

PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO SOLAR FOTVOLTAICA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: UMA ABORDAGEM TÉCNICO-CIENTÍFICA

Swytz José Silva Tavares (UECE) - swytz.tavares@aluno.uece.br

Ricardo de Castro Gomes (UECE) - ricardocg.eng@gmail.com

luterocarmo de lima (UECE) - luterodelima@gmail.com

Resumo:

A crescente demanda brasileira por microgeração fotovoltaica segue uma tendência mundial. Vários fatores colaboraram para a expansão, entre eles, a redução do custo e o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos. Ademais, o mercado de energia se encontra regulamentado por regras de compensação comercial e critérios técnicos para geração e conexão à rede de distribuição (grid). Contudo, os sistemas fotovoltaicos necessitam de medidas de Proteção contra Descargas Atmosférica (PDA), inclusive para garantia do retorno financeiro desse investimento. Pois, os módulos instalados no teto das edificações possibilitam a incidência de raios que podem danificá-los, bem como os demais componentes do sistema, cujo cenário de riscos tem como agravante: os problemas operacionais, a manutenção e o envelhecimento (vida útil). Destarte, empregam-se os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) e os Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) como medidas fundamentais de proteção contra raios. O DPS reduz as falhas em instalações e equipamentos, e o SPDA canaliza a energia das descargas à terra para prevenção dos efeitos diretos e mais danosos nas edificações. Este trabalho visou subsidiar a etapa do gerenciamento de riscos da norma NBR 5419, quantificando-se as tensões e correntes elétricas induzidas por descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos, aplicando-se fórmulas do eletromagnetismo para estimativa de induções e a Lei de Ohm para a estratificação das diferenças de potencial elétrico no solo produzidas pela malha de aterramento do para-raios. Portanto, verificou-se pelas tensões e correntes calculadas que as edificações sem SPDA apresentaram os maiores valores de indução nos circuitos elétricos dos sistemas fotovoltaicos. Isto posto, pelos resultados das simulações conclui-se que o SPDA é essencial para a proteção de edificações e seus sistemas elétricos contra os efeitos diretos dos raios. E, de modo efetivo, a equipotencialização completa as medidas de proteção equalizando as diferenças de potencial do solo.

Palavras-chave: *NBR-5419, Para-raios, Diferença de Potencial*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO SOLAR FOTVOLTAICA CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: UMA ABORDAGEM TÉCNICO-CIENTÍFICA

Swytz José Silva Tavares - swytztavares21@gmail.com

Ricardo de Castro Gomes - ricardocg.eng@gmail.com

Lutero Carmo de Lima - luterodelima@gmail.com

Universidade Estadual do Ceará - UECE

Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas - CMAFCA

Linha de Pesquisa: Energias e Meio Ambiente - EMA

Resumo. A crescente demanda brasileira por microgeração fotovoltaica segue uma tendência mundial. Vários fatores colaboraram para a expansão, entre eles, a redução do custo e o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos. Ademais, o mercado de energia se encontra regulamentado por regras de compensação comercial e critérios técnicos para geração e conexão à rede de distribuição (grid). Contudo, os sistemas fotovoltaicos necessitam de medidas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA), inclusive para garantia do retorno financeiro desse investimento. Pois, os módulos instalados no teto das edificações possibilitam a incidência de raios que podem danificá-los, bem como os demais componentes do sistema, cujo cenário de riscos tem como agravante: os problemas operacionais, a manutenção e o envelhecimento (vida útil). Destarte, empregam-se os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) e os Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) como medidas fundamentais de proteção contra raios. O DPS reduz as falhas em instalações e equipamentos, e o SPDA canaliza a energia das descargas à terra para prevenção dos efeitos diretos e mais danosos nas edificações. Este trabalho visou subsidiar a etapa do gerenciamento de riscos da norma NBR 5419, quantificando-se as tensões e correntes elétricas induzidas por descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos, aplicando-se fórmulas do eletromagnetismo para estimativa de induções e a Lei de Ohm para a estratificação das diferenças de potencial elétrico no solo produzidas pela malha de aterramento do para-raios. Portanto, verificou-se pelas tensões e correntes calculadas que as edificações sem SPDA apresentaram os maiores valores de indução nos circuitos elétricos dos sistemas fotovoltaicos. Isto posto, pelos resultados das simulações conclui-se que o SPDA é essencial para a proteção de edificações e seus sistemas elétricos contra os efeitos diretos dos raios. E, de modo efetivo, a equipotencialização completa as medidas de proteção equalizando as diferenças de potencial do solo.

Palavras-chave: NBR-5419, Para-raios, Diferença de Potencial

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, atualmente, alcançou a marca de 2,0 GWp de potência instalada em mini e microgeração fotovoltaica conectada à rede de distribuição de energia elétrica, com mais de 150 mil sistemas. Segundo a EPE (2019), apenas 0,19% das 84 milhões unidades consumidoras se beneficiaram com a geração de energia solar. A cidade de Fortaleza ocupa o quinto lugar com 20,7 MWp e o Estado do Ceará está em nono com 67,3 MWp instalados. Vários fatores colaboraram com o crescimento, entre eles, a redução do preço do módulos fotovoltaico para US\$ 0,22 por watt, juntamente com o aumento da eficiência de conversão energética de 22,5% ou 225 Wp/m², segundo PVEL LLC.

Em 2016, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estimou em 287,5 TWh (32,8 GWp) o potencial de geração anual de energia fotovoltaica distribuída no Brasil, equivalente a 230% do consumo daquele ano. No Estado do Ceará o levantamento apontou 12,5 TWh (1,43 GWp), representando 334% do consumo anual. O mesmo estudo projetou que em 2024 serão 800 mil residências (2,5 GWp) beneficiadas com esse tipo de geração, que segue a tendência da Austrália cujo país tem dimensões geográficas e índices de irradiação solar (kWh/m²) semelhantes ao do Brasil e já alcançou mais de 2 milhões de residências (7,8 GWp), segundo o Australian Clean Energy Regulator (ACER).

Mas, a exposição contínua desses sistemas no topo das edificações os torna susceptíveis à incidência de raios. Nos últimos anos ocorreu no Brasil uma média anual de 78 milhões de descargas atmosféricas (d.a.), que equivale a 213.000 d.a./dia ou 9,16 d.a./km²/ano. A cidade de Fortaleza com área geográfica de 313,8 km² teve uma incidência média de 427 d.a./ano (INPE, 2019). E mesmo com dados incipientes, as estatísticas preliminares indicaram que no período de 2004 a 2016 em torno de 31% dos danos em sistemas fotovoltaicos foram provocados por raios (DEHN, 2019).

As medidas protetivas contra descargas atmosféricas tem por objetivo a proteção da estrutura das edificações e suas instalações dos efeitos danosos das descargas atmosféricas, inclusive de cargas elétricas específicas como os veículos elétricos conectados em estações de carregamento. Portanto, as descargas atmosféricas podem danificar sistemas e equipamentos que requerem medidas apropriadas de proteção (Mamede, 2005). O custo total do prejuízo deve considerar os valores com o reparo do próprio sistema fotovoltaico e as perdas de receita durante o tempo da falta de geração de

energia, que podem ser maiores que os custos de reparação. Assim, o critério financeiro também é importante ao gerenciamento de riscos dos projetos subsidiando os índices de ponderação de danos, falhas e perdas, que determinam a aplicação dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (NBR-5419, 2015).

O presente trabalho objetivou subsidiar a etapa do gerenciamento de riscos, diretriz da norma NBR-5419 (ABNT), sem pretensão de esgotar o assunto. Para este fim, foram estimados valores de sobretensões e sobrecorrentes induzidas em sistemas fotovoltaicos por descargas atmosféricas diretas ou indiretas em edificações, considerando-se as diversas configurações, ou seja, com e sem para-raios. E foram elaborados modelos matemáticos aos cálculos das diferenças de potenciais (ΔV) no solo (tensão de passo) provocados pelos sistemas de aterramento durante um raio, para subsídio à análise de riscos sob a égide da referida norma técnica.

2. REVISÃO do ESTADO da ARTE

O papel principal das medidas de proteção contra raios em sistemas é reduzir os seus efeitos diretos e indiretos a níveis de prejuízos técnico-financeiros aceitáveis. Os indiretos são causados pelo efeito da Lei de Faraday ou da indução eletromagnética ($\mathcal{E} = -d\phi/dt$) produzidos pelos campos eletromagnéticos das descargas atmosféricas, que mesmo sem atingir diretamente as instalações protegidas induzem correntes e tensões anormais em sistemas e instalações. Os efeitos diretos causam danos mais extensivos decorrentes de efeitos térmicos e dos esforços eletrodinâmicos ou mecânicos causados nas estruturas físicas das edificações e dos sistemas, além de produzir sobrecargas em circuitos elétricos. Contudo, os tipos de danos provocados por ambos os modos dependem das características da descarga elétrica envolvida, tais como: o valor de pico ou da intensidade da corrente, o tempo de duração da intensidade, a taxa de variação da corrente (di/dt) e o cálculo da integral de Joule ($Q = R \int i^2 dt$) ou da energia térmica transferida (Sueta, 2005 e 2014).

A complexidade do fenômeno atmosférico exigiu esforços conjuntos da engenharia e a física ao desenvolvimento de pesquisas científicas para proteção dos sistemas fotovoltaicos, produzindo trabalhos acadêmicos multidisciplinares para entendimento e modelagem matemática do ambiente eletromagnético operacional em que este sistema se encontra inserido durante uma descarga atmosférica (Ahmad, 2018). A importância do tema pode ser exemplificada pelos trabalhos do CBENS VI e VII, onde um apresentou uma configuração de malhas de aterramento para sistemas fotovoltaicos (Pereira, 2016) e outro demonstrou os efeitos de correntes de alta frequência de inversores eletrônicos em aterramentos de plantas solares (Osório, 2018). Outro exemplo é o uso de cabos isolados de alta tensão em subsistemas de descida de SPDA para proteção contra descargas laterais nas estruturas de edificações, conforme o item 7.3.e da norma NBR 5419-1 (Tavares, 1993). A aplicação do método dos elementos finitos para dimensionamento de tensões de passo e toque em edificações durante um raio (Garcia, 2016). Bem como, o emprego do conceito físico da Deflexão por Campo Elétrico (DCE) para otimização do desempenho de para-raios em sistemas fotovoltaicos (Lisboa, 2018).

2.1 Norma NBR 5419:2015

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em 2015, a última versão da norma NBR-5419 sobre proteção contra descargas atmosféricas. A sua revisão dividiu a norma em quatro partes, baseando-se na série normativa da International Electrotechnical Commission (IEC), principalmente a norma IEC 62305, que foi elaborada considerando-se dados científicos que definiram parâmetros sobre as correntes de descargas atmosféricas e sua classificação em classes de riscos através de quatro possíveis níveis básicos de proteção (NP I - IV).

Outra inovação importante da NBR 5419 foi a especificação do Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) para a função de escoamento de sobrecorrentes ao sistema de aterramento e limitação de sobretensões induzidas por raios em instalações elétricas. O DPS opera conjuntamente com o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) para proteção mais completa de estruturas, instalações e pessoas dos efeitos dos raios. Assim, o conjunto DPS/SPDA protege de modo mais efetivo as instalações (gás, dados, elétrica, solar e etc.) e as cargas consumidoras de energia (eletroeletrônicos, veículos elétricos e etc.) contra os danos provocado por descargas atmosféricas diretas ou indiretas.

Neste contexto, se a proteção for resumida ao uso só do Dispositivo de Proteção contra Surto (DPS), aumentar-se-á a probabilidade de danos em módulos, inversores e circuitos dos sistemas instalados no teto das edificações, caso seja atingido por um raio. A avaliação desse cenário pelo item 5 da norma NBR 5419-1 considera os agravantes das perdas L2 (serviços públicos) e L4 (econômicos), bem como de danos D2 (físicos) e D3 (sistemas) na ponderação dos riscos.

O item 8 da NBR 5419-1 prescreve que as medidas de proteção contra descargas atmosféricas sejam determinadas por meio de zonas de proteção ou ZPRs, onde tais medidas contra os efeitos de raios devem considerar a análise das zonas ZPR 0A e 0B. A zona ZPR 0A é uma zona externa, limítrofe da edificação e não-protetida contra incidência direta de raios, pois está fora do volume de proteção de um SPDA. Os sistemas e as instalações estão sujeitos a descargas atmosféricas diretas e não há atenuação dos efeitos causados por campos eletromagnéticos. E a zona ZPR 0B é, também, uma zona externa da edificação mas dentro do volume de proteção de um SPDA, cujos sistemas e equipamentos estão conectados à uma malha de aterramento para escoamento de surtos. Os sistemas e instalações localizados nesta zona não estão sujeitos a descargas diretas, mas estão susceptíveis à surtos de corrente e efeitos de campos eletromagnéticos não atenuados. Ademais, as partes condutoras externas dos equipamentos e instalações expostas nesta zona, conduzirão parte dos surtos de corrente e sofrerão os efeitos dessas mesmas correntes induzidas.

No caso de exposição dos cabos elétricos de corrente contínua (c.c.) do sistema fotovoltaico à surtos, as induções se apresentam em dois modos distintos: comum e diferencial. O surto de modo comum está relacionado com a

suportabilidade do isolamento elétrico aos impulsos de tensão e é decorre da diferença de potencial entre condutores energizados e pontos de aterramento. E o surto de modo diferencial, que é a diferença de potencial entre os próprios condutores, diz respeito a imunidade de dispositivos e componentes constituintes do sistema aos mesmos impulsos. Ambos podem danificar equipamentos, mas o modo comum tem o agravante adicional de causar choque elétrico.

A equipotencialização é outra medida de proteção importante e está descrita no item 6 da NBR 5419-3. Neste caso, o sistema de aterramento da edificação se interliga à malha de terra do SPDA visando a proteção contra choque elétrico, danos estruturais e em instalações, falhas em sistemas eletroeletrônicos e prevenção de incêndios e explosões.

Caso a distância entre os módulos e o para-raios seja menor que de segurança “s” (NBR 5419, 2015), far-se-á necessária a ligação equipotencial entre os mesmos. Também, serão equipotencializados os módulos expostos à incidência de raios e que não estejam na zona de proteção do SPDA. A seção mínima do condutor de equipotencialização é de 16 mm², conforme a norma NBR 16690 que trata de requisitos de projetos para arranjos fotovoltaicos.

A Fig. 1 resume o diagrama básico de um sistema de aterramento TN-S com equipotencialização.

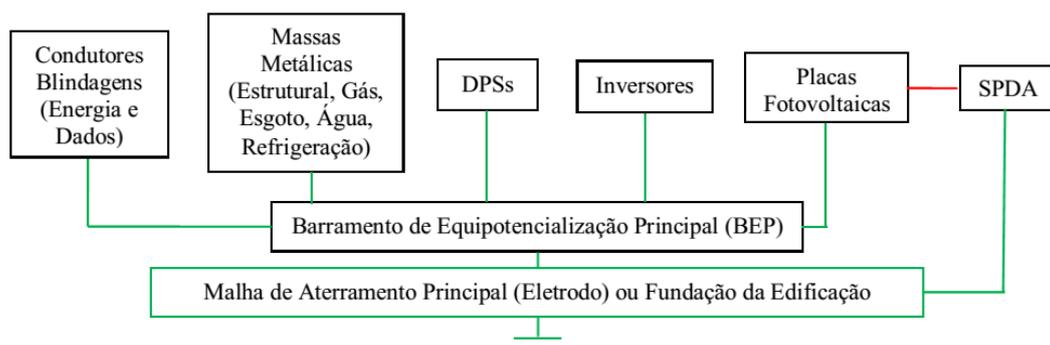


Figura 1 - Esquema básico de um sistema de aterramento/equipotencialização.

2.2 CEPEL-CRESESB

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), em 2014, lançou um manual de engenharia para elaboração de projetos de sistemas de geração solar relacionando orientações sobre as especificações técnicas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR). Entre as principais diretrizes estão os dispositivos de proteção integrada aos equipamentos, dispositivos de segurança intitulado de chave seccionadora sob carga ou dispositivos de seccionamento visível (DSV), disjuntores e DPS, além de outros aparatos.

Os avanços tecnológicos dos componentes constituintes do sistema de geração solar tornaram-no mais robusto. Contudo, para uma ação mais preventiva torna-se necessário a utilização de dispositivos externos de proteção contra descargas atmosféricas (PDA) e sistemas de aterramento como medida de proteção efetiva contra os efeitos dos raios. A aplicação do sistema de para-raios, conjuntamente com DPS, sistema de aterramento e equipotencialização, é uma medida fundamental de proteção de sistemas fotovoltaicos (CRESESB, 2014).

Na Fig. 2 consta o esquema básico de proteção para sistemas fotovoltaicos contra descargas atmosféricas.

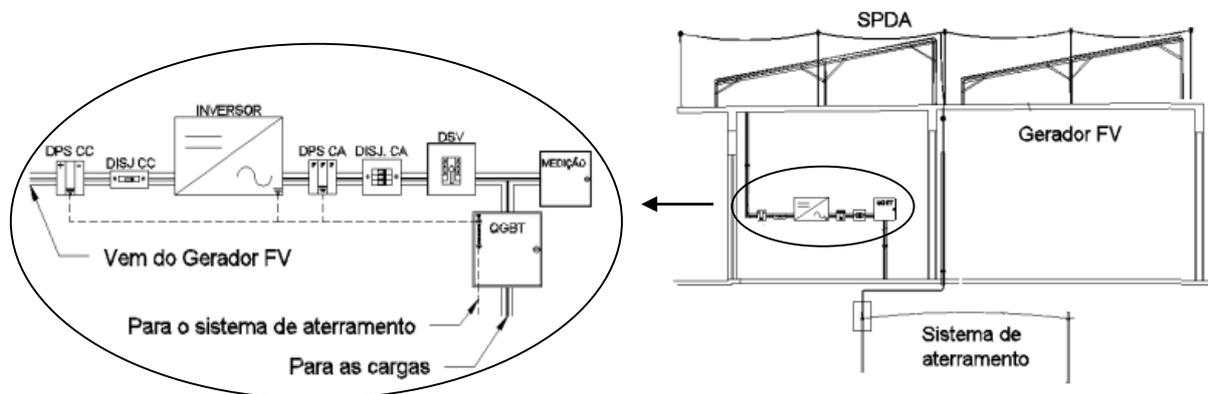


Figura 2 - Diagrama básico de proteção para sistema SFV (CEPEL, 2014).

2.3 Norma NBR 5410:2004

O aterramento é uma ligação elétrica intencional de baixa impedância ao solo e a equipotencialização elimina ou minimiza diferenças de potenciais elétricos entre diferentes massas metálicas (Cotrim, 2009). Portanto, por segurança todos os equipamentos, calhas de cabos e armação dos módulos, entre outros, devem ser aterrados para prevenção contra danos em equipamentos e riscos de choque elétrico em pessoas, cujo cenário defini muito bem as características elétricas

e perigos existentes em um sistema fotovoltaico (Nascimento, 2016). Inclusive, a mesma malha de terra de referência também deve ser utilizada pelo SPDA para escoamento direto da descarga atmosférica, conforme a Fig. 1.

Esta norma definiu as condições técnicas mínimas para as instalações elétricas de baixa tensão com a finalidade de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado das instalações e a sua proteção. Ela estabelece os critérios para instalação de sistemas de aterramento e aplicação da equipotencialização. Entre a classificação dos vários esquemas de aterramento disponibilizados pela norma, o modelo TN-S foi o considerado como padrão de segurança ao presente estudo e o diagrama da Fig. 1 elaborado por este trabalho se encontra em conformidade com a referida norma.

3. METODOLOGIA

A primeira parte do trabalho aplicou o modelo proposto por Pons *et al.* (2013) composto por formulações matemáticas da lei do eletromagnetismo ou de Faraday. Utilizaram-se parâmetros técnicos de referência sobre proteção de descargas atmosféricas definidos pelos conceitos da indutância mútua para o cálculo aproximado de tensões e correntes induzidas em circuitos elétricos de corrente contínua (c.c.) de sistemas de geração fotovoltaica, em cenários que consideraram a fiação ou cabos elétricos não-blindados. Também, foram realizadas variantes de cálculos para surtos de tensão nos modos comum e diferencial, considerando-se raios diretos e indiretos em sistemas SFV. Além disso, foram estimados os valores de tensões e correntes em três possíveis configurações de instalação ou encaminhamento dos cabos de energia, interagindo com a ocorrência de descargas atmosféricas, conforme a Fig. 3, simulando-se os dois cenários principais de incidência de raio: a) No SPDA e, b) Diretamente nos módulos do sistema.

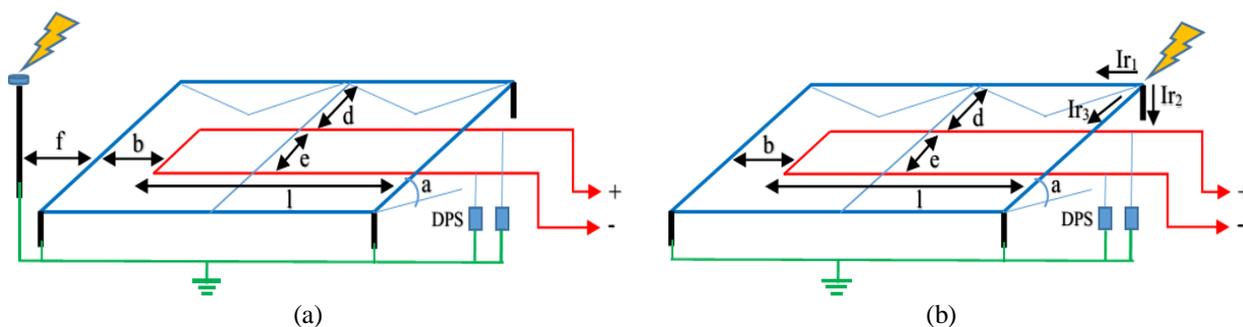


Figura 3 – Cenários de incidência do raio: a) Para-raios e, b) Sistema fotovoltaico.

A parte final foi desenvolvida aplicando-se um modelo matemático elaborado para estimativa da resistência de aterramento e cálculo das variações de tensão elétrica geradas no solo pelo escoamento de descargas atmosféricas no solo, mediante a Lei de Ohm ($V=R.I$), proposto por Cotrim (2009). Os resultados geraram gráficos que foram elaborados considerando-se os efeitos dos gradientes de ionização do solo por campo elétrico, definida na forma de uma zona ao redor do eletrodo instalado no solo, conforme (Kindermann, 2012).

3.1 Tensões elétricas induzidas por raios incidentes no SPDA

Simulando-se o cenário da incidência de raios no SPDA, conforme a Fig. 3.a, a tensão elétrica induzida (U_{ip}) nos circuitos elétricos, sem blindagem do sistema fotovoltaico, pode ser estimada pelas expressões Eq. (1) e (2).

$$U_{ip} = K_c L_m \frac{di}{dt} \quad (1)$$

O K_c é o coeficiente de divisão da corrente entre os condutores de descida disponíveis em um SPDA ($K_c = 1$ para um condutor, $K_c = 0,5$ para dois condutores e $K_c = 0,44$ para 3 ou mais condutores), di/dt é a taxa de variação do impulso de corrente (200, 150 e 100 kA/ μ s em função do nível de proteção NP) e L_m é a indutância mútua entre o condutor de descida do SPDA e qualquer laço de circuito elétrico considerado, estimada conforme Eq. (2).

$$L_m = 0,2m \text{sen}(a) \ln \left(\frac{f+b+l}{f+b} \right) \quad (2)$$

O m é a largura do loop ($m = e$ para o cálculo do modo diferencial ou $m = e + d$ para o cálculo de modo comum), f é a menor distância entre SPDA e os módulos, l é comprimento total dos módulos e a é o ângulo de inclinação.

3.2 Tensões e correntes elétricas induzidas por raios incidentes no sistema fotovoltaico

Simulando-se o cenário da incidência de raios diretamente nos módulos do sistema, conforme a Fig. 3.b, a tensão elétrica induzida (U_{ip}) nos circuitos elétricos pode ser estimada pelas expressões Eq. (1) e (3).

$$L_m = 0,2 \ln \left(\frac{d+e+r}{d+r} \right) l \quad (3)$$

O r é o raio da circunferência equivalente a área da estrutura de suporte do sistema fotovoltaico. O cálculo da corrente curto-circuito induzida (I_{sc}), nos circuitos elétricos sem blindagem do sistema, pode ser estimada pelas expressões Eq. (3) a (5), de acordo com IEC 62305, onde a aplicação da equação Eq. (4) requer que a corrente do raio I seja dividida por 3, correspondendo aos possíveis caminhos disponibilizados pela própria estrutura do sistema fotovoltaico.

$$I_{sc} = K_c I \frac{L_m}{L_s} \quad (4)$$

O I é intensidade da corrente elétrica do raio, cujos valores são 200, 150 ou 100 kA de acordo com o Nível de Proteção (NP-I a IV). O valor de L_s (autoindutância) é calculado pela equação Eq. (5).

$$L_s = 0,8 \sqrt{l^2 + e^2} - 0,8(l + e) + 0,4 \ln \left[\frac{\frac{2e}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{e}{l}\right)^2}} \right] l + 0,4 \ln \left[\frac{\frac{2l}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{e}\right)^2}} \right] e 10^{-6} \quad (5)$$

3.3 Tensões elétricas induzidas no solo por descargas atmosféricas

O sistema de aterramento constituído por um eletrodo pode ser representado por uma haste de cobre fincada no solo, verticalmente. Conforme o modelo proposto por Cotrim (2009) caso a haste seja percorrida por uma corrente, pela Lei de Ohm ($V=R.I$) a haste assumirá um valor de tensão. Neste cenário, valores de tensão medidos em pontos distantes do eletrodo serão cada vez menores, decrescendo na forma de uma curva exponencial conforme o gráfico da Fig. 4. O ponto mais distante e que tende ao infinito assumirá o valor de tensão de 0,0 V.

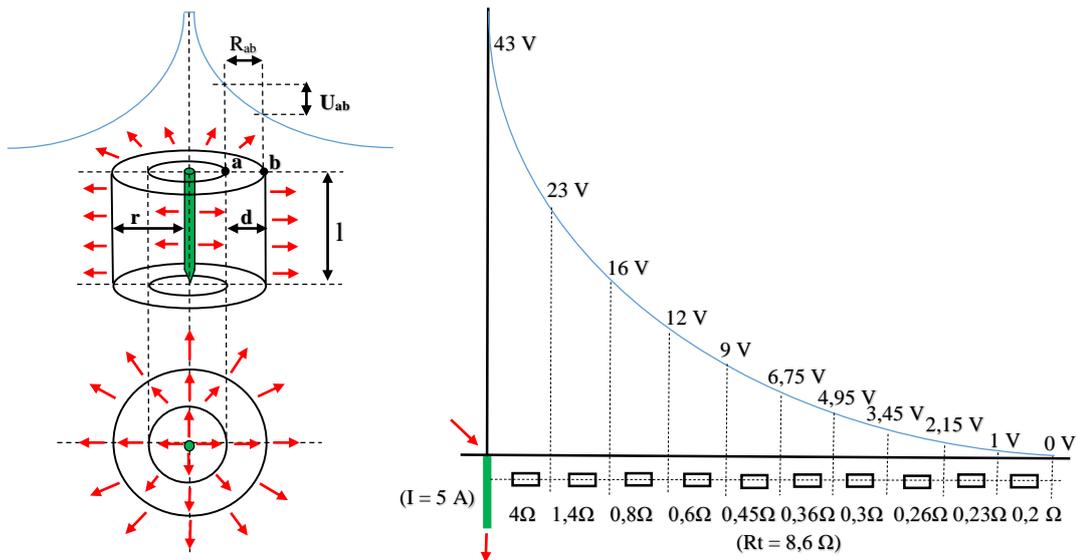


Figura 4 – Queda de tensão a partir de uma haste de aterramento para corrente de 5 A.

O modelo matemático da Fig. 4 foi proposto por Cotrim (2009) à elaboração da curva de queda de tensão no solo e baseou-se na equação da resistência elétrica $R=\rho(l/s)$, onde ρ é a resistividade do solo, l é a distância radial do ponto da haste de terra e s é a seção (área) atravessada pela densidade de corrente originada da haste. O princípio desse modelo considera que o fenômeno de espreadimento da corrente elétrica a partir da haste ocorrerá, exclusivamente, na camada do solo com profundidade equivalente ao comprimento da haste, no sentido radial (horizontal), com resistividade do solo (ρ) constante em toda a extensão dessa camada. Pela Fig. 4, também, observa-se que a corrente atravessa superfícies (áreas) equipotenciais cilíndricas cada vez maiores quanto mais distante se estar da haste.

Destarte, a Eq. (6) resume o método de cálculo para estimativa do valor da resistência elétrica do volume do solo compreendido entre duas superfícies cilíndricas A e B, concêntricas à haste de aterramento, conforme a Fig. 4. E, por fim, com a Lei de Ohm ($V=R.I$) finaliza-se o processo de cálculo da queda de tensão entre duas superfícies equipotenciais.

$$R \cong \rho \frac{d}{2\pi r l} \quad (6)$$

O ρ é a resistividade elétrica da camada do solo, d é a distância entre duas superfícies equipotenciais cilíndricas A e B, r é a distância radial da haste até o ponto médio entre duas camadas cilíndricas consecutivas e l é o comprimento da

haste de aterramento, correspondente a espessura da camada do solo para escoamento da corrente elétrica.

4. RESULTADOS e DISCUSSÃO

O estudo simulou o cenário de um sistema fotovoltaico de 2,65 kWp com 10 módulos de 1,65 x 0,99m, cada, instalado no topo de uma edificação, dispostos linearmente conforme a Fig. 3 e com sistema de para-raios de um só condutor de descida ($k_c = 1$). Os resultados obtidos correspondem às tensões e correntes induzidas nos laços de circuitos elétricos sem blindagem ou em malhas de aterramento, simulados e apresentados na seguinte sequência:

- Tensões elétricas induzidas por raios incidentes em SPDA;
- Tensão e corrente elétrica induzidas por raio incidente diretamente nos módulos, e;
- Tensões elétricas geradas no solo em malha de terra durante o escoamento de um raio pelo SPDA.

4.1 Tensões elétricas induzidas por raios incidentes no SPDA

As Tab. 1 a Tab. 4 apresentam os resultados dos valores estimados das tensões induzidas através de cálculos que utilizaram a série de equações indicadas na metodologia descrita no item 3.1. Considerou-se neste estudo, que foram induzidas tensões elétricas nas instalações do sistema fotovoltaico constituídas por cabos de corrente contínua (c.c) com classe de isolamento 1,8 kV, comprimento (l) de 10,0 m, sem qualquer tipo de blindagem contra indução eletromagnética e com espessura do conjunto isolamento-cobertura de 1,50 mm. Ademais, os cálculos consideraram as tensões induzidas no modo diferencial (Vid) e comum (Vic), além da simulação de cenários com a variação dos seguintes parâmetros:

- Distância de separação entre o condutor de descida do SPDA e a estrutura do sistema fotovoltaico (f);
- Taxa de variação do impulso de corrente de acordo com nível de proteção (NP-I a IV);
- Ângulo de inclinação dos módulos (α);
- C1, cenário dos cabos juntos e roteados pela margem dos módulos;
- C2, cenário dos cabos juntos, mas roteados pelo meio dos módulos;
- C3, cenário dos cabos separados e encaminhados em cada margem oposta dos módulos.

Os resultados das Tab. 1 a Tab. 4 são as estimativas das tensões induzidas em circuitos de corrente contínua de interligação os módulos fotovoltaicos e inversores, tanto em modo diferencial como em modo comum, por unidade de comprimento do circuito. Observou-se que as variações de tensões induzidas foram diretamente proporcionais à variação do ângulo de inclinação (α) dos módulos e da taxa do impulso de corrente ($kA/\mu s$), onde os extremos de 0° e 90° foram respectivamente zero e o valor de pico de uma função senoidal. No entanto, esses valores se mostraram inversamente proporcionais à variação da distância de separação (f) entre o condutor de descida do SPDA e a estrutura do sistema. Outra observação importante é que a variação do ângulo de inclinação (α) modificou os resultados das induções em maior proporção que a alteração da distância de separação (f) entre o SPDA e o sistema. Assim, o acréscimo de 100% nos parâmetros da distância (f) e do ângulo (α) resultaram em variações de - 21% e + 99% nos valores das tensões induzidas, respectivamente. Ademais, as variações dos cenários C1, C2 e C3 demonstraram que o melhor e o pior modo de instalação dos cabos foram, respectivamente, os modos C1 e C3. Por fim, verificou-se que o aumento do comprimento (l) de cabos implicou no aumento diretamente proporcional dos valores das tensões induzidas nos circuitos elétricos.

Tabela 1 - Tensão elétrica induzida em função do nível de proteção ($f = 2,00$ m e $\alpha = 13^\circ$).

CLASSE de PROTEÇÃO			200 kA/ μs (NP-I)		150 kA/ μs (NP-II)		100 kA/ μs (NP-III/IV)	
Cenário	e (mm)	d (mm)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)
C1	3	1,5	0,039	0,058	0,029	0,043	0,019	0,029
C2	3	825	0,039	10,6	0,029	7,92	0,019	5,28
C3	1.650	1,5	18,1	18,1	13,6	13,6	9,04	9,04

Tabela 2 - Tensão elétrica induzida em função do nível de proteção ($f = 1,00$ m e $\alpha = 13^\circ$).

CLASSE de PROTEÇÃO			200 kA/ μs (NP-I)		150 kA/ μs (NP-II)		100 kA/ μs (NP-III/IV)	
Cenário	e (mm)	d (mm)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)
C1	3	1,5	0,049	0,073	0,037	0,055	0,024	0,037
C2	3	825	0,049	13,4	0,037	10,1	0,024	6,70
C3	1.650	1,5	22,9	22,9	17,2	17,2	11,4	11,4

Tabela 3 - Tensão elétrica induzida em função do nível de proteção ($f = 2,00$ m e $\alpha = 6,5^\circ$).

CLASSE de PROTEÇÃO			200 kA/ μ s (NP-I)		150 kA/ μ s (NP-II)		100 kA/ μ s (NP-III/IV)	
Cenário	e (mm)	d (mm)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)
C1	3	1,5	0,019	0,029	0,015	0,022	0,010	0,015
C2	3	825	0,019	5,30	0,015	3,95	0,010	2,65
C3	1.650	1,5	9,04	9,04	6,78	6,78	4,52	4,52

Tabela 4 - Tensão elétrica induzida em função do nível de proteção ($f = 1,00$ m e $\alpha = 6,5^\circ$).

CLASSE de PROTEÇÃO			200 kA/ μ s (NP-I)		150 kA/ μ s (NP-II)		100 kA/ μ s (NP-III/IV)	
Cenário	e (mm)	d (mm)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)	Vid (kV/m)	Vic (kV/m)
C1	3	1,5	0,024	0,037	0,018	0,028	0,012	0,018
C2	3	825	0,024	6,70	0,018	5,00	0,012	3,35
C3	1.650	1,5	11,4	11,4	8,58	8,58	5,72	5,72

4.2 Tensões e correntes elétricas induzidas por raios incidentes no sistema fotovoltaico

Os resultados apresentados na Tab. 5 representam os valores estimados das tensões e correntes induzidas utilizando-se a série de equações descritas na metodologia do item 3.2. As características técnicas do sistema de microgeração fotovoltaica consideradas neste estudo são as mesmas do projeto do sistema fotovoltaico descrito no item 4.1, onde as tensões e corrente elétrica induzidas foram calculadas. Desta forma, os valores das tensões (V_i) e das correntes (I_i) elétricas induzidas por surtos ou pulsos eletromagnéticos (10/350 μ s) consideraram a simulação de cenários com a variação dos seguintes parâmetros:

- Taxa de variação do impulso de corrente de acordo com nível de proteção (NP I - IV).
- Cenários C1 a C3, análogos aos simulados no item 4.1.

Os parâmetros do ângulo de inclinação (α) dos módulos e a distância (f) entre o SPDA e o sistema, por não terem influência nos valores induzidos, não foram considerados para análise de resultados. As tensões elétricas estimadas foram apresentadas por unidade de comprimento (extensão) do circuito elétrico. Mas, observou-se que as variações de tensões induzidas foram diretamente proporcionais à variação da taxa do impulso de corrente (kA/ μ s). Ademais, as variações entre os cenários C1, C2 e C3 demonstram que a melhor e a pior situação de instalação dos cabos foram, respectivamente, os modos C1 e C3. Os valores do cenário C3 foram desconsiderados, cujos valores foram muito maiores que em C1 e C2, comprovando-se o alto risco dessa configuração sem SPDA. Bem como, constatou-se que o aumento do comprimento (l) dos cabos elétricos implicou no aumento diretamente proporcional das tensões e correntes induzidas.

Tabela 5 - Tensão e corrente elétrica induzida em função do nível de proteção.

Cenário	e (mm)	d (mm)	200 kA/ μ s (NP I)		150 kA/ μ s (NP II)		100 kA/ μ s (NP III-IV)	
			V_i (kV/m)	I_i (kA)	V_i (kV/m)	I_i (kA)	V_i (kV/m)	I_i (kA)
C1	3	1,5	8,71	6,56	6,53	4,92	4,36	3,28
C2	3	825	6,41	4,83	4,81	3,62	3,21	2,41

4.3 Tensões elétricas induzidas no solo por descargas atmosféricas

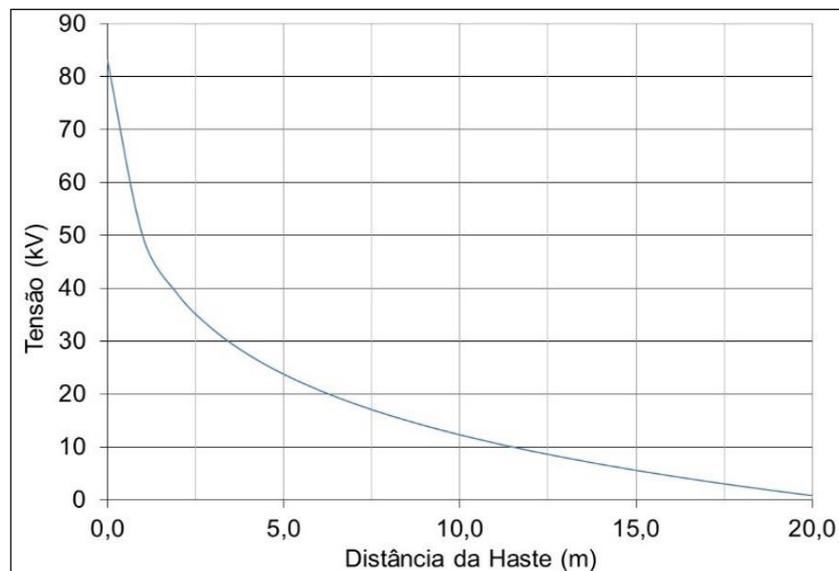
Os resultados com a aplicação da metodologia descrita no item 3.3 estão apresentados nas Tab. 6 e Tab. 7, onde se utilizou a Eq. (6) para se obter a resistência elétrica das camadas cilíndricas do solo e com a Lei de Ohm ($V=R.I$) se obteve o valor da queda de tensão em trechos com espaçamentos de 1,0 m. Também, foram simulados cenários variando-se as correntes do raio na haste (I_r), a resistividade elétrica do solo (ρ) e o comprimento da haste de aterramento (l).

Os valores listados na Tab. 6 apresentam a queda de tensão na superfície do solo até 20 m de distância da haste de terra, em passos de 1,0 m. Foram aplicados os mesmos parâmetros (I_r , ρ e l) e recalculados os valores das quedas de tensão elétrica até a distância de 1.000 m da haste, mas não foram constatadas quaisquer alterações nos valores dos vinte primeiros trechos de 1,0 m da referida tabela. Contudo, os valores da queda de tensão somente apresentaram variações de forma diretamente proporcional com a variação da corrente na haste (I_r) e da resistividade elétrica do solo (ρ). Mas, a variação foi inversamente proporcional com a variação do comprimento da haste (l).

O gráfico apresentado na Fig. 5 reproduz a distribuição das tensões elétricas no solo e foi compilado dos dados da 1ª. coluna da Tab. 6 com os seguintes parâmetros: $I = 10$ kA, $\rho = 50 \Omega.m$ e $l = 2,40$ m. A diferença de potencial elétrico entre dois pontos quaisquer tomados na referida curva indicará o valor da queda de tensão (tensão de passo).

Tabela 6 - Queda de tensão elétrica no solo a partir da haste.

Sa-Sb (m)	Ir = 10 kA	Ir = 30 kA	Ir = 10 kA	Ir = 30 kA	Ir = 10 kA	Ir = 30 kA
	$\rho = 50 \Omega.m$	$\rho = 50 \Omega.m$	$\rho = 100 \Omega.m$			
	l = 2,40 m	l = 2,40 m	l = 2,40 m	l = 2,40 m	l = 3,00 m	l = 3,00 m
ΔV (kV)						
0,0 - 1,0	33,16	99,47	66,31	198,94	53,05	159,15
1,0 - 2,0	11,05	33,16	22,10	66,31	17,68	53,05
2,0 - 3,0	6,63	19,89	13,26	39,79	10,61	31,83
3,0 - 4,0	4,74	14,21	9,47	28,42	7,58	22,74
4,0 - 5,0	3,68	11,05	7,37	22,10	5,89	17,68
5,0 - 6,0	3,01	9,04	6,03	18,09	4,82	14,47
6,0 - 7,0	2,55	7,65	5,10	15,30	4,08	12,24
7,0 - 8,0	2,21	6,63	4,42	13,26	3,54	10,61
8,0 - 9,0	1,95	5,85	3,90	11,70	3,12	9,36
9,0 - 10,0	1,75	5,24	3,49	10,47	2,79	8,38
10,0 - 11,0	1,58	4,74	3,16	9,47	2,53	7,58
11,0 - 12,0	1,44	4,32	2,88	8,65	2,31	6,92
12,0 - 13,0	1,33	3,98	2,65	7,96	2,12	6,37
13,0 - 14,0	1,23	3,68	2,46	7,37	1,96	5,89
14,0 - 15,0	1,14	3,43	2,29	6,86	1,83	5,49
15,0 - 16,0	1,07	3,21	2,14	6,42	1,71	5,13
16,0 - 17,0	1,00	3,01	2,01	6,03	1,61	4,82
17,0 - 18,0	0,95	2,84	1,89	5,68	1,52	4,55
18,0 - 19,0	0,90	2,69	1,79	5,38	1,43	4,30
19,0 - 20,0	0,85	2,55	1,70	5,10	1,36	4,08

Figura 5 - Curva da tensão elétrica no solo ($I = 10 \text{ kA}$, $\rho = 50 \Omega.m$ e $l = 2,40 \text{ m}$).

Os dados da 1ª. coluna da Tab. 6, também, foram utilizados como estudo de caso simulando-se uma edificação com três sistemas de aterramento independentes, conforme a Fig. 6. A haste de terra H1 representa o aterramento do SPDA no marco 0,0 m, a haste H2 aterra o conjunto inversor/módulo do sistema na cota 10,0 m e a haste H3 é o aterramento funcional da rede elétrica (medição) na cota 20,0 m. No caso de incidência de um raio no SPDA (H1), as hastes sem equipotencialização apresentarão diferenças de potenciais (ddp) ou queda de tensão, conforme a Tab. 7:

- H1-H2 = 70,7 kV (SPDA - Inversor/Módulos)
- H2-H3 = 11,5 kV (Inversor/Módulos - Quadro de Medição de Energia)
- H1-H3 = 82,2 kV (SPDA - Quadro de Medição de Energia)

A solução é a interligação entre os sistemas de aterramento isolados H1, H2 e H3 com o barramento de equipotencialização principal (BEP), que por sua vez deve estar interligado em uma malha de aterramento principal ou

anel de fundação da edificação, conforme a Fig. 1. A solução equivocada seria uma simples interligação entre as hastes H2 com H3, visto que a diferença de potencial (ddp) se manteria pelo solo, possibilitando a circulação da corrente de descarga atmosférica em instalações e equipamentos, com risco de danos. A falta de equipotencialização levará as sobretensões induzidas no solo aos diversos tipos de sistemas existentes na edificação, exigindo a atuação dos dispositivos de proteção contra surtos ou DPS 1 a 4, conforme a Fig. 6.

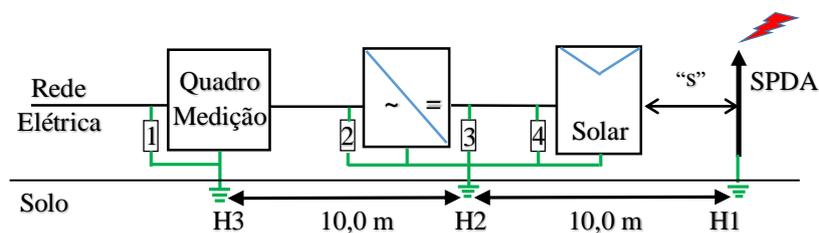


Figura 6 - Sistemas de aterramento independentes e sem equipotencialização.

Os resultados da Tab. 7 foram compilados dos dados da Tab. 6 com os espaçamentos de 10,0 m da Fig. 6.

Tabela 7 - Diferença de potencial entre as hastes isoladas H1, H2 e H3.

Sa-Sb (m)	I = 10 kA	I = 30 kA	I = 10 kA	I = 30 kA	I = 10 kA	I = 30 kA
	$\rho = 50 \Omega.m$	$\rho = 50 \Omega.m$	$\rho = 100 \Omega.m$			
	l = 2,40 m	l = 2,40 m	l = 2,40 m	l = 2,40 m	l = 3,00 m	l = 3,00 m
ΔV (kV)						
0,0 - 10,0	70,7	212,2	141,5	424,4	113,2	339,5
10,0 - 20,0	11,5	34,5	22,9	68,9	18,3	55,1
0,0 - 20,0	82,2	246,7	164,4	493,3	131,5	394,6

5. CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou quantificar os efeitos eletromagnéticos das descargas atmosféricas, diretas e indiretas, na forma de tensões e correntes elétricas induzidas em sistemas de microgeração fotovoltaica. E a avaliação do gerenciamento de risco, para implantação do modelo de PDA mais efetivo, adicionalmente, deve considerar novos parâmetros de equacionamento, entre eles: a vida útil do sistema SFV para garantia do retorno financeiro deste investimento, proteção patrimonial de veículos elétricos durante recargas de energia e etc.

Para compreensão dessa realidade, foram definidos dois modelos para estudo, considerando-se estruturas e circuitos não-blindados. No primeiro, o SPDA da edificação é atingido pela descarga atmosférica, e no segundo modelo, sem SPDA, os módulos são atingidos por raios. Desta forma, o segundo modelo comprovou a hipótese deste trabalho devido aos maiores valores de tensões e correntes induzidas, aumentando a possibilidade de danos nos sistemas.

Comprovou-se, ainda, que os valores de V e I induzidos são fatores determinantes da classe do DPS para proteção de instalações elétricas contra falhas, justificando-se o uso de classes mais robustas em edificações sem SPDA. Com base nesse estudo, demonstrou-se que a corrente do raio se dissipa no solo através dos sistemas de aterramentos na forma de linhas equipotenciais de tensão, de forma exponencial e sob a égide da Lei de Ohm (queda de tensão) dependendo da intensidade da corrente, resistividade do solo e comprimento da haste de terra.

E que, para completar a efetividade das medidas de proteção do conjunto SPDA, DPS e sistemas de aterramento contra os efeitos eletromagnéticos das descargas atmosféricas, a equipotencialização deve compor a base fundamental da proteção contra sobretensões e sobrecorrentes em instalações elétricas, inversores, módulos fotovoltaicos e etc.

Agradecimentos

Agradecemos a Universidade Estadual do Ceará e as empresas SATTAV Eng., TECMAN SERV Eng. e TRIEXE Tecnologia pelo apoio ao desenvolvimento desse artigo, parte integrante da dissertação de mestrado do autor.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, N. I., Ab-Kadir, M. Z. A., Izadi, M., Azis, N., Radzi, M. A. M., Zaini, N. H., & Nasir, M. S. M., 2018. Lightning Protection on Photovoltaic Systems: A Review on Current and Recommended Practices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- ANEEL, 2012. Resolução Normativa N° 482, Condições Gerais ao Acesso da Microgeração e Minigeração Distribuída

- aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- ANEEL, 2015. Resolução Normativa N° 687, alteração da RN-482/2012 e dos Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- ANEEL, 2017. Nota Técnica n° 0056/2017-SRD/ANEEL, Atualização das Projeções de Consumidores Residenciais e Comerciais com Microgeração Solar Fotovoltaicos no Horizonte 2017-2024, ANEEL, Brasília.
- ANEEL, 2019. Banco de Informações da Geração – BIG, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- Assaife, B. M., 2013. Aterramento e Proteção de Sistemas Fotovoltaicos, Monografia de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, POLI/UFRJ.
- CAMARA dos DEPUTADOS, 2017. Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas, Relatório Técnico, Brasília.
- CEPEL-CRESESB, 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Rio de Janeiro.
- Cotrim, A. A. M. B., 2009. Instalações elétricas, Pearson Prentice Hall do Brasil.
- DEHN, 2014. Lightning Protection Technical Guide, 3rd Updated Edition, Copyright DEHN & SÖHNE, Germany.
- EPE, 2019. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília.
- EPE, 2019. Balanço Energético Nacional, Relatório Síntese Ano Base 2018, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília.
- EPE, 2019. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília.
- Garcia, F. R. P., 2016. Análise dos Potenciais Elétricos e Avaliação dos Riscos relacionados às Tensões de Toque e de Passo devidos à Incidência de Descarga Atmosférica em Edificação, Monografia de Graduação, UFC.
- INPE-ELAT, 2019. Grupo de Eletricidade Atmosférica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, último acesso em 04/12/2019: <http://www.inpe.br/webelat/homepage>
- Kindermann, G., Campagnolo, J. M., 2012. Aterramento Elétrico, Sagra-DC Luzzatto.
- Lisboa, B. R., 2018. Estudo de Proteção contra Descargas Atmosféricas diretas em uma Unidade de Minigeração Fotovoltaica Distribuída, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará.
- Mamede, J., 2000. Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis, Rio de Janeiro, Editora Érica.
- Nascimento, D. A., Loschi, H. J., Iano, Y., Carvalho, S. R. M. 2016. Instalações de Sistemas de Geração Solar Fotovoltaica, Brazilian Technology Symposium.
- NBR, 5410, 2004. Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR, 5419, 2015. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Osório, E. A. A., Pan, A. C., 2018, Dimensionamento de um Sistema de Aterramento em uma Usina Solar, VII CBENS - VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Pereira, F., de Paula, H., Filho, B. J. C., Brito, J. A. S., 2016. Aterramento de Instalações de Geração Fotovoltaica: Abordagem sob o Prisma da Compatibilidade Eletromagnética Conduzida, VI CBENS - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- Pons, E., Tommasini, R., 2013. Lightning Protection of PV Systems, Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE Publisher.
- Sueta, H. E., 2005. Uso de Componentes Naturais de Edificações como parte integrante do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Visão Relativa aos Danos Físicos, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Sueta, H. E., Mocelin, R., Zilles, R., Bomeisel, E., Obase, B. F., 2014. Proteção de Sistemas Fotovoltaicos contra Descargas Atmosféricas Diretas. ENIE - XV Encontro Nacional de Instalações Elétricas, São Paulo.
- Tavares, S. J. S., 1993. Sistema Coaxial de Proteção, Revista Tecnologia, Universidade de Fortaleza - UNIFOR.

LIGHTNING PROTECTION TO ROOFTOP PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: TECHNICAL-SCIENTIFIC STUDY

Abstract. *The growing demand for photovoltaic microgeneration systems in Brazil follows a worldwide trend. The cost of solar modules and efficiency of cells contribute for its expansion. The Brazilian energy market is regulated with laws for generation and connection in distribution grid. The installation on rooftops can ease a lightning strike through photovoltaic modules that can get the ground through other components of the system. The operational, maintenance and aging (lifespan) problems aggravates this scenario. In addition, there is a challenge of understanding how the functions of Surge Protection Device (SPD) and Lightning Protection System (LPS) are complementary to effective protection against such discharges, where the Surge Protection Device (SPD) reduces electrical faults and the Lightning Protection System (LPS) drives the lightning flash energy to soil. This work aims to estimate overvoltage and overcurrent values induced by lightning in photovoltaic systems, in different building configurations with and without Lightning Protection System (LPS), as well as it has calculated the drop of voltage on the ground or step voltage, and its effects on some types of grounding systems. The methodology involves the application of electromagnetic formulas for calculating inductions in solar systems and the use of Ohm's Law for equipotential soil stratification. The results were obtained through specific methodologies of voltage (V) and current (I) values, in various scenarios, for risk assessment in solar photovoltaic systems (SPS). The work concluded that the installation of Lightning Protection System (LPS) increases the protection of the solar system, reducing the induced voltage (V) and current (I) in structures and electrical installations. And the equipotentialization is as important as the grounding system, completing the preventive system against lightning strikes.*

Key words: IEC 62.305, Earthing, LPS