

ANÁLISE DA PERFORMANCE DE INVERSORES SOLARES SUBMETIDOS A SURTOS ELÉTRICOS PROVOCADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Gustavo O. Cavalcanti¹, Marcílio A. F. Feitosa¹, Luis A. G. Malagón¹, Lucas C. Sobral¹, Fernanda S. Silva¹, Lucas V. Barbalho¹, Douglas T. M. Lara², Samuel F. Pinto², Thiago F. Gomes², Renato J. Teixeira², Wagner A. Barbosa²,

¹Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco, Recife – PE, Brasil

²CLAMPER Indústria e Comércio S.A., Lagoa Santa – MG, Brasil

e-mail: suporte@clamper.com.br

Resumo – Este estudo apresenta uma análise experimental do impacto do uso de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) no prolongamento da vida útil dos inversores utilizados em sistemas residenciais de geração de energia solar. Dois modelos de inversores fotovoltaicos com potência nominal de 3kW, de diferentes fabricantes, denominados como “A” e “B”, foram submetidos a sucessivos pulsos elétricos para determinar o número de pulsos que cada modelo suporta com e sem a proteção de DPS externo. Os inversores foram submetidos a um número máximo de 100 pulsos elétricos que não ultrapassaram 4kA de corrente. Os pulsos foram aplicados em modo diferencial na entrada de corrente contínua (CC) e em modo comum na saída de corrente alternada (CA) dos inversores. Os resultados indicam que, na saída CA, os modelos “A” e “B” suportaram em média 5 e 7,7 pulsos, respectivamente. Por outro lado, na entrada CC os dispositivos falharam em média com 1 e 6 surtos nos Modelos “A” e “B”, respectivamente. Quando foi utilizado um DPS externo, ambos os modelos suportaram os 100 pulsos tanto do lado CC quanto do lado CA. Uma análise das correntes circulantes mostrou que o DPS externo desviou pelo menos 93,6% da energia do pulso que atingiria o inversor. Isso destaca a importância fundamental da utilização de DPS externo na proteção de inversores, conforme evidenciado pelo aumento da quantidade de pulsos suportados quando utilizada uma proteção contra surtos.

Palavras-Chave – Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS), Inversores Fotovoltaicos, Geração de Energia Solar, Vida Útil de Inversores, Surtos Elétricos, Descargas Atmosféricas.

1. Introdução

Em 2023 mais de 209 milhões de raios foram contabilizados por todo o território brasileiro [1]. No mesmo período, conforme relatado no segundo Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 (ano base 2022), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, para o Ministério de Minas e Energia – MME, a geração elétrica por fonte solar teve um aumento de 79,8%, tornando-se a segunda maior fonte de geração do Brasil e ultrapassando a energia eólica [2]. Esses dois fatos estão relacionados visto que os inversores, responsáveis pela conversão da tensão contínua (CC), gerada pelos módulos fotovoltaicos, em tensão alternada (CA) utilizada na rede elétrica, são pontos sensíveis e sujeitos a falhas induzidas pela sobretensão provocada pelas descargas atmosféricas.

Os danos provocados num sistema de geração fotovoltaica pela incidência de um raio dependem de diversos parâmetros que, em conjunto, permitem determinar o nível da sobretensão induzida [3]. Entre eles destacam-se: a intensidade e forma de onda da corrente da descarga; o ponto de incidência; a geometria da instalação e o sistema de proteção adotado. Os dois primeiros não são controláveis, mas diversos trabalhos tratam da otimização da geometria dos circuitos (comprimento dos cabos, distância entre condutores, plano de terra etc.) para minimizar os efeitos das sobretensões [4-5] ou analisam, através de simulações, a eficiência de sistemas de proteção contra raios (LPS do inglês *Lightning Protection System*) e propõem soluções para o projeto desses [6-8].

Raizer e colaboradores [9], realizaram uma análise, por simulações, das sobretensões máximas de origem atmosférica nas redes de distribuição de Baixa Tensão (BT). Entre os

parâmetros de entrada para as simulações foram considerados: a distância do ponto de impacto das descargas (na rede de Média Tensão (MT) e na rede de baixa tensão (BT)); a presença ou não de aterramentos na rede MT; diferentes valores de corrente de pico (de 10 a 200 kA) e diferentes valores de resistividade do solo (de 100 a 1000 $\Omega.m$). Observou-se que, a probabilidade de ocorrer sobretensões acima de 10 kV, nas unidades consumidoras, provenientes de descargas que ocorram na rede MT ou na própria rede BT é pequena [9]. No entanto, em regiões com elevadas densidades de incidências de raios e solos de alta resistividade, podem ocorrer sobretensões significativas na rede BT, atingindo um número elevado de consumidores e danificando diversos equipamentos [9].

Se tomarmos como exemplo o estado do Amazonas, que apresenta uma densidade de descargas em torno de 19 descargas/km²/ano, existe a possibilidade de ocorrer sobretensões superiores a 6 kV em 25 transformadores a cada grupo de 1000 transformadores no lado de baixa tensão. O valor de 6 kV foi analisado por ser o mínimo de tensão de impulso que deve ser suportado por quadros de distribuição do lado CA, de acordo com a norma ABNT NBR 5419 [10]. Por isso, a norma ABNT NBR IEC 61643-32 recomenda e fornece a metodologia para a proteção de sistemas fotovoltaicos contra sobretensões utilizando dispositivos de proteção contra surtos [11].

Os fabricantes de inversores de frequência alegam que seus produtos possuem proteção interna suficiente, tanto no lado CA como no CC, mas ensaios experimentais indicam que essa proteção pode não ser suficiente quando o nível de estresse é elevado [12]. Por razões diversas, entre elas o elevado custo, pesquisas experimentais sobre a suportabilidade a surtos dos inversores não são comuns, pois envolve a realização de

ensaios destrutivos em inversores de elevado custo. Em um trabalho experimental, desenvolvido em 2022 na África do Sul, o lado CC de microinversores foi analisado através da injeção de pulsos de corrente em dois pontos da estrutura do sistema fotovoltaico (no para-raios e no quadro do painel solar) [13]. Os resultados mostraram que as tensões induzidas pelas descargas atmosféricas podem causar danos significativos aos microinversores em instalações fotovoltaicas. As tensões induzidas em modo comum foram maiores do que as tensões induzidas em modo diferencial, mas os autores sugerem que a proteção contra surtos deve ser implementada em ambos os modos para minimizar os riscos de danos causados pelas descargas. O objetivo do presente trabalho é analisar, de forma experimental, a suportabilidade a pulsos de alta tensão, provocados por descargas atmosféricas e os benefícios causados pela adoção de dispositivos de proteção contra surtos, que aumentam a vida útil dos inversores fotovoltaicos.

2. Montagem Experimental

Os inversores utilizados nos sistemas de geração fotovoltaica convertem o sinal contínuo (CC) dos painéis solares em um sinal senoidal (CA) de frequência bem definida. Esses equipamentos possuem, pelo menos, uma entrada CC, que recebe a energia oriunda dos painéis e uma saída CA que é conectada à rede elétrica local do usuário. Esses inversores estão sujeitos a surtos elétricos nas portas CA e CC [14], devido às descargas atmosféricas que podem ocorrer na rede elétrica local ou próximo às instalações fotovoltaicas. Por isso, foi desenvolvido o aparato experimental da Figura 1, que permite aplicar pulsos elétricos controlados em ambas as portas do inversor sob teste, com o equipamento em operação.

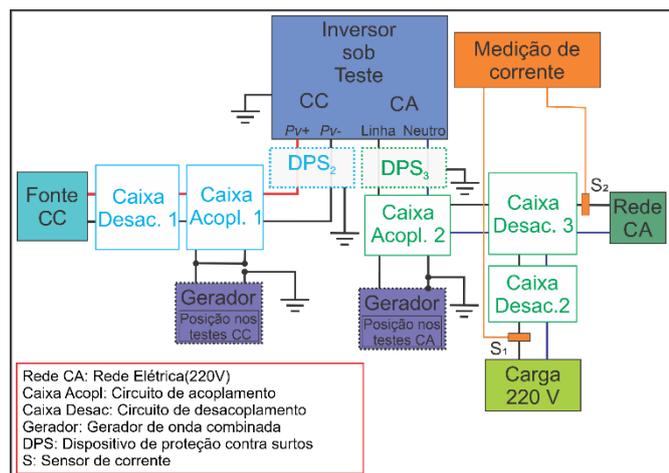


Figura 1 Configuração experimental de testes.

No lugar de painéis solares, que possuem uma geração de potência irregular, devido à inconstância na radiação solar, foi utilizada uma fonte CC, como ilustrado na Figura 1. A potência da fonte CC alimenta a entrada do inversor que fornece uma saída CA de 220 V sincronizada com a rede elétrica local e alimenta uma carga resistiva de 1kW (Carga de 220 V), conforme ilustrado na Figura 1. Os circuitos de acoplamento 1 e 2, apresentados na Figura 1, permitem inserir os pulsos de alta tensão em paralelo com o sinal CC da fonte e a rede elétrica

de 220 V, respectivamente. Assim, nos ensaios do lado CC o gerador de pulsos é posicionado na caixa de acoplamento 1 e os pulsos são injetados no inversor em paralelo com o sinal da fonte CC. Já nos testes do lado CA o gerador é posicionado na caixa de acoplamento 2 e os pulsos entram em paralelo com o sinal senoidal da rede elétrica local que possui frequência 60 Hz.

Os circuitos de desacoplamento 1, 2 e 3, apresentados na Figura 1, impedem a passagem do surto elétrico para a fonte CC, a carga de 1 kW e a rede elétrica local, respectivamente. Os equipamentos utilizados nos ensaios eram originais e as instalações atendiam à norma NBR 5410 [15]. As marcas e os modelos dos inversores escolhidos não são apresentados, pois não são o foco desta pesquisa. Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaios de Descargas Atmosféricas - LEDA/UPE, localizado no Instituto de Inovação Tecnológica da Universidade de Pernambuco IIT/UPE.

Os ensaios foram realizados com e sem os DPS 2 e 3 apresentados na Figura 1 para posterior comparação dos resultados. Os DPS para corrente contínua DPS₂ e alternada DPS₃, empregados na proteção, conforme ilustrado na Figura 1, são descritos pelas normas ABNT NBR IEC 61643-31 [16] e ABNT NBR IEC 61643-11 [17], respectivamente.

A distância entre o DPS externo e o componente de proteção interno do inversor é de 1 metro, uma configuração comum em uma instalação residencial. Os resultados desse estudo buscam confirmar que essa distância facilita a coordenação efetiva entre os DPS externo e a proteção interna. Tal coordenação é crucial para otimizar a eficiência de proteção, como observado por Staikos[18].

O gerador produz uma onda combinada com tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito com formas $1,2/50\mu\text{s}$ e $8/20\mu\text{s}$ ($8\mu\text{s}$ de tempo de subida e $20\mu\text{s}$ de tempo de queda até 50%), respectivamente. Ele emite surtos elétricos que atendem à norma IEC 61000-4-5 [19]. O gerador possui impedância interna 2Ω , gera surtos de polaridade positiva e negativa, tem taxa de repetição de 0,04Hz e gera surtos de até 18kV. O setup e os procedimentos utilizados nos experimentos são descritos a seguir.

2.1. Setup Experimental

Os ensaios experimentais foram realizados individualmente e seguiram o padrão internacional IEC 61000-4-5 [19] de testes e medições de imunidade contra surtos. O circuito de acoplamento é responsável por conectar o gerador em paralelo com a rede elétrica de 220V nos ensaios do lado CA e com o sinal CC que vem de uma fonte estabilizada, que neste trabalho substitui os painéis solares. Esses circuitos são constituídos por varistores (V_{R1} , V_{R2} , V_{R3} e V_{R4}) em série com centelhadores 800V (C_{t1} , C_{t2} , C_{t3} e C_{t4}), como ilustrado na Figura 2, e permitem que o surto elétrico de alta tensão proveniente do gerador seja injetado em paralelo com a rede elétrica ou sinal CC próximo ao equipamento sob teste, e não segue para a rede elétrica, fonte CC ou carga, pois é bloqueado pelas redes de desacoplamento.

Cada uma das redes de desacoplamento 1, 2 e 3, apresentadas na Figura 2, é composta por duas bobinas de 1,5 mH cada, para a rede local, para a Fonte CC e para a carga, concentrando

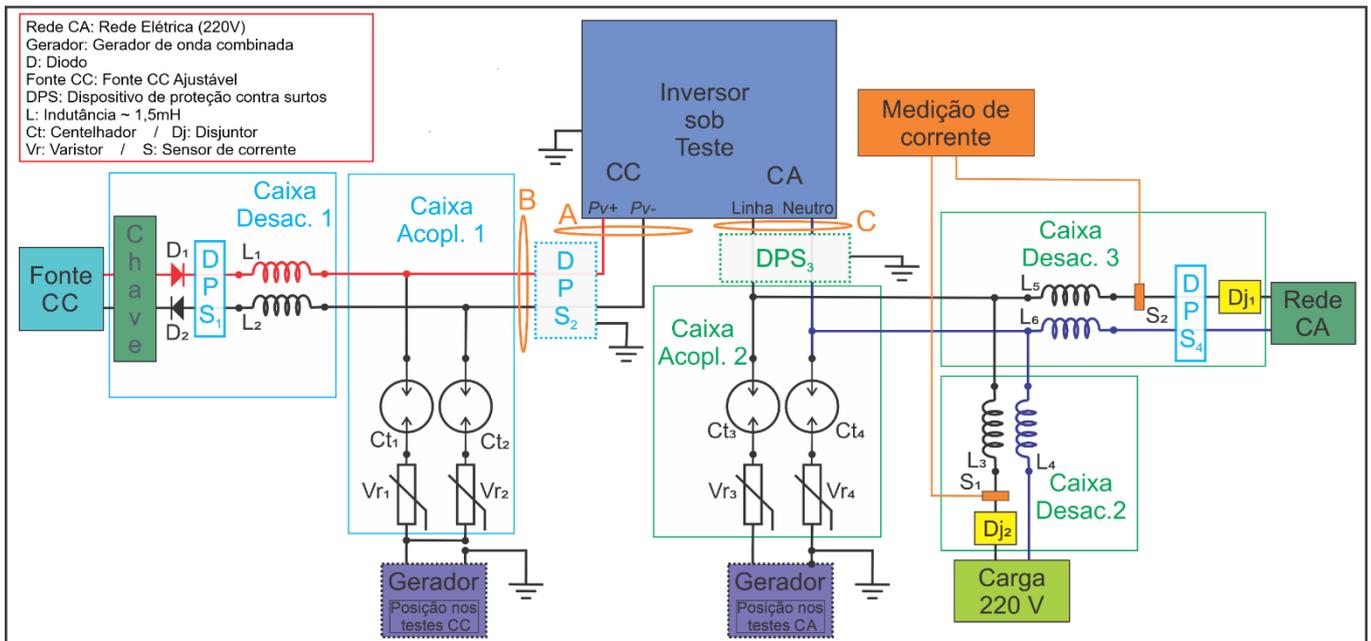


Figura 2 Esquema de conexão dos inversores sob testes.

a energia do surto no inversor sob teste. Para garantir a eficiência de desacoplamento e proteger os circuitos do LEDA a rede 1 recebeu DPS entre os sinais P_{v+} e terra e P_{v-} e terra, além de diodos de bloqueio e uma chave bipolar, como ilustrado na Figura 2. A Rede 3 recebeu DPS entre Linha e terra e entre Neutro e terra, além de um disjuntor para limitar a corrente máxima que deve circular.

As redes de acoplamento e desacoplamento, desenvolvidas seguindo a norma IEC 61000-4-5 [19], foram colocadas em caixas metálicas aterradas para proteção e acondicionamento dos circuitos. Na sequência, estão descritos os procedimentos experimentais aplicados na realização dos testes.

2.2. Procedimentos de Teste

Os experimentos foram conduzidos em um único inversor por vez, nas seguintes configurações possíveis de aplicação do pulso de alta tensão:

1. Na entrada CC sem a proteção de um DPS;
2. Na entrada CC com a proteção de um DPS (DPS₂ da Figura 2);
3. Na porta CA sem a proteção de um DPS e
4. Na porta CA com a proteção de um DPS (DPS₃ da Figura 2).

Os DPS 2 e 3, utilizados nos ensaios com proteção, foram instalados conforme descrito na Figura 3, adaptada da Figura A.1 da Norma ABNT NBR IEC 61643-32 de 2022 [11]. Em função da configuração de conexão do DPS, ilustrado na Figura 3, a aplicação dos pulsos elétricos de alta tensão na entrada CC foi realizada no modo diferencial, ou seja, os pulsos são aplicados diferencialmente nas entradas P_{v+} e P_{v-} , como ilustrado na Figura 2. Na saída CA os pulsos foram aplicados no modo comum, como detalhado na Figura 2. O em série com os sinais a serem protegidos, conforme a IEC 61000-4-5 [19]. Essas redes impedem a passagem do surto procedimento utilizado foi construído com base no padrão internacional

IEC 61000-4-5 [19] e seguiu as etapas:

1. Montagem e verificação dos circuitos de acoplamento e desacoplamento;
2. Conexão do inversor sob teste, conforme ilustrado na Figura 2, com os cabos e conectores originais do equipamento;
3. Ligação do inversor e observação por 30 minutos para identificar possíveis falhas no início da vida útil;
4. Submissão do inversor a surtos sucessivos com tensão de circuito aberto de 10kV, limitando a corrente a 5kA, devido à resistência interna do gerador de 2 Ω .

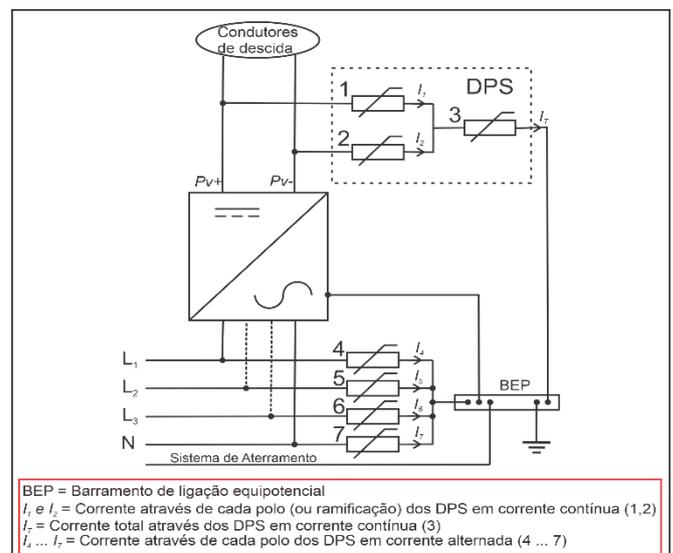


Figura 3 Configuração de conexão dos DPS utilizados nos ensaios e definido pela ABNT NBR IEC 61643-32 [11].

O intervalo entre os pulsos foi de 60 segundos, alternando-se em grupos de 5 pulsos de polaridade positiva e 5 de negativa. A sequência era interrompida caso o inversor

apresentasse falha ou ao atingir 100 pulsos. Assim, a análise leva em consideração duas hipóteses: quantidade de surtos/pulsos até ocorrer a falha e quando a falha não ocorrer. Observando-se a falha, registrou-se a quantidade de pulsos aplicados e, quando o inversor não falhou, foram registrados 100 pulsos.

Os ensaios para um mesmo modelo de inversor são realizados sem e com a proteção de DPS. Importante salientar que a única diferença nos circuitos é a inserção do DPS, sendo mantidas todas as dimensões dos cabos e demais variáveis inalteradas. Assim, a comparação dos resultados com e sem o DPS demonstrou a influência do dispositivo de proteção.

2.3. Descrição do Equipamento sob teste

Dois modelos de fabricantes distintos foram escolhidos para a realização dos testes. Ambos são monofásicos, operaram em uma rede elétrica de 220 V, on-grid, potência nominal de saída de 3 kW e foram alimentados com tensão e corrente contínuas dentro dos limites definidos pelos fabricantes. Os sensores de corrente S_1 e S_2 , ilustrados na Figura 2, medem a corrente injetada na carga e na rede, respectivamente e permitem identificar se o inversor sob teste está funcionando adequadamente.

3. Resultados

A apresentação dos resultados será realizada separadamente para cada modelo, referenciando os modelos como “A” e “B”. Essa abordagem permite uma análise detalhada das características individuais de desempenho de cada modelo de inversor.

3.1. Modelo A

A proteção interna deste modelo de inversor é composta por: na porta CA - filtros capacitivos, bobinas, varistores S20K510, fusíveis térmicos (125°C) e um centelhador EF1500 - 210. Na porta CC – bobinas e filtros capacitivos.

Seguindo os *Procedimentos de Teste* foram realizados ensaios destrutivos em dez inversores idênticos, sendo cinco testados na porta CA e outros cinco na porta CC. Em cada grupo de cinco inversores, três foram testados sem DPS e dois com DPS. Os números de surtos suportados pelos inversores com e sem a proteção do DPS, nas portas CA e CC, estão apresentados na Tabela I.

TABELA I
Dados Experimentais do Modelo A

Nº do Ensaio	Porta CA		Porta CC	
	Sem DPS	Com DPS	Sem DPS	Com DPS
1º	5	100	1	100
2º	4	100	1	100
3º	6	-	1	-
Média	5	100	1	100

Observa-se na Tabela I que a proteção interna dos inversores falhou, em média, após 5 pulsos na porta CA e 1 pulso na porta CC. Com o DPS aplicado na proteção, ambas as portas suportaram os 100 pulsos aplicados, mostrando a importância da utilização do dispositivo na proteção externa deste modelo.

Em função do resultado apresentado na Tabela I, foi realizada uma investigação detalhada nas correntes que circulam pela entrada CC e CA do inversor do Modelo A. A Figura 4 apresenta as curvas medidas nos pontos A e B, ilustrados na Figura 2. As curvas 1 e 2 mostram os pulsos de corrente medidos no ponto B da figura 2, representando o inversor sem e com a proteção do Dispositivo de proteção contra surtos (DPS), respectivamente. Vale ressaltar que o DPS cria um caminho de baixa impedância, sendo esta inferior à do inversor isoladamente. A Curva 3 é pulsos de corrente, medido no Ponto A da Figura 2, quando o inversor está protegido por um DPS.

Observa-se na Figura 4 que a amplitude máxima da corrente que entra no inversor sem a proteção de um DPS é de aproximadamente 3 kA, já com a proteção essa intensidade fica abaixo de 1 kA.

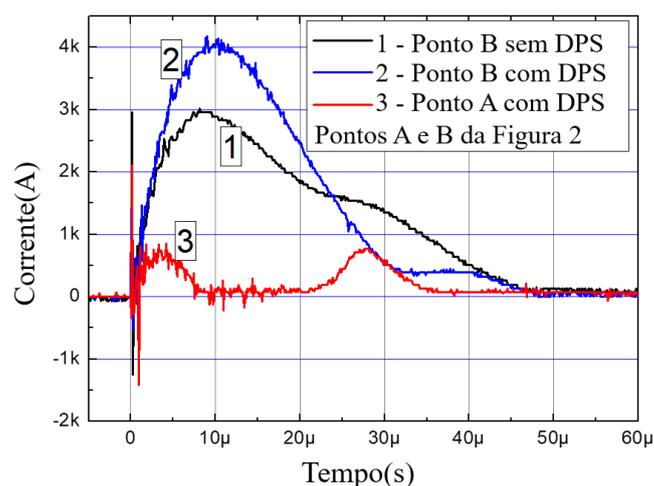


Figura 4 Correntes no lado CC do Modelo A, medidas nos pontos A e B, ilustrados na Figura 2.

Porém, mais importante que essa queda na amplitude no pulso de entrada do inversor é a redução da área da curva de corrente. A área da Curva 1, que representa o pulso de entrada sem a proteção do DPS, é de 0,078 A.s e a área da Curva 3, que representa a corrente que entra no inversor quando ele está protegido, é de 0,014 A.s. Dessa forma, o percentual da área da Curvas 3, em relação à Curva 1, é de 18%. Essa redução de 82% na área da curva da corrente de entrada dos inversores pode ser traduzida como redução da energia do pulso que passa para o equipamento sob proteção. Considerando a impedância inalterada, uma vez que os inversores testados com e sem DPS são idênticos, e a relação quadrática entre a corrente (i) e a potência (P),

$$P = Z \cdot i^2 \quad (1)$$

uma redução de 82% na área da curva corrente (A) x tempo (s) corresponde a uma redução de energia (E) de 96,8%.

$$E = P \cdot t \quad (2)$$

A Figura 5 apresenta as curvas de corrente do lado CA sem e com a proteção de DPS medidas no Ponto C ilustrado na Figura 2. As áreas das Curvas 1 e 2 da Figura 5 são 0,076 A.s e 0,004 A.s, respectivamente. Assim, a redução na energia que entra no inversor do lado AC, provocada pela atuação do DPS, é de 99,73%. As reduções de 96,8% no lado CC e 99,73% no

lado CA da potência recebida pelo equipamento protegido demonstram a importância da utilização do DPS nos inversores do modelo A e levaram às investigações do segundo modelo.

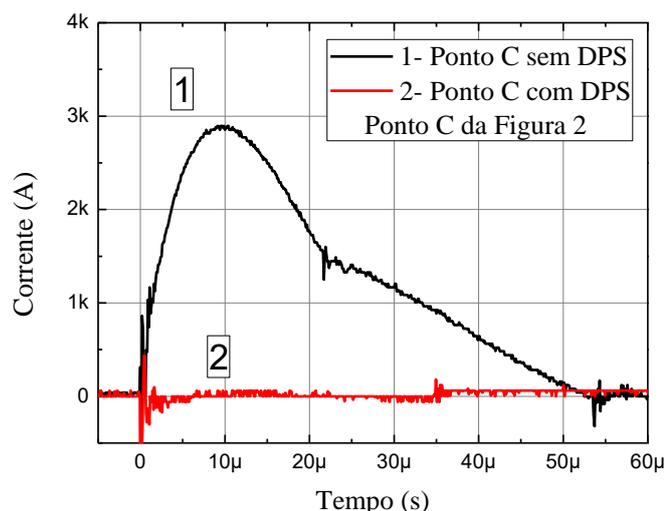


Figura 5 Correntes no lado CA do Modelo A, medidas no ponto C, ilustrados na Figura 2.

3.2. Modelo B

A proteção interna desse modelo de inversor é composta por: na porta CA - bobinas, varistores 821KD20 e filtros capacitivos. Na porta CC - bobinas, varistores 821KD10 e filtros capacitivos.

Conforme os *Procedimentos de Teste*, dez inversores idênticos e novos foram analisados para este segundo modelo e os números de surtos suportados com e sem a proteção do DPS estão apresentados na Tabela II. Observa-se, na Tabela II, que esse modelo suportou, sem a proteção de DPS, uma média de 7,7 e 6 pulsos dos lados CA e CC, respectivamente. Esses valores representam uma baixa suportabilidade. Em aplicações práticas, como em sistemas fotovoltaicos residenciais sem a proteção externa de um DPS, esses inversores teriam uma vida útil reduzida.

TABELA II
Dados Experimentais do Modelo B

Nº do Ensaio	Porta CA		Porta CC	
	Sem DPS	Com DPS	Sem DPS	Com DPS
1º	1	100	6	100
2º	20	100	6	100
3º	2	-	6	-
Média	7,7	100	6	100

Com a proteção de DPS, ambos os lados, CA e CC, suportaram 100 pulsos, como ilustrado na Tabela II. Mais uma vez, agora para o Modelo B, observa-se a importância da utilização do DPS em ambos os lados. A Figura 6 detalha as correntes circulantes no lado CC sendo: Curvas 1 e 2 os pulsos de corrente que entram no inversor, no ponto A da Figura 2, sem e com a proteção de DPS, respectivamente; curva 3 ilustra a corrente no ponto B da Figura 2 quando existe um DPS na entrada do inversor.

As áreas das correntes de entrada do inversor sem e com a proteção de DPS, nas curvas 1 e 2 da Figura 6, são de

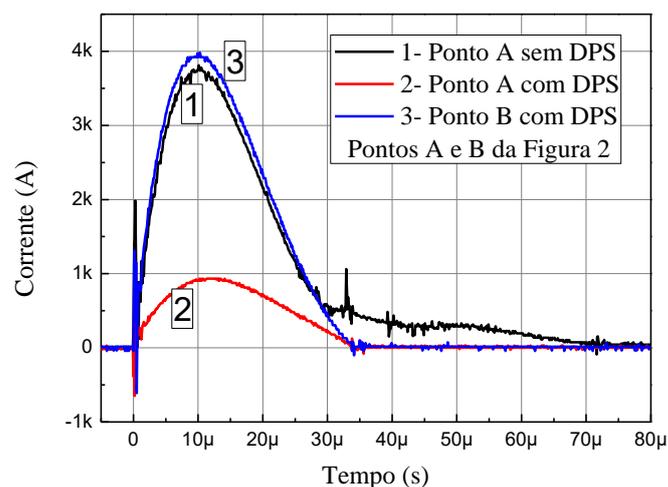


Figura 6 Correntes no lado DC do Modelo B, medidas nos pontos A e B, ilustrados na Figura 2.

0,083 A.s e 0,021 A.s, respectivamente. Isso corresponde a uma redução de pelo menos 93,6% da energia do pulso que atingiria o inversor.

A Figura 7 apresenta as correntes circulantes na porta CA do inversor, ilustrada pelo ponto C da Figura 2, durante a aplicação de um pulso sem e com a proteção de DPS nas curvas 1 e 2, respectivamente. As áreas das Curvas 1 e 2, apresentadas na Figura 7, são de 0,077 A.s e 0,005 A.s, respectivamente. Assim, tem-se que o DPS foi responsável pelo desvio de 99,58% da energia do pulso. Isso explica a elevação no número de pulsos suportado pelos inversores protegidos pelo DPS.

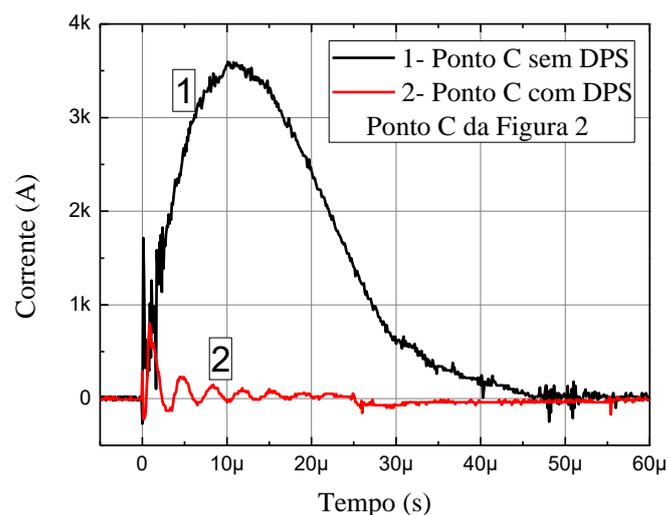


Figura 7 Correntes no lado CA do Modelo B, medidas no ponto C, ilustrado na Figura 2.

4. Conclusões

O número de pulsos de alta tensão suportados pelos inversores, sem a proteção do DPS, demonstra a baixa suportabilidade dos modelos estudados. Tanto a porta de CC como a porta CA suportaram os 100 pulsos aplicados quando os equipamentos estavam protegidos pelos DPS. Esses resultados mostram a necessidade da utilização de DPS para proteção de ambas as portas. Assim, para garantir a vida útil dos

equipamentos, evitando falhas precoces, provocadas por descargas atmosféricas, é indicada a utilização de DPS externo nos inversores.

A análise das intensidades dos pulsos de corrente que entram nos inversores mostrou que o DPS externo desviou pelo menos 93,6% da energia dos pulsos, evitando, assim, a falha precoce dos inversores. Além disso, o custo dos DPS utilizados para proteção dos inversores neste trabalho foi inferior a 8% do preço do inversor de menor valor. Conclui-se, portanto, que a utilização de DPS externo em instalações solares é uma solução eficaz e econômica para evitar falhas precoces dos inversores.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a CLAMPER Indústria e Comércio S.A e a Universidade de Pernambuco, pela colaboração neste trabalho.

6. Referências

- [1] Record News, "Brasil registra quase 209 milhões de raios em 2023". Hora News, January 2023. [online]. Available: <https://11nk.dev/raios2023>. Accessed: January, 29, 2024.
- [2] MME, Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 (Ano base 2022), Ministério de Minas e Energia do Governo Federal, elaborado pela EPE Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, maio de 2023, Disponível em: < <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>>, Acesso em: 22 de agosto de 2023.
- [3] C.A. Christodoulou, V. Kontargyri et al. Lightning performance study for photovoltaic systems. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August 2015.
- [4] Y. Zhang, H. Chen and Y. Du, "Considerations of Photovoltaic System Structure Design for Effective Lightning Protection," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 62, no. 4, pp. 1333-1341, Aug. 2020, doi: 10.1109/TEMC.2020.2990930.
- [5] N.I. Ahmad, M.Z.A. Ab-Kadir, M. Izadi, N. Azis, M.A.M. Radzi, N.H. Zaini, M.S.M. Nasir, Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 1, 2018, Pages 1611-1619, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.008>.
- [6] K. Sakai and K. Yamamoto, "Lightning protection of photovoltaic power generation system: Influence of grounding systems on overvoltages appearing on DC wirings," 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, 2013, pp. 335-339, doi: 10.1109/SIPDA.2013.6729211.
- [7] M. R. Ahmed, M. R. Karim and M. A. Hossain, "Protection of Solar Power Generation System from Lightning Induced Overvoltage," 2022 25th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), Cox's Bazar, Bangladesh, 2022, pp. 396-399, doi: 10.1109/ICCIT57492.2022.10055139.
- [8] Z. Benesova, R. Haller, J. Birkl and P. Zahlmann, "Overvoltages in photovoltaic systems induced by lightning strikes," 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344253.
- [9] A. Raizer, V. L. Coelho and T. P. d. Reis, "Analysis of the Maximum Overvoltages Conducted to the Low Voltage Electric Installations," 2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA), Sao Paulo, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIPDA47030.2019.8951574.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas: ABNT NBR 5419, Proteção contra descargas atmosféricas, Rio de Janeiro, 2015.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas: ABNT NBR IEC 61643-32:2022, Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão Parte 32: DPS conectado no lado corrente contínua das instalações fotovoltaicas, 2022.
- [12] P. R. Borel, T. F. Gomes, R. J. Teixeira, A ilusão da proteção interna em inversores. Revista Fotovolt, Maio 2023.
- [13] S. Mosamane and C. Gomes, "Lightning-Induced Voltages Risk for Microinverters in Photovoltaic Installations," 2022 30th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC), Durban, South Africa, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAUPEC55179.2022.9730764.
- [14] N. H. Zaini et al., "Lightning Surge on the DC and AC Side of Solar PV System," 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/APL.2019.8815953.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas: ABNT, NBR 5410, "Instalações Elétricas de Baixa Tensão", versão corrigida, março 2008.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas: ABNT NBR IEC 61643-31 - Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão - Parte 31: DPS para utilização específica em corrente contínua — Requisitos e métodos de ensaio para os dispositivos de proteção contra surtos para instalações fotovoltaicas. ABNT 2022.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas: ABNT NBR IEC 61643-11 - Dispositivos de proteção contra surtos de baixa tensão - Parte 11: Dispositivos de proteção contra surtos conectados aos sistemas de baixa tensão - Requisitos e métodos de ensaio. ABNT 2021.
- [18] E. T. Staikos et al., "Coordination of varistors with transient voltage suppression diodes in automotive DC systems," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 73, no. 1, pp. 450-462, Jan. 2024.
- [19] Norma IEC 61000-4-5:2015, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test", Edition 3.0, 2014. Analog Devices: Analog Design Seminar, Munich: Analog Devices GmbH, 1989.