

Proposta de um algoritmo para detecção de faltas em Parques Eólicos utilizando distância Euclidiana

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: The integration of wind farms to the National Interconnected System brings with it great challenges and innovations, since the electrical power systems that contain this type of generation, present different responses from conventional generation (synchronous generators) in the face of disturbances that may occur. This article presents a study on the state of the art regarding the main methodologies used in the detection, classification, and location of faults in electric energy distribution networks and the development of a detection algorithm applied in feeders of Parks wind. The methodology used in the detection algorithm is based on the calculation of the Euclidean distance of samples of the system voltage signal to detect faults. Numerous short-circuit tests were carried out considering two wind farms, under different operating conditions. The observed results show the efficiency and robustness of the proposed method in correctly detecting faults applied even for high fault resistances.

Resumo: A integração de Parques eólicos ao Sistema Interligado Nacional traz consigo grandes desafios e inovações, uma vez que os Sistemas Elétricos de Potência que contém esse tipo de geração, apresentam respostas diferentes da geração convencional (geradores síncronos) frente a distúrbios que possam ocorrer. Este artigo apresenta um estudo sobre o estado da arte referente as principais metodologias empregadas na detecção, classificação e localização de falta em sistemas de distribuição de energia elétrica e o desenvolvimento de um algoritmo de detecção de curtos-circuitos em alimentadores de Parques Eólicos. A metodologia empregada no algoritmo de detecção, baseia-se no cálculo da distância Euclidiana de amostras do sinal de tensão do sistema para detectar as faltas. Foram realizados inúmeros testes de curtos-circuitos considerando dois Parques Eólicos, em diferentes condições de operação. Os resultados observados mostram a eficiência e robustez do método proposto ao detectar corretamente as faltas aplicadas inclusive para resistências de faltas elevadas.

Keywords: Wind farm; Fault detection; Fault location; Euclidean Distance; Protection of transmission lines.

Palavras-chaves: Parque eólico; Detecção de faltas; Localização de faltas; Distância Euclidiana; Proteção de linhas de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

A busca incessante pela diversificação da matriz energética brasileira e o aumento da confiabilidade no abastecimento e operação faz-se necessário uma vez que transtornos provocados pela interrupção no abastecimento de energia elétrica atingem a diversos tipos de atividades e consumidores (industriais e/ou residenciais).

Todavia a matriz energética brasileira ainda é caracterizada pela preeminência de grandes centrais hidrelétricas, chegando a 56,15% de potência fiscalizada, seguida pelas usinas termoeletricas 24,62% e centrais geradoras eólicas 11,88% (ANEEL, SIGA- Sistema de informações de geração).

Entretanto, as construções de novas centrais hidrelétricas encontram dificuldades, devido os distanciamentos dos centros de cargas, além dos impactos ambientais associados a estruturação de novos reservatórios e de suas longas linhas de

transmissão, assim como ocorre nas centrais de geração térmica, que possuem além do elevado custo do combustível, aspectos ambientais relacionados ao aquecimento global e a emissão de CO₂ (SECCO, 2015). Desse modo, há um aumento da motivação pela competitividade das centrais de geração eólica na comercialização de energia elétrica no país, posto que os custos de operação estão cada vez menores, e a capacidade instalada cada vez maior, além de não possuir custos na obtenção da fonte motriz.

Em 2022 o Brasil ocupa a 6ª posição no ranking mundial de energia eólica onshore (em terra), com 21,5 GW de capacidade instalada. 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 6,6%, como observa-se na Fig. 1. Espera-se que mais de 557 GW de nova capacidade sejam

adicionados entre 2022-2026, ou seja, uma média de cerca de mais de 110 GW de novas instalações a cada ano até 2026.

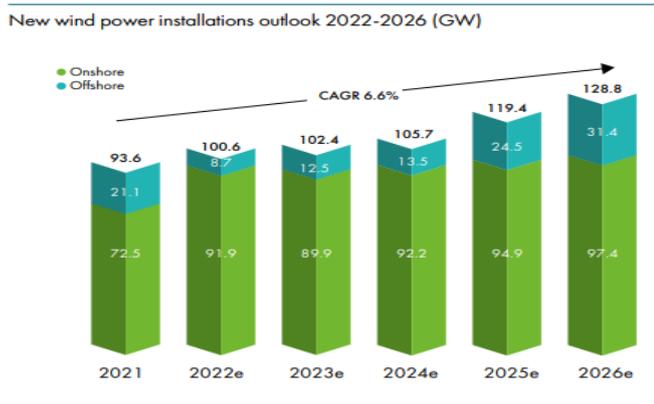


Fig. 1 Perspectivas globais de novas instalações eólicas entre 2020-2025. Fonte: Global Wind Energy Council – GWEC 2021.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a geração de energia a partir dos ventos alcançou a marca de 22,00GW de capacidade instalada em julho de 2022, contendo mais de 9 mil aerogeradores em operação em 812 Parques Eólicos distribuídos em 12 Estados do Brasil e em termos de representatividade e abastecimento, o país obteve um incremento de 165,6MW na matriz energética. Do total, mais da metade (87,6MW) provêm de usinas eólicas de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Entretanto a integração dos Parques eólicos ao Sistema Interligado Nacional (SIN), traz consigo grandes desafios e inovações tecnológicas, devido o comportamento dos sistemas constituídos por aerogeradores serem diferentes dos convencionais composto por geradores síncronos (SECCO, 2015).

Com isso, 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 ocorra alguma falta no Sistema Elétrico de Potência (SEP). Os investimentos em novas técnicas, tecnologias e filosofias de diagnóstico/prognóstico de faltas, vêm sendo intensificados com o intuito de minimizar a atuação dos operadores de subestações, tornando o processo de diagnóstico de faltas mais ágil e preciso (TONELLI NETO, 2015).

A partir disso, os procedimentos de diagnóstico realizados a partir da detecção de uma falta ocorrida no SEP, envolvem o processo de localização, que consiste na determinação do local em que o evento ocorreu. Em todos os casos, existe a motivação de se prover ferramentas automatizadas que possam auxiliar equipes de manutenção na normalização do sistema (SEVERIANO JUNIOR, 2013). Uma vez que, o custo da interrupção da energia afeta o gerador e consequentemente o consumidor e, como nenhuma rede elétrica é imune a blecautes, por menor que sejam as chances da ocorrência desses, o sistema deve estar preparado para o restabelecimento das cargas no menor tempo possível, possibilitando o retorno às condições normais de operação (GOMES, P.; GUARINI, A.P, 2005).

Portanto este trabalho será apresentado da seguinte maneira. Na Seção 2 serão apresentadas as principais metodologias empregadas na detecção, classificação e localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE). Na Seção 3 será implementado através do *software* DigSilent® Power Factory, um sistema elétrico consistindo de um Parque Eólico com alguns geradores eólicos, no qual serão obtidos os resultados de fluxo de carga e análise de curto-circuito considerando todos os tipos de faltas (monofásica, bifásica, bifásica a terra e trifásica). Na Seção 4 será desenvolvido um algoritmo de detecção de faltas e sua implementação se dará através do *software* MATLAB®. E por fim serão apresentados os resultados preliminares do algoritmo considerando alguns cenários de falta no sistema teste implementado na Seção 3.

2. ESTADO DA ARTE REFERENTE ÀS PRINCIPAIS TÉCNICAS EMPREGADAS NA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A detecção, classificação e localização de faltas são temas centrais de várias publicações da literatura especializada. Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais aplicaram-se técnicas como: Transformada de Fourier (TF); Transforma Wavelet (TW); Análise de Multirresolução (AMR); Sistema de Inferência Fuzzy; Redes Neurais Artificiais (RNAs) entre outros (FARIA, 2020).

Salim et al. (2008) propuseram um novo esquema híbrido para diagnóstico de faltas em sistema de distribuição, composto por três diferentes processos: Detecção e classificação de faltas, Localização da Falta (LF) e a determinação da seção em falta. No processo de detecção e classificação empregou-se a Transformada *Wavelet* (TW) e a técnica de localização de faltas baseia-se em impedância e usa fasores fundamentais de tensão e corrente locais. Após a detecção e classificação da falta, inicia-se o algoritmo de localização. O sistema foi dividido em ramos, no qual, para cada ramo, um local de falta é estimado. Por fim, aplicando os sinais de tensão e corrente estima-se a seção em falta via RNA *feedforward* com algoritmo de aprendizado supervisionado de *Levenberg-Marquardt*.

Oleskovicz et al. (2009) desenvolveram um sistema híbrido para detectar, classificar e localizar distúrbios que afetam a qualidade de energia no SEP. Na primeira etapa a TW foi utilizada para detectar distúrbios no sistema e localizar o tempo de sua ocorrência. Na segunda etapa, avaliou-se dois tipos de arquitetura de RNA para a classificação: *Perceptron* Multicamadas (PMC) com algoritmo de treinamento *Levenberg-Marquardt* e Função de Base Radial (RBF).

Decanini et al. (2012) apresentaram uma estratégia para a detecção e classificação automática de curtos-circuitos em alimentadores de distribuição. As principais características dos sinais de tensão e corrente são extraídas empregando a Transformada discreta *wavelet* (*Discrete Wavelet Transform - DWT*), a análise multirresolução (*multi-resolution analysis - MRA*) e o conceito de energia, no qual o sinal foi decomposto em três níveis de resolução. Os índices comportamentais obtidos correspondem aos vetores de entrada para um conjunto de três redes neurais artificiais ART (*Adaptive Resonance*

Theory) – ARTMAP *fuzzy*, paralelas entre si. O primeiro e o segundo conjuntos de rede avaliam as características extraídas dos sinais de corrente e tensão, respectivamente. O terceiro conjunto realiza o diagnóstico com base em ambos os índices comportamentais (características de corrente e tensão). O processo de detecção é realizado por meio de análise estatística e direta das formas de ondas atuais no domínio *Wavelet*. A classificação inicia-se após a detecção da falta, com a aplicação do conceito de energia sobre os coeficientes de detalhe e aproximação obtidos na utilização da DWT e MRA. Os índices calculados são empregados como vetores de entrada para as redes neurais.

Bísaro et al. (2015) desenvolveram uma metodologia para análise automática de perturbações e localização de faltas em SDEE. A detecção contínua dos distúrbios baseia-se na análise estatística e análise de sinais no domínio *Wavelet*. Os índices comportamentais dos sinais de corrente e tensão são extraídos empregando a TW discreta, análise de multirresolução e o conceito de energia do sinal. Esses índices são utilizados por diversas redes neurais *Fuzzy*-ARTMAP independentes, que visam classificar o tipo de falta e os eventos de qualidade de energia. A localização da falta é realizada após o processo de classificação.

Dehghani et al. (2016) sugerem uma metodologia fundamentada na combinação de Transformada *Wavelet* (TW), Entropia de Shannon e Lógica *Fuzzy*, para detecção e classificação de faltas em linhas de distribuição com presença de geração distribuída. A metodologia consiste na extração dos coeficientes de detalhe usando a TW. Os valores obtidos são tratados com a aplicação da Decomposição em Valores Singulares (*Singular Value Decomposition* - SVD). Os índices da entropia dos valores calculados na etapa anterior são definidos com base em probabilidade (*Wavelet Singular Entropy* - WSE). O algoritmo proposto é baseado na variação das saídas da WSE. Portanto, a detecção e classificação das faltas são feitas combinando a WSE com a Lógica *Fuzzy*, utilizando um conjunto de regras e funções para a tomada de decisão.

Ledesma et al. (2020) apresentaram um novo método para localização e identificação de Faltas de Alta Impedância (FAI) em redes de média tensão em sistemas de distribuição desbalanceados. O método foi baseado em dois conjuntos de RNAs, no qual foram aplicados dados de unidades de medidas sincronizadas. O primeiro conjunto tem o objetivo de identificar a área da falta, bem como a fase em que ocorreu a falta; enquanto o segundo conjunto tem o objetivo de indicar a localização por meio da distância aproximada da falta dentro da área. A rede neural *Multiple Layer Feedforward* foi aplicada com treinamento via *backpropagation*.

Alencar et al. (2020) propuseram um método baseado em distância Euclidiana para detectar e classificar faltas, usando somente sinais de tensão da linha de transmissão. Dois sistemas diferentes foram testados e os resultados observados mostram que o método proposto é capaz de detectar e classificar faltas corretamente podendo ser empregado em estágios anteriores ao de localização de faltas em relés digitais.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para que um algoritmo de localização de faltas seja executado de modo preciso e confiável, deve-se primeiro detectar a falta corretamente. Sendo assim, visando o desenvolvimento e testes do algoritmo proposto para a detecção de faltas, um Parque Eólico conectado a uma rede de distribuição de 34,5kV foi escolhido e modelado, permitindo a geração de sinais precisos do sistema em condições normais e em falta.

3.1 Sistema elétrico adotado

Nesta etapa implementou-se utilizando o *software* DigSilent® Power Factory um circuito de um Parque Eólico de 34,5kV pertencente ao Complexo Eólico Ventos do Tianguá localizado na Serra de Ibiapaba, no município cearense de Tianguá, contendo uma extensão de 6,438 km, saindo da subestação coletora até o aerogerador. São obtidos os resultados de fluxo de carga e análise de curto-circuito considerando todos os tipos de faltas (monofásica, bifásica, bifásica a terra e trifásica). Os dados do circuito analisado foram extraídos de Peixoto et al. (2020). Na Tabela 1, consta a impedância para cada seguimento do trecho analisado, também se tem que a impedância total do trecho é $Z_L = 1,58893 + j2,63542 \Omega$.

Tabela 1. Impedância de sequência positiva de cada segmento do circuito analisado. Fonte: (Peixoto et al., 2020).

Identificação do segmento	R(Ω)	X(Ω)
1	0,88751	2,04082
2	0,1199	0,10164
3	0,15696	0,13305
4	0,6812	0,5775
5	0,12317	0,10441
6	0,13189	0,1118
7	0,10137	0,8593
TOTAL	1,58893	2,63542

Na Fig. 2, é possível observar o circuito do Parque eólico analisado implementado no *Software* DigSilent® Power Factory, composto por 8 aerogeradores de 1,690MW cada, conectado a uma rede de distribuição de 34,5 kV.

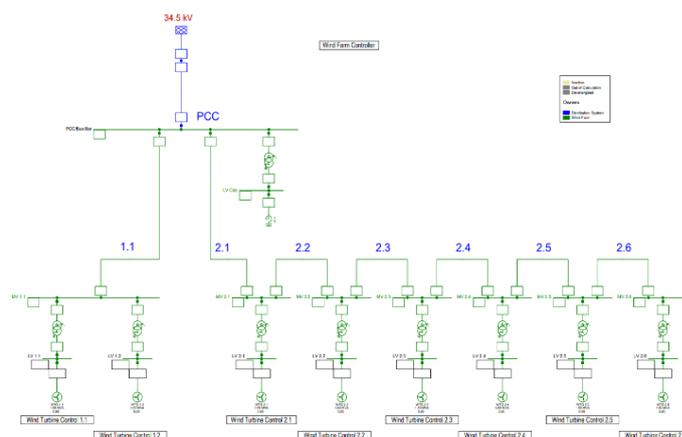


Fig. 2 Parque eólico consistindo de uma rede de distribuição de 34,5 kV.

3.2 Aquisição dos dados de tensão

Para desenvolver o método proposto, diversas situações de falta foram simuladas em diferentes alimentadores (AL) do parque eólico adotado. Os sinais de tensão foram amostrados na barra PCC da Fig. 2, para cada falta. A frequência de amostragem utilizada para discretização das amostras do sinal de tensão foi 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. Para o janelamento do sinal de tensão, utilizou-se uma janela de dados, com o comprimento ajustado para conter um ciclo do sinal de tensão com deslocamento de meio ciclo, conforme a Fig. 3. A implementação do algoritmo é realizada empregando o software MATLAB®.

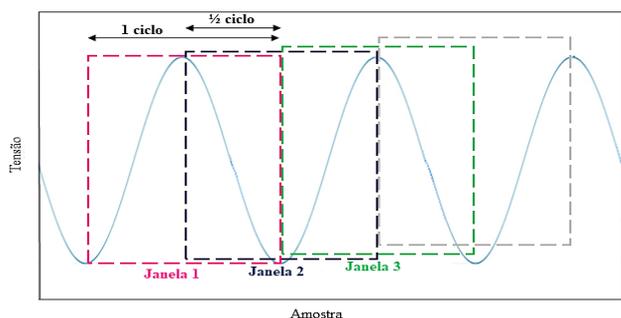


Fig. 3 Amostragem e janelamento do sinal de tensão. Fonte: (Adaptada de Alencar et al., 2020).

4. ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS

A detecção ocorre a partir da variação da distância Euclidiana entre dois pontos consecutivos dos valores amostrados dos sinais de tensão conforme proposto por Alencar et al. (2020). Baseado na mesma referência, escolheu-se a tensão como sinal de entrada para o algoritmo, uma vez que há uma menor variação desse sinal durante as faltas.

Ao ocorrer um distúrbio no alimentador, o sinal de tensão tende a sofrer alterações quando comparado ao mesmo sinal em condições normais de operação. A título de exemplo, na Fig. 4, é apresentada a tensão trifásica instantânea em um intervalo de tempo de 0 a 0,5s, no qual ocorre um curto-circuito trifásico no instante 0,2s no alimentador 2.4 do sistema da Fig. 2 com resistência de falta igual a zero.

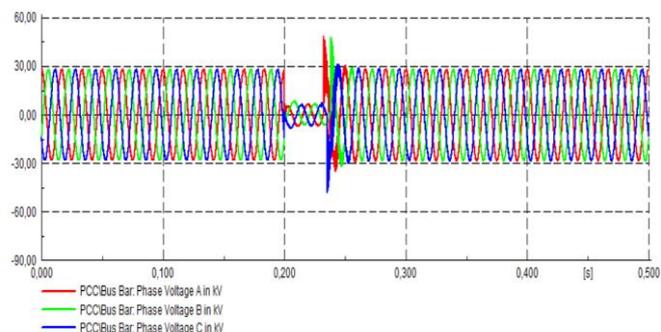


Fig. 4 Curto-circuito trifásico no instante de tempo de 0,2s no AL2.4 amostrado na barra PCC.

Nota-se que em aproximadamente 0,03s (2 ciclos) há a atuação da proteção localizada no PCC. Percebe-se que a proteção atua

de modo a isolar a parte do sistema sob curto-circuito a fim de manter energizada a parte em condições normais do Parque Eólico. Nas Fig. 5 e 6, é possível observar a atuação da proteção no PCC (em vermelho) e a parte desenergizada do sistema (em cinza) de acordo com o local da falta. Entretanto para altas resistências de falta, como por exemplo 100Ω, é muito provável que a proteção não seja sensibilizada devido à alta impedância.

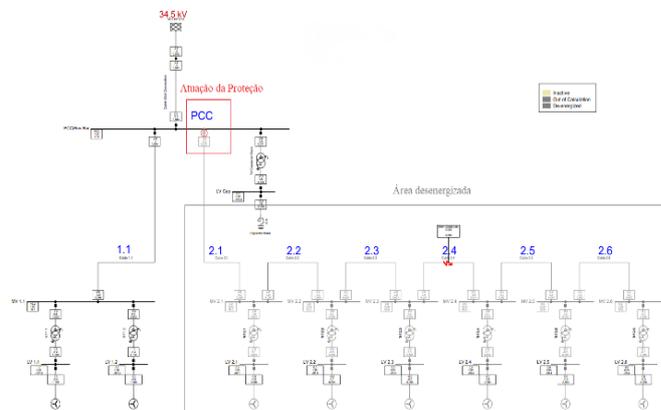


Fig. 5 Curto-circuito trifásico no AL2.4

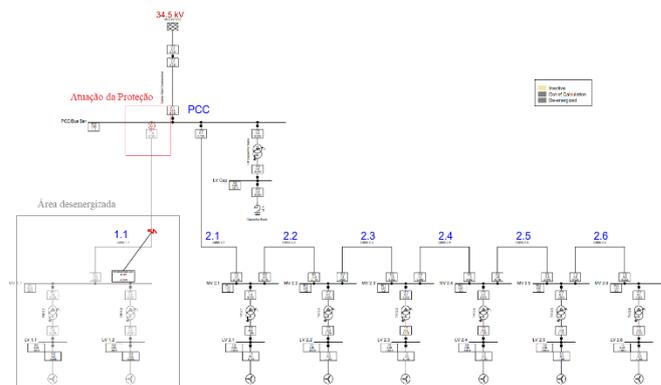


Fig. 6 Curto-circuito trifásico no AL1.1

4.1 Distância Euclidiana na detecção da falta

A título de exemplo, na Fig. 7 é ilustrada a tensão na fase (a) na barra PCC do Parque Eólico mostrado na Fig. 2, contendo apenas um ciclo da frequência fundamental do sinal. Considerando que 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 (Fig. 8).

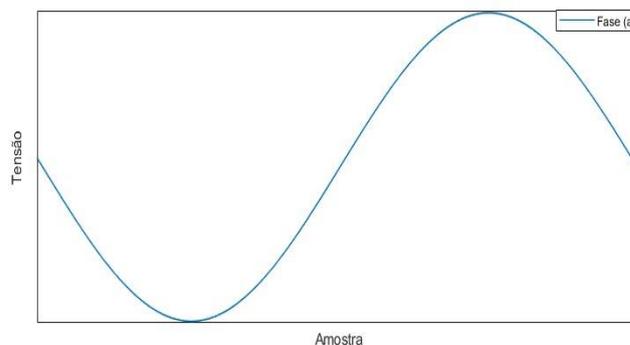


Fig. 7 Um ciclo do sinal de tensão na barra PCC.

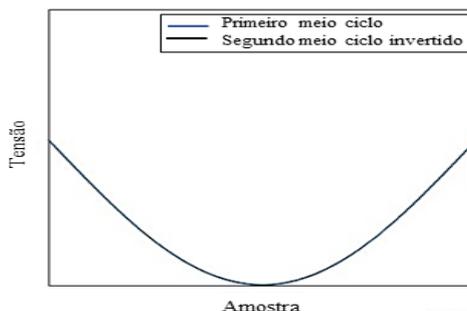


Fig. 8 Comparação entre o primeiro meio ciclo e o segundo meio ciclo invertido do sinal de tensão.

Uma vez que ocorre uma falta no sistema, o sinal de tensão tende a sofrer uma deformação como indica a Fig. 9. Neste sentido, observa-se que ao se calcular a distância Euclidiana entre o ciclo do sinal de tensão antes da ocorrência da falta e após, o resultado não será nulo.

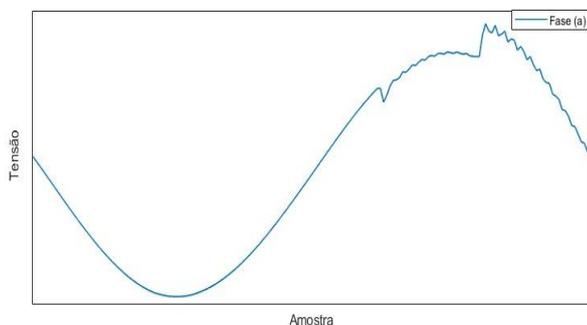


Fig. 9 Um ciclo do sinal de tensão na barra PCC após uma falta.

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. A partir disto, 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 a equação 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 equação 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. 10, pode ser visto como ocorre a detecção da falta.

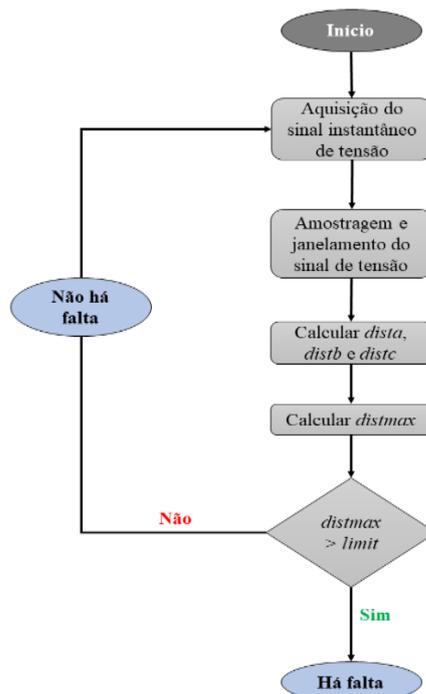


Fig. 10 Fluxograma do algoritmo de detecção de faltas.

O limite de detecção deve ser calibrado de modo que o algoritmo de detecção seja insensível a casos que causem alteração no sinal da tensão, mas não constituem um curto-circuito. Para calibração do $limit$ fez-se uma análise de contingências no sistema da Fig. 2, considerando os seguintes casos: a interrupção de um alimentador, e a saída de geradores e transformadores do sistema. Na Fig 11 (a, b, c, d, e, f) é possível identificar as contingências que foram simuladas, sendo: interrupção do AL2.5, saída do transformador 2.2, saída do gerador 1.2, saída dos geradores 1.1 e 2.3, saída do AL2.4 e transformador 1.2 e pôr fim a saída dos geradores 1.1 e 2.3 e dos transformadores 1.2 e 2.3 do sistema, respectivamente.

5. TESTES E RESULTADOS

Nesta seção são analisados e discutidos os resultados obtidos com o algoritmo de detecção de faltas apresentado na seção anterior. Além do SEP apresentado na Fig. 2, também foi modelado um segundo SEP (Fig. 12), constituído de um Parque Eólico com 6 aerogeradores de 2,5 MW cada, conectado a uma rede de distribuição de 20 kV e frequência de 50Hz. A ideia é testar e validar o algoritmo a partir de diferentes condições operativas em dois Parques Eólicos distintos. Para avaliar o algoritmo proposto foi simulado no *software* DigSilent® Power Factory faltas monofásicas A, B e C, bifásica terra ABT, BCT e CAT, bifásica AB, BC e CA e trifásica em ambos os Parques Eólicos e em alimentadores distintos, adotando-se os seguintes valores de resistências de falta: 0 Ω, 10 Ω, 30 Ω, 50Ω e 100Ω.

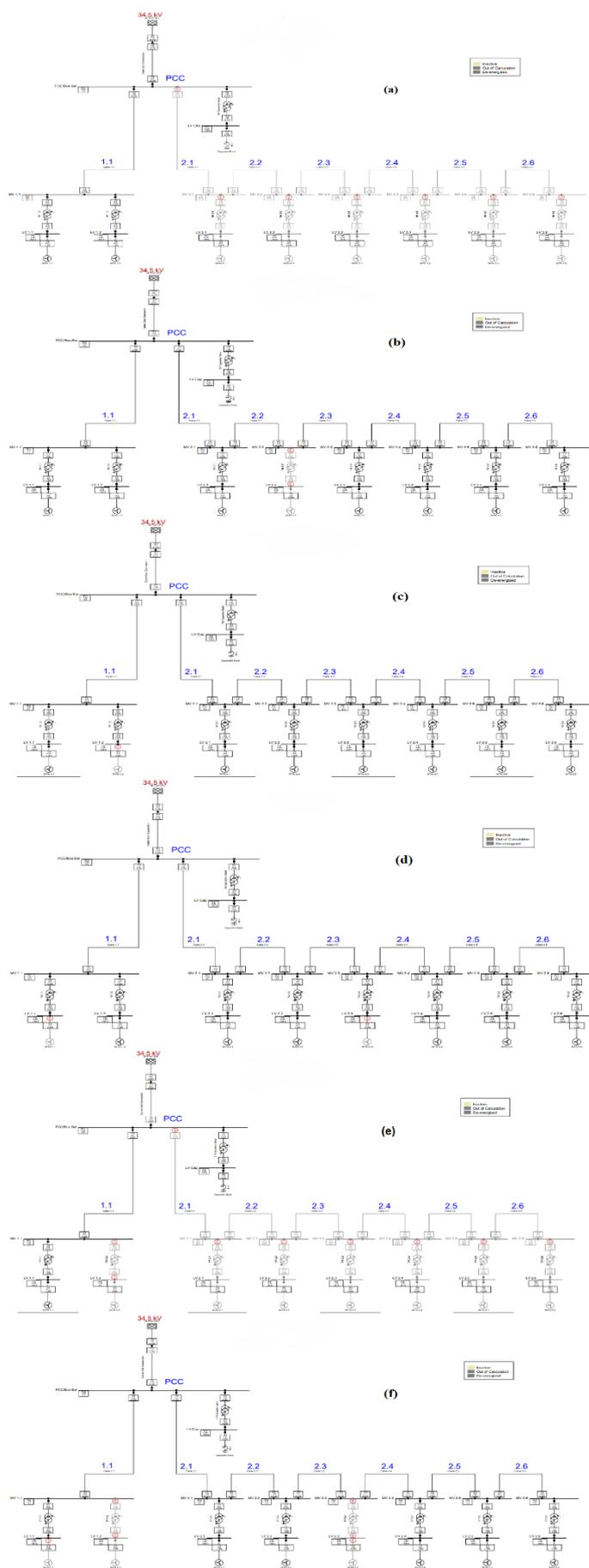


Fig. 11 Contingências simuladas para a calibração de *limit*.

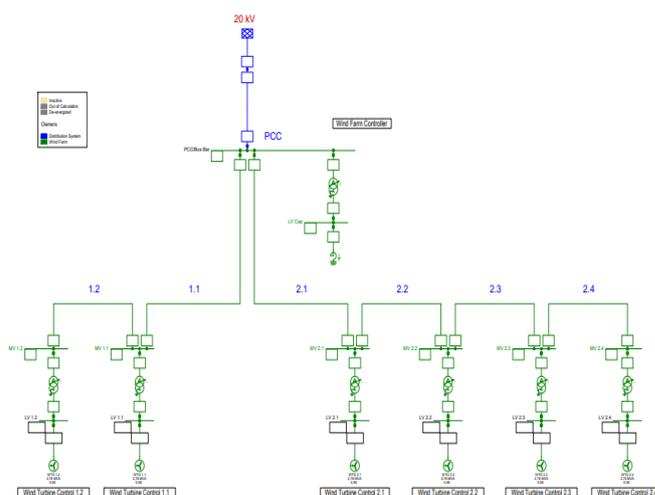


Fig. 12 Parque eólico consistindo de uma rede de distribuição de 20 kV.

Para declarar a existência de falta no SEP é necessário definir o valor que *limit* deve assumir, permitindo diferenciar uma situação de falta de uma condição de operação normal. Após simuladas diversas situações de faltas, pequenos distúrbios e condições de operação normal no sistema da Fig. 2, o valor de 0,5 foi definido como parâmetro para a detecção da falta, ou seja, para valores de *distmax* acima desse limite o algoritmo de detecção identifica a existência de um curto-circuito no sistema.

Foram testados ao todo 250 situações de falta, sendo 150 casos de falta em três alimentadores (AL's 1.1, 2.1 e 2.4) para o Parque Eólico conectado à rede de distribuição de 34,5 kV (Fig. 2), e 100 casos de faltas em dois alimentadores (AL's 1.2 e 2.4) para o segundo sistema modelado (Fig. 12).

Na Fig. 13 (a) e (b), são apresentados dois gráficos contendo no total 100 simulações de faltas no alimentador 2.4 de ambos os sistemas com resistências de faltas conforme descritas anteriormente, sendo 50 faltas no Parque Eólico conectado à rede de distribuição de 20kV e 50 faltas no Parque Eólico conectado à rede de distribuição de 34,5kV. Sendo assim, é possível observar como ocorre a detecção, uma vez que a falta resulta em um valor de *distmax* superior ao *limit* (0,5) e em caso de operação normal no SEP os valores de *distmax* são inferiores ao *limit*.

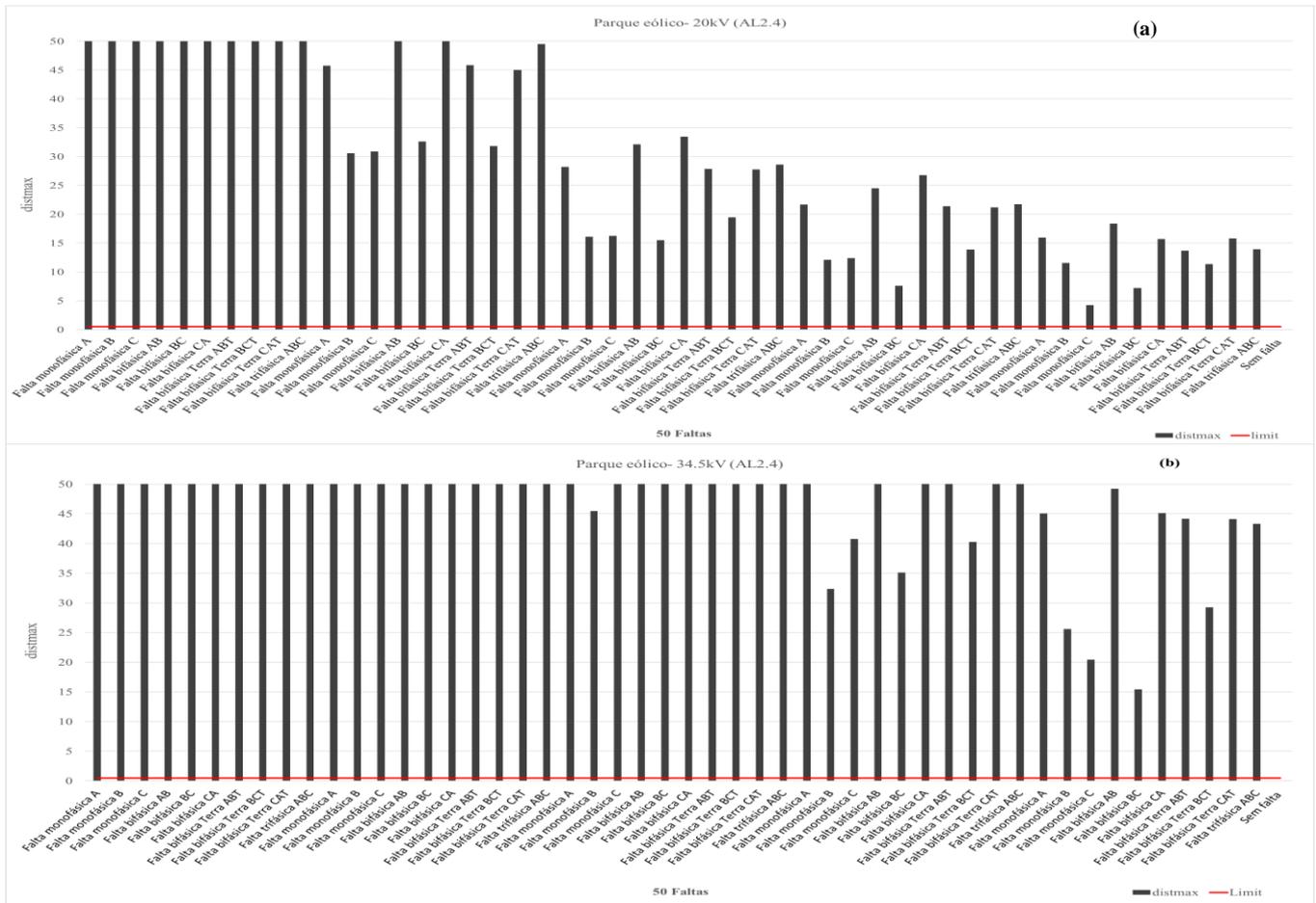


Fig. 13 a) Distância da detecção da falta no AL2.4 do Parque Eólico consistindo de uma rede de distribuição de 20kV e b) no Parque Eólico consistindo de uma rede de distribuição de 34,5kV.

Considerando que o algoritmo de detecção deve ser insensível a casos que não constituem um curto-circuito, embora causem alteração no sinal de tensão, na Fig. 14 é possível observar que para as contingências simuladas (Fig. 11) os valores de *distmax* calculados não ultrapassam o limite calibrado, ou seja, não ocorre a detecção em situações que não constituem um curto-circuito.

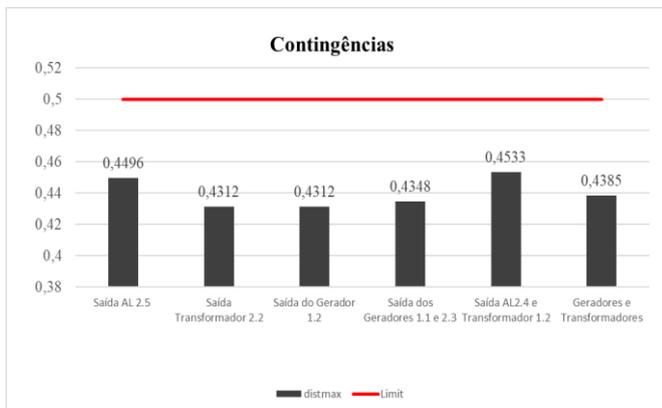


Fig. 14 Distância da detecção das contingências simuladas para calibração de *limit*.

A exatidão do algoritmo de detecção aplicado a Parques Eólicos apresentou uma taxa de acerto de 100% para os casos testados como pode ser visto na Tabela 2, o que demonstra um

excelente resultado na detecção de faltas. Ressalta-se a precisão do método de detecção para os curtos-circuitos com altas resistências de faltas (100Ω).

Tabela 2 Resultados do algoritmo de detecção para diferentes tipos de faltas.

Tipo de Falta	Resistência de falta (Ω)	Total de faltas simuladas	Precisão da detecção
A	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
B	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
C	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
AB	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
BC	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
CA	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
ABT	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
BCT	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
CAT	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
ABC	0	5	100,00%
	10	5	100,00%
	30	5	100,00%
	50	5	100,00%
	100	5	100,00%
Total		250	100,00%

6. CONCLUSÕES

Neste artigo um método baseado em distância Euclidiana foi proposto para a função de detecção de faltas em alimentadores de Parques Eólicos. Inúmeros casos de faltas foram simulados ao longo de alguns alimentadores, considerando diversas condições de falta e operativas do SEP, a fim de desenvolver um algoritmo robusto e preciso, assim como avaliar seu funcionamento. Para validação do esquema de detecção proposto, dois sistemas em condições de operações distintas foram modelados e simulados no DigSilent®. Ao todo, considerando os dois SEP's, foram testados e avaliados 250 casos de faltas, com resistências de faltas variando em 0Ω, 10Ω, 30Ω, 50Ω e 100Ω. Os resultados mostraram que para os 250 casos de falta simulados, o método proposto foi capaz de detectar a existência da falta com excelência obtendo precisão de 100% ou seja, o algoritmo detectou a presença do curto-circuito independentemente das condições operativas do SEP ou das características da falta. Portanto o método proposto apresentou excelentes resultados na detecção da falta, podendo ser empregado de modo eficaz em estágios anteriores a localização de faltas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Disponível em: <https://www.aneel.gov.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.
- Associação Brasileira de Energia Eólica - ABEEólica. Boletim anual de geração eólica, 2020. Disponível em: <http://abeeolica.org.br>.
- Bíscaro, A.; Pereira, R.; Kezunovic, M.; Mantovani, J. Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 31, n. 2, p. 428–436, 2015.
- Decanini, J.; tonelli-neto, M.; Minussi, C. Robust fault diagnosis in power distribution systems based on fuzzy artmap neural network-aided evidence theory. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 6, n. 11, p. 1112–1120, 2012.
- Dehghani, M.; Khooban, M. H.; Niknam, T. Fault detection and classification based on a combination of wavelet singular entropy theory and fuzzy logic in distribution lines in the presence of distributed generations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 78, p. 455–462, 2016.
- Faria, A. S. S. detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição com a inserção de geração distribuída. 2020. 89 f. dissertação (mestrado em engenharia elétrica) - faculdade de engenharia, universidade estadual paulista "julio de mesquita filho"-unesp, ilha solteira, 2020.
- Global Wind Energy Council- GWEC. Global wind report: annual market update 2021. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2021>.
- Gomes, P.; Guarini, A.P., “O Processo de Recomposição das Cargas após Grandes Perturbações: um processo de desenvolvimento continuado.” XVIII SNPTEE, Curitiba, PR, 16 a 21 de Outubro de 2005.
- Ledesma, J. J. G.; Nascimento, K. B. do; Araujo, L. R. de; Penido, D. R. R. A two-level ann-based method using synchronized measurements to locate high-impedance fault in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 188, p. 106576, 2020.
- 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.
- Oleskovicz, M.; Coury, D. V.; Felho, O. D.; Usida, W. F.; Carneiro, A. A.; Pires, L. R. Power quality analysis applying a hybrid methodology with wavelet transforms and neural networks. *International journal of electrical power & Energy systems*, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 206–212, 2009.
- Peixoto, L. B.; Coelho, R. R. A.; Mamede, D. R.; Paula, D. G. A.; Santo, S. G. D. Aplicação do Método de Simples Reatância e Takagi na Localização de Falta em uma Rede de Média Tensão de um Parque Eólico, SBSE 2020.
- Salim, R. H. et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 1846 - 1856, out. 2008. ISSN 0885-8977.
- 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.
- Severiano Junior, C. A. Localização e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando o método dos mínimos quadrados e inteligência computacional. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG. Belo Horizonte. 2013.
- Sistema de Informações de Geração da ANEEL- SIGA. Disponível em: <https://dados.gov.br/dataset/signa-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>.
- Tonelli Neto, M. D. S. Desenvolvimento de um sistema inteligente para o diagnóstico e prognóstico de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica. 2015. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho- UNESP. Ilha Solteira. 2015.