

# Análise da Inversão no Sentido do Fluxo de Potência Devido à Falta na Média Tensão e Geração Distribuída no Secundário Reticulado

Leonardo J. R. Neiva\* Francisco C. R. Coelho\* Wesley Peres\*  
Silvan A. Flávio\* Leandro R. Dias\*\*

\*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, São João del-Rei - MG, Brasil (e-mail: Leo\_J\_Rodrigues@hotmail.com, franciscocoelho@ufsj.edu.br, wesley.peres@ufsj.edu.br, silvanflavio@ufsj.edu.br).

\*\* Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos - SP (e-mail: rosadias.leandro@gmail.com)

**Abstract:** Regarding the distribution power system, the Distributed Generation (DG) is known for its potential benefits, as well as for its operational challenges. The focus of this work is about DG connection on loop secondary systems, also called Grid Networks (or Area Networks). The high-level penetration of DG can revert the traditional power flow direction, which is usually from high-voltage to low-voltage in distribution transformers. The network protectors use to be sensitized when power flow reverts, because it happens when there is a fault on primary feeder. Therefore, DG can lead to protectors false trips. Here, through simulations with the software OpenDSS, we assess different scenarios of primary faults and DG penetration, aiming for verification of any pattern in power flow reversion. The simulations are carried out on a grid 81 bus distribution system. Found results allowed the observation of patterns in most cases. These patterns can support network protectors programming, hence avoiding, or mitigating, false trips. Still, it is important to emphasize that future applications of solutions needs further studies on smart grid communication technologies.

**Resumo:** A Geração Distribuída (GD) apresenta potenciais benefícios, assim como desafios operativos em relação ao fornecimento de energia. Neste trabalho, realizou-se um estudo sobre a conexão de Geração distribuída em redes de distribuição cujo secundário é reticulado, isto é, malhado. A presença de GD em altos níveis neste tipo de topologia pode ocasionar inversão do fluxo de potência nos transformadores de distribuição. Tradicionalmente, a inversão de fluxo nestes transformadores está atrelada a curtos-circuitos no trecho de média tensão da rede, causando a sensibilização de dispositivos de proteção. Este estudo analisa situações envolvendo curtos-circuitos e GD em redes reticuladas com o intuito de diferenciar as inversões de fluxo de potência ocasionadas por estes. Realizaram-se simulações no *software* OpenDSS com um sistema real de 81 barras. Os resultados obtidos permitiram a observação de um padrão para a maior parte dos casos. Estes padrões podem apoiar a programação dos protetores de rede presentes no sistema, evitando ou minimizando os chamados falsos *trips*, que correspondem à atuação indevida destes dispositivos. Ressalta-se ainda que, para a aplicação de possíveis soluções para o problema, necessitam-se de estudos posteriores, como tecnologias que permitam a comunicação entre os protetores de rede.

**Keywords:** Grid Network; Distributed Generation; Fault Studies; OpenDSS; Reverse Power Flow.

**Palavras-chaves:** Rede Reticulada; Geração Distribuída; Curto-Circuito; OpenDSS; Fluxo Reverso.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel fundamental na sociedade, estando atrelada ao desenvolvimento social e econômico. Por esta razão, estudos sobre possíveis melhorias na rede elétrica são recorrentes. Em especial, a disseminação da geração por parte do consumidor (Geração Distribuída - GD) e seus impactos no sistema de distribuição tem sido objeto de pesquisas em todo o mundo nos últimos anos, visando principalmente o aproveitamento de seus potenciais benefícios para o sistema (Razavi et al., 2019).

A GD é definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como sendo fonte elétrica de qualquer potência, conectada diretamente na rede de distribuição ou por meio de instalações de consumidores, podendo também operar de forma isolada, com despacho possível pelo ONS (ANEEL, 2018). Em operação conectada à rede, os impactos mais notáveis da GD se dão nas perdas técnicas, nos níveis de tensão, na taxa de distorção harmônica e nos níveis curto-circuito ao longo dos ramos. Este último impacto traz um significativo aumento na complexidade dos esquemas de proteção, necessários à operação segura e confiável (Ghadiri and Mazlumi, 2020).

Com relação à confiabilidade do atendimento ao consumidor por parte da distribuidora de energia, a ANEEL estabelece metas de qualidade. Estas metas são representadas por valores máximos de alguns indicadores, como, por exemplo, o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), que descreve quanto tempo, em média, cada unidade consumidora ficou sem energia (ANEEL, 2017).

### 1.1 Sistema Reticulado de Distribuição de Energia Elétrica

Dentre as topologias possíveis para configuração dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a topologia chamada reticulada favorece à confiabilidade, fornecendo simultaneamente mais de uma opção de trechos de alimentação para cada consumidor. Destaca-se que, tradicionalmente, a distribuição tende a ser radial, isto é, sem laços (malhas). As redes reticuladas se caracterizam por instalações subterrâneas, possuindo mais de um alimentador primário, sendo que o secundário dos transformadores de distribuição pode estar conectado a uma região com conexão dos consumidores em malha, ou a uma instalação em particular. A Fig. 1 mostra o diagrama unifilar de um sistema de distribuição reticulado malhado. Este tipo de sistema é normalmente utilizado em regiões com alta densidade de carga, como regiões centrais de grandes metrópoles (Kagan et al., 2010).

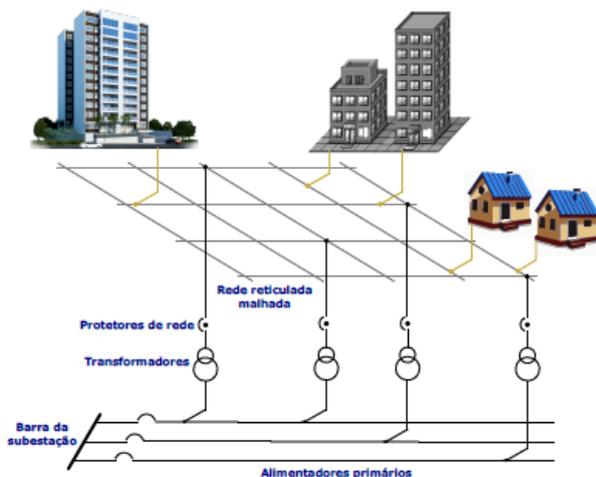


Fig. 1 Diagrama unifilar de um sistema de distribuição reticulado malhado (Dias, 2018).

A rede reticulada possui protetores de rede localizados no secundário dos transformadores de distribuição, sendo que estes transformadores são a interface entre a rede primária e secundária da distribuidora. Uma das funções destes protetores é a atuação no caso de reversão no sentido do fluxo de potência. Esta atuação evita que um curto-circuito na rede primária (média tensão) seja alimentado pela rede secundária, o que ocorreria por meio de outros alimentadores que chegam à rede de baixa tensão malhada. Fica evidente, portanto, como esta topologia aumenta a confiabilidade do sistema de distribuição, pois mesmo no caso de um curto-circuito na rede primária, o atendimento não precisa ser necessariamente interrompido, contribuindo assim para bons valores dos indicadores de qualidade do serviço, como o DEC. Em se

tratando de redes radiais, todos os consumidores conectados a jusante do protetor que atua no caso de um curto-circuito têm seu fornecimento de energia cortado.

### 1.2 Geração Distribuída

A geração distribuída pode ser abordada de duas perspectivas principais. A primeira é a reserva de energia, na qual ela tem como objetivo melhorias nos parâmetros qualitativos, como frequência e nível de tensão, geralmente sendo instalados em regiões onde os mesmos apresentam deficiência, perto de alcançarem níveis críticos. O que também é chamado de serviço ancilar. A segunda abordagem é a fonte de energia, cujo objetivo é o suprimento de cargas que são conectadas as mesmas, podendo ou não haver excedentes, que por sua vez podem ser exportados para a rede com o intuito de suprir cargas locais (CEMIG, 2012).

A atuação da ANEEL, por meio das resoluções normativas 482/2012 (ANEEL, 2012) e 687/2015 (ANEEL, 2015), foi essencial para que a potência instalada em micro e mini geração distribuída no Brasil ultrapassasse 1GW. Consta nestas resoluções que o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica por meio de fontes renováveis, e ainda que o excedente pode ser fornecido para a rede de distribuição na qual sua residência ou indústria está conectada. Segundo a ANEEL (2019), a fonte mais utilizada em micro e mini geração distribuída no Brasil é a solar fotovoltaica, tendo 82,6 mil micro e mini usinas, sendo responsável pela produção de 870MW de energia elétrica.

Conforme o nível de penetração de GD conectada no secundário aumenta, cresce a possibilidade de inversão no sentido do fluxo de potência nos transformadores de distribuição. Ou seja, os protetores de rede da topologia reticulada, programados para atuar em caso de faltas na rede primária, passariam a atuar de forma indesejada devido à reversão de potência causada pelas GDs (falso trip).

### 1.3 Objetivos

Considerando como ponto de partida o fato de que tanto curtos-circuitos na rede primária quanto conexões de GD podem provocar a reversão do fluxo de potência nos transformadores de distribuição, busca-se neste trabalho a avaliação destas situações por meio de simulações de ambos os fenômenos, sob diferentes cenários.

Especificamente, pretende-se responder à seguinte questão: Existe algum padrão na reversão de fluxo que permita a programação dos protetores de rede para eliminar (ou minimizar) os chamados falsos trip?

Com o intuito de responder à questão posta, realizaram-se diversas simulações computacionais por meio do software OpenDSS. Trata-se de uma ferramenta computacional desenvolvida para análise de sistemas de distribuição, possibilitando estudos sobre fluxo de carga trifásico instantâneo e sequencial no tempo, fluxo de potência harmônico, estudos sobre faltas, dentre outros (Dugan and McDermott, 2011).

Nas simulações de curto-circuito, foram considerados cenários de curtos monofásicos, bifásicos e trifásicos. Em relação aos testes computacionais com GD, avaliaram-se cenários com diferentes níveis de penetração de potência, cuja dispersão das unidades geradoras pelo sistema foi feita também em dois cenários: alocação uniforme e aleatória.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Rede Reticulada em Estudo (81 barras)

A rede reticulada utilizada como base para as simulações propostas neste trabalho possui 81 barras e é parte de uma rede real, localizada na região central de Curitiba – PR (Dias, 2018).

A Fig. 2 mostra configuração dos alimentadores primários deste sistema de distribuição. Os alimentadores estão conectados às barras de Média Tensão (MT), com os transformadores de distribuição (TR1 a TR12) e seus respectivos protetores de rede à jusante. Os 12 protetores (PR1 a PR12), se ligam a barras do lado de Baixa Tensão (BT) da rede. A Fig. 3 detalha as conexões do secundário reticulado.

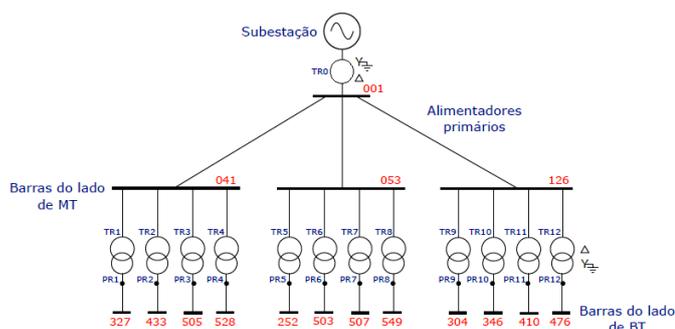


Fig. 2 Alimentadores primários da rede reticulada de 81 barras (Adaptado de Dias, 2018).

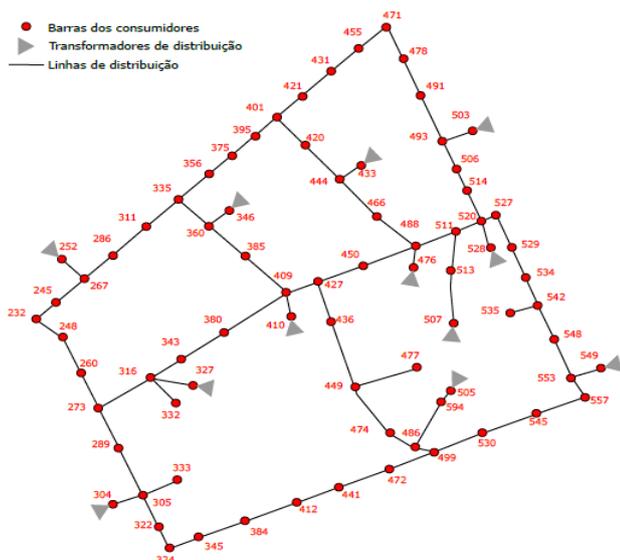


Fig. 3 Trecho de baixa tensão da rede reticulada de 81 barras (Dias, 2018).

### 2.2 Geração Distribuída no Secundário Reticulado

Para o estudo de como o fluxo reverso causado pelas GDs se comporta, é importante a realização de diversas simulações, variando os pontos onde são inseridos os geradores, bem como a quantidade de potência gerada pelos mesmos, de modo que se obtenha uma amostra abrangente dos cenários possíveis.

Neste trabalho, foram realizadas oito simulações com a presença de geração distribuída no sistema, sendo estas realizadas com duas diferentes formas na alocação dos geradores, e com quatro níveis de potência gerada distintos.

As distribuições dos geradores no sistema foram realizadas de duas formas: (i) comando *skip* do software OpenDSS, que aloca um gerador em determinada barra, salta duas e aloca novamente, seguindo a numeração especificada quando a rede é declarada; (ii) comando *random*, que insere os geradores na rede de forma aleatória. Já os níveis de potência injetada correspondem à 25%, 50%, 75% e 100% de 1000kW.

### 2.3 Curto-Circuito na Rede primária

Diferentes faltas geram diferentes impactos no sistema. Partindo-se desta premissa, foi proposta a realização de diversas simulações com curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, aplicados em três pontos do sistema. As simulações foram feitas com apenas um curto-circuito de cada vez, visto que a probabilidade de ocorrência simultânea é baixa (Souza, 2008). Em todos os testes, apenas a rede primária foi considerada para aplicação das faltas, pois o estudo tem como propósito verificar a inversão do fluxo (e sua intensidade) nos transformadores de distribuição. Evidentemente, faltas na baixa tensão não causam inversão de fluxo nestes dispositivos.

Definiu-se que a impedância de falta, em todos os testes, seria no valor de  $1\Omega$ . Esta escolha foi feita empiricamente, visando a produção de resultados significativos. Com resistências menores, a contribuição da subestação no curto-circuito faz com que ocorram poucas inversões no sentido do fluxo de potência, enquanto com resistências maiores, a falta não causa os efeitos que se deseja avaliar, pois esta passa a se comportar como uma pequena carga. A Fig. 4 apresenta os locais onde foram aplicados os curtos.

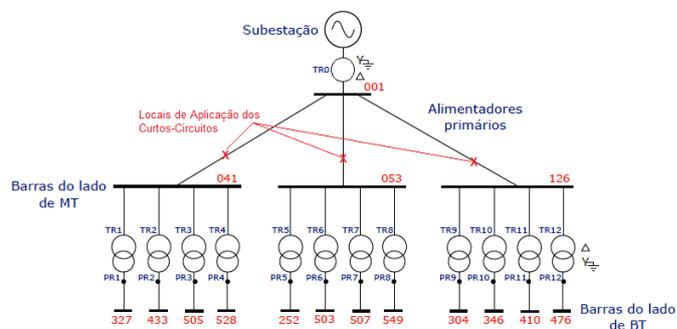


Fig. 4 Locais de aplicação dos curtos-circuitos (Adaptado de Dias, 2018).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio de simulações do sistema de 81 barras no *software* OpenDSS, os resultados são divididos em duas partes principais: (i) Aplicação de faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas em cada um dos três alimentadores da rede; e (ii) Alocação de GD em quatro níveis de penetração, com alocação uniforme (*skip*) e aleatória (*random*). Esta seção conta ainda com uma terceira subseção com análise dos resultados.

#### 3.1 Simulações com Curto-Circuito

Os resultados dispostos na Tabela 1 decorrem da falta aplicada entre a subestação e o alimentador primário que contém a barra 041. Os valores apresentados correspondem à potência de saída no segundo terminal de cada um dos transformadores de distribuição, que fazem interface entre média e baixa tensão.

**Tabela 1. Potência de saída nos transformadores de distribuição com curto-circuito entre a barra 001 e 041.**

Trafo.	Curto 1Ø P (kW)	Curto 2Ø P (kW)	Curto 3Ø P (kW)
TR1	58,0	-8,7	-75,6
TR2	77,0	-18,0	-116,1
TR3	26,9	-17,3	-62,1
TR4	31,3	-8,0	-47,5
TR5	78,8	106,2	130,6
TR6	28,9	69,8	110,1
TR7	68,8	134,4	198,1
TR8	27,2	108,1	187,6
TR9	59,7	131,6	201,9
TR10	42,6	62,6	81,0
TR11	40,6	203,5	365,2
TR12	71,0	155,2	238,1

A Tabela 2 mostra a potência de saída no segundo terminal de cada um dos transformadores de distribuição quando o curto é aplicado entre a subestação e o alimentador primário que contém a barra 053.

O sentido convencional do fluxo de potência (da rede primária para secundária) é representado por valores positivos de potência de saída no segundo terminal dos transformadores. As situações em que houveram a ocorrência de inversão no sentido do fluxo de potência, estão assinaladas em vermelho e têm seus valores negativos, representando que a potência está entrando no segundo terminal do transformador.

**Tabela 2. Potência de saída nos transformadores de distribuição com curto-circuito entre a barra 001 e 053.**

Trafo.	Curto 1Ø P (kW)	Curto 2Ø P (kW)	Curto 3Ø P (kW)
TR1	58,0	80,5	102,5
TR2	77,0	207,4	334,8
TR3	26,9	48,3	69,1
TR4	31,3	69,4	107,2
TR5	78,8	20,7	-39,8
TR6	28,9	1,5	-26,4
TR7	68,8	14,7	-40,9
TR8	27,2	-25,6	-79,6
TR9	59,7	77,7	94,1
TR10	42,6	79,4	114,6
TR11	40,6	132,8	223,9
TR12	71,0	78,8	85,2

Na Tabela 3 constam as potências de saída dos transformadores de distribuição para o caso em que a falta é aplicada no alimentador conectado à barra 126.

**Tabela 3. Potência de saída nos transformadores de distribuição com curto-circuito entre a barra 001 e 126.**

Trafo.	Curto 1Ø P (kW)	Curto 2Ø P (kW)	Curto 3Ø P (kW)
TR1	58,0	171,9	285,3
TR2	77,0	157,8	235,3
TR3	26,9	122,4	217,3
TR4	31,3	81,6	131,7
TR5	78,8	129,6	177,6
TR6	28,9	41,2	52,8
TR7	68,8	82,9	95,3
TR8	27,2	107,6	186,9
TR9	59,7	6,2	-48,7
TR10	42,6	7,3	-29,2
TR11	40,6	-48,1	-137,8
TR12	71,0	10,5	-50,9

De acordo com as conexões apresentadas na Fig. 2, nota-se que, em todos os casos apresentados, a reversão de fluxo ocorre somente nos transformadores de distribuição conectados ao alimentador primário ligado ao trecho em que é aplicada a falta. Ressalta-se que os curtos monofásicos não causam inversão no sentido do fluxo de potência, uma vez que

a região em que estes são aplicados está entre duas conexões delta de transformadores.

### 3.2 Simulações com Geração Distribuída Conectada

Os resultados das simulações envolvendo GD se dividem em duas tabelas, cada uma com quatro níveis de penetração de GD em porcentagem referente à 1000kW (100%).

A Tabela 4 mostra as potências de saída nos transformadores para o cenário hipotético de surgimento uniforme de consumidores com pontos de GD instalada. Trata-se do modo de alocação *skip* do OpenDSS. Assim como nos testes com curto-circuito, os pontos nos quais houve inversão do fluxo de potência estão destacados em vermelho.

**Tabela 4. Potência de saída nos transformadores de distribuição no modo de alocação *skip*.**

Trafo.	25% GD P (kW)	50% GD P (kW)	75% GD P (kW)	100% GD P (kW)
TR1	46,5	35,1	23,9	13,2
TR2	53,6	30,8	8,8	-12,4
TR3	17,9	8,8	0,0	-8,6
TR4	5,9	-18,3	-41,1	-62,4
TR5	33,3	-11,7	-55,8	-99,2
TR6	10,7	-6,9	-23,7	-39,8
TR7	25,4	-17,4	-59,0	-99,4
TR8	23,2	19,2	15,4	11,8
TR9	33,8	8,7	-15,5	-38,8
TR10	23,7	4,8	-13,9	-32,3
TR11	27,8	15,3	3,3	-8,4
TR12	54,8	39,0	23,5	8,5

A Tabela 5 apresenta os valores de potência para o cenário de surgimento aleatório (modo *radom*) dos pontos de conexão de GD. O objetivo da realização de simulações nestes dois modos é cobrir possíveis diferenças no padrão de reversão de fluxo.

Diferentemente do ocorrido nas situações de faltas, quando há ocorrência de fluxo reverso devido a GD, este não se limita aos transformadores de distribuição ligados a apenas um alimentador primário. Por exemplo, nos dois casos de 50% de penetração de GD há ocorrência de inversão no sentido do fluxo de potência em transformadores de distribuição ligados à dois alimentadores primários distintos, simultaneamente.

**Tabela 5. Potência de saída nos transformadores de distribuição no modo de alocação *random*.**

Trafo.	25% GD P (kW)	50% GD P (kW)	75% GD P (kW)	100% GD P (kW)
TR1	28,9	17,2	-11,5	-9,5
TR2	55,3	31,5	29,3	4,1
TR3	-0,4	-22,6	-34,4	-63,4
TR4	13,1	-24,3	-41,8	-55,1
TR5	53,9	48,1	-1,3	2,3
TR6	15,7	-19,4	-36,2	-67,0
TR7	47,2	17,0	13,6	-7,6
TR8	19,5	7,8	13,7	3,2
TR9	27,8	10,2	-41,6	-43,2
TR10	22,4	14,9	-23,1	-45,1
TR11	23,1	7,4	-3,2	-28,2
TR12	43,9	27,9	-2,5	-22,4

### 3.3 Análises dos Resultados

As simulações produziram resultados com comportamentos diferentes entre inversão de fluxo causada por faltas e excedente de GD. A diferença observada se refere a quais transformadores de distribuição sofrem inversão no sentido do fluxo de potência. Nas simulações de faltas no trecho de MT do sistema, pôde-se observar que a inversão no sentido do fluxo de potência ocorre apenas em transformadores de distribuição conectados ao alimentador primário ligado ao trecho onde há ocorrência do curto. Já nos casos em que a inversão é causada por excedente de potência gerada, os transformadores não estão ligados somente a um alimentador na maior parte dos casos, sendo a única exceção o modo *random* com 25% da potência injetada. De toda forma, neste caso apenas o TR3 apresentou inversão.

Como não foi possível a observação de um padrão nas situações em que as inversões são causadas pela GD, podemos sugerir que a ocorrência do padrão citado nas situações com curto circuito, poderia por si só definir que as inversões foram causadas por uma falta.

Desta forma, a priori, em uma rede com GD, é possível propor que se protetores de rede relacionados a diferentes alimentadores primários forem sensibilizados simultaneamente, a reversão foi causada por excedente de geração distribuída, não sendo necessária a abertura dos mesmos (evitando o chamado falso *trip*). Entretanto, se somente protetores de rede relacionados a um mesmo alimentador primário forem sensibilizados, isto significa que a reversão decorre de alguma falta, sendo necessária a abertura imediata dos mesmos.

## REFERÊNCIAS

É importante observar que, em alguns casos, não é possível a obtenção de um padrão. Como exemplo, novamente o caso de 25% de GD com distribuição no modo de alocação aleatório, e os resultados de faltas bifásicas nos trechos ligados às barras 053 e 126, em que há inversão no sentido do fluxo de potência em apenas um dos transformadores. Considerando estes casos, não é possível a identificação de um padrão, ou de uma causa, para a inversão do fluxo de potência. Ou seja, para o protetor de rede, a informação, mesmo que em tempo real, sobre todos os outros protetores, seria inconclusiva. É importante salientar também que a comunicação entre os protetores em tempo real para uma “tomada de decisão” depende de tecnologias de telecomunicações, que vem sendo desenvolvidas no âmbito das chamadas *smart grids*.

A análise anterior apresenta algumas limitações, sendo um exemplo a ocorrência simultânea de duas faltas em alimentadores primários diferentes. Entretanto, esta é uma situação com baixa probabilidade de ocorrência, visto que usualmente são resultados de eventos como descarga atmosférica e erro de manipulação de equipamentos pelos operários. Além desta, é possível que existam configurações de alocação de geração distribuída que causem a inversão no sentido do fluxo de potência em transformadores de distribuição relacionados a um único alimentador primário, sendo que para a prevenção destes casos, é necessária a realização de mais testes. Adicionalmente, não é possível a extrapolação e generalização destes resultados, uma vez que apenas o sistema teste de 81 barras foi analisado.

### 4. CONCLUSÕES

No contexto de crescimento acelerado nas instalações de geração distribuída, estudos acerca de seus impactos operativos na rede de distribuição se tornam cada vez mais relevantes. Frequentemente, os estudos realizados visam a obtenção dos potenciais benefícios proporcionados pela GD. O foco deste trabalho, no entanto, está em um desafio operativo que a GD traz à proteção da rede, impactando diretamente na confiabilidade da mesma.

Em se tratando de sistemas de distribuição reticulados, que por natureza são mais confiáveis, os protetores de rede são programados para abertura dos disjuntores em caso de inversão no sentido do fluxo. Tradicionalmente, estas inversões são causadas por faltas na rede primária em média tensão. Porém, ocorre que em cenários de alto nível de geração distribuída pode ocorrer o mesmo, acarretando em falsos *trips* nos protetores de rede. A fim de verificar possíveis padrões destas ocorrências, realizaram-se simulações no sistema reticulado de 81 barras por meio do *software* OpenDSS.

As comparações efetuadas permitiram maior entendimento sobre as diferenças entre as reversões no sentido do fluxo de potência causado por faltas e por excedente de GD. A pesar da verificação de padrões em alguns casos, outros permaneceram inconclusivos, o que aponta para demanda de estudos futuros em relação ao tema.

- ANEEL. (2012), “Resolução Normativa nº 428 de 2012 da ANEEL”.
- ANEEL. (2015), “Resolução Normativa nº 687 de 2015 da ANEEL”.
- ANEEL. (2017), “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica - Revisão 10”, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica No Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*.
- ANEEL. (2018), “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 1 – Introdução - Revisão 10”.
- ANEEL. (2019), “Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída”, available at: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdmFhRE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdmFhRE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877) (accessed 9 January 2019).
- CEMIG. (2012), *Alternativas Energéticas: Uma Visão Cemig*.
- Dias, L.R. (2018), *Análise Da Influência de Elevados Níveis de Geração Fotovoltaica Na Operação Das Redes Reticuladas de Distribuição de Energia Elétrica*, Universidade de São Paulo, São Carlos, 10 September, available at: <https://doi.org/10.11606/D.18.2018.tde-05092018-171824>.
- Dugan, R.C. and McDermott, T.E. (2011), “An open source platform for collaborating on smart grid research”, *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, pp. 1–7.
- Ghadiri, S.M.E. and Mazlumi, K. (2020), “Adaptive protection scheme for microgrids based on SOM clustering technique”, *Applied Soft Computing*, Elsevier B.V., p. 106062.
- Kagan, N., Oliveira, C.C.B. de and Robba, E.J. (2010), *Introdução Aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, 2ª Edição., Blucher.
- Razavi, S.-E., Rahimi, E., Javadi, M.S., Nezhad, A.E., Lotfi, M., Shafie-khah, M. and Catalão, J.P.S. (2019), “Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, Vol. 105 No. May 2018, pp. 157–167.
- Souza, F.A. de. (2008), “Detecção de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis”, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - SP.