

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA POTÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM HARMÔNICOS CAUSADOS POR FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Gabriela Nunes Lopes¹, José Carlos de Melo Vieira¹

¹*Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) (e-mail:gabrielanuneslopes@usp.br).*

RESUMO

A proteção de Sistemas de Distribuição (SDs) contra Faltas de Alta Impedância (FAIs) é um desafio complexo que atrai a atenção de empresas e pesquisadores em todo o mundo. A crescente integração de Geração Distribuída (GD) aumenta tal complexidade. A ocorrência de FAIs pode causar riscos de incêndio e de choque para seres vivos, o que motiva a busca por novas técnicas para o diagnóstico deste tipo de falta. No entanto, ainda não existe uma solução completamente eficaz para sua identificação e o impacto de GDs nas soluções existentes ainda não foi completamente avaliada. Portanto, o presente estudo realiza a análise dos sinais registrados na subestação de um sistema de distribuição com GD. Para tal, foram utilizados índices para avaliar a amplitude e o ângulo dos harmônicos extraídos dos sinais de corrente e tensão medidos durante as FAIs usando a Transformada de Stockwell. Isso permite identificar como a presença da GD e a localização da FAI afetam os índices utilizados para seu diagnóstico. Em resumo, o estudo visa caracterizar os harmônicos dos sinais associados a esse evento, fornecendo resultados que podem ser aplicados por pesquisadores no desenvolvimento de algoritmos de detecção de FAIs em sistemas elétricos, mesmo quando há GD.

Palavras-chave: Falta de Alta Impedância, Geração Distribuída, Sistemas de Distribuição, Transformada de Stockwell

1. INTRODUÇÃO

A Falta de Alta Impedância (FAI) é um tipo de evento recorrente em Sistemas de Distribuição (SDs). Esse tipo de falta é considerado um problema importante pela comunidade científica, bem como pela indústria, uma vez que pode causar diversos efeitos perigosos se a proteção do sistema elétrico não agir em tempo hábil. Destaca-se que, uma vez que esse tipo de falta apresenta corrente com valores muito próximos aos das correntes de cargas em SDs, a proteção convencional usualmente não opera quando as FAIs ocorrem.

FAIs são originadas pelo contato entre condutores da rede elétrica e superfícies de elevada impedância, como árvores, asfalto, areia, grama ou cimento. Os cenários mais comuns para que essas situações aconteçam em SDs são falhas de isolamento, contaminação de isoladores e defeitos na blindagem externa do cabo de proteção, que podem causar a

ruptura do condutor que pode levar à FAI (DEPEW, 2006). Dentre os efeitos causados por FAIs, destaca-se a eventual interrupção do fornecimento de energia elétrica para consumidores. Isso pode causar penalização das concessionárias de energia, uma vez que índices de duração e frequência de interrupção são passíveis de aumento na ocorrência de FAIs (ANEEL, 2017). Além disso, FAIs podem causar danos às propriedades e equipamentos, e podem expor seres humanos e animais ao risco de choque elétrico, pois podem causar queimaduras e eletrocussão devido ao arco elétrico associado (NAKAGOMI, 2006). Em contrapartida ao exposto, mesmo com a importância de conceberem-se métodos eficazes de proteção e com o empenho de pesquisadores e fabricantes de equipamentos de proteção, relés comerciais específicos para FAIs ainda não são capazes de identificar este tipo de falta em todos os cenários que podem ocorrer em SDs.

Diversas técnicas foram elaboradas com o objetivo de buscar resoluções deste tema. Grande parte delas origina-se de componentes de frequências causados pela FAI (GOMES, 2009). Algumas das técnicas são baseadas em harmônicos e inter-harmônicos extraídos pela Transformada de Fourier e suas derivações, ou em resoluções extraídas pela Transformada Wavelet (LOPES, 2020). Ainda, pode-se citar a Transformada de Stockwell (TS), considerada uma evolução da junção entre a Transformada Wavelet e a de Fourier, pois observa frequências presentes no sinal, como a Transformada de Fourier, mas por meio de uma janela Gaussiana, além de empregar uma wavelet-mãe multiplicada por um fator de fase, assim como a Transformada Wavelet (SAMANTARAY, 2008). Nesse sentido, a TS tem apresentado resultados promissores no estudo de FAIs.

Ao desenvolver um método de proteção, pretende-se que este seja aplicável a variados sistemas. Nesse sentido, é compreendido que em trabalhos atuais que envolvam estudos de SDs, é importante considerar o crescente aumento da Geração Distribuída (GD) devido ao seu crescimento considerável nos últimos anos (ANEEL, 2020). De acordo com O'Brien (2016) e Bretas (2006), essa notável proliferação de GD, levou a uma completa reavaliação dos métodos pelos quais os SDs devem ser monitorados, controlados e protegidos, pois elas acarretam consequências na operação geral de SDs, como a alteração do fluxo de energia elétrica. Diante disso, os equipamentos que possuem configurações de um circuito específico podem funcionar incorretamente, o que afeta a confiabilidade, a segurança e a eficiência dos sistemas de proteção, incluindo os especializados na identificação de falhas.

Em vista da problemática narrada, o presente estudo realiza a análise da amplitude e ângulo de harmônicos extraídos pela TS de sinais de tensão e corrente registrados na subestação

de um sistema teste com a presença de GD durante a incidência de FAIs. Assim, as principais contribuições desse trabalho são:

- O uso de sinal real de FAI nos testes;
- A aplicação da TS, uma técnica com alto poder de processamento no domínio da frequência e do tempo, para extração de harmônicos dos sinais;
- Estabelecimento de índices para avaliação quantitativa das amplitudes e dos ângulos dos sinais medidos durante a FAI;
- Avaliação dos sinais medidos durante a incidência da FAI com diversos níveis de penetração da GD no sistema.

2. Características das Falhas de Alta Impedância e Impacto das GDs

As FAIs ocorrem em SDs pelo contato de um condutor energizado com uma superfície de alta impedância, o que pode gerar arco elétrico e, conseqüentemente, corrente de falta, ainda que com patamar insuficiente para operar a proteção convencional de SDs (DEPEW, 2006). Tal corrente de falta apresenta diversas peculiaridades e pode ser definida como distorcida, assimétrica, aleatoriamente interrompida e progressivamente variável a cada semiciclo (NAKAGOMI, 2006). Apesar de sua natureza variável, existem alguns padrões de comportamento para delimitar o estudo de FAIs. Dentre eles está a distorção da forma de onda associada devido à não linearidade do arco. Outros efeitos são a assimetria e a intermitência da forma de onda da corrente. Ainda, há o *build-up*, o aumento gradativo da forma de onda da corrente quando o potencial de ruptura é atingido até que a corrente de falta seja atingida. Por fim, há a formação de patamares, associado a uma variação lenta da resistência de falta, criando períodos em que a constância da amplitude é alcançada.

As características dos sinais medidos durante a FAI evidenciam que existem frequências associadas a elas. Um exemplo é o surgimento de harmônicos ímpares de baixa ordem devido à distorção causada pela não-linearidade da resistência de arco. Ainda, há harmônicos de ordem par em decorrência da assimetria e altas frequências originadas pela intermitência (NAKAGOMI, 2006). Em vista do exposto, observa-se que existirão formas de onda não lineares associadas aos sinais elétricos registrados durante a FAI. Assim, é possível caracterizar e analisar este evento por meio da realização da extração das componentes de frequência dos sinais associados a esta modalidade de falta (LOPES, 2020).

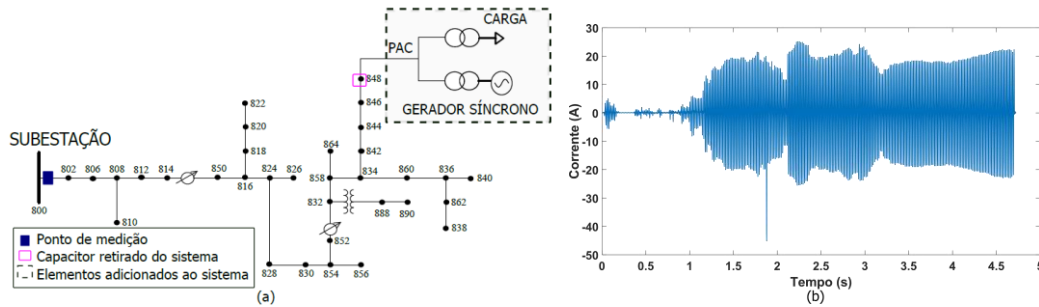
Usualmente SDs apresentam topologia radial e fluxo de potência unidirecional. Nos últimos anos, devido ao avanço na tecnologia de semicondutores, desejo do fornecimento de energia elétrica barata e confiável, além do interesse em diversificar a matriz energética e de inserir fontes renováveis, houve um crescente aumento na inserção de GD em SDs (TEMERBAEV, 2014). Nota-se tal interesse no mundo todo, o que não é diferente no Brasil. O acréscimo de GD influencia no desempenho geral da operação dos SDs, além de tornar o fluxo de potência bidirecional. Nessa perspectiva, as configurações do sistema de proteção também são alteradas, uma vez que a magnitude e a direção da corrente de falta também sofrem modificações (NAYAK, 2016). Desse modo, a detecção de faltas pode ser comprometida pelas GDs (O'BRIEN, 2016).

Apesar da significativa pesquisa realizada para proteção contra FAI em SDs, existe uma forte necessidade de desenvolvimento de novos algoritmos que possam identificar, de forma eficiente e confiável, as FAIs em sistemas com GD, quer sejam pautados na detecção, como é buscado em (NAYAK, 2016) ou na localização, como é apresentado em (BRETAS, 2006). Em ambos os trabalhos, a análise da proteção contra FAIs é realizada por meio de modelos simplificados de FAI e aplicados a sistemas teste com baixo número de barras, mostrando que ainda existem muitos caminhos a serem explorados neste tema.

3. Modelagem e Metodologia

Um dos principais intuítos deste trabalho é a análise dos sinais medidos na subestação de um sistema de distribuição durante a incidência da FAI. Para realizar esta modelagem, foi utilizado o software *Alternative Transients Program* (ATP) por meio da interface *ATPDraw*. Assim, os testes seguiram utilizando o sistema de 34 barras do IEEE (Figura 1a). Suas principais características são ser um sistema real, naturalmente desbalanceado, com cargas, capacitores, reguladores de tensão e transformadores (IEEE, 2010). Adicionalmente, foi modelado um gerador síncrono (GS) com potência de 1,112 MVA e 0,48 kV, extraído de Motter (2018), que foi conectado à barra 848 por meio de um transformador de 1500 kVA, 0,48 kV/24,9 kV estrela-estrela. O GS foi modelado pelo elemento do ATPDraw *SM59FC - Synchronous Machine - TYPE 59*, com modo de injeção de potência constante. Para evitar sobretensões, o capacitor conectado à barra 848 foi desconectado, e foi conectada uma carga concentrada de 556 kW e fator de potência indutivo de 0,95 por meio de um transformador de 750 kVA, 24,9kV/0,48 kV e acoplamento delta-estrela (MOTTER, 2018).

Figura 1 – (a) Sistema de 34 barras do IEEE modificado e (b) Forma de onda de FAI.



Para simulação das FAIs, foi utilizando um sinal obtido em ensaios reais num campo de teste de média tensão especialmente construído para esse propósito pelos autores de (MACEDO, 2015). Tais ensaios consistiam na queda do condutor ao contato com diversos solos. A forma de onda de FAI apresenta características como a longa duração, assimetria, patamares e *buildup* (Figura 1b). Após a aquisição no ponto de falta, o sinal real de FAI foi inserido no sistema teste simulado como fonte de corrente. Duas chaves foram inseridas para modelar ruptura do condutor e o toque ao solo. Nas simulações, tal esquema foi inserido na fase A das barras do sistema após a completa energização e estabilização do GS. Após as medições, é realizada a extração de harmônicos dos sinais utilizando a TS implementada no *software* MATLAB. A TS é uma técnica de processamento com análise espectral de multiresolução, que provê os harmônicos dos sinais como a transformada de Fourier, mas por uma janela Gaussiana (SAMANTARAY, 2008), como mostra a Equação (1):

$$S[jT, n/NT] = \sum_{m=0}^{N-1} H[(m+n)/(NT)] e^{-(2\pi^2 m^2)/(n^2)} e^{-i(2\pi m j)/N} \neq 0 \quad (1)$$

em que j , m e $n=0, 1, \dots, N-1$ para cada ordem harmônica n diferente de zero. Assim, a TS fornece uma matriz complexa, em que as linhas contêm as componentes em frequência e as colunas representam a amplitude e ângulo das frequências para cada amostra.

Para realizar uma análise quantitativa, foram desenvolvidos índices para avaliar o comportamento das harmônicas comparando seu comportamento durante o regime permanente e após a falta. A amplitude e o ângulo das harmônicas serão avaliados por meio de índices específicos por apresentarem comportamento diferente.

Para medir o impacto nos valores das amplitudes das harmônicas, o primeiro índice utilizado é o índice de margem mr , proposto inicialmente para analisar sinais de FAI em Lopes (2020). Para calculá-lo, define-se a margem de cada período p pré e pós falta ao longo do tempo, em que a margem será a soma do valor máximo da amplitude de cada ordem

harmônica naquele período e seu desvio padrão. Após definidas as margens, calcula-se a razão de margem, mr , como mostra Equação (3).

$$mr = \frac{\max(x_{pós-falta}) + \text{std}(x_{pós-falta})}{\max(x_{pré-falta}) + \text{std}(x_{pré-falta})} \quad (3)$$

Já para analisar o comportamento dos ângulos, foi avaliado o desvio padrão durante o período sob falta em relação ao regime permanente. Para tal, utilizou-se o índice da relação do desvio padrão ($stdr$) de cada ângulo entre os períodos pós e pré-falta, como segue:

$$stdr = \text{std}_{pós-falta} / \text{std}_{pré-falta} \quad (4)$$

4. Resultados

As análises realizadas nesta seção são separadas em três casos, considerando 100%, 60% e 30% da potência nominal do GS enquanto são mantidas as tensões em todas as barras do sistema adequadas aos níveis exigidos pelo PRODIST (ANEEL, 2017). Por questão de viabilidade de espaço, os resultados apresentados nesta seção serão referentes à FAI na barra 802 e na barra 860. A barra 802 se localiza próxima à subestação, e, portanto, do ponto de medição, e ao realizá-la, desconecta-se da subestação a fase A de todo o sistema, inclusive do GS. Já a barra 860 é a 24ª barra mais distante da subestação, e está em um ramo diferente do ponto de conexão do GS, e ainda é conectada ao sistema durante a falta.

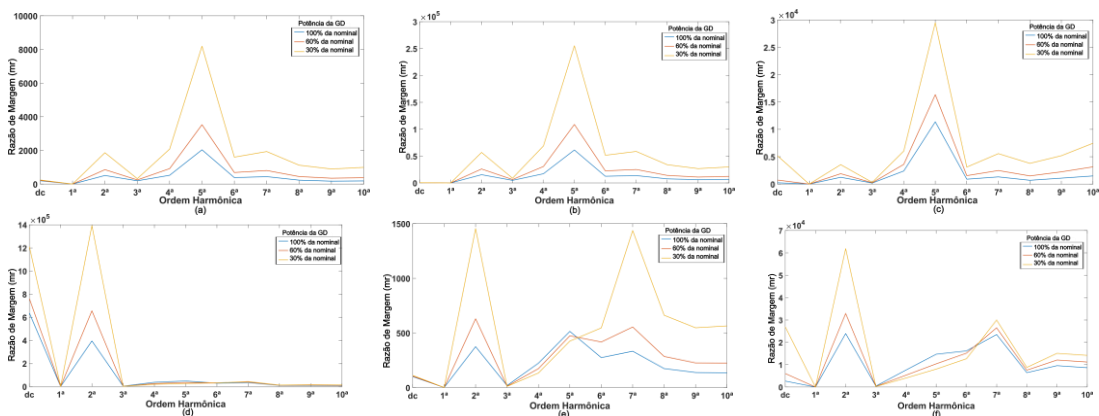
Após a aquisição dos dados, com 1 s de regime permanente e 1 s durante a falta, foi calculada a TS dos sinais medidos na subestação a cada ciclo. Assim, foi calculado o índice mr para avaliar a amplitude e o índice $stdr$ para os ângulos das harmônicas dos sinais. Foram considerados os harmônicos até a décima ordem, pois representam as principais características das FAIs e são comumente usados na literatura (LOPES, 2020).

A Figura 2 apresenta os resultados do índice mr em relação à amplitude das harmônicas. As Figuras 2a, 2b, e 2c, que são relacionadas à FAI na barra 802, mostram que os maiores valores de índice mr foram atingidos na quinta ordem harmônica, seguido da sétima e da segunda ordem. Isso mostra o grande impacto causado pelo arco elétrico associado à FAI, que implica em distorções que geram harmônicos ímpares, e também em assimetria, que origina harmônicos pares. Os sinais de corrente na fase e no neutro e o da tensão apresentaram comportamento similar em relação ao impacto na amplitude das ordens harmônicas. Ainda, nota-se que ao aumentar a penetração do GS, diminuiu-se o impacto nas harmônicas, uma vez que índice mr diminuiu. No entanto, mesmo com tal queda, este

índice apresentou valores consideráveis em todos os casos para as harmônicas previamente mencionadas, tornando possível utilizá-las como métricas em futuros métodos de detecção de FAI, considerando os diversos níveis de penetração do GS.

A outra análise relacionada ao índice mr foi gerada pela medição dos sinais com a incidência da FAI na barra 860. A Figura 2d mostra, em relação à corrente medida na fase, que com a incidência da FAI sem que houvesse desconexão de uma das fases do GS, houve um aumento do impacto do índice mr relacionado à amplitude da segunda ordem harmônica e do nível dc do sinal. Assim, as Figuras 2e e 2f também mostram que houve variação da influência da amplitude das harmônicas ao considerar outra localização da FAI. Nesses dois casos, que se relacionam à corrente medida no neutro do transformador e à tensão na fase, também houve aumento do índice mr relacionado à segunda ordem harmônica, mas com impacto considerável nas harmônicas de maior ordem, principalmente a sétima. Deve-se salientar que mesmo com o aumento do índice mr dos outros harmônicos, o quinto harmônico ainda apresentou valor considerável. Isso indica que se a quinta ordem harmônica fosse aplicada como métrica num algoritmo de identificação de FAIs, seria possível observá-lo no sinal com a incidência da falta em ambas as localizações.

Figura 2 - Índice razão de margem da amplitude das harmônicas dos sinais de (a) corrente na fase, (b) corrente no neutro e (c) tensão na fase com a FAI na barra 802, e os sinais de corrente (d) na fase, (e) no neutro e de (f) tensão com a incidência da FAI na barra 860.



A segunda análise é pautada na avaliação do impacto da FAI no ângulo dos harmônicos usando a relação do desvio padrão, o $stdr$, cujos resultados estão na *Tabela 1*. Ao analisá-la, infere-se que o desvio padrão do ângulo da componente fundamental dos sinais foi o que mais apresentou aumento quando se compara os sinais pós e pré falta, principalmente com a FAI na barra 802. Também, nota-se que o valor do índice $stdr$ foi afetado pelo nível de penetração do GS. Por fim, verifica-se que em todos os níveis de penetração, o índice $stdr$ do ângulo da sexta à décima ordem harmônicas foram baixos, sendo pouco afetados pela

FAI. Por outro lado, os ângulos da fundamental, segunda e terceira harmônicas foram afetados pela FAI em todos os sinais analisados, mostrando potencial para sua detecção.

De modo geral, tanto os índices *mr* relacionados à amplitude, quanto os índices *stdr* relacionados aos ângulos, apresentaram variação dependendo da penetração do GS. Isso evidencia a necessidade de serem consideradas as situações de geração ao elaborar-se análises para proteção contra FAIs em SDs com DG que utilizem harmônicos como métricas.

Tabela 1 - Métrica *stdr* do ângulo das harmônicas para a corrente na fase (Ia), no neutro (In) e tensão na fase (Va) para os três níveis de potência da GD (PDG).

PGD Ordem Harmônica	Nominal						60% da nominal						30% da nominal					
	Fai na barra 802			FAI na barra 860			Fai na barra 802			FAI na barra 860			Fai na barra 802			FAI na barra 860		
	Ia	In	Va	Ia	In	Va	Ia	In	Va	Ia	In	Va	Ia	In	Va	Ia	In	Va
Fund.	34	129	638	1298	2057	4606	10	17	39	207	335	769	420	639	1310	20	95	637
2ª	103	83	33	3	3	3	16	14	12	9	8	5	109	96	36	254	106	37
3ª	7	31	28	6	8	46	0	31	123	7	9	50	14	68	24	8	10	48
4ª	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	1	0	0	0
5ª	17	14	11	18	39	94	2	2	2	0	40	136	14	11	8	49	70	37
6ª	4	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	5	1	0
7ª	3	3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	7	2
8ª	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	5	1
9ª	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	8	4	2
10ª	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	5	3	1

5. Conclusão

Neste artigo foi avaliada a influência da potência de um gerador síncrono ao incidir uma FAI em localizações diferentes de um SD. Para tal, foram extraídas as amplitudes e os ângulos dos harmônicos de sinais de corrente de fase e neutro e tensão de fase por meio da TS, para que assim estes pudessem ser analisados por meio de índices.

A amplitude dos harmônicos foi avaliada por meio da relação entre a amplitude do harmônico pós e pré-falta. Os resultados mostraram que o quinto harmônico foi severamente afetado pela FAI, seguido de harmônicos de segunda e sétima ordem. O valor dessa relação é modificada ao variar penetração do GS. Já as análises da relação entre o desvio padrão dos ângulos *stdr* pós e pré falta mostraram grande impacto no ângulo da fundamental, seguido da segunda e terceira ordens harmônicas.

De modo geral, inferiu-se que a localização da falta também modifica o comportamento harmônicos dos sinais medidos na subestação, uma vez que o GS também contribui com o fluxo de potência do sistema. Os sinais de corrente medidos na fase e no neutro do transformador, bem como o sinal de tensão, foram eficientes para aplicação na identificação das FAIs, uma vez que apresentaram variação ao incidir a FAI no sistema em relação ao

regime permanente, alterando os índices calculados. Por fim, nota-se que esse artigo pode contribuir com desenvolvedores de algoritmos de diagnóstico de FAIs, exaltando a importância de verificar o comportamento de algoritmos na presença de GD.

6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, processo nº 2020/06935-5, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo 308979/2022-2. Agradecemos aos autores de Macedo (2015) da Universidade Federal de Uberlândia, pelo dado de FAI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2017), Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - **Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 8 - Resolução Normativa n 728/2016**, 2017.
- BRETAS, A. S., MORETO, M., SALIM, R. H., AND PIRES, L. O. (2006), **A novel high impedance fault location for distribution systems considering distributed generation**. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Venezuela, IEEE, p. 1–6.
- DEPEW, A. C., PARSICK, J. M., DEMPSEY, R. W., BENNER, C. L., DON RUSSELL, B., AND ADAMIAK, M. G. (2006), **Field experience with high- impedance fault detection relays**. *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, Dallas, TX, USA) p. 868–873.
- GOMES, D. P. S., OZANSOY, C., AND ULHAQ, A. (2017), **High-Frequency Spectral Analysis of High Impedance Vegetation Faults on a Three- wire System**. *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, VIC, Australia, IEEE.
- IEEE Distribution System Analysis Subcommittee (2010), **IEEE 34 Node Test Feeder**. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/> . Acesso em: 10/01/2020.
- LOPES, G. N., LACERDA, V. A., VIEIRA, J. C. M., COURY, D. V. (2020), **Analysis of Signal Processing Techniques for High Impedance Fault Detection in Distribution Systems**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 36, n. 6, p. 3438-3447.

-
- MACEDO, J. R., RESENDE, J. W., BISSOCHI, C. A., CARVALHO, D., AND CASTRO, F. C. (2015), **Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems**. *IET Gener., Transmiss. and Distribution*, v. 9, n. 16, p. 2593–2601.
- MOTTER, D., AND VIEIRA, J. C. D. M. (2018), **The setting map methodology for adjusting the dg anti-islanding protection considering multiple events**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 6, p. 1–10.
- NAKAGOMI, R. M. (2006) **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. Tese de Doutorado, *Universidade de São Paulo*.
- NAYAK, P. K., SARWAGYA, K., AND BISWAL, T. (2016), **A novel high impedance fault detection technique in distribution systems with distributed generators**. *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, Bhubaneswar, India, IEEE, p. 1–6.
- O'BRIEN, W., UDREN, E., GARG, K., HAES, D., AND SRIDHARAN, B. (2016) **Catching falling conductors in midair: detecting and tripping broken distribution circuit conductors at protection speeds**. *Annual Conference for Protective Relay Engineers, USA*, n. 69, IEEE, p. 11.
- SAMANTARAY, S., PANIGRAHI, B., AND DASH, P. (2008) **High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network**. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v.2, p.1071–1083.
- TEMERBAEV, S. A., AND DOVGUN, V. P. (2014) **Improvement of power quality in distributed generation systems using hybrid power filters**, *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Bucharest, n. 16, IEEE, p. 1–5