

Diagnóstico de faltas em alimentadores de redes coletoras de parques eólicos onshore

Elis C. S. Trindade*

Fábio B. Leão**

*Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
(e-mail: elis.trindade@unesp.br)

** Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
(e-mail: fabio.bertequirini@unesp.br)

Abstract: To ensure safety and reliability in the incorporation of wind generation into the Brazilian energy matrix, agility and precision are of fundamental importance in the process of restoring normality in the event of a fault. Therefore, this article presents the development of a fault detection and classification algorithm and an iterative fault location algorithm for collector networks of onshore wind farms. The methodology employed in the detection and classification algorithm is based on the calculation of the Euclidean distance of samples of the voltage signal, and for the location of faults, a methodology based on apparent impedance is proposed using data from a measurement terminal. Several short circuit tests were carried out considering an onshore wind farm. The observed results show the efficiency of the proposed method in correctly detecting and classifying applied faults. For fault location, the method presented a maximum percentage error of 9.32% for phase-to-earth faults.

Resumo: Para garantir a segurança e confiabilidade na incorporação da geração eólica na matriz energética Brasileira é de fundamental importância a agilidade e precisão no processo de restauração da normalidade caso ocorra alguma falta. Com isso, este artigo apresenta o desenvolvimento de um algoritmo de detecção e classificação de faltas e um algoritmo iterativo de localização de faltas em redes coletoras de parques eólicos onshore (em terra). A metodologia empregada no algoritmo de detecção e classificação, baseia-se no cálculo da distância Euclidiana de amostras do sinal de tensão e para a localização das faltas utiliza-se uma metodologia baseada em impedância aparente, usando dados de um terminal de medição. Foram realizados diversos testes de curtos-circuitos considerando um parque eólico onshore. Os resultados observados mostram a eficiência do método proposto ao detectar e classificar corretamente as faltas aplicadas. Para a localização de faltas o método apresentou erro máximo percentual de 9,32% para faltas do tipo fase-terra.

Keywords: Wind farm; Fault detection; Fault classification; Fault location; Euclidean Distance; Wind farm protection system.

Palavras-chaves: Parque eólico; Detecção de faltas; Classificação de faltas; Localização de faltas; Distância Euclidiana; Sistema de proteção de parques eólicos.

1. INTRODUÇÃO

A integração dos parques eólicos ao Sistema Interligado Nacional (SIN), traz consigo grandes desafios e inovações tecnológicas. O *Global Wind Energy Council* ressalta uma perspectiva positiva de mercado para a indústria eólica global nos próximos cinco anos, com a CAGR (Taxa de crescimento anual composta) prevista em 15%, como se observa na Fig. 1. Espera-se que mais de 680 GW de nova capacidade sejam adicionados entre 2023-2027, ou seja, uma média de cerca de mais de 136 GW de novas instalações a cada ano até 2027. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil concluiu o primeiro semestre de 2023 com um acréscimo de 5,1 gigawatts (GW) na capacidade instalada de geração de energia elétrica. Desses, 2,3 GW (44,53% do to-

tal) são de fontes eólica.

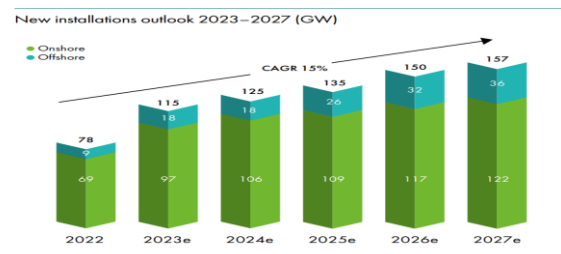


Fig. 1 Perspectivas globais de novas instalações eólicas entre 2023-2027. Fonte: Global Wind Energy Council – GWEC 2023.

Sendo assim, para a inserção eficiente da energia eólica na matriz energética é preciso garantir sua segurança e confiabilidade, sendo de fundamental importância a agilidade e precisão no processo de restauração da normalidade caso

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), nº do processo: 130142/2021-2.

ocorra alguma falta no Sistema Elétrico de Potência (SEP), sendo o curto-circuito o principal fenômeno responsável por desligamentos não programados (SECCO, 2015; SATO; FREITAS, 2015).

Embora os sistemas de proteção sejam bastante eficientes contra as faltas, é pertinente salientar que tão importante quanto o desligamento das redes defeituosas, é a localização precisa e rápida do ponto de falta, uma vez que se estabelece ferramentas para que as equipes de manutenção reparem a rede no menor tempo possível. A localização de faltas (LDF), acontece após sua detecção e classificação. Para alguns métodos de LDF, a etapa de classificação pode não ser exigida, porém, é fato que o conhecimento das fases envolvidas na falta, bem como a presença ou não da terra, auxilia no processo de LDF, permitindo o desenvolvimento de métodos de localização mais eficientes e, logo, uma estimação mais rápida do tipo e local da falta (SANTOS, 2023).

Entretanto, observa-se um déficit no Brasil no que diz respeito as metodologias desenvolvidas e aplicadas para a LDF em parques eólicos. Sendo assim, este trabalho propõe um completo diagnóstico da falta em alimentadores de parques eólicos, englobando as etapas de detecção e classificação que antecedem o algoritmo de localização.

Este artigo é organizado da seguinte forma. Na Seção 2 apresenta-se a metodologia desenvolvida neste trabalho para detecção e classificação de faltas em alimentadores (AL) de parques eólicos. Na seção 3 apresenta-se a técnica proposta para a LDF. Por fim, são apresentados os resultados e conclusões considerando alguns cenários de falta aplicados em um sistema teste de um parque eólico *onshore*.

2. MÉTODO DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

Para que um algoritmo de localização de faltas seja executado de modo preciso e confiável, deve-se primeiro detectar e classificar a falta corretamente. Na proposta do algoritmo de detecção e classificação de faltas em alimentadores de redes coletoras de parques eólicos, empregou-se o método proposto em Alencar, Santos e Panazio (2020) para linhas de transmissão. A detecção ocorre a partir da variação da distância Euclidiana entre dois pontos consecutivos dos valores amostrados dos sinais de tensão. Escolheu-se a tensão como sinal de entrada para o algoritmo, uma vez que há uma menor variação desse sinal durante as faltas. Após a detecção, a distância Euclidiana também é utilizada para indicar em quais fases ocorreu a falta e, conseqüentemente, classificar os tipos de faltas.

2.1 Distância Euclidiana na detecção da falta

Para calcular as distâncias, considera-se um sinal de tensão representado pelo vetor $V = [v[1] \dots v[N]]$, onde $v[n]$ é a tensão instantânea na n -ésima amostra e N corresponde a quantidade de amostras da sequência, sendo que este sinal corresponde a uma janela contendo um ciclo do sinal de tensão. O sinal v é dividido em dois sinais contendo o mesmo intervalo de tempo, conforme as equações (1) e (2).

$$V_1 = [v[1] \dots v[N/2]] \quad (1)$$

$$V_2 = [v[(N/2) + 1] \dots v[N]] \quad (2)$$

Sendo assim, a distância Euclidiana entre V_1 e o inverso de V_2 pode ser calculada através da norma Euclidiana entre V_1 e o inverso de V_2 , conforme (3).

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

O operador $\| \cdot \|$ corresponde à norma Euclidiana.

Admitindo que o sinal de tensão seja trifásico, a equação (3) pode ser reescrita por fase, conforme as equações (4), (5) e (6) respectivamente.

$$dista = \|V_{a1} + V_{a2}\| \quad (4)$$

$$distb = \|V_{b1} + V_{b2}\| \quad (5)$$

$$distc = \|V_{c1} + V_{c2}\| \quad (6)$$

O objetivo ao definir a distância Euclidiana dada pela equação (3) é determinar o nível de perturbação ocorrida no SEP. Em casos onde não existe distúrbio ou nos casos em que o distúrbio é pequeno, o valor de $dist$ 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 (ALENCAR; SANTOS; PANAZIO, 2020).

Após o cálculo das distâncias ($dista$, $distb$ e $distc$), define-se como $distmax$, a maior distância entre $dista$, $distb$ e $distc$, conforme (7).

$$distmax = \text{máximo}(dista, distb, distc) \quad (7)$$

Assim, para detectar a ocorrência da falta no SEP, um limite de detecção foi definido, denominado como $limit$. Portanto se $distmax > limit$ existe falta, caso contrário não existe. No fluxograma da Fig. 2, pode ser visto como ocorre a detecção da falta.

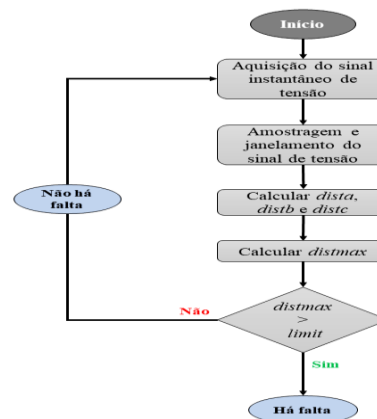


Fig. 2 Fluxograma do algoritmo de detecção de faltas.

2.2 Distância Euclidiana na classificação da falta

A distância Euclidiana também pode ser utilizada para indicar em quais fases ocorreu a falta e, conseqüentemente, classificar as faltas. Entretanto, para ocorrer a classificação da falta de maneira precisa, não se pode apenas admitir um limite para

valores das distâncias Euclidianas, uma vez que curtos-circuitos em uma fase podem interferir em outras fases.

A equação (8) é usada para determinar a distância Euclidiana envolvendo todas as fases ($distt$). Comparando o valor de $distt$, por meio de um valor de $limitT$, é possível estimar inicialmente duas hipóteses para o tipo de falta.

$$distt = \| (Va1 + Vb1 + Vc1) + (Va2 + Vb2 + Vc2) \| \quad (8)$$

A falta pode ser monofásica ou bifásica-terra, caso o valor de $distt$ calculado seja superior ao $limitT$ adotado, caso contrário, a falta pode ser bifásica ou trifásica, ou seja, o $distt$ é utilizado para indicar o envolvimento da terra na classificação da falta. Determinam-se em (9) e (10), quais fases possuem menor valor de distância ($distmin$) e valor mediano ($distmed$) de distância Euclidiana, respectivamente. A fase de maior valor é obtida através da equação (7). Sendo esses os parâmetros utilizados para definir as fases que envolvem a falta.

$$distmin = \text{mínimo} (dista, distb, distc) \quad (9)$$

$$distmed = \text{mediana} (dista, distb, distc) \quad (10)$$

Com isso, as distâncias de classificação são normalizadas para cada fase empregando a normalização *Min-Máx* conforme as equações de (11) a (13). A normalização preserva as relações entre os valores de dados originais sendo os resultados obtidos em um intervalo entre 0 a 1.

$$dista(n) = \frac{dista - distmin}{distmax - distmin} \quad (11)$$

$$distb(n) = \frac{distb - distmin}{distmax - distmin} \quad (12)$$

$$distc(n) = \frac{distc - distmin}{distmax - distmin} \quad (13)$$

Determina-se em (14) as fases que possuem valor mediano ($distfmed$) de distância Euclidiana normalizada.

$$distfmed = \text{mediano} [dista(n), distb(n), distc(n)] \quad (14)$$

Nas faltas monofásicas a distância Euclidiana mediana normalizada ($distfmed$) tende a ser mais próxima de zero, enquanto nas faltas bifásicas-terra ela tende a ser próxima de um. Nas faltas bifásicas a distância Euclidiana mediana normalizada tende a ser mais próxima de um, enquanto nas faltas trifásicas ela tende a ser próxima de zero. Esse critério observado é utilizado na classificação das faltas, sendo assim define-se $limitmbt$ como sendo o limite de classificação entre faltas monofásicas e bifásicas-terra e $limitbt$ para faltas bifásicas e trifásicas. Os limites para a classificação foram ajustados baseados em simulações realizadas no parque eólico apresentado na seção 4. No fluxograma da Fig. 3, observa-se como a classificação ocorre empregando o algoritmo proposto.

3. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Nesta seção apresenta-se o método de LDF utilizado neste artigo. A Fig. 4 ilustra o diagrama resumido contendo as sub-rotinas que foram implementadas no *software* MATLAB® pa-

ra a LDF, que são detalhadas ao decorrer desta seção. Após a aquisição dos sinais de tensão e corrente, realiza-se o processo de detecção e classificação da falta.

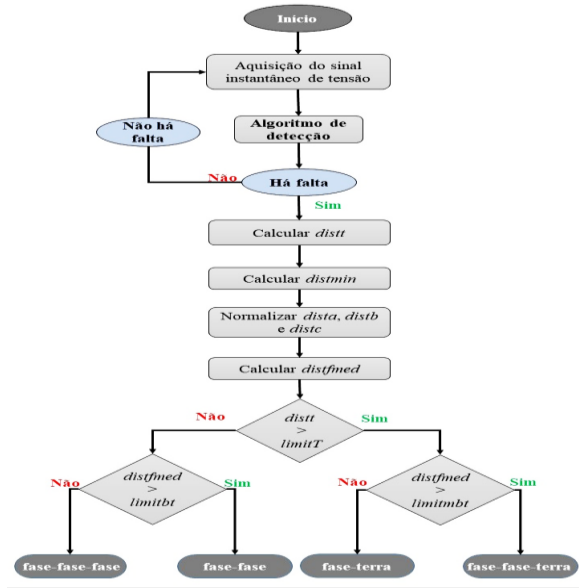


Fig. 3 Fluxograma de classificação.

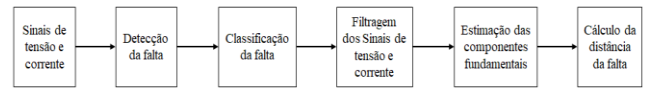


Fig. 4 Sub-rotinas do método utilizado.

Esses sinais apresentam além da componente fundamental, uma componente CC e componentes de alta-frequência (SOUZA *et al.*, 2020). Desta forma, antes de executar o algoritmo de LDF, realiza-se o processo de filtragem dos sinais, para filtrar as componentes de alta-frequência. Utiliza-se um filtro passa-baixa de *Butterworth* de terceira ordem com frequência de corte de 270Hz. A metodologia aplicada neste trabalho faz uso das componentes fundamentais de tensão e corrente para calcular a distância da falta. Desta forma, utiliza-se a Transformada de Fourier de Ciclo Completo (TDFCC), para a estimação das componentes fundamentais dos sinais, como proposto em Souza *et al.* (2020). A TDFCC fornece os coeficientes da série de Fourier de um sinal $x(t)$, a partir de um ciclo de amostras do sinal.

3.1 Cálculo da distância da falta

O presente equacionamento do algoritmo de LDF fundamentado na impedância de sequência positiva estende o trabalho de Lima (2013). São utilizados dados de tensão e corrente de pré-falta e pós-falta de um único terminal e utilizadas as componentes de sequências na estimação do ponto de falta. Na Fig. 5 é ilustrado o diagrama unifilar de um circuito equivalente em falta, no qual a partir deste obteve-se o equacionamento para tensões trifásicas de fase para uma falta (LIMA, 2013).

Referente ao sistema sob falta é importante destacar algumas considerações: o sistema é considerado equilibrado, a resistência de falta é constante e a mesma para todas as fases em falta. Considera-se também para o equacionamento, que a impedância de sequência positiva do alimentador é igual a

impedância de sequência negativa e o equacionamento é feito baseado em componentes de seqüências.

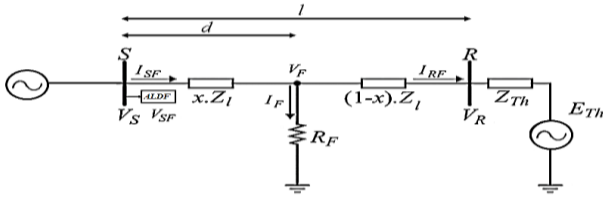


Fig. 5 Diagrama unifilar do circuito equivalente em falta.

Para o cálculo da distância da falta, este artigo emprega a técnica proposta em Lima (2013) conforme (15), para uma falta fase-terra na fase “a”, localizada a uma distância d do terminal de medição:

$$x = \frac{\Im(V_{SFa} \cdot I_{Fa}^*)}{\Im\{[Z_{l0} \cdot I_{SF0} + Z_{l1} \cdot (I_{SF1} + I_{SF2})] \cdot I_{Fa}^*\}} \quad (15)$$

Onde \Im e $*$ representam, respectivamente, a parte imaginária e o conjugado de um número complexo. Sendo I_{SF0} , I_{SF1} e I_{SF2} as correntes de sequência zero, positiva e negativa e Z_{l0} e Z_{l1} as impedâncias de sequência zero e positiva, contribuídas pelo terminal local durante a falta, respectivamente. A distância d da falta em relação ao terminal local pode ser determinada fazendo $d = x \cdot l$, sendo l o comprimento do alimentador em km.

Para as faltas fase-terra nas fases “b” e “c”, assim como para as faltas bifásicas, bifásicas-terra e trifásica, o equacionamento pode ser visto em Lima (2013).

3.2 Algoritmo proposto para LDF em parques eólicos

Para a técnica iterativa proposta, inicialmente assume-se que a corrente que circula no terminal remoto (I_R) é igual a corrente de pré-falta no terminal local (I_S). Estima-se a corrente de falta (I_F) pela diferença entre a corrente durante a falta no terminal S (I_{SF}) e a corrente contribuída pelo terminal remoto pré-falta (I_R). Calcula-se a estimativa inicial da distância da falta, utilizando a equação referente ao tipo de falta.

Uma vez estimada a distância percentual (x) inicial da falta, é realizada a análise de convergência do algoritmo, conforme (16).

$$|x(i) - x(i - 1)| < \delta \quad (16)$$

Onde i é o número de iterações do algoritmo e δ é uma tolerância definida sendo adotada $\delta = 10^{-3} \times l$. Se x convergiu finaliza-se o algoritmo, caso contrário passa-se para o próximo passo. Determina-se a tensão das fases no ponto da falta (V_F) a partir de uma estimativa inicial de x , de acordo com as equações (17), (18) e (19).

$$V_{Fa} = V_{SFa} - x((I_{SF1} + I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}) \quad (17)$$

$$V_{Fb} = (V_{SF0} + a^2 \cdot V_{SF1} + a \cdot V_{SF2}) - x((a^2 \cdot I_{SF1} + a \cdot I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}) \quad (18)$$

$$V_{Fc} = (V_{SF0} + a \cdot V_{SF1} + a^2 \cdot V_{SF2}) - x((a \cdot I_{SF1} + a^2 \cdot I_{SF2}) \cdot Z_{l1} + Z_{l0} \cdot I_{SF0}) \quad (19)$$

Por fim estima-se a corrente durante a falta no terminal remoto conforme (20). Com o valor atualizado da corrente no terminal remoto I_R , estima-se novamente I_{SF} e retorna o cálculo da distância da falta. O algoritmo é executado até a convergência (16).

$$I_R = \frac{V_F - E_{Th}}{(1 - x) \cdot Z_l + Z_R} \quad (20)$$

Para a estimação da impedância equivalente da fonte (Z_R), utiliza-se a técnica das componentes simétricas e o teorema da superposição. Desta forma, decompõe-se o circuito em redes de sequência, conforme o tipo de falta ocorrido (SILVEIRA, 2007). As tensões equivalentes no terminal remoto (E_{Th}) para cada fase são estimadas através do cálculo da tensão no ponto da falta, no período pré-falta. A partir de uma estimativa inicial da distância e dos dados medidos no período pré-falta, calcula-se a tensão no ponto da falta.

O algoritmo iterativo descrito nesta seção é ilustrado no fluxograma da Fig. 6.

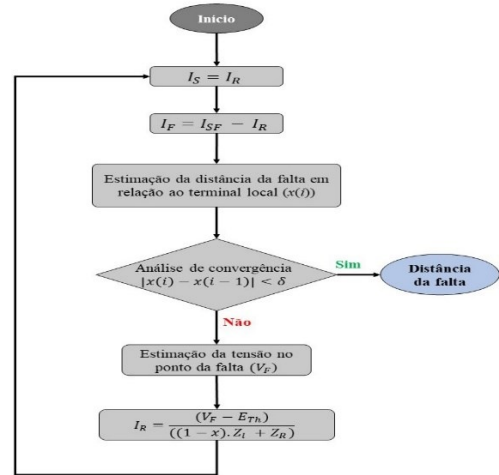


Fig. 6 - Fluxograma de localização de faltas.

4. TESTES E RESULTADOS

Nesta seção são discutidos os resultados obtidos com os algoritmos propostos apresentados nas seções anteriores. Para isto, utilizou-se um sistema, constituído de um parque eólico (Fig. 7) com 6 aerogeradores com gerador de indução do tipo duplamente alimentado (*Doubly-Fed Induction Generator – DFIG*) de 2,5 MW cada, conectados a uma rede de distribuição de 20 kV e frequência elétrica de 50Hz, retirado da base de dados do *software DigSilent® Power Factory*. As impedâncias de seqüências positiva e zero calculadas para cada seguimento dos trechos analisados podem ser obtidos em *DigSilent® Power Factory* (2014).

4.1 Detecção e classificação

Para desenvolver o método proposto, diversas situações de falta foram simuladas em 3 alimentadores (1.2, 2.2, e 2.4) do parque eólico adotado (Fig. 7). Simulou-se faltas, com valores de resistências de falta (R_f): 0Ω, 10Ω, 20Ω, 40Ω, 50Ω e 100Ω para curtos-circuitos monofásicos AT, BT e CT, bifásico-terra ABT, BCT e CAT, bifásico AB, BC e CA e para faltas trifásicas adotou-se valores diferentes de R_f sendo: 0Ω, 1Ω,

2Ω, 3Ω, 4Ω e 5Ω, pois na prática em geral as faltas trifásicas costumam apresentar menores resistências.

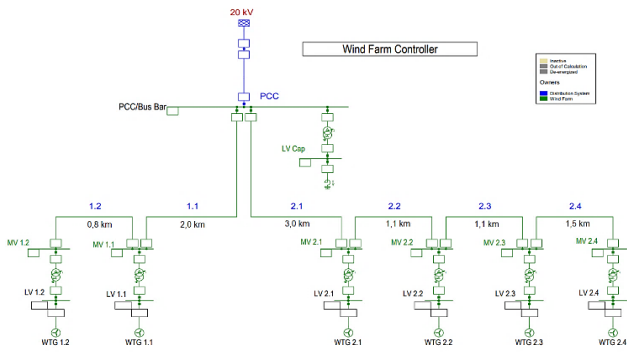


Fig. 7 Parque eólico conectado a uma rede de distribuição de 20 kV.

Os sinais de tensão foram amostrados na barra PCC, para cada falta. O tempo de simulação para obtenção dos sinais de tensão é de 0,1s e as faltas são aplicadas em, aproximadamente, 0,021s. A frequência de amostragem (f_s) utilizada para a discretização dos sinais foram de 62,5kHz. Para a escolha da f_s realizaram-se alguns testes variando f_s entre 5kHz-100kHz e considerou-se para este trabalho a frequência que apresentou melhor resultado (62,5kHz) na detecção e que contém a menor quantidade de amostras por ciclos do sinal, visto que, o tempo de processamento do algoritmo pode ser afetado devido a quantidade de amostras discretizadas a partir do sinal de tempo contínuo. Utilizou-se uma janela de dados com o comprimento ajustado para conter um ciclo do sinal de tensão.

O limite de detecção (*limit*) foi calibrado através de uma análise de contingências (Tabela 1), para que o algoritmo de detecção seja insensível a casos que causem alteração no sinal da tensão, mas que não constituem um curto-circuito. Neste caso o valor de *limit* = 0,5 foi definido como parâmetro para a detecção da falta. Um curto-circuito resulta em um valor de *distmax* superior ao *limit* (0,5) e em caso de operação normal no SEP ou pequenos distúrbios os valores de *distmax* são inferiores ao *limit*.

Tabela 1 Análise de contingência para calibração do *limit*.

Contingências	<i>distmax</i>
Saída do AL 2.1	0,4496
Saída do transformador 2.2	0,4312
Saída do gerador 1.2	0,4312
Saída dos geradores 1.1 e 2.3	0,4348
Saída do AL2.4 e transformador 1.2	0,4533
Saída de geradores e transformadores	0,4385

Ao todo 180 curtos-circuitos foram simulados. Para representar os valores de *distmax* calculados nas simulações realizadas, utilizou-se os *boxplots* mostrados na Fig. 8. Portanto, é possível verificar que para todas as faltas simuladas, o valor de *distmax* encontra-se acima do limite estabelecido (*limit*), ou seja, há detecção do curto-circuito em 100% dos casos.

Para a classificação da falta, definiu-se $limitT = limit = 0,5$, baseado nas simulações de faltas realizadas, sendo assim, esse limite irá definir o envolvimento da terra na classificação da

falta caso o $distt > limitT$ a falta está condicionada a duas hipóteses: falta monofásica ou bifásica-terra e caso contrário as hipóteses podem ser falta bifásica ou trifásica (Fig. 9).

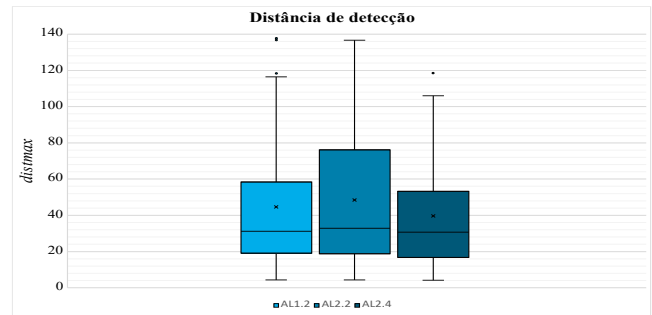


Fig. 8 Distâncias máximas de detecção simuladas.

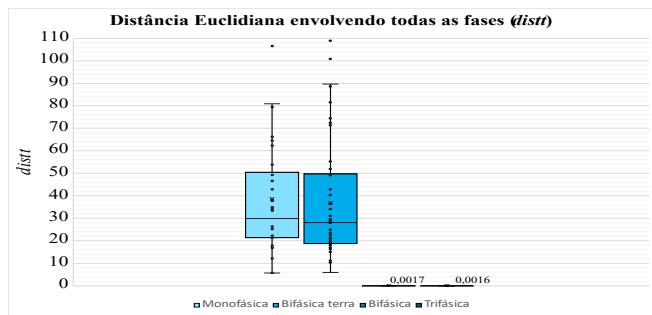


Fig. 9 Distância Euclidiana envolvendo todas as fases (*distt*).

A partir da *distfmed* definida, classifica-se o tipo de falta entre as hipóteses, conforme o fluxograma da Fig. 3. A partir das simulações realizadas foram definidos os limites para a classificação entre as faltas monofásica e bifásica-terra e entre as faltas bifásica e trifásica como sendo $limitmbt = limitbt = 0,4$, respectivamente.

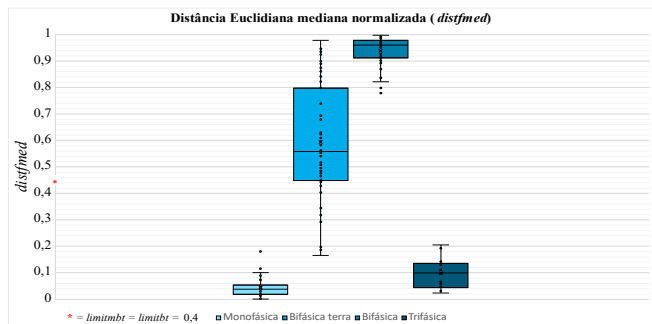


Fig. 10 Distância Euclidiana mediana normalizada (*distfmed*).

Pode-se verificar, a partir da Fig. 10, que há erros na classificação para faltas bifásica-terra uma vez que existem valores de *distfmed* abaixo do $limitmbt$ (*). Observa-se que nestes casos as faltas estão sendo classificadas como monofásicas. Dos 180 curtos-circuitos simulados no total, 8 foram classificados erroneamente. Portanto, o algoritmo apresentou uma taxa de acerto de 95,55%.

4.2 Localização de faltas

As faltas foram aplicadas nos AL's do sistema da Fig. 7 em 20%, 50% e 80% de seus comprimentos. O erro obtido pelo algoritmo é expresso em função do comprimento total da linha, dado pela equação (21).

$$\text{erro} (\%) = \left| \frac{d_{\text{real}} - d_{\text{estimada}}}{l} \right| \cdot 100 \quad (21)$$

Sendo d_{real} , d_{estimada} e l , a distância real, a distância estimada e o comprimento total do AL, respectivamente.

Uma vez que a etapa de localização da falta utiliza os resultados obtidos nas etapas de detecção e classificação implementadas nessa pesquisa, optou-se por considerar R_f : 0Ω , 2Ω , 4Ω e 5Ω para faltas trifásicas e 0Ω , 10Ω , 20Ω , 40Ω para as demais, visto que os erros encontrados na etapa de classificação se deram para resistências de falta em 50Ω e 100Ω . A ideia é verificar a eficiência da etapa de localização de faltas considerando que as etapas anteriores foram bem sucedidas, uma vez que interfere diretamente no método.

A análise da Fig. 11 permite verificar a tendência da elevação do erro percentual com o aumento da resistência de falta, independentemente do tipo de falta associado. Também pode-se observar na Fig. 12 o aumento do erro com o aumento da distância da falta em relação ao terminal local e os maiores erros para faltas que envolvem a terra.

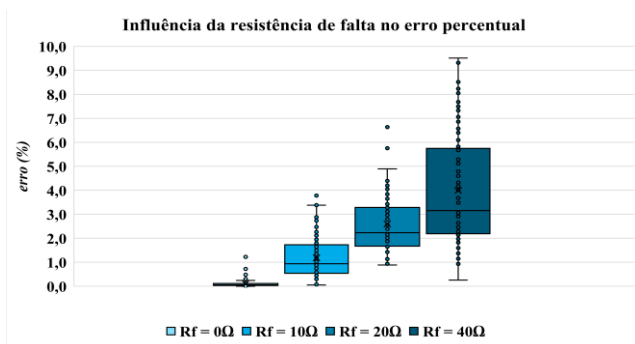


Fig. 11 Influência da R_f no erro percentual.

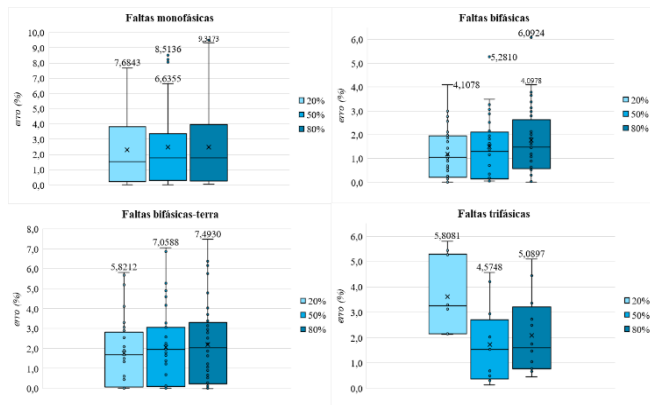


Fig. 12 Erro percentual para cada tipo de falta aplicada em 20%, 50% e 80% do alimentador.

Para todos os casos simulados o método completo proposto (detecção, classificação e localização) apresentou um tempo máximo de processamento de 0,56s quando implementado em um computador com processador Intel Core i5-10300H, com memória RAM de 8GB, sendo o método de LDF o responsável pelo maior tempo de processamento.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo um método baseado em distância Euclidiana foi proposto para as etapas de detecção e classificação de faltas

em redes coletoras de parques eólicos e para a LDF desenvolveu-se um algoritmo iterativo baseado na impedância de sequência positiva, considerando dados de um terminal de medição. Para avaliar os métodos 180 casos de faltas foram simulados ao longo de 3 alimentadores de um parque eólico. A etapa de detecção da falta resultou em 100% de precisão para os casos simulados e para classificação o algoritmo foi capaz de classificar o tipo de falta, identificando inclusive as fases faltosas, com 95,55% de precisão. Para o algoritmo de LDF, obteve-se que, independentemente do tipo de falta, a resistência de falta tem influência nos resultados, visto que, os erros percentuais calculados foram mais uniformes para faltas francas, e mais proeminentes para faltas com resistências maiores que 10Ω . Além disso, o algoritmo de LDF mostrou-se sensível a distância da falta em relação ao terminal de medição, no qual apresentou o maior erro percentual médio em 6,16% e erro percentual máximo em 9,32% ambos para $R_f = 40\Omega$ e alimentador 2.4.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>
- Alencar, G. T.; Santos, R. C.; Panazio, A. O. N.; Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Distância Euclidiana, SBSE 2020.
- DigSilent® *Power Factory Version 15* Manual. Gomaringen, Alemanha (2014). Disponível em: DigSilent® *Power Factory 15.1*.
- Global Wind Energy Council - GWEC. Global wind report: annual market update 2023. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2023>.
- Lima, D. A. C. Localização de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica baseada na impedância aparente: algoritmo utilizando dados de um terminal. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRS. Porto alegre. 2013.
- Santos, G. G. Metodologia integrada para detecção, classificação e localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica ativas. 2023. 156 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo - USP, São carlos, 2023.
- Sato, F.; Freitas, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. [S.l.]: Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- Secco, G. P. Procedimento para estudo de coordenação das proteções elétricas em Centrais de Geração Eólica. 2015. 125 f. Tese (Doutorado em Sistema de potência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PoliUSP, São Paulo, 2015.
- Silveira, E. G. Localização de faltas em linhas de transmissão: desenvolvimento de novos algoritmos e implementação de sistema computacional para aplicações práticas. 2007. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. Belo Horizonte. 2007.
- Souza, F. M. S. et al; Localização de faltas em linhas de transmissão pelo método das componentes fundamentais, SBSE 2020.