

Análise da Inserção de SPDA em Sistemas Fotovoltaicos

Jackson Nogueira Feitosa
Dep. De Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
jacsonfeitosa16@gmail.com

Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra
Dep. De Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
fkv@ufersa.edu.br

Resumo — O Brasil é considerado recordista em incidência de descargas atmosféricas, anualmente cerca de 78 milhões de raios incidem sobre o território nacional, fato justificado pelo seu clima e extensão territorial. O país também possui um grande potencial em geração de energia solar com expressivo crescimento nos últimos anos. Em seu funcionamento, os sistemas fotovoltaicos estão expostos à diversas intempéries como, por exemplo, à incidência de descargas atmosféricas, tendo em vista que algumas de suas instalações ocupam grandes áreas sendo alocadas na parte superior de edifícios ou sobre o solo. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo realizar o estudo da inserção de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em instalações fotovoltaicas sobre as diretrizes da NBR 5419:2015. Esses sistemas de geração possuem um alto valor agregado e qualquer dano pode ocasionar perdas econômicas e danos físicos aos seres humanos. Assim, esta pesquisa realiza um estudo utilizando dados da minigeração fotovoltaica de 150,8 kWp localizada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, campus Mossoró, RN. Os resultados se mostraram satisfatórios e foi possível determinar em qual porte de usina solar fotovoltaica um SPDA se faz necessário para sua proteção.

Palavras chaves — *descargas atmosféricas, energia solar, raios, sistemas fotovoltaicos, geração fotovoltaica, SPDA*

I. INTRODUÇÃO

A energia solar obteve grandes avanços nos últimos anos devido à crescente busca por fontes alternativas renováveis de energia elétrica. Essa busca ocorre primordialmente devido à necessidade de diversificação e complementariedade da matriz elétrica e energética utilizando-se de fontes renováveis de energia, como também devido às questões ambientais, visando diminuir a emissão de gases nocivos na atmosfera. A nível nacional essa evolução é notada pelo fato de o Brasil já acumular a potência instalada de aproximadamente 9,0 GW em sistemas fotovoltaicos, e deste total, 5,4 GW estão alocados em geração distribuída que corresponde a algo em torno de 470 mil sistemas instalados [1].

Para a boa captação desse potencial fotovoltaico, os painéis solares devem ser instalados sobre telhados de edifícios, residências ou em estruturas fixadas em solo. Devido a grande exposição à radiação solar, esses equipamentos se tornam susceptíveis a várias intempéries como: chuva, vento e descargas atmosféricas. A incidência de um raio sob a estrutura pode danificar equipamentos,

causar interrupção na geração de energia, ferimentos a seres vivos e prejuízos econômicos [2].

Segundo relatório desenvolvido em 2020 pelo Grupo de Eletricidade Atmosféricas (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil se destaca mundialmente no número de descargas atmosféricas, incidindo sobre seu território 77,8 milhões de raios anualmente devido à sua extensão territorial, localização e seu clima tropical [3]. A análise criteriosa para o uso de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas é essencial visando buscar diminuir os riscos de prejuízos financeiros e de vida humana.

Com isso, este trabalho visa realizar a análise da inserção de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em sistemas fotovoltaicos atendendo às orientações dispostas na NBR 5419:2015 – Parte II. Dessa forma, será realizado um estudo na minigeração distribuída de 150,8 kWp da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, localizada em Mossoró, Rio Grande do Norte.

A cidade possui uma densidade de descargas atmosféricas de aproximadamente 3,025 raios por km²/ano, ocupando a posição 3262 no *ranking* nacional [4]. Conforme Anexo F da Parte II da NBR 5419:2015 esta posição é justificada pela sua localização ser na região Nordeste do país, e concentrações maiores de descargas tenderem a ocorrer nas demais regiões.

Serão coletados todos os dados para a realização do gerenciamento de risco. Posteriormente, os riscos descritos na normativa serão calculados para a determinação da necessidade de um SPDA para a proteção do sistema estudado.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentadas as características que constituem as unidades de micro e minigeração distribuída de fonte fotovoltaica e sua atuação no panorama brasileiro. Além disso, será tratado sobre as características de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas e os parâmetros para avaliar sua necessidade, além de sua aplicação em sistemas fotovoltaicos.

A. Micro e Minigeração Distribuída Fotovoltaica

A conversão da energia solar em elétrica é obtida através de módulos fotovoltaicos e inversores, sendo o primeiro responsável por captar a energia solar e transformá-la em

corrente elétrica contínua, e o segundo responsável por converter esta em corrente alternada. Sistemas solares podem ser conectados à rede elétrica da concessionária local, *on-grid*, ou desconectados, *off-grid*. A Fig. 1 mostra o esquema de uma instalação *on-grid*.

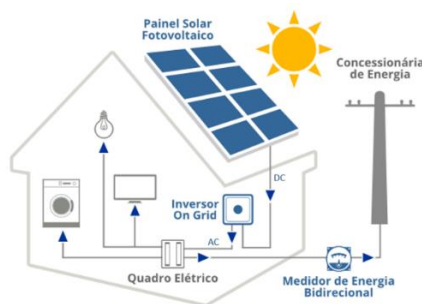


Fig. 1. Sistema fotovoltaico *on-grid* [5].

Instalações caracterizadas pela Fig. 1, são categorizadas em micro e minigeração distribuída de fonte solar fotovoltaica. Conforme descrito em [6], essas categorias consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais que utilizam fontes renováveis para geração de energia elétrica conectadas à rede elétrica da concessionária, sendo a microgeração constituída por instalações com menos de 75 kW de potência instalada e a minigeração por sistemas acima desse valor até 5 MW.

É possível visualizar na Fig. 2 e Fig. 3 a disposição por segmentos da geração distribuída fotovoltaica no Brasil. Identifica-se que o setor residencial possui o maior número de sistemas instalados, cerca de 74,9% do valor total, e de potência instalada, em torno de 40,4%. O setor comercial e serviços possui valores próximos da potência instalada do setor residencial, por seu consumo de energia ser maior, há a necessidade de uma potência instalada de geração superior.

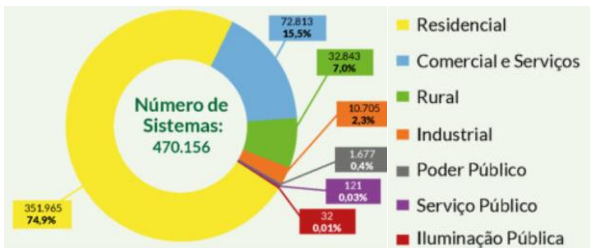


Fig. 2. Número de sistemas instalados no Brasil por segmento. Adaptado de [1].

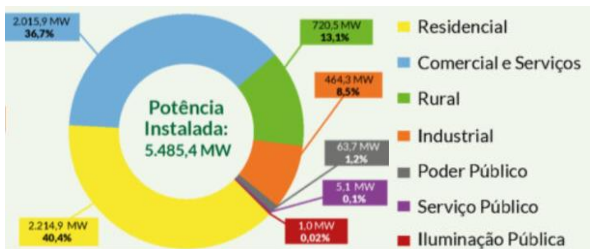


Fig. 3. Potência instalada de geração distribuída fotovoltaica no Brasil por segmento. Adaptado de [1].

B. Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

A NBR 5419:2015 - Proteção contra Descargas Atmosféricas, define SPDA como um sistema utilizado para reduzir os danos físicos originados por uma descarga atmosférica que incide sobre uma estrutura. É constituído por três subsistemas:

- Subsistema de captação: parte de um SPDA externo que se utiliza de elementos metálicos como hastes, condutores em malha ou cabos em catenária que são posicionados e projetados para a interceptação de descargas atmosféricas.
- Subsistema de descida: tem a finalidade de conduzir a descarga do subsistema de captação para o subsistema de aterramento.
- Subsistema de aterramento: é responsável por conduzir e dispersar a descarga atmosférica no solo.

A normativa também define que a ocorrência de um raio sobre uma edificação ou equipamento pode gerar danos físicos aos seres humanos e falhas em sistemas internos, acarretando em perdas de vida humana, patrimônio cultural, serviços e econômicas. Inclusive, aponta as características da estrutura que devem ser analisadas para identificar se a mesma necessita de um SPDA e como projetá-lo.

B.1. Gerenciamento de Risco

De acordo com a NBR 5419-2:2015, para definir se determinada estrutura necessita ou não de SPDA se faz necessário a realização de uma análise de risco. Para este estudo, as fontes de danos devem ser analisadas, sendo elas: descargas atmosféricas na estrutura (S_1); perto da estrutura (S_2); na linha (S_3); perto da linha (S_4).

As descargas provenientes dessas quatro fontes, podem causar três tipos de danos, que são: ferimentos a seres vivos (D_1); danos físicos (D_2); e falha de sistemas eletrônicos (D_3). Tais danos podem gerar sozinho ou combinados diferentes tipos de perdas, sendo elas classificadas em quatro categorias: perdas de vida humana (L_1); de serviço público (L_2); de patrimônio cultural (L_3); e de valores econômicos (L_4).

A Fig. 4 caracteriza os tipos de perdas associadas aos tipos de danos e fontes de descargas atmosféricas.

Descarga atmosférica		Estrutura	
Ponto de impacto	Fonte de danos	Tipo de danos	Tipo de perdas
	S_1	D_1 D_2 D_3	L_1 , L_4 ^a L_1 , L_2 , L_3 , L_4 L_1 ^b , L_2 , L_4
	S_2	D_3	L_1 ^b , L_2 , L_4
	S_3	D_1 D_2 D_3	L_1 , L_4 ^a L_1 , L_2 , L_3 , L_4 L_1 ^b , L_2 , L_4
	S_4	D_3	L_1 ^b , L_2 , L_4

^a Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos.
^b Somente para estruturas com risco de explosão ou para hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos podem imediatamente colocar em perigo a vida humana.

Fig. 4. Tipos de perdas e danos associados as fontes de danos [7].

Para cada perda há um risco associado, R_1 a R_4 respectivamente, que deve ser avaliado de acordo com os cálculos de suas componentes de riscos R_A , R_B , R_C , R_M , R_U , R_V , R_W e R_Z . Elas são divididas em descargas atmosféricas na estrutura, perto da estrutura, em uma linha conectada a estrutura e perto da linha. As componentes relacionadas às descargas na estrutura são:

- R_A : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora nas zonas até 3 m ao redor dos condutores de descidas.
- R_B : componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente.
- R_C : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP.

As componentes de risco para descargas próximas a estrutura são:

- R_M : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP.

Para descargas na linha conectada:

- R_U : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura.
- R_V : componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura) devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ou ao longo das linhas.
- R_W : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta

Para descargas próximas a linha conectada:

- R_Z : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta

Através da Equação (1) é possível obter as componentes de riscos.

$$R_x = N_x \times P_x \times L_x \quad (1)$$

Onde, N_x é o número de eventos perigosos por ano, P_x a probabilidade de dano a estrutura e L_x é a perda consequente. A Tab. I ilustra o cálculo das componentes de riscos de acordo com os tipos e fontes de danos.

TABELA I. CÁLCULO DAS COMPONENTES DE RISCOS DE ACORDO COM O TIPO E FONTE DE DANO

Danos	Fonte de danos			
	S1 Descarga atmosférica na estrutura	S2 Descarga atmosférica perto da estrutura	S3 Descarga atmosférica na linha conectada	S4 Descarga atmosférica perto da linha conectada
D1 Ferimentos a seres vivos devido a choque elétrico	$R_A = N_D \times P_A \times L_A$		$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U$	
D2 Danos físicos	$R_B = N_D \times P_B \times L_B$		$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V$	
D3 Falha de sistemas eletroeletrônicos	$R_C = N_D \times P_C \times L_C$	$R_M = N_M \times P_M \times L_M$	$R_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W$	$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z$

Fonte: [7].

Com as componentes de riscos calculadas, é possível obter os riscos R_1 a R_4 a partir da Equação (2), Equação (3), Equação (4) e Equação (5).

$$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1} \quad (2)$$

$$R_2 = R_{B2} + R_{C2} + R_{M2} + R_{V2} + R_{W2} + R_{Z2} \quad (3)$$

$$R_3 = R_{B3} + R_{V3} \quad (4)$$

$$R_4 = R_{A4} + R_{B4} + R_{C4} + R_{M4} + R_{U4} + R_{V4} + R_{W4} + R_{Z4} \quad (5)$$

Após computados os valores de cada tipo de risco, deve-se compará-los com o valor de risco tolerável descrito pela NBR 5419:2015. Assim, se o valor de risco encontrado for menor que o risco tolerável determinado para cada tipo de perda, a instalação não necessitará de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas e caso o contrário ocorra, o sistema necessitará. A Tab. II mostra os valores de risco tolerável.

TABELA II. VALORES DE RISCO TOLERÁVEL

Tipo de Perda		RT(γ^{-1})
L_1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
L_2	Perda de serviço público	10^{-3}
L_3	Perda de patrimônio cultural	10^{-4}

Fonte: [7].

Para a análise da perda de valores econômicos L_4 , um estudo apresentado no Anexo D da NBR 5419:2015 – Parte II, deve ser realizado. Porém se não for possível obter os dados para essa avaliação, a norma define que o valor de risco tolerável igual a 10^{-3} pode ser considerado.

É permitido o estudo da estrutura como uma única zona definida Z_S , porém usar essa definição pode levar a adoção de soluções de proteção mais onerosas já que elas devem ser adotadas para toda a zona. Neste caso é legítimo dividi-la em múltiplas zonas Z_S . Dessa forma, o projetista tem maior possibilidade de analisar as componentes de riscos associadas às características de cada parte da estrutura e

escolher as medidas de proteção mais adequadas para cada zona. O risco total para essa situação é a soma dos riscos de todas as zonas que compõem a estrutura.

C. SPDA em Sistemas Fotovoltaicos

Nos dias atuais, a geração de energia elétrica que se utiliza do sistema de energia solar com módulos fotovoltaicos instalados sobre telhados ou em solo, tornaram esses equipamentos expostos às descargas atmosféricas diretas e indiretas devido à sua interface voltada para captação da radiação solar. O potencial de produção de energia elétrica é diretamente dependente da área de captação dos módulos fotovoltaicos. Dessa forma, quanto maior o porte do sistema, maior será o número de módulos e o risco de exposição a descargas atmosféricas [8].

Segundo [9], o uso de proteção contra descargas atmosféricas é recomendado nessas instalações, com a finalidade de evitar grandes danos aos equipamentos integrantes da geração fotovoltaica. Os riscos e a eventual inevitabilidade de proteção contra raios devem ser analisados em projeto e assim, dimensionar e utilizar corretamente os dispositivos de proteção para a diminuição e erradicação das falhas.

Assim, em instalações fotovoltaicas o sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve proteger toda área abrangida pelos módulos fotovoltaicos e a edificação que serve de abrigo para os equipamentos de condicionamento de potência. Vale salientar que o sistema tem de estar interligado a um conjunto de aterramento adequado, bem como o inversor, dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) e o quadro de aterramento do quadro geral da instalação [10]. A Fig. 5 demonstra uma ilustração de como o sistema fotovoltaico deve ser protegido e a Fig. 6 uma situação real.

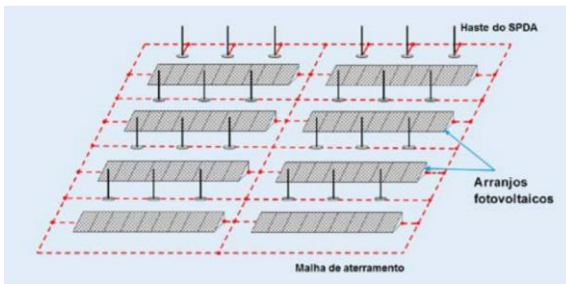


Fig. 5. Layout de um SPDA em um sistema fotovoltaico [11].



Fig. 6. Instalações reais de um SPDA em um sistema fotovoltaico [12].

III. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada como instrumento de pesquisa a usina fotovoltaica de 150,8 kWp de potência instalada, localizada na UFERSA, Campus Mossoró, RN. É composta por 580 módulos fotovoltaicos de 260 kWp interligados a 10 inversores de 15 kW, trifásicos. A energia gerada é injetada na rede de distribuição da Universidade através de um transformador de 150 kVA, 13800/380 V.

Os painéis fotovoltaicos estão alocados em uma estrutura metálica, com o ponto mais alto à 1,7 m do solo, distribuídos em 5 arranjos com 116 módulos cada e possuem aterramento. O solo é protegido por uma camada de brita para evitar o surgimento de tensões de passo. Além da área de captação, a minigeração também é composta por uma pequena edificação que é o abrigo para os inversores, quadro elétrico, *stringboxes* e demais equipamentos. Na estrutura não existe proteção de SPDA e está inserida em um ambiente urbano, porém está localizada de forma isolada dos demais prédios da Universidade. O layout da usina é mostrado na Fig. 7.



Fig. 7. Layout da minigeração fotovoltaica da UFERSA – Campus Mossoró [13].

Os módulos fotovoltaicos são conectados aos inversores através de cabos de 4,00 mm² com tensão máxima suportável de 1 kV em eletroduto subterrâneo. Durante a inspeção visual como também no estudo do projeto executivo, não foi identificado nenhum tipo de blindagem nos cabos de energia contínua e alternada. Vale salientar que na região de captação não há aviso contra choques elétricos e linha de sinal conectada.

A edificação onde os inversores são alocados é constituída por uma estrutura de alvenaria com piso de concreto, conforme mostra a Fig. 8.



Fig. 8. Abrigo dos inversores da minigeração fotovoltaica da UFERSA – Campus Mossoró [Autoria própria].

Na estrutura da Fig. 9 adentram os cabos provenientes dos painéis, interligados a dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) Classe II de corrente contínua alocados em suas respectivas *stringbox*. Os circuitos terminais dos inversores são conectados nos barramentos fase, neutro e terra do quadro geral. O circuito de saída para o transformador elevador é conectado a um DPS de corrente alternada Classe II. O quadro elétrico é provido de aviso de riscos de choques elétricos. Na Fig. 10 é possível visualizar um diagrama unifilar simplificado de um circuito da usina com suas proteções.

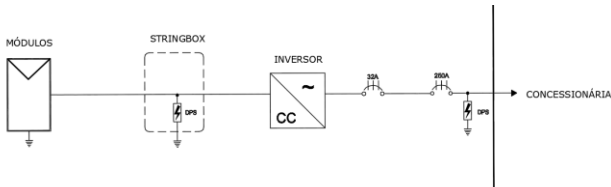


Fig. 9. Diagrama simplificado de um circuito da minigeração fotovoltaica da UFERSA – Campus Mossoró [Autoria própria].

Na edificação dos inversores também é introduzida uma linha de sinal, de forma aérea, para a comunicação dos dados de produção do inversor para um servidor. Esta linha é composta por cabos de fibra ótica. Na região exterior ao abrigo estão dispostos extintores de pó químico e CO_2 .

Para o cálculo do gerenciamento de risco, foi desenvolvida uma planilha eletrônica automatizada, de acordo com os parâmetros descritos na NBR 5419-2:2015. A planilha utiliza características da estrutura e das linhas de energia e sinal conectadas como parâmetros de entradas para a análise da inserção de um SPDA ao sistema.

Neste trabalho, serão analisadas duas situações distintas: toda a estrutura principal como uma zona única e posteriormente com duas zonas, sendo elas divididas em zona de captação, onde os módulos estão alocados, e a zona de transformação, onde os inversores estão alocados.

IV. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentadas as componentes de riscos obtidas em cada situação analisada, bem como o risco total mensurado. O valor calculado é comparado com o risco tolerável descrito pela NBR 5419:2015 para cada tipo de perda conforme a Tab. II deste trabalho. Vale salientar que as componentes relacionadas às perdas do tipo L_2 e L_3 não foram mensuradas, pois não se trata de uma instalação que possui algum tipo serviço público ou patrimônio cultural.

O estudo para o risco relacionado às perdas de vidas humanas, considerou o número médio de 20 pessoas com duração de permanência de 8 horas por ano na estrutura. Pois, a usina é objeto de estudo de vários discentes e docentes da instituição, além de receber visitas de turmas de alunos da graduação e workshops realizados durante o ano.

Para a avaliação do Risco R_4 , relacionado às perdas de valor econômico foi considerado o valor representativo de risco tolerável igual a 10^{-3} . Porque, não é de conhecimento os valores da estrutura, do conteúdo das zonas e dos sistemas internos. Por consequente, não é possível realizar

uma avaliação de risco de acordo com o Anexo D da NBR 5419-2 devido à indisponibilidade desses dados.

A. Análise da Usina Fotovoltaica como Zona única

Para esta análise, foi considerada a cerca metálica (aproximadamente 44 m de comprimento e 65 m de largura) que resguarda a usina como os limites da zona. A altura considerada foi a maior, os 3 m do abrigo dos inversores, tratando a estrutura como o bloco retangular. A Fig. 10 mostra a vista aérea da Zona.



Fig. 10. Delimitação da zona. Adaptado de [14].

Utilizando as características gerais mostradas na seção III e com a delimitação do volume a ser protegido, é possível calcular cada componente de risco. A Tab. III expõe as componentes de riscos para perdas do tipo L_1 e L_4 .

TABELA III. RISCO RELACIONADO A PERDA L_1 E L_4

Zona Única		
Componentes de Riscos	Risco R_1	Risco R_4
R_A	$1,40246 \times 10^{-13}$	0
R_B	$7,01229 \times 10^{-11}$	$7,67845 \times 10^{-7}$
R_C	0	$3,07138 \times 10^{-8}$
R_M	0	0
R_U	$5,52533 \times 10^{-16}$	0
R_V	$2,76266 \times 10^{-13}$	$3,02512 \times 10^{-9}$
R_W	0	$6,05023 \times 10^{-9}$
R_Z	0	$6,05023 \times 10^{-7}$
TOTAL	$7,05399 \times 10^{-11}$	$1,41266 \times 10^{-6}$

Fonte: Autoria Própria.

Nota: A descrição das componentes de risco, listadas na primeira coluna desta tabela, pode ser consultada na seção III B.

As componentes de riscos R_C , R_M , R_W e R_Z mostradas na Tab. III relacionadas ao risco R_1 , estão com valores iguais a zero por não ocorrer risco de explosão no local. Também, as parcelas R_A e R_U , que compõem o risco R_4 , resultaram no valor zero devido à não presença de animais na estrutura.

Pode-se visualizar que as componentes relacionadas a perda de vida humana são bem baixas, fato explicado pela baixa circulação de pessoas na estrutura. Os fatores de redução como tipo de superfície, o baixo índice de explosão, incêndio e pânico, e a presença de extintores no local reduzem os valores das componentes de risco R_A , R_B , R_U e R_V do risco R_1 .

Comparando os valores encontrados de R_1 e R_4 aos valores de risco toleráveis demonstrados na Tab. II, é

possível afirmar que a estrutura não necessita de um SPDA para esta forma de análise.

B. Análise da Usina Fotovoltaica como Multizonas

Neste contexto, a estrutura foi dividida em duas zonas Z_S : a zona de captação (Z_1), formada pelos módulos fotovoltaicos e a zona de transformação (Z_2) contemplada pelo o abrigo dos inversores. A Fig. 11 mostra essa divisão espacial.



Fig. 11. Delimitações das zonas Z_1 e Z_2 . Adaptado de [14].

De acordo com o projeto executivo da minigeração distribuída, disponibilizado pela UFERSA, a zona Z_1 possui um comprimento de aproximadamente 20 m e largura de 59 m e a zona Z_2 com comprimento de 2 m e largura de 8,5 m. A Tab. IV dispõe dos valores das componentes de riscos relacionados às perdas do tipo L_1 e L_4 para a zona de captação e a Tab. V para a zona de transformação.

TABELA IV. RISCO RELACIONADO AS PERDAS L_1 E L_4 PARA A ZONA Z_1

Zona Z_1 - Captação		
Componentes de Riscos	Risco R_1	Risco R_4
R_A	$2,85592 \times 10^{-14}$	0
R_B	$1,42796 \times 10^{-11}$	$3,12723 \times 10^{-7}$
R_C	0	$1,25089 \times 10^{-8}$
R_M	0	0
R_U	$5,52533 \times 10^{-16}$	0
R_V	$2,76266 \times 10^{-13}$	$6,05023 \times 10^{-9}$
R_W	0	$1,21005 \times 10^{-8}$
R_Z	0	$1,21005 \times 10^{-6}$
TOTAL	$1,45850 \times 10^{-11}$	$1,55343 \times 10^{-6}$

Fonte: Autoria Própria.

TABELA V. RISCO RELACIONADO AS PERDAS L_1 E L_4 PARA A ZONA Z_2

Zona Z_2 - Transformação		
Componentes de Riscos	Risco R_1	Risco R_4
R_A	$6,36060 \times 10^{-12}$	0
R_B	$3,18030 \times 10^{-12}$	$6,96486 \times 10^{-8}$
R_C	0	$2,78594 \times 10^{-9}$
R_M	0	0
R_U	$2,76266 \times 10^{-13}$	0
R_V	$1,38133 \times 10^{-13}$	$3,02512 \times 10^{-9}$
R_W	0	$6,05023 \times 10^{-9}$
R_Z	0	$6,05023 \times 10^{-7}$
TOTAL	$9,95530 \times 10^{-12}$	$6,86533 \times 10^{-7}$

Fonte: Autoria Própria.

A Tab. VI caracteriza os valores totais de riscos R_1 e R_4 somando os riscos correspondentes em cada zona.

TABELA VI. RISCO RELACIONADO AS PERDAS L_1 E L_4

Riscos Totais	
R_1	R_4
$2,45403 \times 10^{-11}$	$2,23996 \times 10^{-6}$

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos demonstram similaridade com a análise feita considerando a estrutura como zona única, como mostrado na subseção A desta seção. Nota-se que o valor total de risco R_1 para esta verificação teve pouca variação, pois o número de pessoas e permanência na estrutura se mantiveram os mesmos. Além disso, foram distribuídos os números iguais de pessoas para cada uma.

É perceptível que os valores das componentes de riscos R_A e R_U , relacionadas as perdas de vida humana tiveram valores superiores na zona Z_2 , pois foram consideradas os diferentes tipos de solo nas zonas analisadas. Por exemplo, a brita possui um valor de redução menor que o concreto. A componente R_B e R_V , se mostra mais elevada porque a zona Z_1 possui uma área de exposição maior.

Percebe-se que o valor global de R_4 se elevou, fato que ocorreu devido à diferença da forma como a linha adentra a estrutura em cada zona, considerando a linha enterrada na zona Z_1 e aérea na zona Z_2 , elevando o valor da componente R_Z na zona Z_1 .

Como na subseção anterior, o uso do SPDA se demonstrou dispensável, devido aos valores de risco totais R_1 e R_4 descritos na Tab. VI serem inferiores aos descritos na Tab. I e ao risco tolerável considerado de 10^{-3} para perdas do tipo L_4 .

Porém, se extrapolar a área da usina para averiguar a partir de qual potência instalada é necessária a instalação de SPDA, identifica-se o valor de uma área 73 vezes maior que a original em cada zona, mantendo as mesmas características físicas de estrutura e linha da minigeração estudada. A Tabela VII demonstra os valores obtidos para a zona Z_1 e Tab. VIII para zona Z_2 .

TABELA VII. RISCO RELACIONADO AS PERDAS L_1 E L_4 PARA A ZONA Z_1

Zona Z_1 - Captação		
Componentes de Riscos	Risco R_1	Risco R_4
R_A	$8,76748 \times 10^{-11}$	0
R_B	$4,38374 \times 10^{-8}$	$9,6004 \times 10^{-4}$
R_C	0	$3,84016 \times 10^{-5}$
R_M	0	0
R_U	$5,52533 \times 10^{-16}$	0
R_V	$2,76266 \times 10^{-13}$	$6,05023 \times 10^{-9}$
R_W	0	$1,21005 \times 10^{-8}$
R_Z	0	$1,21005 \times 10^{-6}$
TOTAL	$4,39254 \times 10^{-8}$	$9,99669 \times 10^{-4}$

Fonte: Autoria Própria.

TABELA VIII. RISCO RELACIONADO AS PERDAS
 L_1 E L_4 PARA A ZONA Z_2

Zona Z_2 - Transformação		
Componentes de Riscos	Risco R_1	Risco R_4
R_A	$1,44549 \times 10^{-9}$	0
R_B	$7,22743 \times 10^{-10}$	$1,58281 \times 10^{-5}$
R_C	0	$6,33123 \times 10^{-7}$
R_M	0	0
R_U	$2,76266 \times 10^{-13}$	0
R_V	$1,38133 \times 10^{-13}$	$3,02512 \times 10^{-9}$
R_W	0	$6,05023 \times 10^{-9}$
R_Z	0	$6,05023 \times 10^{-7}$
TOTAL	$2,16864 \times 10^{-9}$	$1,70753 \times 10^{-5}$

Fonte: Autoria Própria.

Os valores totais dos riscos R_1 e R_4 descritos na Tab. IX aumentaram em comparação aos resultados da Tab. VI. Isso ocorre devido ao aumento das componentes R_A e R_B correspondentes ao risco R_1 , em relação aos valores das Tab. IV e V pela maior área de exposição. Inclusive a elevação do risco R_4 na zona Z_1 , decorre da elevação da componente R_B , decorrente do mesmo motivo. Com isso, obtêm-se uma potência instalada de aproximadamente 11,0 MWp, com 42.340 módulos fotovoltaicos instalados.

TABELA IX. RISCO RELACIONADO AS PERDAS
 L_1 E L_4

Riscos Totais	
R_1	R_4
$4,60940 \times 10^{-8}$	$1,016745 \times 10^{-3}$

Fonte: Autoria Própria.

Destaca-se que para este estudo só foram avaliadas as características físicas da unidade de minigeração para a análise de perdas econômicas, pelo déficit dos valores econômicos da instalação. Em usinas de grande porte, com alto valor agregado, é sugerida a avaliação de acordo com o Anexo D contido na Parte II da NBR5419:2015, para uma análise mais minuciosa e criteriosa dos riscos relacionados as perdas do tipo L_4 .

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da confecção da planilha de gerenciamento de risco, foi possível realizar os cálculos das componentes e dos riscos associados. A mensuração das componentes de riscos é realizada com precisão considerando todas as casas decimais associadas resultando em um valor bastante preciso. Além disso, a planilha evita possíveis erros que poderiam ocorrer no cálculo manual, além de ser uma maneira mais prática de realização da análise de risco.

De acordo com o objetivo inicial do presente trabalho, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Na estrutura analisada, percebeu-se a não necessidade da instalação do SPDA, pois os riscos de perda de vida humana são baixos em função de uma baixa circulação de pessoas no local analisado. Em relação a perda de valor econômico obteve-se um montante abaixo do risco tolerável adotado, resultando na não inserção de um SPDA. Porém, uma análise desse tipo de perda pode suceder em um valor diferente se feita detalhadamente, utilizando os valores dos sistemas internos, estrutura e conteúdo de cada zona.

Com a extrapolação no tamanho da usina considerada a inserção de um SPDA se mostrou necessária para que as perdas de valores econômicas sejam reduzidas. Assim, conclui-se que usinas de pequeno porte, com as mesmas características apresentadas, não necessitam de um SPDA por apresentarem riscos baixos tendo como base a densidade de raios na cidade de Mossoró/RN. Vale salientar que cada instalação tem suas características e peculiaridades, portanto o estudo da inserção do sistema de proteção deve ser realizado independente do porte de micro ou minigeração.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de uma geração fotovoltaica onde possa ser realizado o estudo descrito no anexo D da norma aqui utilizada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por está finalizando essa jornada, a minha família que sempre me apoiou e deu suporte para eu chegar até aqui e o meu muito obrigado também aos meus amigos e professores que me auxiliaram na minha caminhada acadêmica.

REFERÊNCIAS

- [1] ABSOLAR. Site da Associação Brasileira de Energia solar fotovoltaica, 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em 12 de maio de 2021.
- [2] LISBOA, Bruno Rodrigues. Estudo De Proteção Contra Descargas Atmosféricas Diretas em uma Unidade De Minigeração Fotovoltaica Distribuída. 2018. 78 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- [3] ELER, Guilherme. Brasil, O País dos Raios. *Superinteressante*, p. 56-61, maio, 2020.
- [4] INPE. Grupo de Eletricidade Atmosférica, 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelab/homepage/>. Acesso em 12 de maio de 2021.
- [5] MINHA CASA SOLAR. Site da Minha Casa solar, 2019. Disponível em: <http://blog.minhacasasolar.com.br/inversor-solar-tudo-o-que-voce-precisa-saber-esta-aqui/>. Acesso em 12 de maio de 2021.
- [6] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, 2016.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, p. 353, 2015.
- [8] NASCIMENTO, Douglas Aguiar do et al, Instalações de Sistemas de Geração Solar Fotovoltaica: Um estudo sobre sistemas de aterramento, proteção contra surto e descargas atmosféricas. In: Brazilian Technology Symposium, 2016. Campinas, 2016.
- [9] GOMES, Allyson José de Sousa. Proteção Contra Raios e Surtos em Sistemas Fotovoltaicos. 2018. 73 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.
- [10] PINHO, João Tavares e GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESEB, 2014.
- [11] CLAMPER. Site da Clamper, 2017. Disponível em: https://clamper.com.br/wpcontent/uploads/2017/06/MKT_012015_Guia_Sistemas-Fotovoltaicos_DIGITAL.pdf. Acesso em 12 de maio de 2021.
- [12] SANTOS, Sergio Roberto. Proteção Contra Descargas Atmosféricas em Usinas Fotovoltaicas. Canal Solar, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/protacao-contr-descargas-atmosfericas-em-usinas-fotovoltaicas/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

- [13] UFERSA. **Site da Assessoria de Comunicação da UFERSA**, 2017. Disponível em: <https://assecom.ufersa.edu.br/2018/02/06/ufersa-recebe-autorizacao-para-instalar-usinas-solares-nos-campi-de-angicos-caraubas-e-pau-dos-ferros/>. Acesso em 12 de maio de 2021.
- [14] UFERSA. **Usina Solar da UFERSA**, 2017. Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/>. Acesso em 12 de maio de 2021.