

Impacto Econômico da Desconexão Massiva de Microgeradores Distribuídos em Consumidores Industriais Sensíveis a VTCDs

Weld L. Cunha, Juan C. Cebrian, Fernanda C. L. Trindade, Walmir Freitas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

Campinas, Brasil

{weld.lucas, cebrian}@ieee.org, {fernanda, walmir}@dsee.fee.unicamp.br

Resumo — Este trabalho investiga o impacto econômico de variações de tensão de curta duração associadas à desconexão de unidades microgeradoras em decorrência da incidência de faltas nos sistemas de distribuição de energia elétrica. A metodologia proposta permite estimar as perdas financeiras nos processos produtivos dos consumidores bem como auxiliar as empresas concessionárias de energia na definição de melhores práticas de operação e planejamento das suas redes em cenários com alta penetração de microgeração distribuída e com consumidores dependentes de processos sensíveis a variações de tensão. Os resultados mostram que as faltas localizadas próximas à subestação podem causar um elevado número de desconexões de microgeradores, resultando na parada de processos produtivos sensíveis em consumidores industriais.

Palavras-chave — Afundamento de tensão, microgeração distribuída, qualidade de energia elétrica, sistemas de distribuição.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, tem-se testemunhado uma inserção massiva de geradores distribuídos (GDs), principalmente porque tais geradores têm um importante papel na redução de perdas elétricas e emissões de carbono. GDs com capacidade de geração de até 10 MW têm sido conectados nos níveis de média e baixa tensão das redes de distribuição. Apesar de oferecer importantes benefícios à rede, o crescente nível de penetração de GDs pode desafiar a gestão dos sistemas de distribuição [1].

A microgeração distribuída (μ GD) é considerada como um subgrupo de GD e pode ser definida como a energia produzida para setores domésticos no local onde é consumida [2]. As tecnologias de microgeradores incluem: sistemas fotovoltaicos (PV), geradores eólicos de pequeno porte, microgeração combinada de calor e eletricidade, entre outros.

A energia excedente da microgeração pode ser disponibilizada para a rede elétrica com a adequada conversão da energia. Inversores, por exemplo, são projetados para converter a energia elétrica primária em corrente contínua (CC) para alternada (CA), em sincronismo com a rede local [3]. Usualmente, em caso de condições anormais de operação,

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e da CPFL Energia (Convênio P&D ANEEL PD-0063-3012/2014).

como afundamentos de tensão causados por faltas elétricas, os sistemas de proteção são ajustados para a rápida desconexão dos microgeradores da rede local por razões operacionais e de segurança. Em caso de baixos níveis de penetração, a imediata desconexão de μ GDs não causa riscos ao sistema de distribuição. Entretanto, com níveis elevados de penetração de μ GDs, o impacto de desconexões em massa pode piorar a resposta do sistema durante condições críticas, comprometendo a sua operação [4]. Além disso, após a desconexão das μ GDs, consumidores com processos comerciais ou industriais sensíveis podem ser afetados pelo afundamento de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), levando a altas Perdas Financeiras relacionadas à Parada de seus Processos sensíveis (PFPP) [5].

Geralmente, inversores são projetados para respeitar certos limites de tensão que, quando violados, causam a desconexão do equipamento junto à rede elétrica [1], [6]. Entretanto, o tempo de desconexão para o caso de afundamentos de tensão no ponto de conexão com a rede elétrica – chamado neste trabalho como “Tempo de Desconexão por Afundamento de Tensão” (TDAT) – não é fornecido aos usuários finais pelos fabricantes. Esta falta de informação pode induzir à escolha inadequada de inversores, os quais podem ser desnecessariamente desconectados da rede de baixa tensão durante faltas momentâneas.

Este trabalho investiga o impacto econômico das desconexões de microgeradores devido a afundamentos de tensão causados por faltas elétricas nas redes de distribuição, um caso particular de variações de tensão de curta duração (VTCDs). A estimativa da PFPP durante massivas desconexões de microgeradores devido a afundamentos de tensão de curta duração também é introduzida neste artigo. A metodologia utilizada correlaciona valores de TDAT para dois tipos de inversores junto com o tempo de atuação dos dispositivos de proteção. Essa correlação permite uma melhor representação do comportamento do sistema durante condições de falta elétrica.

II. CONCEITOS BÁSICOS

Distúrbios de tensão em sistemas de distribuição podem causar falhas ou operações inadequadas de processos industriais modernos de consumidores, o que representa enormes perdas financeiras. Esta questão foi abordada de

forma abrangente pelo grupo de trabalho CIGRE/CIRED/UIE [5], que introduziu o termo “Tempo de Imunidade do Processo – TIP” (ou, em inglês, *Process Immunity Time – PIT*). TIP é definido como o intervalo de tempo entre o instante de início do desvio (T_{UP}) de um parâmetro do processo (P_p) do seu valor nominal (P_{nom}) e o instante (T_{UP}^P) em que o parâmetro do processo viola seu limite permissível (P_{limit}), conforme ilustrado na Fig. 1. Após T_{UP}^P , P_p (que representa a pressão do óleo ou o tempo de reação química, por exemplo) não pode suportar a perturbação e o processo deve ser interrompido, resultando em perdas financeiras.

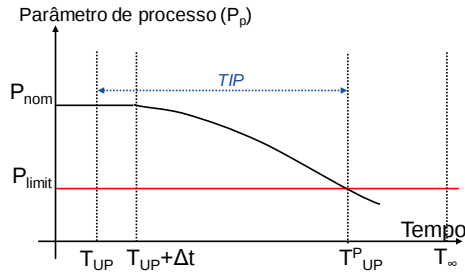


Fig. 1. Definição de Tempo de Imunidade do Processo (TIP), adaptado de [5].

A. Efeito da Alta Penetração de Microgeração na Parada de Processos Sensíveis

Problemas relacionados a altos níveis de penetração de μ GDs têm sido reportados em termos de fluxo reverso de potência, coordenação da proteção, entre outros. Contudo, a Fig. 2 ilustra como a elevada penetração de μ GDs pode evitar o afundamento severo da tensão durante a ocorrência de faltas. Nessa figura, a zona de parada de processos representa a região de vulnerabilidade para um determinado processo industrial. Nessa região, o processo industrial é interrompido devido à magnitude da tensão residual (V_{sag}) e duração (SgD) desse afundamento. Na figura, V_{nom} representa a tensão pré-falta; $V_{sag(1)}$ representa a magnitude da tensão devido à ocorrência de uma falta em um sistema com alta penetração de μ GD; $V_{sag(2)}$ representa a magnitude da tensão (para a mesma barra) sem a presença de μ GDs; e T_1 representa o instante de atuação do dispositivo de proteção para isolar a falta permanente. Em termos de parada do processo do consumidor, $V_{sag(1)}$ não atinge a região de vulnerabilidade do processo e este, portanto, não é interrompido devido a esse distúrbio.

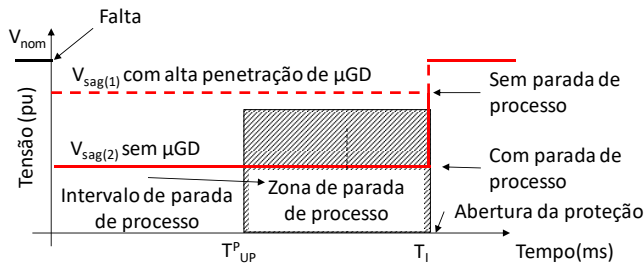


Fig. 2. Impacto da microgeração no afundamento de tensão durante uma falta.

III. AVALIAÇÃO DA INTERRUPÇÃO ANUAL DE PROCESSOS DEVIDO A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Uma formulação genérica para estimar a probabilidade de interrupção do processo devido a afundamentos de tensão ($P_{PTU-sag}$) é introduzida em [7], que correlaciona a incerteza de interrupção (Un_{PT}), a probabilidade acumulada de SgD (P_{SgD}), TIP , e V_{sag} , por um intervalo de tempo $[T_a, T_b]$ como dado em (1).

$$P_{PTU-sag}(T_a, T_b, TIP, V_{sag}) = \int_{T_a}^{T_b} [Un_{PT}(t - TIP, V_{sag}) * P_{SgD}(t)] * dt \quad (1)$$

Valores de Un_{PT} são apresentados em [7] e os valores usados para P_{SgD} são mostrados na Tabela I. Estes valores são adaptados de [8] e [9].

TABELA I. FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE ACUMULADA (FDPA) PARA DURAÇÃO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO (PARA UM SISTEMA DE 60 Hz), ADAPTADO DE [8] e [9].

Tempo (ms)	$P_{SgD}(T)$	Tempo (ms)	$P_{SgD}(T)$
0,00	0,00	200	0,84
8,33	0,02	300	0,87
50	0,12	400	0,90
70	0,31	500	0,91
90	0,52	600	0,92
100	0,64	T_{∞}	1,00

O valor de $P_{PTU-sag}$ é obtido usando (1) para uma falta elétrica. Entretanto, para estimar o desempenho anual de cada consumidor no sistema de distribuição, um elevado número de faltas elétricas em diversos pontos da rede deve ser simulado e agregado para obter os valores acumulados de paradas de processos devido a afundamentos de tensão ($CP_{PTU-sag}$). O valor agregado $CP_{PTU-sag}$ para cada consumidor j é obtido através de (2).

$$CP_{PTU-sag(j)} = \sum_{a=1}^{N_g} P_{PTU}(0, T_{I(a)}, TIP_{(j)}, V_{sag(a,j)}) \quad (2)$$

Em que o índice a representa uma falta simulada na rede; N_{sc} é o número total de faltas simuladas, e j representa um consumidor.

Para estimar o valor anualizado com relação aos diferentes fenômenos considerados, as eq. (3)-(4) são utilizadas.

$$N_{anos} = N_{prot} / (\lambda_{DF} \times d_{DF}) \quad (3)$$

$$N_{PTU-sag-ano(j)} = (CP_{PTU-sag(j)} / N_{anos}) * F_{CA(j)} \quad (4)$$

onde N_{prot} é o número de simulações nas quais dispositivos de proteção são “acionados”; λ_{DF} é a taxa anual de ocorrência de faltas por km em um alimentador; d_{DF} é o comprimento do alimentador em km (soma do ramo principal e dos ramais); N_{anos} é o número de anos considerados durante o processo anual; e $N_{PTU-sag-ano(j)}$ é o número de paradas de processo por ano devido a afundamento de tensão para um consumidor j . Os valores de $F_{CA(j)}$ são adotados de [10] dependendo do tipo de

consumidor j : industrial = 0,2384; residencial = 1,0; comercial = 0,3573; e grande consumidor = 0,05.

A formulação introduzida em [11] é aplicada neste trabalho para avaliar $PFPP_{sag-ano(j)}$ para cada consumidor j e $PFPP_{total-ano}$ para todo o sistema de distribuição, ambos são calculados por (5) e (6).

$$PFPP_{sag-ano(j)} = f(P_{PRS}, CIP(j), N_{PTU-sag-ano(j)}) \quad (5)$$

$$PFPP_{Total-ano} = \sum_{j=1}^{N_c} PFPP_{sag-ano(j)} \quad (6)$$

Em que P_{PRS} representa a probabilidade de restauração do processo e CIP representa o custo de interrupção do processo de cada consumidor por tipo de consumidor. Ambos os valores são introduzidos em [7].

IV. DESCONEXÃO DE MICROGERADORES DEVIDO A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Tecnologias de microgeração (como PVs, células a combustível, geradores eólicos de pequeno porte, etc.) precisam operar respeitando limites de tensão e frequência específicos. A conexão entre um microgerador e o PAC é feita por uma interface eletrônica de potência que permite converter a energia de CC para CA e vice-versa. Em caso de uma falta, que induz uma condição anormal de operação, a proteção do μ GD deve operar para garantir a imediata desconexão do μ GD da rede local. Entretanto, em altos níveis de penetração de microgeradores, esta desconexão imediata pode induzir severos problemas na rede.

Considerando que o PD (do inglês: *protection device*) seja um dispositivo de proteção “acionado” para isolar a falta, o termo “desconexão de microgeradores” é utilizado neste artigo para se referir às unidades de microgeração – localizadas a montante do PD – que são desconectadas da rede devido a afundamentos de tensão no barramento de conexão durante uma falta elétrica. O impacto de desconexões de μ GD em larga escala é apresentado a seguir.

B. Tempo de desconexão por afundamento de tensão

Neste trabalho, o termo “Tempo de desconexão por afundamento de tensão” é utilizado para representar o tempo necessário para o subsistema “microgerador-inversor” se desconectar da rede de baixa tensão quando a tensão no PAC atinge valores abaixo da tensão mínima requerida. Normalmente, os fabricantes disponibilizam os intervalos mínimo e máximo de tensão para a operação normal de seus sistemas. Contudo, valores de TDAT são raramente disponibilizados. Os valores de tempo de desconexão por afundamento de tensão podem ser obtidos a partir de testes de laboratório, submetendo cada subsistema “microgerador-inversor” a diferentes níveis de afundamento de tensão e medindo o instante em que os subsistemas se desconectam automaticamente da rede.

A Fig. 3 mostra as curvas de TDAT de dois sistemas “microgerador-inversor” (ou simplesmente microinversor) representativos. A partir desta figura, observa-se que se a tensão no barramento de conexão atinge um valor de 0,8 pu, o TDAT é de 180 ms para o microinversor do tipo 1. Entretanto,

para esse mesmo nível de tensão, o microinversor tipo 2 não é desconectado. Por outro lado, em caso de um nível de tensão de 0,3 pu, os valores de TDAT para os tipos 1 e 2 são 120 ms e 60 ms, respectivamente. Em outras palavras, comparando ambos os sistemas, se um distúrbio causa afundamentos de tensão entre 0,4 e 0,8 pu, apenas o microinversor do tipo 1 é desconectado, ou seja, o sistema do tipo 2 ainda permanecerá conectado à rede elétrica até a extinção do distúrbio. Porém, em caso de afundamentos de tensão mais severos (com tensões menores que 0,4 pu), ambos são desligados, sendo que o microinversor tipo 2 é desconectado mais rapidamente que o do tipo 1.

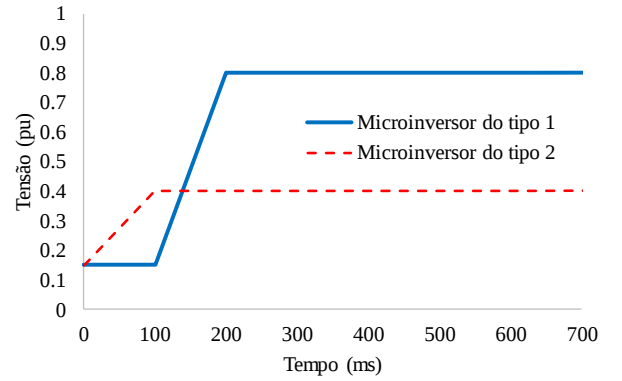


Fig. 3. Tempo de desconexão de μ GD vs. magnitude da tensão.

C. Impacto de desconexões de microgeradores devido a afundamentos de tensão em consumidores sensíveis

Uma rede de distribuição ilustrativa é mostrada na Fig. 4 para mostrar o processo de desconexão de microgeradores durante uma falta elétrica. Há dois dispositivos de proteção: um disjuntor (CB, do inglês: *circuit breaker*) na subestação e um fusível (FU) localizado a montante da barra B3. Se a rede for submetida a uma falta em B3, FU é acionado para isolar a falta em $T_1 = 150$ ms. Além disso, a figura mostra dois microgeradores μ GD₁ e μ GD₂ instalados em baixa tensão em diferentes barramentos localizados a montante de B3. Neste exemplo, a curva de TDAT do microinversor tipo 1 (ver Fig. 3) é utilizada para ambos os microgeradores. Desde o instante do início da falta até $T_1 = 150$ ms, algumas μ GDs podem ser desconectados devido a afundamentos de tensão em seus respectivos pontos de acoplamento comum.

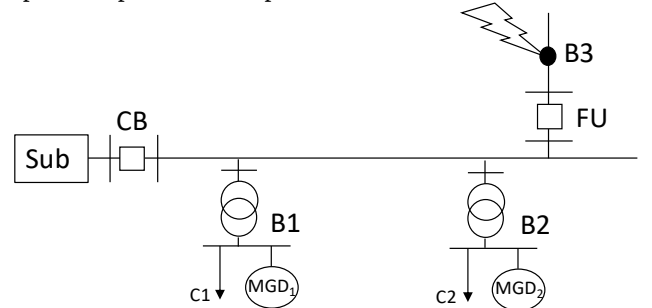


Fig. 4. Sistema de distribuição com dois μ GDs sendo afetado por uma falta permanente na barra B3.

A Fig. 5 mostra o comportamento da tensão para a barra B2 desde o instante do início da falta até T_1 . No tempo zero, $V_{B2} = 0,3$ pu, que representa um TDAT de 120 ms. Neste caso, a desconexão de μGD_2 é não intencional e desnecessária porque este está localizado a montante de FU. A consequência da desconexão de μGD_2 pode ser observada na Fig. 5. Após 120 ms, a magnitude de tensão em B2 cai para $V_{B2} = 0,1$ pu e este valor é mantido até 150 ms, quando o fusível atua. No caso de B1 (conforme mostrado na Fig. 6), após 120 ms, existe um afundamento de tensão de $V_{B1} = 0,7$ pu para $V_{B1} = 0,6$ pu. Embora, μGD_1 não foi sensibilizado pelo primeiro afundamento de tensão em tempo zero, μGD_1 é sensibilizado pelo segundo afundamento em 120 ms. Para o nível de tensão de 0,6 pu, o tempo necessário para a desconexão de μGD_1 é de 180 ms, ou seja, a desconexão acontece em $t = 300$ ms. Contudo, como o fusível é acionado em 150 ms, μGD_1 certamente não será desligado.

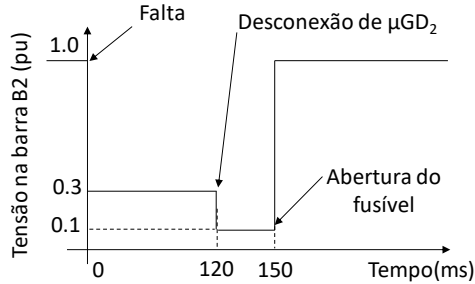


Fig. 5. Magnitude da tensão vs. tempo em B2 (veja Fig. 4).

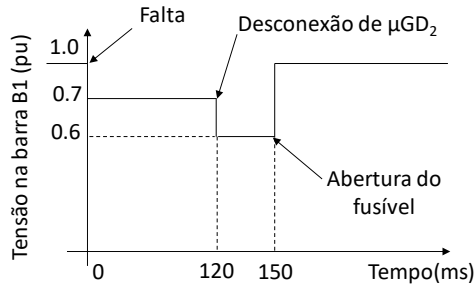


Fig. 6. Magnitude da tensão vs. tempo em B1 (veja Fig. 4).

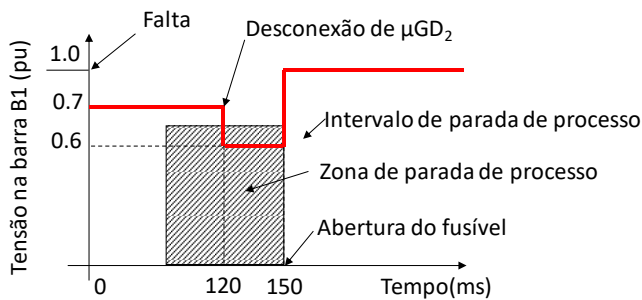


Fig. 7. Zona de vulnerabilidade de um processo industrial sendo afetado pelo afundamento de tensão no PAC do consumidor C1 (ver Fig. 4).

A desconexão não intencional e desnecessária de μGD s devido a afundamentos de tensão durante faltas pode causar paradas de processos em consumidores sensíveis. Este efeito pode ser relevante em caso de altos níveis de penetração de microgeradores. A Fig. 7 mostra esse impacto para um

consumidor sensível C1 (ver Fig. 4). O afundamento de tensão em B1 (ver Fig. 6), causa uma parada do processo de C1 em 120 ms, quando a magnitude de tensão ($V_{B1} = 0,6$ pu) intercepta a zona de vulnerabilidade do processo. Em outras palavras, C1 é afetado pela desconexão não intencional e desnecessária de μGD_2 , que também pode representar um conjunto de microgeradores.

D. Probabilidade de interrupção de processos considerando desconexões de microgeradores

Para estimar a probabilidade de parada do processo considerando as múltiplas desconexões de unidades microgeradoras durante uma falta elétrica, (1) é modificada para incluir os diferentes intervalos de tempo durante a desconexão de cada microgerador. A Fig. 8 mostra n desconexões de μGD s antes que o fusível seja acionado para isolar a falta. Em (7) mostra-se a probabilidade de parada do processo para um consumidor j .

$$P_{PTU(j)} = P_{PTU}(T_1, T_2, TIP, V_{sag(1)}) + P_{PTU}(T_2, T_3, TIP, V_{sag(2)}) + \dots + P_{PTU}(T_n, T_1, TIP, V_{sag(n)}) \quad (7)$$

Para estimar a PFPP anual para múltiplas desconexões de μGD s, (2) a (6) podem ser aplicadas.

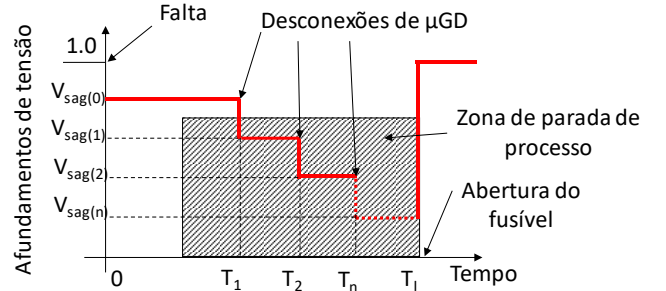


Fig. 8. Zona de vulnerabilidade de um processo industrial sendo afetado por afundamentos de tensão devido a n desconexões sucessivas de μGD s.

V. APLICAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO REAIS

O estudo proposto é aplicado em um sistema real de distribuição de 25 kV, mostrado na Fig. 9, formado por um alimentador de distribuição de 7 km, 239 barras, 238 linhas, 38 consumidores (25 residenciais, 8 comerciais, 4 industriais e 1 grande consumidor); um disjuntor (na barra principal na subestação) e 5 fusíveis instalados em diferentes ramos. A taxa de ocorrência de faltas é de 0,3 faltas/km/ano. Para todos os testes, assume-se que a proteção primária está perfeitamente ajustada.

A fim de estimar as PFPPs, um tipo de processo é atribuído a cada consumidor seguindo o critério introduzido por [7]. Em relação aos valores de TIP, existem 19 consumidores com $TIP = 0$ s; 9 com $10 \text{ s} < TIP < 100 \text{ s}$; 5 com $100 \text{ s} < TIP < 250 \text{ s}$; e 5 com $TIP > 250 \text{ s}$.

A plataforma SINAP R&D [12] é utilizada para simular 10 mil faltas elétricas seguindo o método de Monte Carlo. Os parâmetros utilizados na simulação dos curtos-circuitos são: máxima impedância de falta (Z_{f-max}) e probabilidade do tipo de falta (P_{TF}). No caso da impedância de falta, é atribuída uma

densidade de probabilidade uniforme entre 0 e Z_{f-max} . Os valores utilizados para estes parâmetros são mostrados na Tabela II.

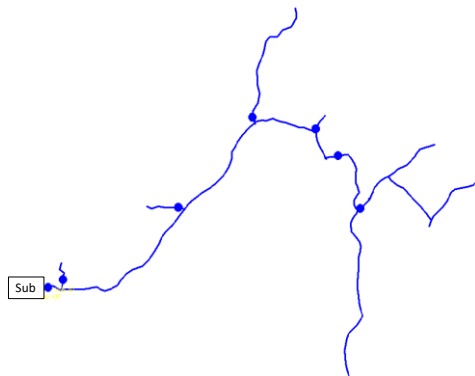


Fig. 9 Rede de distribuição real de 25 kV utilizada nas simulações.

TABELA II. PERDAS FINANCEIRAS POR ANO DEVIDO A AFUNDAMENTO DE TENSÃO.

Tipo de curto-circuito	Z_{f-max} (Ω)	P_{TF} (%)
Trifásico	10	5
Bifásico	10	15
Bifásico-terra	10	10
Fase-terra	30	70

A. Avaliação de desconexões de microgeradores devido a afundamentos de tensão

A Fig. 10 mostra o percentual de eventos simulados que resultam em desconexões não intencionais de μ GDs, ou seja, μ GDs localizadas a montante do equipamento de proteção. Neste caso, 32% dos eventos simulados podem causar desconexões não intencionais de unidades microgeradoras.

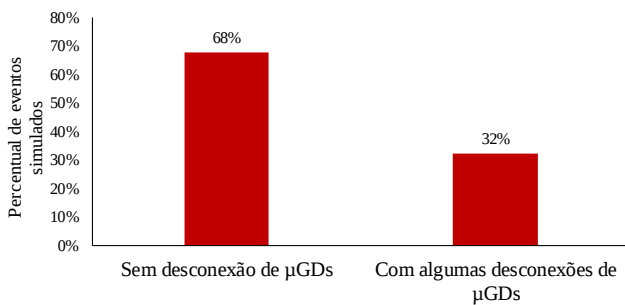


Fig. 10. Percentual de eventos simulados que podem causar a desconexão de μ GDs localizadas a montante do equipamento de proteção.

Em termos de eventos (faltas elétricas) por ano que podem causar desconexões não intencionais de μ GDs, a Fig. 11 mostra que aproximadamente 8 eventos/ano podem causar a desconexão de 50% e 70% do total de μ GDs.

A Fig. 12 mostra a influência da posição da falta elétrica no percentual de desconexões de μ GDs. A partir desta figura, observa-se que as faltas localizadas a menos de 2 km causam aproximadamente 61% das desconexões de μ GDs. Isto acontece, principalmente porque faltas próximas à subestação causam severos afundamentos de tensão no ponto de acoplamento comum dos microgeradores, o que os leva à imediata desconexão.

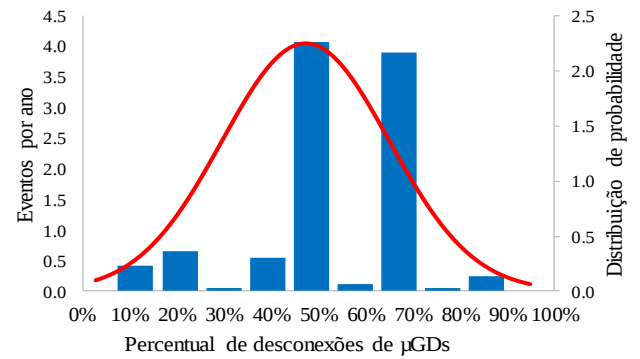


Fig. 11. Eventos por ano vs. percentual de desconexões de μ GDs localizadas a montante do equipamento de proteção com relação ao total de μ GDs. Média de 47% e desvio padrão de 18%.

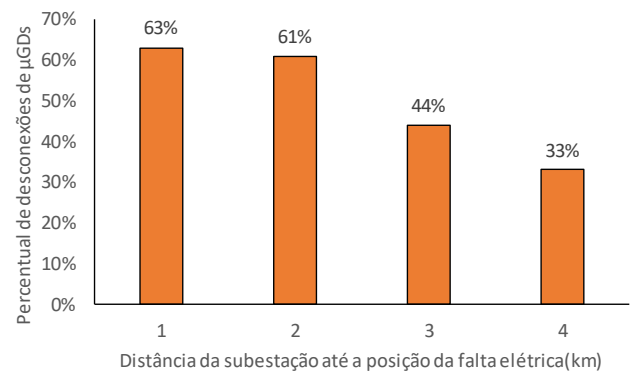


Fig. 12. Percentual de desconexões de microgeradores vs. distância do ponto de falta até a subestação.

B. Impacto econômico das μ GDs nas perdas financeiras dos consumidores sensíveis

A Tabela III mostra uma comparação entre a PFPP por ano devido a afundamentos de tensão sem μ GD no sistema de distribuição e com 30% de penetração de microgeração. A seleção dos consumidores com μ GD foi realizada de forma aleatória. A partir da Tabela III, observa-se que este nível de penetração leva a uma redução de aproximadamente 33% em termos de PFPP por ano; principalmente porque os microgeradores evitam afundamentos severos de tensão durante faltas elétricas. Os valores das Tabelas III e IV são dados em Reais, considerando a cotação da Libra Esterlina (£) igual a R\$ 3,82 (em 13/03/2017).

TABELA III. PERDAS FINANCEIRAS POR ANO DEVIDO A AFUNDAMENTO DE TENSÃO.

Cenário	Perdas financeiras anuais provocados por afundamento de tensão (R\$/ano)
Sem μ GD	349.961,66
30 % nível de penetração de microgeradores	233.524,24
Redução (%)	33,33 %

A Tabela IV mostra, para 6 consumidores, o impacto da inserção de 30% de μ GD na rede de distribuição em relação às

perdas financeiras devido a paradas de processos. Dentre eles, o consumidor C267 teve a maior redução monetária nas suas perdas anuais (R\$ 139.202,8) com a inserção de μ GD. Isto acontece principalmente porque ele é um grande consumidor e porque a inserção de μ GD ajuda na redução do número de afundamentos que podem afetar os seus processos sensíveis. Contudo, os consumidores C270, C278 e C248 foram prejudicados pela inserção de μ GD. Para estes consumidores as PFPPs aumentaram, sendo o consumidor C270 o mais prejudicado. Isto se deve à desconexão não intencional de μ GDs durante as faltas elétricas, causando afundamentos de tensão que podem afetar os equipamentos/processos destes consumidores. Embora os valores relacionados aos aumentos das perdas sejam muito menores em relação ao ganho obtido pelo consumidor C267, estes podem crescer com o aumento no nível de inserção de μ GDs, já que a desconexão inadequada poderia afetar cada vez mais consumidores sensíveis.

TABELA IV. COMPARATIVO DAS PERDAS FINANCEIRAS PARA ALGUNS CONSUMIDORES COM A PENETRAÇÃO DE 30% DE μ GD.

Cliente	TIP (s)	Tipo	Distância até a subestação (km)	PFPP em R\$ por ano		Dif. em R\$ por ano
				Sem μ GD	Com 30% de μ GD	
C267	0	Gra	2,2	286.530,60	147.327,80	139.202,80
C120	0	Ind	3,0	36.992,88	31.238,72	5.754,16
C193	0	Com	3,3	2.280,54	1.580,96	699,58
C270	0	Res	2,4	45,46	114,47	-69,01
C278	345	Res	2,7	3,82	49,86	-46,04
C248	223	Res	2,4	0,00	39,03	-39,03

Res: residencial; Com: comercial; Ind: industrial e Gra: grande consumidor.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho investiga o efeito de inserção de microgeração em sistemas de distribuição em termos de perdas financeiras anuais devido a paradas de processos comerciais/industriais sensíveis. Simulações em um sistema de distribuição real de 25 kV mostram que afundamentos de tensão severos podem ser evitados com o aumento do nível de penetração de microgeradores conectados ao sistema de distribuição.

Por outro lado, à medida que os sistemas de distribuição se tornam mais dependentes de microgeradores, desconexões indevidas – causadas entre outras razões, por uma escolha inadequada do sistema microgerador-inversor por parte dos usuários – podem induzir afundamentos de tensão mais severos durante o processo de desconexão, o que consequentemente, levaria a afetar consumidores sensíveis e provocar paradas nos seus processos produtivos.

Além disso, verifica-se que a posição da falta impacta diretamente no número de microgeradores desconectados, principalmente por causa da inadequada correlação entre o tempo de atuação da proteção e o TDAT. Com a finalidade de reduzir as desconexões dos microgeradores, fabricantes de inversores/conversores poderiam disponibilizar o tempo de desconexão por afundamento de tensão aos usuários finais, assim estes podem selecionar o equipamento apropriado a ser conectado à rede local. Além do mais, companhias elétricas podem adaptar a seletividade e coordenação de seus

dispositivos de proteção em cenários com alta penetração de microgeração.

O presente trabalho está em fase inicial, outros níveis de penetração serão estudados em trabalhos posteriores para definir com mais precisão os impactos econômicos da microgeração em redes de distribuição.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] X. Liang and J. Hofman, "Trip curves and ride-through evaluation for power electronic devices in power system dynamic studies," in *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 52, no. 2, pp. 1290-1296, March-April 2016.
- [2] I. Staffell, D. J. L. Brett, N. P. Brandon, A. D. Hawkes. "Domestic microgeneration: renewable and distributed energy technologies, policies and economics", Routledge, London, 2015.
- [3] L. H. M. Leite, W. Boaventura, L. de Errico, E. N. Cardoso, R. Dutra and B. M. Lopes, "Fault ride through capability and voltage support in distribution grid with photovoltaic distributed generation," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, Montevideo, pp. 130-135, 2015.
- [4] R. Brundlinger et al., "Lab tests: verifying that smart grid power converters are truly smart," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 30-42, March-April 2015.
- [5] CIGRE/CIREU/UIE Joint Working Group C4.110, Voltage dip immunity of equipment and installations, CIGRE Technical Brochure 412, 2010.
- [6] J. Roldán-Pérez, A. García-Cerrada, J. L. Zamora-Macho and M. Ochoa-Giménez, "Helping all generations of photovoltaic inverters ride-through voltage sags," in *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 10, pp. 2555-2563, 2014.
- [7] J. C. Cebrian, N. Kagan and J. V. Milanovic, "Probabilistic Estimation of Distribution Network Performance with Respect to Voltage Sags and Interruptions Considering Network Protection Setting: Part II – Economic Assessment," *IEEE Trans. on Power Del.* In Press.
- [8] M. Wamundson. "Calculating voltage dips in power systems using probability distributions of dip durations and implementation of the Moving Fault Node method". Master's thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007
- [9] IEEE Std. 493-1990, IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.
- [10] J. V. Milanovic, C. P. Gupta. "Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sag: Part II: The implementation". *IEEE Trans Power Del.* vol. 21, no. 2, pp. 925-932, Apr. 2006.
- [11] J. C. Cebrian, J. V. Milanovic, N. Kagan, "Probabilistic Assessment of Financial Losses in Distribution Network Due to Fault-Induced Process Interruptions Considering Process Immunity Time". *IEEE Trans Power Del.* vol. 30, no. 3, pp. 1478-1486, June 2015.
- [12] Platform SINAP R&D – Ver4.0. <http://www.sinapisenergia.com/>.