (UFABC) no Centro de Modelagem, Engenharia e Ciências Sociais Aplicadas. Em 2014 realizou sua pesquisa de pós-doutorado na Universidade de Bath (UK). Tem interesses nas áreas de proteção de sistemas elétricos, inteligência artificial aplicada a sistemas elétricos potência, geração distribuída e redes inteligentes.



Guilherme Alencar obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (2007), o mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (2011) e o doutorado em Energia pela Universidade Federal do ABC (UFABC). Atualmente, realiza sua pesquisa de pós-doutorado na área de Sistemas Elétricos de Potência no Laboratório de Redes Inteligentes da UFABC.