

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**CAROLINA PRIETO RIBEIRO
RAFAEL RODRIGUES HEBERLE**

**PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

CURITIBA

2023

CAROLINA PRIETO RIBEIRO
RAFAEL RODRIGUES HEBERLE

**PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

Protection against atmospheric discharge in photovoltaic systems

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica e de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador (a): Paulo Cicero Fritzen

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

CAROLINA PRIETO RIBEIRO
RAFAEL RODRIGUES HEBERLE

**PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia Elétrica e de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação do curso
de Engenharia de Controle e Automação da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 07/junho/2023

Juan Camilo Castellanos Rodriguez

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Nastasha Salame da Silva

Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cícero Fritzen

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2023

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal realizar uma análise de gerenciamento de riscos em uma propriedade rural fictícia que possui uma usina de microgeração fotovoltaica instalada em seu terreno conforme as diretrizes estabelecidas na norma NBR 5419-2. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangendo os conceitos de gerenciamento de riscos, energia fotovoltaica e normas de proteção contra descargas atmosféricas, destacando-se a importância da NBR 5419-2 como referência para a análise de riscos em instalações fotovoltaicas. Em seguida, foi realizado um estudo de caso, determinado os dados sobre propriedade rural, incluindo informações sobre o tamanho e a localização da usina de microgeração fotovoltaica, características do terreno e detalhes da infraestrutura elétrica existente. Esses dados foram essenciais para identificar e calcular os principais riscos que podem afetar a usina e os seus respectivos componentes, considerando descargas atmosféricas e sobretensões sobre a estrutura e próximos delas. Com base nas informações coletadas, foi realizado um estudo detalhado de cada risco considerando aspectos como a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas na região, a vulnerabilidade dos equipamentos fotovoltaicos e a inexistência das medidas de proteção na estrutura. Para os cálculos foi utilizado uma planilha Excel automatizada, minimizando possíveis erros que poderiam ocorrer no cálculo manual. Após a análise dos riscos, os resultados foram comparados com o valor mínimo de risco tolerável conforme a NBR 5419-2 e, aliada aos princípios estabelecidos pela IEC 63227, foi mensurado as medidas de proteção adequadas para minimizar os impactos negativos dos eventos indesejados. Concluiu-se, portanto, que a análise de gerenciamento de riscos conforme a NBR 5419-2, é de extrema importância para garantir a proteção no sistema. A implementação das medidas de proteção recomendadas proporciona maior segurança operacional, evitando danos aos equipamentos e garantindo a continuidade da geração de energia renovável de forma sustentável.

Palavras-chave: SPDA, gerenciamento de riscos, segurança, medidas de proteção, descargas atmosféricas.

ABSTRACT

This work aims to perform a risk management analysis on a fictional rural property that has a photovoltaic microgeneration plant installed on its premises according to the guidelines established in the NBR 5419-2 standard. Initially, a literature review was conducted, encompassing the concepts of risk management, photovoltaic energy, and protection standards against atmospheric discharges, highlighting the importance of NBR 5419-2 as a reference for risk analysis in photovoltaic installations. Next, a case study was conducted, determining data about the rural property, including information on the size and location of the photovoltaic microgeneration plant, terrain characteristics, and details of the existing electrical infrastructure. This data was essential to identify and calculate the main risks that can affect the plant and its respective components, considering atmospheric discharges and overvoltages on and near the structure. Based on the collected information, a detailed study of each risk was conducted, considering aspects such as the probability of atmospheric discharges occurring in the region, vulnerability of photovoltaic equipment, and the absence of protective measures in the structure. An automated Excel spreadsheet was used for the calculations, minimizing potential errors that could occur with manual calculations. After analyzing the risks, the results were compared with the minimum tolerable risk value according to NBR 5419-2, and in conjunction with the principles established by IEC 63227, appropriate protective measures were measured to minimize the negative impacts of undesired events. Therefore, it can be concluded that the risk management analysis according to NBR 5419-2 is of utmost importance to ensure protection in the system. The implementation of recommended protective measures provides greater operational safety, preventing equipment damage and ensuring the continuity of sustainable renewable energy generation.

Keywords: Lightning Protection Systems (SPDA), risk management, safety, protective measures, atmospheric discharges.

Lista de siglas e abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – *Alternating Current*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DC – *Direct Current*

DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surtos

ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica

FV – Fotovoltaico

IEC – *International Electrotechnical Commission*

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais

LEMP – *Lightning Eletromagnetic Impulse*

NBR – Norma Técnica Brasileira

NG - Densidade de descargas atmosféricas

PDA - Proteção contra Descargas Atmosféricas

OTD - *Optical Transient Detector*

SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

ZPR - Zonas de proteção contra descargas atmosféricas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema off-grid	17
Figura 2 - Sistema on-grid	18
Figura 3 - Alinhamento de elétrons para formação de descargas	20
Figura 4 - Evolução no tempo dos processos até uma descarga subsequente	22
Figura 5 - Classificações de descargas diretas	23
Figura 6 - Onda eletromagnética gerada pela corrente de retorno	25
Figura 7 - Mapa do Biênio: Incidência de descargas atmosféricas em território	26
Figura 8 - Esquema de localização e tipo dos DPS em um sistema fotovoltaico não conectados ao SPDA	29
Figura 9 - Esquema de localização e tipo dos DPS em um sistema fotovoltaico conectados ao SPDA	30
Figura 10 - Diagrama esquemático da localização dos DPS	32
Figura 11 - Esquema de conexão de DPS	33
Figura 12 - Estruturação da NBR 5419	35
Figura 13 - Zonas de proteção	36
Figura 14 - Layout de um SPDA em um sistema fotovoltaico	42
Figura 15 - Instalações reais de um SPDA em um sistema fotovoltaico	43
Figura 16 - Layout da minigeração fotovoltaica da propriedade rural fictícia – São José dos Pinhais	47
Figura 17 - Abrigo dos inversores da minigeração fotovoltaica da propriedade rural	48
Figura 18 - Densidade de descargas atmosféricas NG – Mapa da região sul (descargas atmosféricas/km²/ano).....	50
Figura 19 - Área de exposição equivalente Ad de uma estrutura retangular.....	51
Figura 20 - Delimitações das zonas Z1, Z2 e Z3	55
Figura 21- Ângulo de proteção SPDA.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking dos 10 municípios paranaenses com maiores densidades de raios por km²/ano (INPE, 2010)	26
Tabela 2 - Suportabilidade a tensões impulsivas de equipamentos que compõem o sistema de geração fotovoltaica	32
Tabela 3 - Resultados das variáveis do estudo de caso obtidos através da planilha de apoio	56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de perdas e danos associados as fontes de danos.....	38
Quadro 2 - Cálculo das componentes de riscos de acordo com os tipos e fontes de danos.....	40
Quadro 3 - Valores de risco toleráveis	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Tema	11
1.1.1. Delimitação do tema	11
1.2. Definição do problema de pesquisa ou problematização	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo geral	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Justificativa da pesquisa	13
1.5. Metodologia de Pesquisa	13
1.6. Estrutura do trabalho	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. Sistemas fotovoltaicos	15
2.2. Classificação de sistemas fotovoltaicos	16
2.2.1. Sistemas isolados (<i>off-grid</i>)	16
2.2.2. Sistemas Conectados à rede (<i>on-grid</i>)	17
2.2.3. Sistemas híbridos	18
2.3. Descargas atmosféricas	19
2.3.1. Formação de descargas atmosféricas	19
2.3.2. Descargas nuvem-solo	20
2.3.3. Descargas Nuvem-Nuvem	22
2.3.4. Incidências de descargas	23
2.3.5. Panorama geral	25
2.4. Métodos e dispositivos de proteção para sistemas fotovoltaicos	27
2.4.1. Sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)	27
2.4.2. Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)	30
2.4.3. <i>String Box</i>	33
3. GERENCIAMENTO DE RISCOS	35
3.1. Normas de SPDA	35
3.1.1. Zonas de proteção contra descargas atmosféricas (ZPR)	36
3.2. Fatores para necessidade de SPDA	37
3.3. Equações relacionadas ao cálculo dos riscos	38
3.4. SPDA em Sistemas Fotovoltaicos	41

3.5.	Métodos para dimensionamento de SPDA.....	43
3.6	Surtos elétricos na rede	44
3.7	SPDA em usinas de solo.....	45
4.	ESTUDO DE CASO.....	46
4.1.	Descritivo da usina.....	46
4.2.	Cálculo do gerenciamento de risco do estudo de caso	48
4.3.	Situações de análise do estudo de caso	49
4.4.	Cálculo do tempo médio para impacto direto na usina fotovoltaica.....	49
4.5.	Cálculo do tempo médio para descarga próxima ao sistema.....	52
4.6.	Cálculo da análise de riscos conforme NBR 5419:2015.....	53
4.7.	Análise da usina fotovoltaica como multizonas	54
4.8.	Resultados análise de riscos por zonas.....	56
4.9.	Solução para o sistema fotovoltaico com inserção de SPDA	57
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA O ESTUDO DE CASO.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. Tema

Com a expansão da geração de energia solar fotovoltaica (FV), o Brasil se torna um país com alto potencial de crescimento no setor, já que possui uma alta extensão territorial que recebe uma quantidade considerável de níveis de radiação, durante todo o ano.

Somente no ano de 2021 o Brasil registrou um acréscimo de 4,72 GW de potência operacional produzida por sistemas de geração solar FV, liderando a expansão da matriz elétrica brasileira e superando o acréscimo de capacidade eólica e térmica (ANEEL).

Entretanto, o país é considerado recordista mundial em incidência de descargas atmosféricas, anualmente cerca de 77,8 milhões de raios incidem sobre o território nacional, devendo alcançar a casa dos 100 milhões até o final do século (ELAT/INPE).

Essas descargas, quando incidem direta ou indiretamente sob os componentes do sistema podem originar fenômenos de sobretensão nas correntes de entrada (contínua) e de saída (alternada) da instalação, destacando-se como a principal causa de danos aos dispositivos, reduzindo sua vida útil e aumentando o custo de manutenibilidade do sistema FV.

Neste contexto, torna-se imprescindível o uso de dispositivos de proteção contra surtos em sistemas de geração de energia fotovoltaica, visando manter a integridade e funcionalidade dos componentes. A garantia padrão de eficiência de um painel solar é de 25 anos, funcionando com ao menos 80% de seu desempenho original.

1.1.1. Delimitação do tema

Avaliação dos sistemas de proteção contra surtos de tensão no nível de baixa tensão dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede de energia.

1.2. Definição do problema de pesquisa ou problematização

Os sistemas fotovoltaicos estão diretamente expostos a surtos provocados por descargas atmosféricas ou por chaveamento nas linhas de energia. Estes surtos podem reduzir a vida útil, ou até mesmo danificar os módulos fotovoltaicos e os inversores, situações que certamente terão impacto nos custos de manutenção e consequente aumento do tempo de amortização. Como solução, faz-se necessária a utilização de protetores contra surtos elétricos (DPS) apropriados para mitigação desses riscos de queima e danos, protegendo, assim, o investimento realizado no sistema fotovoltaico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Apresentar os problemas relacionados aos impactos das descargas atmosféricas diretas e indiretas sobre sistemas fotovoltaicos, bem como as várias possibilidades de ações para proteção destes sistemas contra estes efeitos.

1.3.2. Objetivos específicos

Fornecer informações dos efeitos das descargas atmosféricas sobre a instalação de uma matriz fotovoltaica.

Apresentar as atuais especificações técnicas, bem como as normas e regulamentos que abordam esse tema.

Fornecer referências e diretrizes para a instalação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em matrizes fotovoltaicas.

Especificar os principais requisitos e métodos adotados para o dimensionamento de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

Realizar os cálculos de risco de uma usina fotovoltaica de uma propriedade rural hipotética, e buscando gerenciar estes para adequar o sistema aos padrões exigidos pelas normas.

1.4. Justificativa da pesquisa

Descargas atmosféricas representam enorme perigo para as usinas de geração solar fotovoltaica. Acredita-se que aproximadamente 26% de todos os danos sofridos pelos sistemas fotovoltaicos no mundo sejam causados por descargas atmosféricas diretas ou indiretas (CANALSOLAR, 2020). Os prejuízos econômicos causados por descargas atmosféricas em um sistema fotovoltaicos levam a custos de substituição, manutenção e perda de rendimento. Também causa envelhecimento prematuro de componentes eletrônicos dos circuitos de entrada e de saída de sistemas de dados, o que leva a um aumento dos custos de manutenção.

1.5. Metodologia de Pesquisa

Este trabalho consiste em analisar as características que constituem as unidades de micro e minigeração distribuída de fonte fotovoltaica e sua atuação no panorama brasileiro tratando 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 análise foi realizada com base em uma adaptação de um sistema fotovoltaico existente, incluindo informações relevantes para uma análise de gerenciamento de riscos mais precisa. Para o cálculo da análise de risco, foi utilizada uma planilha automatizada no Excel. Mesmo que essas informações tenham sido adaptadas, elas não estão além da possibilidade de existirem em sistemas reais. Em seguida, os riscos descritos nas normas serão calculados para determinar a necessidade de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) para proteger o sistema estudado.

1.6. Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos que foram propostos, esta dissertação apresenta, além do presente capítulo, demais estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 2: Fundamentação teórica. Neste capítulo é apresentada toda a fundamentação teórica que vai servir como base para elaboração dessa dissertação.

Inicialmente é abordado o fenômeno de formação das descargas atmosféricas, assim como os tipos de descargas existentes.

- Capítulo 3: Gerenciamento de riscos. Nele é apresentada a metodologia para análise da necessidade técnica de um SPDA em um sistema fotovoltaico, segundo a NBR 5419:2015-2. São explanadas todas as equações relacionadas para os cálculos do gerenciamento de riscos, fatores para necessidade de um SPDA e os métodos para dimensionamento de SPDA.

- Capítulo 4: Estudo de caso. Nele é apresentado o detalhamento da propriedade rural com uma usina de minigeração distribuída fotovoltaica localizada na cidade de São José dos Pinhais, escolhida como objetivo de estudo da dissertação. São identificadas as características gerais da propriedade rural, bem como arquitetura, características do terreno e detalhes da infraestrutura elétrica existente. Posteriormente foi realizado um estudo detalhado de cada risco identificado, seguindo as diretrizes estabelecidas na NBR 5419-2 e apresentado os resultados comparando com os valores de risco mínimo tolerável para cada componente. Após o resultado, foi proposto os dispositivos para proteção do sistema conforme as diretrizes internacionais estabelecidas pela IEC 63227.

- Capítulo 5: Conclusão. Por fim, este capítulo tem como objetivo apresentar as discussões e as considerações finais desta dissertação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a base teórica dos temas abordados no campo de expectativa do objetivo do trabalho, bem como os principais conceitos e elementos utilizados para subsidiar esse estudo de caso.

A energia solar fotovoltaica é gerada a partir da luz solar e pode ser diretamente convertida em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Esse fenômeno ocorre quando as partículas de luz solar colidem com os átomos das células solares, resultando no movimento dos elétrons e na criação de uma corrente elétrica, conhecida como energia solar.

A produção de energia fotovoltaica é considerada uma tecnologia energética limpa e sustentável, pois aproveita um recurso inesgotável: o sol.

Um sistema fotovoltaico é um modelo no qual componentes interconectados captam a energia solar e a convertem em eletricidade, que pode ser utilizada para alimentar uma ampla rede elétrica.

2.1. Sistemas fotovoltaicos

Conforme destacado por Pinho e Gadino (2014), os sistemas de energia solar fotovoltaica são responsáveis por converter a energia proveniente da radiação solar, que incide sobre as células de um módulo fotovoltaico, em energia elétrica. De acordo com Souza (2016, p. 14), "Um sistema fotovoltaico é uma fonte de potência elétrica, na qual as células fotovoltaicas transformam a Radiação Solar diretamente em energia elétrica".

A energia solar fotovoltaica possui características que a tornam segura, limpa e renovável. É considerada segura, uma vez que não utiliza meios que coloquem em risco a vida humana. Além disso, é uma fonte de energia limpa, pois não polui o ambiente, ou seja, não emite gases poluentes na atmosfera durante o processo de geração de energia elétrica. Por fim, é classificada como uma fonte de energia renovável, pois sua matéria-prima é o sol, uma fonte inesgotável de energia.

2.2. Classificação de sistemas fotovoltaicos

Segundo Pinho e Galdino (2014), os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em duas categorias: isolados ou conectados à rede. Quando combinados com uma ou mais fontes de energia, esses sistemas são chamados de sistemas híbridos.

2.2.1. Sistemas isolados (*off-grid*)

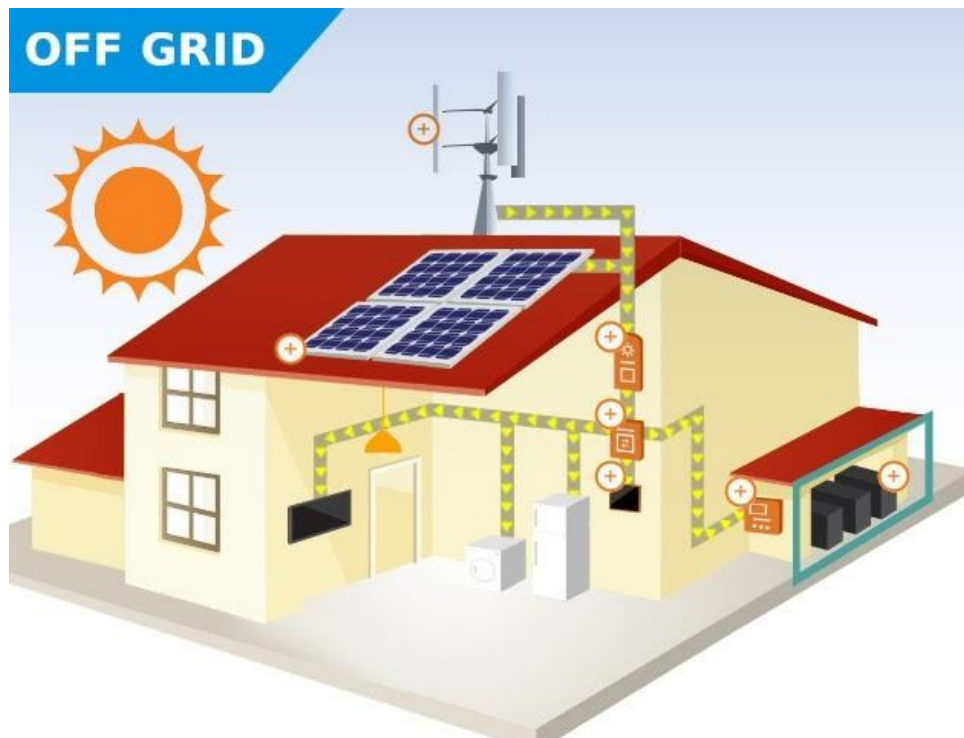
De maneira geral, os sistemas off-grid são considerados sistemas autônomos, ou seja, não dependem da rede de distribuição de energia elétrica e são sustentados por meio de baterias, que atuam como dispositivos de armazenamento.

Esses sistemas são compostos por painéis solares, cabos e estruturas de suporte, que juntos formam o bloco de geração de energia. Além disso, incluem inversores e controladores de carga, responsáveis pelo condicionamento da potência, e as próprias baterias, que compõem o bloco de armazenamento.

A energia excedente produzida pelos painéis solares é armazenada nas baterias e utilizada pelo sistema em momentos de baixa ou nenhuma incidência solar, como durante a noite, conforme ilustrado na Figura 1.

Esses sistemas são frequentemente utilizados em áreas remotas e/ou rurais, onde as cargas elétricas estão distantes das redes de distribuição das concessionárias. Isso ocorre devido ao custo elevado de estender uma linha de energia exclusiva para atender essas cargas (REVISTA POTÊNCIA, 2022).

Figura 1 - Sistema off-grid



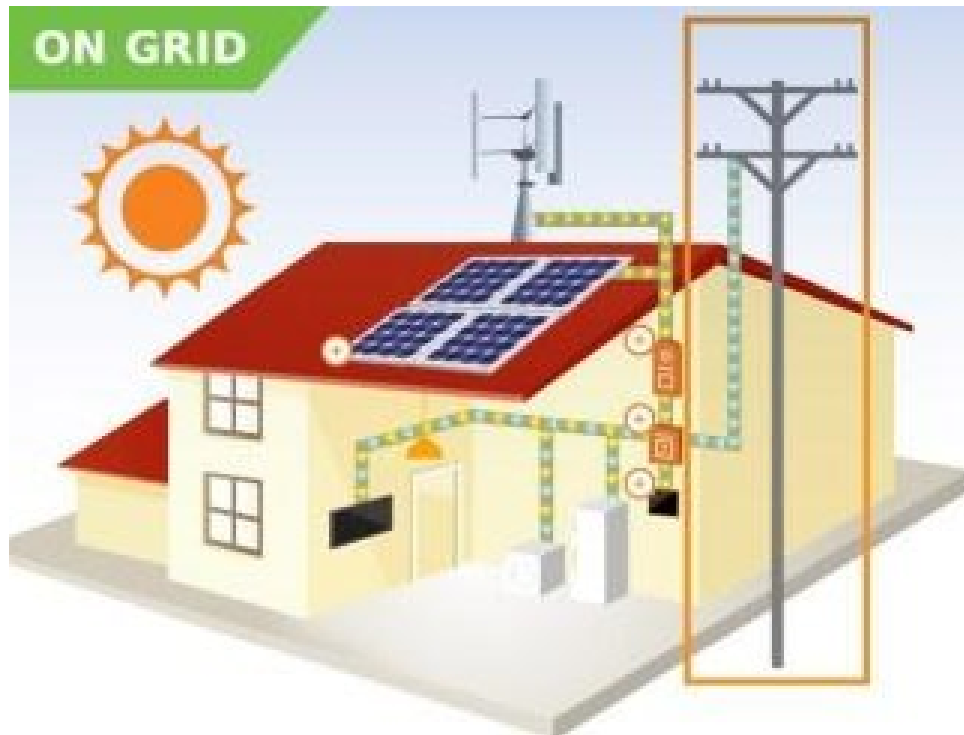
Fonte: Revista Potência, 2020.

2.2.2. Sistemas Conectados à rede (*on-grid*)

Também chamado de sistema *grid-tie*, esse tipo de sistema fotovoltaico requer conexão com uma rede de distribuição de eletricidade. Esses sistemas são mais eficientes do que os sistemas off-grid e dispensam a necessidade de baterias e controladores de carga, o que resulta em uma redução de custos e facilita sua utilização. (REVISTA POTÊNCIA, 2022).

Por não possuir armazenamento interno, todo o excedente de energia gerado é enviado de volta para a rede convencional, como ilustrado na Figura 2.

Dessa forma, o medidor de energia gira em sentido contrário, convertendo o excesso de energia em créditos de energia que podem ser utilizados quando a demanda excede a produção.

Figura 2 - Sistema *on-grid*

Fonte: Revista Potência, 2020.

Em resumo, o painel fotovoltaico gera energia elétrica em corrente contínua e, após ser convertida em corrente alternada, é injetada na rede de energia elétrica. Esse processo de conversão é realizado pelo inversor de frequência, que atua como interface entre o painel e a rede elétrica. (PEREIRA & OLIVEIRA, 2013).

2.2.3. Sistemas híbridos

A associação de sistemas fotovoltaicos com demais fontes de energia fundamenta-se no sistema híbrido. O seu maior benefício é proporcionar eletricidade (armazenada nas baterias), na privação de sol, ou seja, em dias de baixa, ou nenhuma geração. No entanto, é apontado como um sistema complexo, já que necessita integrar diversas formas de produção de energia elétrica, como motores à diesel ou gás, ou por geradores eólicos (PEREIRA & OLIVEIRA, 2011).

2.3. Descargas atmosféricas

Segundo a NBR 5419:2015, descarga atmosférica é definida como uma descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères. Geralmente possuem grande extensão e intensidade, e ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas na atmosfera local.

Descarga atmosférica, de acordo com Filho (2005, p. 18) “trata-se de um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra”.

Conforme o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), descargas atmosféricas são descargas elétricas de grande extensão (alguns quilômetros) e de grande intensidade (picos de intensidade de corrente acima de um quiloampère), que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de tempestades. A descarga inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas excede a capacidade isolante, também conhecida como rigidez dielétrica, do ar em um dado local na atmosfera, que pode ser dentro da nuvem ou próximo ao solo. Quebrada a rigidez, tem início um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas. Existem diversos tipos de descargas, classificadas em função do local onde se originam e do local onde terminam.

2.3.1. Formação de descargas atmosféricas

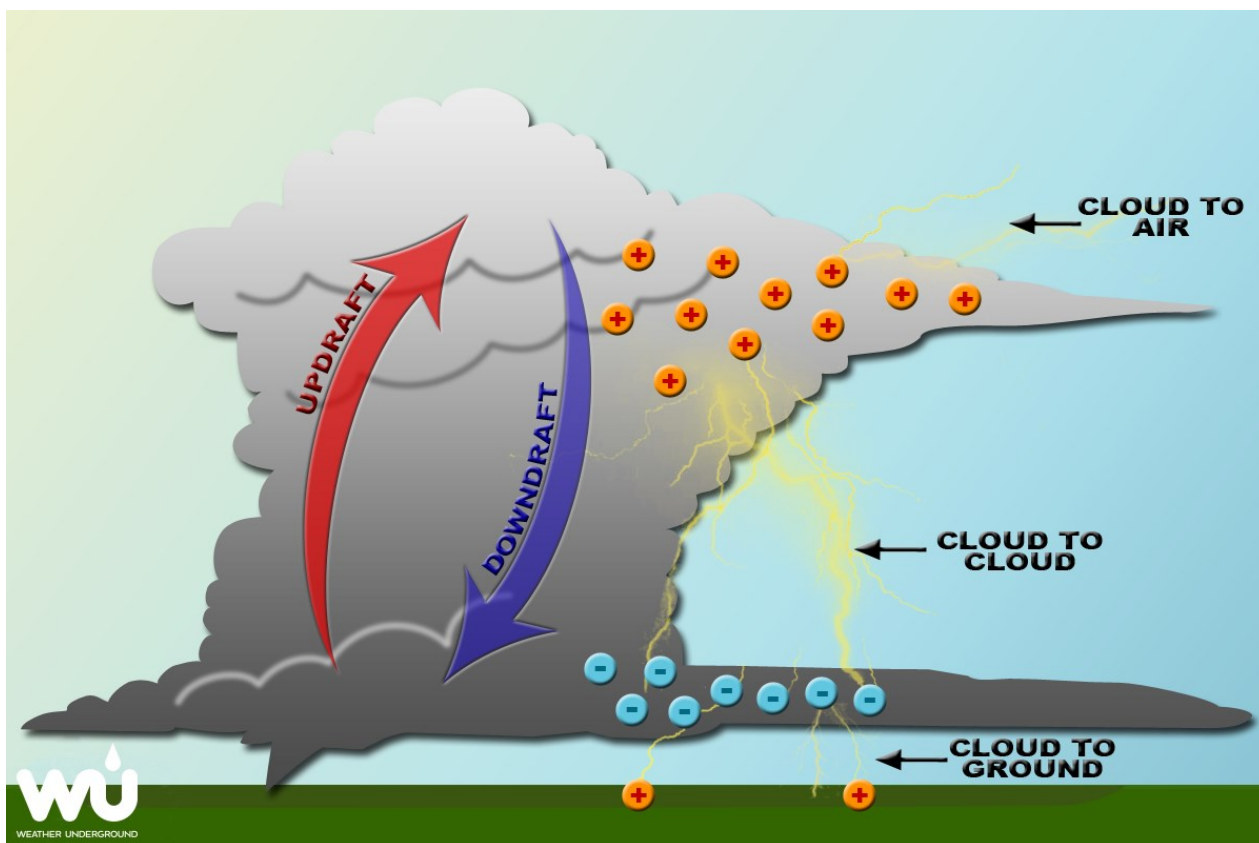
Na atmosfera terrestre os raios são classificados em três tipos, em função da localização da ocorrência, sendo eles raios de nuvem-nuvem, nuvem-solo e intra-nuvem, como observado na Figura 3.

Os raios do tipo nuvem-solo são os menos numerosos, já que representam apenas 30% do total de raios, entretanto são os mais visíveis e perigosos, de tornando objeto principal de estudos sobre raios.

As descargas nuvem-nuvem ocorrem quando há uma descarga elétrica de duas cargas opostas, presentes em duas nuvens distantes uma da outra. Já às

descargas intra-nuvem ocorrem quando há descarga entre duas cargas opostas na mesma nuvem.

Figura 3 - Alinhamento de elétrons para formação de descargas



Fonte: Weather Underground, 2022.

2.3.2. Descargas nuvem-solo

As descargas nuvem-solo, popularmente conhecidas como raios, possuem alto índice destrutivo, e podem ser subdivididas em duas categorias a depender da polarização da carga a ser transferida. As descargas de polaridade negativa, transferem elétrons de uma região carregada negativamente dentro da nuvem para o solo e constituem em média 90% das descargas, já as denominadas positivas transferem elétrons do solo para a nuvem.

Apesar de o raio parecer a olho nu uma única descarga, ele é formado por múltiplas descargas que ocorrem quase simultaneamente, devido a formação de descargas de retorno, que se sucedem em intervalos de tempo muito curtos.

De acordo com pesquisas realizadas pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), as descargas nuvem-solo se iniciam com a etapa denominada líder escalonado. Sobre a influência do campo elétrico entre a nuvem e o solo, as cargas negativas do líder escalonado se movem em etapas de 30 a 100 metros de comprimento. Cada etapa tem uma duração média de um microssegundo, com uma pausa entre elas de 50 microssegundos. Após alguns milissegundos, o líder escalonado surge da base da nuvem, se movendo em direção ao solo. A maior parte da luminosidade é produzida durante as etapas de 1 microssegundo, praticamente não havendo luminosidade durante as pausas.

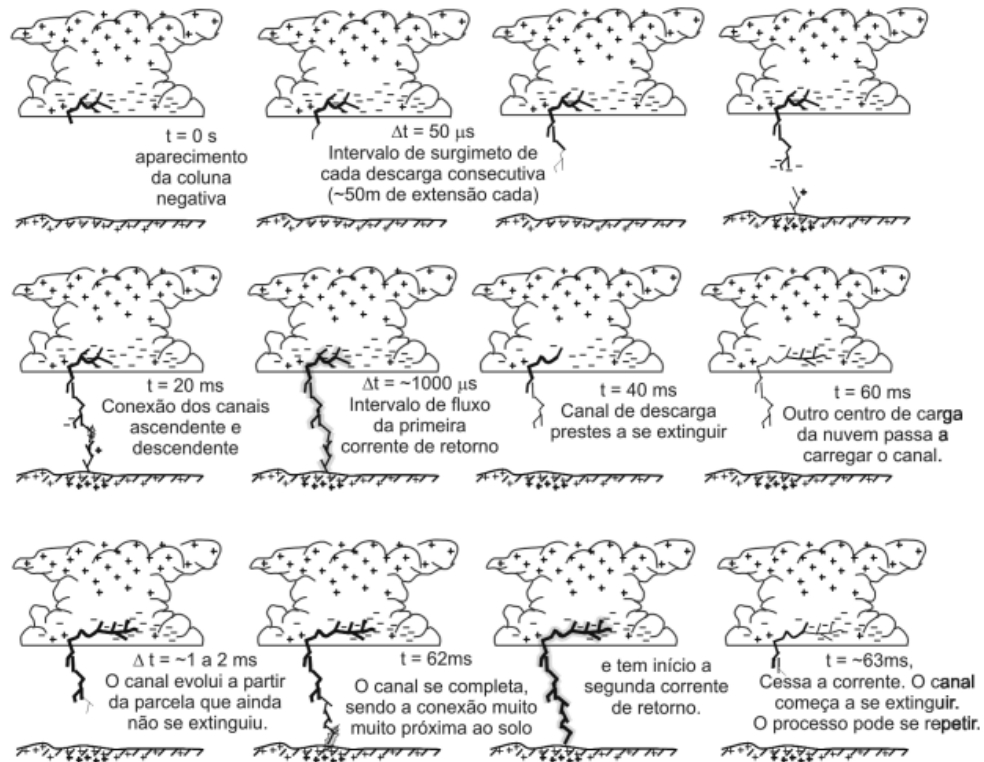
Ao se aproximar do solo, o líder escalonado produz um campo elétrico intenso, correspondente a um potencial elétrico da ordem de 100 milhões de volts, causando a quebra da rigidez dielétrica do ar e gerando uma descarga positiva ascendente no solo, denominada líder conectante. No instante em que um líder conectante encontra o líder escalonado, as cargas armazenadas no canal de líder escalonado movem-se em direção ao solo na forma de descarga acompanhada de um clarão, iluminando o canal e todas as ramificações. Esta descarga, é denominada de descarga de retorno, e produz a maior parte da luz visível.

Se após a descarga de retorno o raio terminar, ele é classificado como um raio simples. Entretanto, na maioria dos casos, uma nova descarga de retorno ocorre, chamada de descarga de retorno subsequente. Para que ela ocorra, é necessário que outras cargas dentro da nuvem sejam transportadas para a região onde iniciou-se o líder escalonado.

Quando as novas cargas transportadas para dentro da nuvem atingem a região do canal formado pela primeira descarga de retorno, um novo líder, chamado líder contínuo, se forma. Este líder irá abrir o caminho para a descarga de retorno subsequente, conforme ilustrado na Figura 4. Raios com diversas descargas de retorno subsequentes são denominados raios múltiplos.

Mais de 95% da energia do raio é gasta na expansão do ar nos primeiros metros ao redor do canal. Do restante, 1% é convertido em energia térmica, 1% em energia acústica e cerca de 2% em energia eletromagnética. Portanto, cerca de 1% da energia total do raio atinge o solo.

Figura 4 - Evolução no tempo dos processos até uma descarga subsequente



Fonte: FILHO, 2019.

2.3.3. Descargas Nuvem-Nuvem

Descargas elétricas que se originam em numa nuvem e propagam-se fora da nuvem rumo a outra nuvem são denominados de raios nuvem-nuvem. Apesar de serem menos conhecidos do que raios nuvem-solo, estes correspondem a cerca de 70% das descargas atmosféricas. Isto porque não representam perigo e são visíveis apenas como um clarão no céu, estando escondidos pelas nuvens.

Geralmente, a descarga se inicia na parte inferior das nuvens, onde estão concentradas as cargas negativas, e propagam-se até a parte superior carregada positivamente. No entanto, também há ocorrência de raios invertidos, que se iniciam na parte superior das nuvens, onde estão concentradas cargas positivas, propagando-se até a parte inferior, carregada negativamente.

As descargas entre nuvens costumam ser as primeiras a ocorrerem em uma tempestade, também apresentando um aumento na sua atividade em períodos que antecedem tornados, diferentemente do relâmpago nuvem-solo. (ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica)

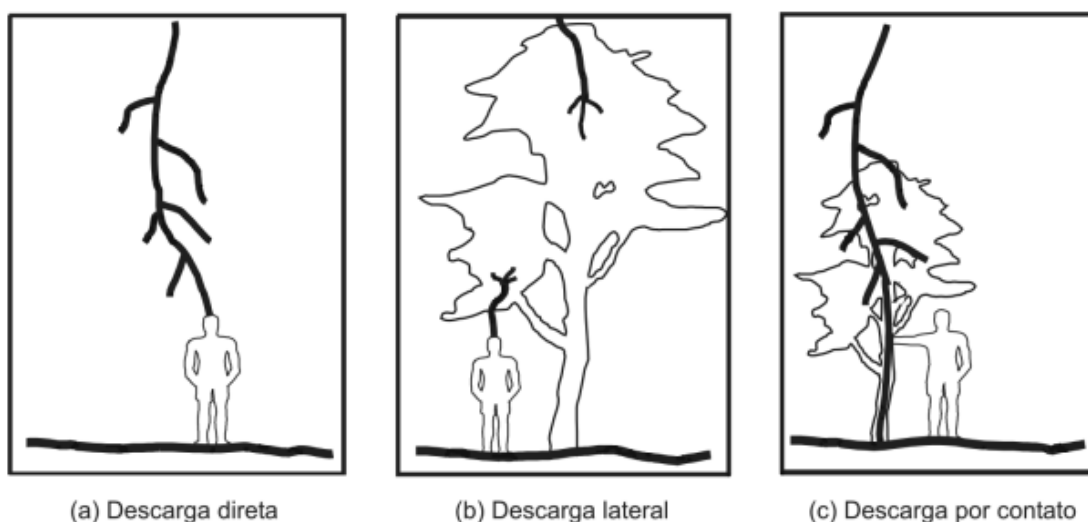
2.3.4. Incidências de descargas

2.3.4.1. Descarga direta

Segundo Filho (2019), os efeitos de maior severidade, ocorrem a partir da incidência direta da descarga. Nesse caso, ao atingir seres vivos, prédios, estruturas ou sistemas elétricos, os raios podem gerar destruição, incêndio e, eventualmente, morte. Na perspectiva da influência das características da descarga na intensidade do efeito resultante, dois parâmetros se destacam: a energia por unidade de resistência e o valor de pico da corrente.

A Figura 5 mostra algumas possíveis classificações para as descargas diretas.

Figura 5 - Classificações de descargas diretas



Fonte: FILHO, 2019.

O valor de pico da corrente de descarga influencia, na definição do nível da sobretensão resultante em sistemas atingidos por descarga. Tal sobretensão pode, em alguns casos, ocasionar a ruptura do isolamento do sistema.

2.3.4.2. Descarga Indireta

Os efeitos mais frequentes decorrentes das descargas atmosféricas são os induzidos por uma descarga incidente nas proximidades da vítima. Sendo esta, comumente, designada descarga indireta ou próxima.

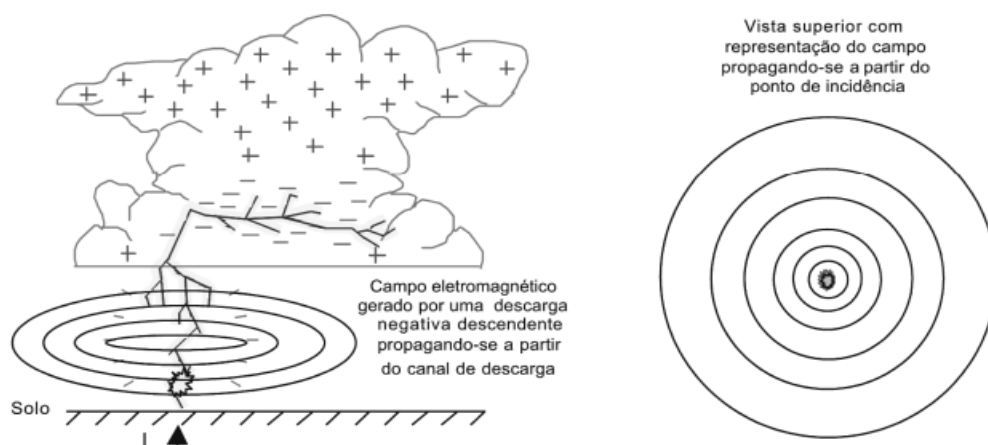
Em uma descarga nuvem-solo, o fluxo da corrente de retorno pelo canal, determina a constituição de uma onda eletromagnética que se irradia a partir do canal. Cada elemento de corrente ao longo do comprimento do canal, atua como fonte de campo eletromagnético. Ao atingir corpos ou estruturas, esta onda é capaz de induzir efeitos nas vítimas, como a absorção da energia irradiada, causando interferência eletromagnética, ou pela geração de tensão induzida em percursos condutores fechados e em corpos condutores atingidos pela onda eletromagnética.

2.3.4.3. A tensão induzida em linhas por descargas atmosféricas

Um dos efeitos mais relevantes das descargas atmosféricas consiste nas tensões induzidas pela corrente que flui pelo canal constituído entre nuvem e solo durante a descarga. Considerando os efeitos da incidência direta de descargas, a probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas próximas é muito superior. Sendo assim, a indução de tensões em linhas ou em corpos condutores longos estendidos na superfície devido à incidência nas proximidades da linha é muito mais frequente.

As tensões induzidas compõem a mais importante fonte de distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos. As sobretensões associadas são responsáveis por grande parte dos desligamentos das linhas de distribuição de energia elétrica e pelos danos causados em redes elétricas e eletrônicas de nível de tensão reduzido. (FILHO, 2019)

Figura 6 - Onda eletromagnética gerada pela corrente de retorno



Fonte: FILHO, 2019.

2.3.5. Panorama geral

Em média, 50 a 100 raios ocorrem a cada segundo, em escala mundial, o que equivale a cerca de 10 milhões de descargas por dia ou três bilhões por ano (ELAT). De acordo com análises obtidas através do satélite *Optical Transient Detector* (OTD), lançado pela NASA em 1995, grande parte das descargas atmosféricas ocorrem em regiões continentais e próximo aos trópicos. De modo geral, a incidência de raios mostra-se alta na África, no sul da Ásia, no sul dos Estados Unidos, no norte da Argentina, na Indonésia, no norte de Austrália e em praticamente todo o território brasileiro.

Além disso, as descargas atmosféricas são raras em regiões de alta latitude, devido às baixas temperaturas do ar e em regiões desérticas, onde a umidade é insuficiente para a formação das nuvens de tempestades.

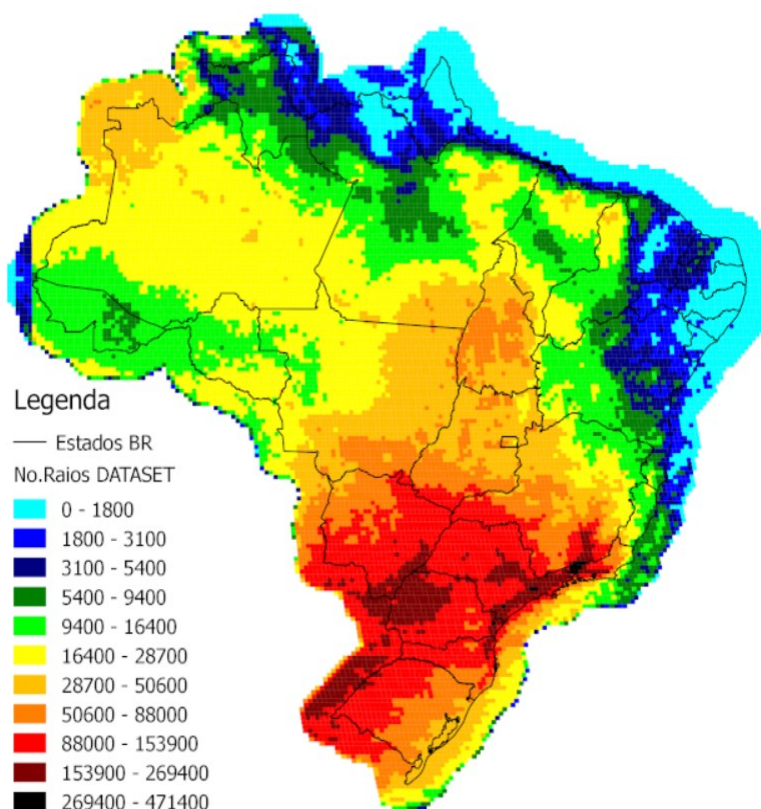
O Brasil é líder no ranking mundial de descargas atmosféricas, tendo uma incidência de 77,8 milhões de raios por ano (INPE). Isto ocorre devido ao fato de ser o país com maior extensão territorial na zona tropical do planeta, tornando-se assim uma área favorável para a formação de tempestades e raios. Na Tabela 1 podemos observar o ranking de municípios paranaenses com maiores índices de densidade de raios por km² e, na Figura 7, o mapa de biênio, representando a quantidade de raios por km² por ano que atingem uma determinada região, conforme Anexo F da NBR 5419:2015.

Tabela 1 - Ranking dos 10 municípios paranaenses com maiores densidades de raios por km²/ano
(INPE, 2010)

Estado	Município	Área (km ²)	Ranking Geral 2009-2010	Densidade (raios / km ² . ano)
PR	Colorado	404,03	28	13,6656
PR	Guaraci	211,82	47	12,3538
PR	Matinhos	118,14	92	10,7562
PR	Itaguajé	192,31	104	10,5184
PR	Barbosa Ferraz	539,27	121	10,2914
PR	Nossa Senhora das Graças	185,45	139	10,0968
PR	Lunardelli	199,28	144	9,9947
PR	Corumbataí do Sul	164,97	190	9,5895
PR	Godoy Moreira	130,74	195	9,5409
PR	Cafeara	185,76	196	9,5353

Fonte: INPE, 2010.

Figura 7 - Mapa do Biênio: Incidência de descargas atmosféricas em território



Fonte: INPE, 2019.

2.4. Métodos e dispositivos de proteção para sistemas fotovoltaicos

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. O uso de proteção contra descargas atmosféricas (PDA) é recomendado nessas instalações, com a finalidade de evitar grandes danos aos equipamentos integrantes da geração fotovoltaica (LISBOA, 2018).

Para que exista a proteção dos equipamentos eletrônicos, é necessário a implementação de medidas adicionais, tais como a instalação de Dispositivo de Proteção Contra Surto de Tensão (DPS) (NBR 5419, 2015). Quando dimensionados e instalados corretamente, os sistemas de proteção melhoram o comportamento do sistema fotovoltaico contra descargas atmosféricas e limitam as falhas de descargas elétricas. A eficácia do sistema de proteção e a severidade dos efeitos de uma descarga na instalação de um sistema fotovoltaico dependem de diversos parâmetros. Usualmente, são levados em consideração as características do solo, as características geométricas e elétricas do equipamento e as características da corrente de descarga.

O correto dimensionamento e a utilização adequada de dispositivos de proteção são essenciais para minimizar ou até mesmo eliminar falhas. Além dos dispositivos de proteção incorporados aos equipamentos, é importante considerar a instalação de outros dispositivos de proteção externos, como DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos) e SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas).

2.4.1. 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. Todo sistema de proteção possui três subsistemas como componentes:

- 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.

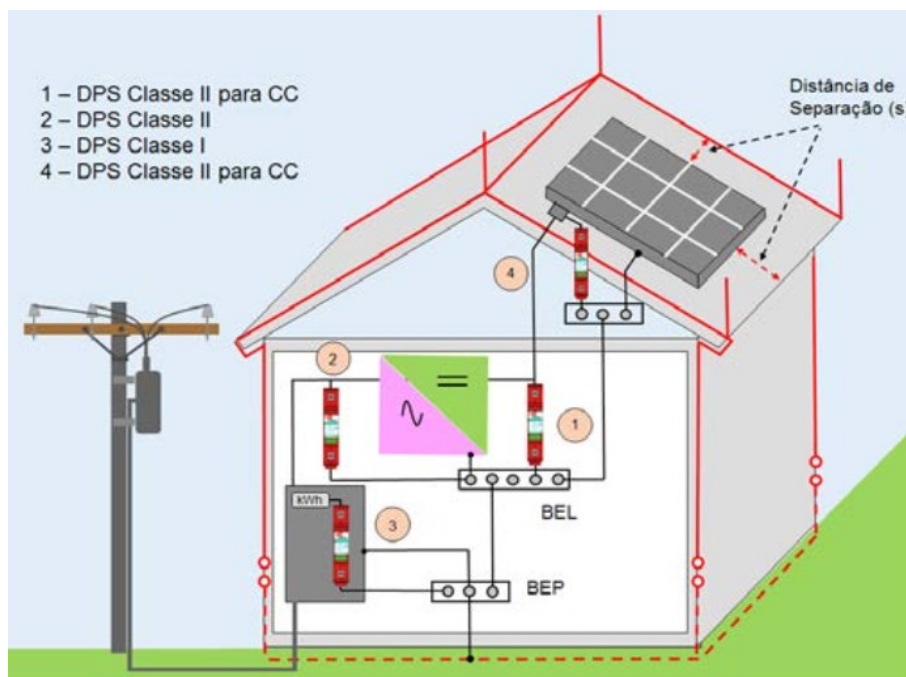
- Subsistema de aterramento: é responsável por conduzir e dispersar a descarga atmosférica no solo.

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 perdas de vida humana, patrimônio cultural, serviços e econômicas. Inclusive, aponta as características da estrutura que devem ser analisadas para identificar se ela necessita de um SPDA e como projetá-lo.

Em edificações com SPDA, existem duas combinações possíveis para o sistema de geração de energia fotovoltaica.

A Figura 8 ilustra um sistema com módulos fotovoltaicos instalados em uma edificação com SPDA e a localização e tipo de DPS indicados para este caso, no qual os módulos fotovoltaicos não estão conectados ao SPDA.

Figura 8 - Esquema de localização e tipo dos DPS em um sistema fotovoltaico não conectados ao SPDA



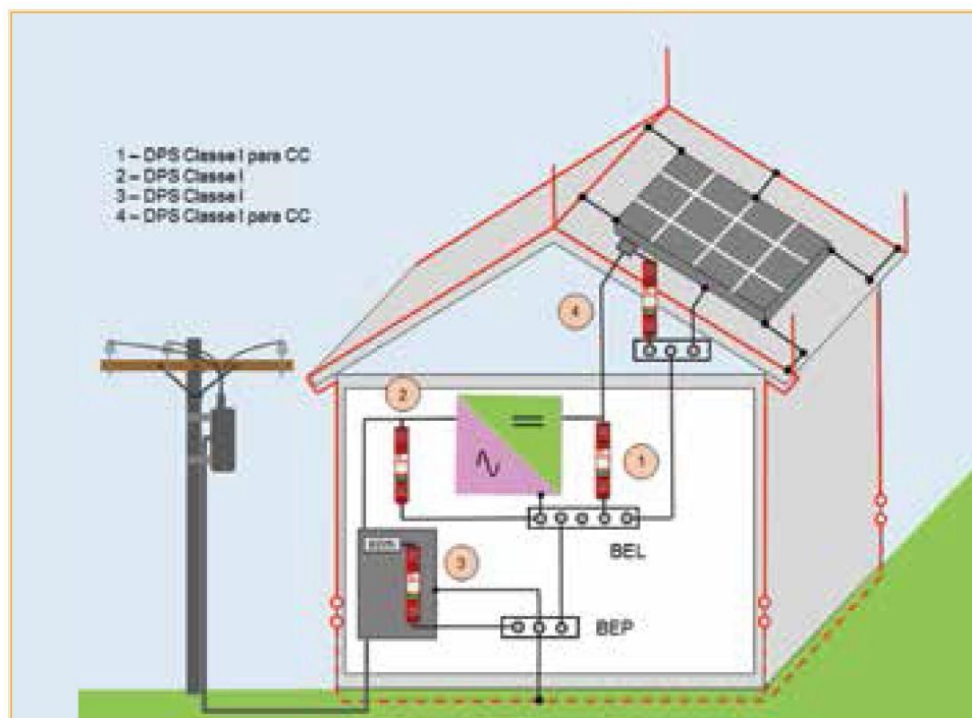
Fonte: PAULINO, 2016.

Conforme NBR 5419, mesmo que a distância de separação (s) seja mantida entre os módulos do sistema fotovoltaico e os componentes do SPDA, a descarga atmosférica provocará uma parcela de corrente induzida e conduzida via linhas de energia elétrica. Neste caso, o DPS 3 deverá ser Classe I, ou seja, com capacidade para drenar uma parcela da corrente da descarga.

O DPS 2 não será necessário se o inversor estiver localizado junto ao quadro de distribuição de circuitos, conectado à mesma barra de terra (PE) do quadro, e o DPS 3 for Classe I, com nível de proteção adequado para proteção do inversor.

Além disso, é possível que os módulos fotovoltaicos estejam conectados ao SPDA. Nessa situação, conforme ilustrado na Figura 9, os condutores de alimentação, tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua, estarão em paralelo com os condutores de aterramento, o que significa que podem receber uma porção da corrente de descarga.

Figura 9 - Esquema de localização e tipo dos DPS em um sistema fotovoltaico conectados ao SPDA



Fonte: PAULINO, 2016.

A parcela da corrente que será drenada via DPS dependerá:

- Do nível de proteção do SPDA, conforme estabelecido na NBR 5419;
- Da impedância do aterramento da edificação;
- Do número de condutores de descida do SPDA;
- Da distância entre os módulos e o inversor e barra de aterramento local;
- Da impedância do DPS (curto-circuito ou limitador de tensão).

A descarga atmosférica provocará uma parcela de corrente induzida e conduzida via linhas de energia elétrica, isso ocorrerá mesmo que a distância de segurança seja mantida entre os módulos do sistema FV e os componentes do SPDA.

2.4.2. Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)

O dispositivo de proteção contra surtos destina-se a limitar as sobretensões transitórias e desviar as correntes de surto. Contém pelo menos um componente não-linear, como varistores e diodos supressores.

Em termos simples, estes dispositivos destinam-se a limitar as sobretensões transitórias com o objetivo de evitar danos aos equipamentos e tempo de inatividade

desses quando atingidos por picos de tensão transitórios. De acordo com a NBR IEC 61643-1 (2021), são especificadas três classes de DPS's conectados a sistemas de energia de baixa tensão.

Os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) de classe I desempenham um papel crucial na redução dos efeitos diretos das descargas atmosféricas. A instalação do DPS classe I é obrigatória quando um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) está presente na edificação. Os testes do DPS classe I são realizados utilizando uma corrente de choque impulsional (Iimp) com uma forma de onda de 10/350µs. Além disso, o DPS deve ser instalado com um dispositivo de desconexão a montante, como um disjuntor, cuja capacidade de interrupção deve ser igual ou superior à corrente máxima de curto-circuito presumida no local de instalação.

Os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) de classe II têm como objetivo proteger os equipamentos elétricos contra sobretensões induzidas ou conduzidas, que são efeitos indiretos das descargas atmosféricas. Os ensaios para os DPS de classe II são realizados com corrente máxima de descarga (Imax) utilizando uma forma de onda de 8/20 µs. Eles podem ser instalados de forma independente ou em cascata com um DPS de classe I ou outro DPS de classe II. Além disso, é necessário que o DPS seja instalado com um dispositivo de desconexão a montante, como um disjuntor, cuja capacidade de interrupção seja pelo menos igual à corrente máxima de curto-circuito presumida no local de instalação.

Os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) de classe III são projetados para fornecer proteção adicional a equipamentos localizados a uma distância superior a 30 metros do DPS principal (geralmente instalado no quadro de distribuição de circuitos). O DPS de classe III é testado utilizando uma forma de onda de corrente combinada de 1,2/50µs e 8/20µs.

Baseado na norma IEC 61643, devemos instalar os DPS com níveis de proteções inferiores aos suportados pelos equipamentos. A Tabela 2 a seguir mostra os níveis de suportabilidade de tensões impulsivas dos equipamentos que compõem um sistema de geração fotovoltaica.

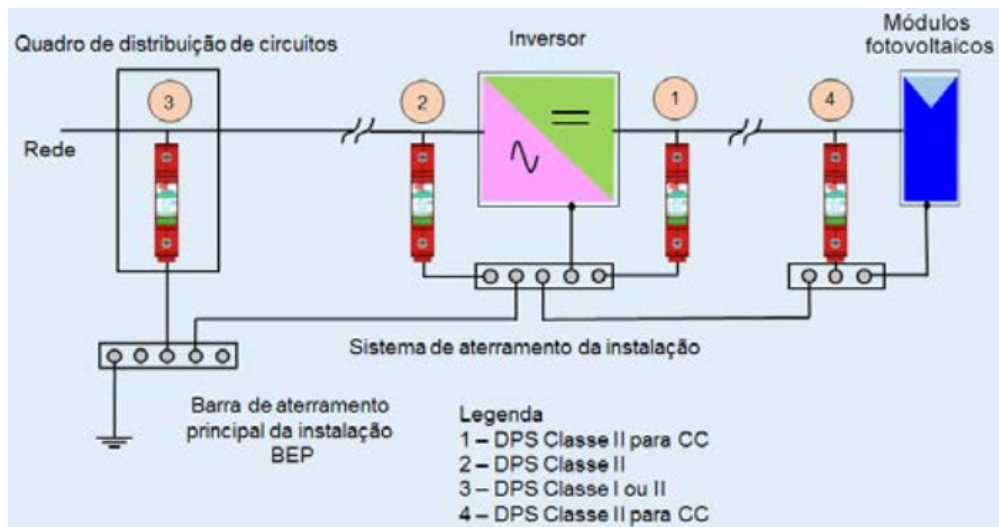
Tabela 2 - Suportabilidade a tensões impulsivas de equipamentos que compõem o sistema de geração fotovoltaica.

Suportabilidade a tensões impulsivas de equipamentos que compõem o sistema de geração fotovoltaica				
Uocmax (V)	Suportabilidade a tensões impulsivas - Uw (KV)			
	Mod. Classe B	Inversor	Outros equipamentos	Mod. Classe A
100	0,8	2,5	0,8	1,5
150	1,5		1,5	2,5
300	2,5		2,5	4
424	4		4	4
600	4	4	4	6
800	5		5	6
849	6		6	8
1000	6	6	6	8
1500	8	8	8	12

Fonte: PAULINO, 2016.

A localização e o tipo dos DPS, no caso de indução provocada por descargas atmosféricas próximas, devem ser conforme mostra a Figura 10.

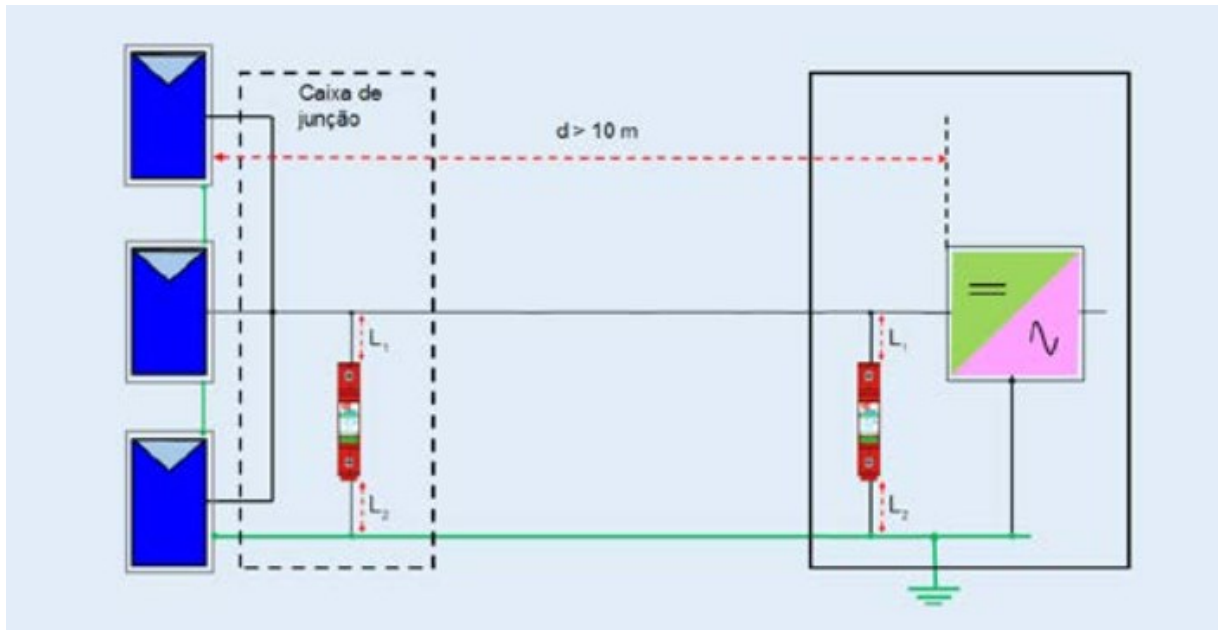
Figura 10 - Diagrama esquemático da localização dos DPS



Fonte: PAULINO, 2016.

O DPS 2, mostrado na Figura 11, não será necessário se a distância entre o quadro de distribuição de circuitos e o inversor for menor do que 10 m. O DPS 4 não será necessário se a distância entre o inversor e o painel fotovoltaico for menor do que 10 m, conforme mostra a Figura 9. As distâncias L_1 e L_2 devem ter comprimento menor que 0,5 m.

Figura 11 - Esquema de conexão de DPS



Fonte: PAULINO, 2016.

2.4.3. String Box

A NBR 5410, norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão, e a NBR 16690, norma brasileira sobre sistemas fotovoltaicos, estabelecem requisitos essenciais para as instalações elétricas. Esses requisitos incluem a proteção contra choques elétricos para os usuários, prevenção de efeitos térmicos e incêndios, proteção contra sobrecorrente, proteção contra sobretensão e capacidade de seccionamento.

String box são dispositivos contendo fusíveis, disjuntores e DPSs para o lado em corrente contínua e a chave seccionadora que é responsável por ligar a *string* de módulos ao inversor e tem o papel de cortar essa ligação quando há algum pico de energia prejudicial aos componentes do sistema e para manutenções e até o inversor, além da conexão do lado em corrente alternada, também por eletrodutos, do inversor

até os disjuntores e DPS e até o quadro de distribuição do imóvel. O lado em corrente contínua, além de ter uma tensão de operação pequena, tem o comprimento dos cabos de conexão pequeno sem a necessidade de eletrodutos e *string box*, já que os inversores possuem internamente um dispositivo que corta a ligação com o lado em corrente alternada quando detecta algum distúrbio elétrico no sistema. No lado em corrente alternada, são conectadas as saídas dos inversores em paralelo e o cabeamento até os disjuntores e DPS é feito de modo mais simples e mais seguro utilizando a própria infraestrutura interna do imóvel, sem nenhum cabo exposto, e por fim conectado ao quadro de distribuição.

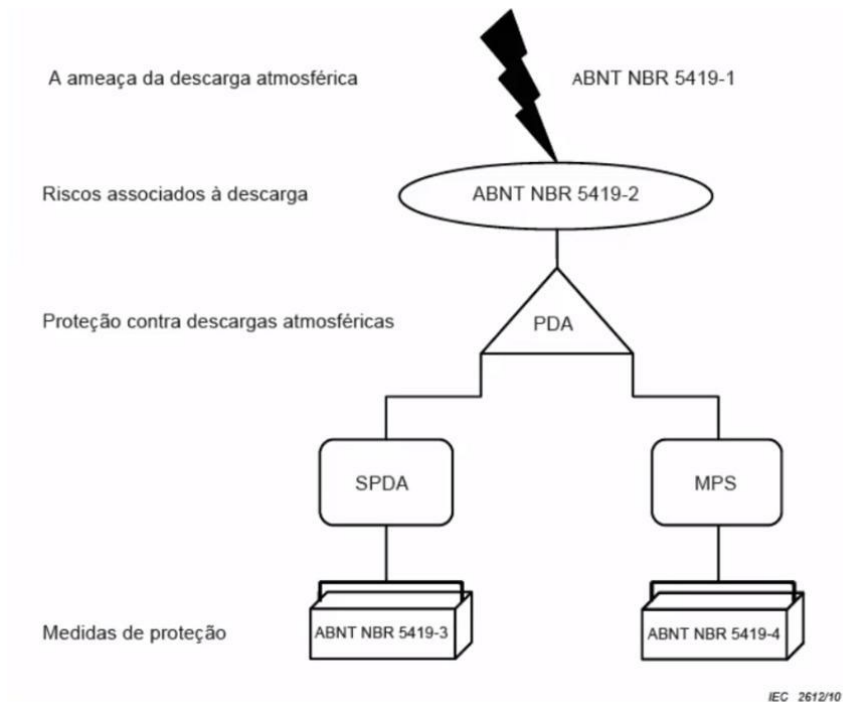
3. GERENCIAMENTO DE RISCOS

Ao realizar o gerenciamento de riscos de uma instalação, diversos aspectos são considerados a fim de determinar os componentes essenciais para sua proteção. Nesta seção, serão apresentadas as informações necessárias para o adequado gerenciamento de riscos.

3.1. Normas de SPDA

A norma brasileira referente ao Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é a NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, que passou por sua última modificação em 2015, aumentando de 42 páginas na edição de 2005, para 366 em 2015. É possível verificar a sua estruturação, dividida em quatro segmentos, na Figura 12.

Figura 12 - Estruturação da NBR 5419



Fonte: ABNT NBR 5419 – Parte 1, 2015.

Uma alteração notável ocorre na seção 2, que quantifica o risco ligado às descargas atmosféricas, propondo uma metodologia que resulta em uma avaliação para determinar se o risco é aceitável ou não. Caso esse risco não seja aceitável,

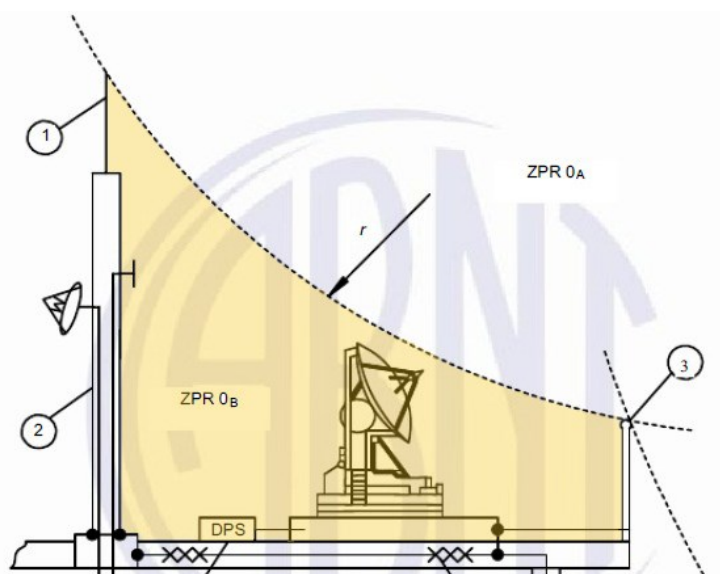
implementa-se a Proteção contra Descargas Atmosféricas (PDA), que abrange as seções 3 e 4 da norma. O SPDA é descrito na seção 3 e as Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) na seção 4.

Atualmente, qualquer novo projeto de proteção contra descargas atmosféricas deve se fundamentar nas normas do corpo de bombeiros local e na NBR 5419:2015, iniciando com uma análise de risco, e posteriormente, caso seja necessário, tomando medidas para mitigar danos materiais e riscos à vida dentro de uma estrutura.

3.1.1. Zonas de proteção contra descargas atmosféricas (ZPR)

A NBR 5419 introduz o conceito de zonas de proteção contra descargas atmosféricas (ZPR), onde a estrutura é dividida com base nas ameaças em cada área, conforme ilustrado na Figura 13 abaixo.

Figura 13 - Zonas de proteção



Fonte: ABNT NBR 5419 – Parte 4, 2015.

Ao analisar a Figura 13, podemos observar a presença de uma haste de captação do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), identificada pelo número 1. Essa haste tem a finalidade de proteger a área situada abaixo da linha tracejada, conhecida como Zona de Proteção contra Raios (ZPR) 0B. Embora essa zona esteja protegida contra descargas atmosféricas diretas, é

importante ressaltar que os equipamentos internos podem ser afetados pelas perturbações decorrentes dos campos eletromagnéticos.

Acima da ZPR 0B, há a ZPR 0A, uma área que pode ser atingida por uma descarga atmosférica direta, ou seja, é uma área desprotegida.

Esses conceitos foram introduzidos de maneira bastante simplificada, apenas para uma melhor compreensão do tema abordado sobre os sistemas fotovoltaicos neste documento.

3.2. Fatores para necessidade de SPDA

Para determinar a necessidade de SPDA de uma estrutura, de acordo com a NBR 5419-2:2015, é realizada uma análise de risco. Para este estudo, são analisadas as fontes de danos devem ser analisadas, sendo elas:

- Média das descargas atmosféricas na estrutura (*S1*);
- Média das descargas atmosféricas perto da estrutura (*S2*);
- Média das descargas atmosféricas na linha (*S3*);
- Média das descargas atmosféricas perto da linha (*S4*).

A norma também descreve os danos que as descargas provenientes dessas quatro fontes podem causar, classificando-os em três tipos listados a seguir:

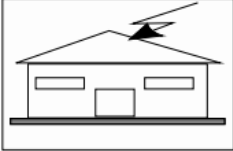

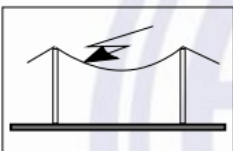
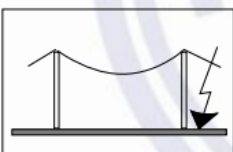
- Ferimentos a seres vivos (*D1*);
- Danos físicos (*D2*);
- E falha de sistemas eletrônicos (*D3*).

Ainda segundo a NBR 5419-2:2015, tais danos podem gerar sozinhos ou combinados diferentes tipos de perdas, sendo elas classificadas em quatro categorias:

- Perdas de vida humana (*L1*);
- Perdas de serviço público (*L2*);
- Perdas de patrimônio cultural (*L3*);
- E perdas de valores econômicos (*L4*).

O Quadro 1 caracteriza os tipos de perdas associadas aos tipos de danos e fontes de descargas atmosféricas.

Quadro 1 - Tipos de perdas e danos associados as fontes de danos

Descarga atmosférica		Estrutura	
Ponto de impacto	Fonte de danos	Tipo de danos	Tipo de perdas
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S2	D3	L1 ^b , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 ^a L1, L2, L3, L4 L1 ^b , L2, L4
	S4	D3	L1 ^b , L2, L4
<p>^a Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos.</p> <p>^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.</p>			

Fonte: ABNT NBR 5419 – Parte 2, 2015.

3.3. Equações relacionadas ao cálculo dos riscos

Para cada perda há um risco associado, $R1$ a $R4$ respectivamente, que deve ser avaliado de acordo com os cálculos de suas componentes de riscos RA , RB , RC , RM , RU , RV , RW e RZ . 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:

- RA : é a componente relativa 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.

- *RB*: é a componente relativa a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente.
- *RC*: é a componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP (*Lightning Electromagnetic Impulse*, em tradução livre Relâmpago Impulso Eletromagnético).

As componentes de risco para descargas próximo a estrutura são:

- *RM*: é a componente relativa a falhas de sistemas internos causados por LEMP. Para descargas na linha conectada:
- *RU*: é a componente relativa a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura.
- *RV*: é a componente relativa 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.
- *RW*: é a componente relativa 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:

- *RZ*: é a componente relativa a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta.

Através da equação (1), apresentada a seguir, é possível obter as componentes de riscos.

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

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. Para facilitar o entendimento, o Quadro 2 ilustra o cálculo das componentes de riscos de acordo com os tipos e fontes de danos.

Quadro 2 - Cálculo das componentes de riscos de acordo com os tipos e fontes de danos

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: ABNT NBR 5419 – Parte 2, 2015.

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), listadas a seguir.

$$R_1 = RA_1 + RB_1 + RC_1 + RM_1 + RU_1 + RV_1 + RW_1 + RZ_1 \quad (2)$$

$$R_2 = RB_2 + RC_2 + RM_2 + RV_2 + RW_2 + RZ_2 \quad (3)$$

$$R_3 = RB_3 + RV_3 \quad (4)$$

$$R_4 = RA_4 + RB_4 + RC_4 + RM_4 + RU_4 + RV_4 + RW_4 + RZ_4 \quad (5)$$

Após computados os valores de cada tipo de risco, deve se compará-los com o valor de risco tolerável descrito pela NBR 5419:2015 e expressos no Quadro 3 apresentada a seguir. 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.

Quadro 3 - Valores de risco toleráveis

Tipo de perda		$R_T (y^{-1})$
L1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
L2	Perda de serviço ao público	10^{-3}
L3	Perda de patrimônio cultural	10^{-4}

Fonte: ABNT NBR 5419 – Parte 2, 2015.

Para a análise da perda de valores econômicos $L4$, 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.

Também consta na norma que é permitido o estudo da estrutura como uma única zona definida ZS , 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 ZS .

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.

3.4. SPDA em Sistemas Fotovoltaicos

Na atualidade, 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, uma vez que 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 (PEREIRA, 2011).

Segundo a IEC 63227 (2011), o uso de proteção contra descargas atmosféricas é recomendado nessas instalações, com a finalidade de evitar grandes danos aos equipamentos integrantes da geração fotovoltaica e fazê-los durar por mais tempo.

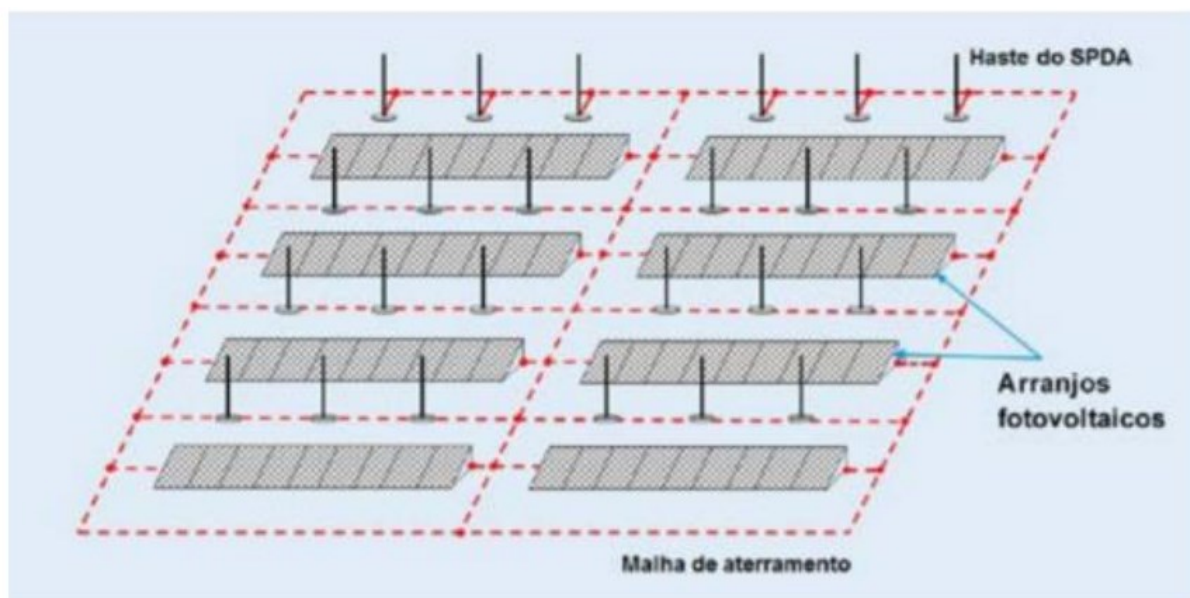
Os riscos e a eventual inevitabilidade de proteção contra raios devem ser analisados em projeto e, assim, dimensionar e utilizar corretamente os dispositivos de proteção para a diminuição e erradicação das falhas.

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 (SCHUCH, 2011).

Representadas a seguir, temos a Figura 14, que demonstra uma ilustração de como o sistema fotovoltaico deve ser protegido, e a Figura 15, que apresenta uma situação real de SPDA em um sistema fotovoltaico instalado no solo.

Figura 14 - Layout de um SPDA em um sistema fotovoltaico



Fonte: SCHUCH, 2011.

Figura 15 - Instalações reais de um SPDA em um sistema fotovoltaico



Fonte: DEHN, 2022.

Vale salientar que, com a popularização dos sistemas fotovoltaicos instalados em ambientes já construídos, como telhados de residências, é imprescindível fazer um novo cálculo e projeto para a SPDA deste espaço, uma vez que a SPDA antes projetada pode não levar em conta a implementação dessa geração de energia.

Outro ponto importante para levar em conta ao fazer um projeto de SPDA para áreas de painéis fotovoltaicos é a interferência das estruturas de SPDA na captação de energia dos painéis devido a eventuais sombras que possam ocorrer dependendo do tamanho da estrutura.

3.5. Métodos para dimensionamento de SPDA

Os três procedimentos mais comuns empregados na determinação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) incluem: o método de malhas, o de esfera rolante e o de Franklin (também denominado método do ângulo de proteção). Cada um apresenta suas peculiaridades e usos.

Ao dimensionar um SPDA para um prédio ou estrutura, um projetista leva em consideração as circunstâncias pré-existentes e, em geral, não considera o sistema fotovoltaico em suas estimativas.

Com a implementação de um Sistema Fotovoltaico (SFV), este se torna parte integrante das instalações do prédio. Portanto, é essencial que o SFV esteja alinhado com os demais sistemas. Em uma edificação que já conta com um SPDA instalado, é necessário ter cuidado e realizar análises que o projetista do SFV deve avaliar.

O primeiro passo é identificar qual método foi aplicado para o SPDA do local. Por exemplo, no método de malhas, frequentemente empregado em grandes armazéns, toda a área em que os módulos serão colocados está na zona ZPR 0A. Nesta situação, eles são instalados em um local onde podem atuar como receptores de descargas atmosféricas, conduzindo parte da energia para o interior da estrutura em vez de ser dissipada adequadamente pelo sistema. Assim sendo, é indispensável solicitar uma adaptação do SPDA para garantir a segurança do sistema fotovoltaico e da estrutura.

Para os métodos de Franklin e esfera rolante, existem algumas áreas protegidas localizadas na ZPR 0B. Neste caso, é necessário assegurar que todos os módulos fotovoltaicos estejam nesta zona, garantindo a proteção deles. Essa circunstância pode ser mais bem percebida na área em amarelo da Figura 13 previamente apresentada.

É aconselhável, antes de instalar o sistema fotovoltaico, pedir uma avaliação de um perito em Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) para confirmar que nenhum sistema causará interferência no outro. Vale ressaltar que, embora o SPDA não seja integrado às instalações de um sistema fotovoltaico, o projetista deste último pode ser responsabilizado caso seja demonstrado que essa avaliação foi negligenciada.

3.6 Surtos elétricos na rede

É fundamental compreender o conceito de surtos elétricos ou sobretensões transitórias, que são distúrbios ou perturbações na onda senoidal da rede, resultando em rápidos e acentuados aumentos na tensão. Estas variações podem ser provocadas por diversos fatores, incluindo a partida e parada de motores elétricos, apagões, chaveamentos, e descargas atmosféricas.

Em relação aos surtos elétricos, é importante destacar duas categorias principais: os surtos conduzidos e os surtos induzidos. Os surtos conduzidos ocorrem quando um raio atinge diretamente um equipamento ou suas linhas de alimentação,

conduzindo parte de sua energia pelo sistema elétrico ou componentes metálicos. Já os surtos induzidos acontecem quando o raio ocorre a uma distância de até 2 km dos equipamentos ou suas linhas de alimentação, e seu campo eletromagnético induz correntes elétricas no sistema elétrico e outros componentes metálicos. Ambos os surtos apresentam características e impactos distintos no sistema elétrico, demandando medidas de proteção contra surtos (MPS) adequadas (DEHN, TERMOTÉCNICA, s.d.).

3.7 SPDA em usinas de solo

Usinas fotovoltaicas de solo são grandes geradoras de energia e, devido a sua escala, requerem um investimento considerável. O retorno do investimento (*payback*) para essas usinas geralmente ocorre entre 5 a 10 anos após a instalação. Dada a importância do investimento e o tempo para o retorno, é crucial garantir que tais instalações estejam adequadamente protegidas contra descargas atmosféricas (DEHN, TERMOTÉCNICA, s.d.).

Mesmo que o Grupo de Risco (G.R.) não exija a instalação do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), é altamente recomendado o seu uso para evitar danos causados por descargas atmosféricas. No entanto, se o cliente optar por não adotar o SPDA, existem instruções específicas para instalação e proteção que devem ser seguidas (DEHN, TERMOTÉCNICA, s.d.).

Em resumo, a proteção adequada contra descargas atmosféricas é vital para garantir a segurança, durabilidade e eficiência das usinas fotovoltaicas de solo.

4. ESTUDO DE CASO

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se como instrumento de pesquisa uma situação adaptada de uma propriedade rural localizada em São José dos Pinhás, na região metropolitana de Curitiba. Nessa propriedade rural fictícia, considerou-se a instalação de uma pequena usina fotovoltaica com uma potência instalada de 75,4 kWp, composta por painéis solares posicionados ao longo do campo. O objetivo dessa planta fotovoltaica é fornecer eletricidade para as atividades diárias da propriedade rural, tais como irrigação, iluminação e refrigeração, com o intuito de reduzir a dependência da rede elétrica convencional e promover a utilização de energia limpa e renovável.

4.1. Descritivo da usina

A usina da propriedade rural é composta por 295 módulos fotovoltaicos com potência de 260 kWp. Esses módulos são interligados a 5 inversores trifásicos de 15 kW cada. A energia elétrica gerada pelos painéis solares é injetada na rede de distribuição da propriedade rural por meio de um transformador de 150 kVA, com tensões de 13800/380 V.

Os painéis fotovoltaicos estão instalados em uma estrutura metálica, com a altura máxima de 1,53 metros do solo. Eles estão distribuídos em 5 arranjos, sendo cada um composto por 59 módulos. Essa distribuição permite uma melhor captação da luz solar e otimiza a geração de energia. Além disso, os painéis possuem aterramento adequado para garantir a segurança elétrica.

Essas especificações técnicas demonstram a capacidade de geração de energia da usina fotovoltaica, sua conexão com a rede elétrica da propriedade rural e a estrutura física utilizada para acomodar os módulos solares.

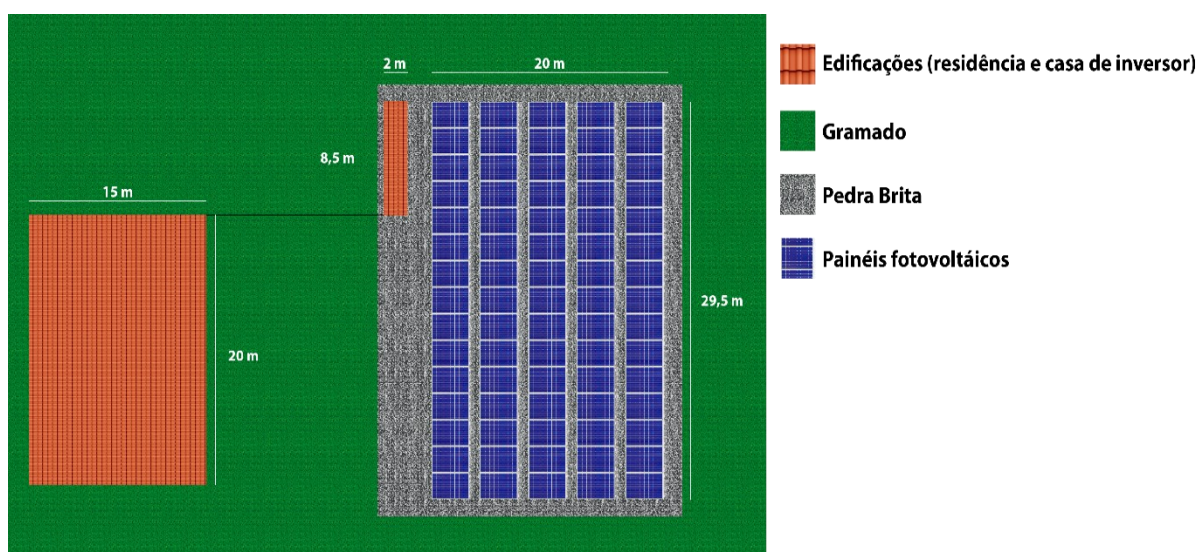
Na situação descrita, a usina fotovoltaica está instalada no campo, aproveitando a área disponível para a captação de energia solar. Além dos painéis solares, a minigeração fotovoltaica inclui uma pequena edificação que serve como abrigo para os inversores, quadro elétrico, *string box* e outros equipamentos necessários para o funcionamento do sistema.

É importante ressaltar que, nessa situação, não há proteção de SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas) ou DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos) previamente instalados nas estruturas da usina fotovoltaica.

Adicionalmente, a usina está localizada em um ambiente rural, isolado e sem construções ao redor. Essa informação contextualiza o cenário em que a propriedade rural está inserida, mostrando que a usina fotovoltaica não está sujeita a possíveis interferências ou sombreamento causado por edificações próximas.

Essas características específicas da instalação da usina fotovoltaica adaptada têm implicações para a segurança elétrica e proteção contra surtos, tornando importante considerar medidas adicionais de proteção adequadas ao ambiente rural e à exposição a possíveis descargas atmosféricas. O layout da usina é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Layout da minigeração fotovoltaica da propriedade rural fictícia – São José dos Pinhais



Fonte: Elaboração do autor, 2022.

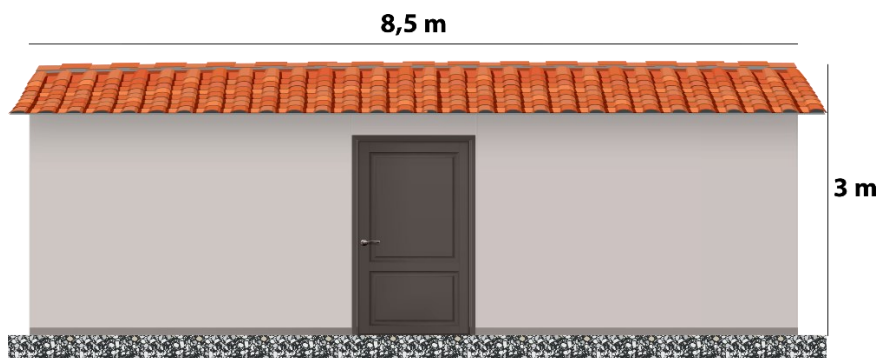
Na situação hipotética descrita, os módulos fotovoltaicos são conectados aos inversores por meio de cabos de 4,00 mm². Esses cabos possuem uma tensão máxima suportável de 1 kV e estão instalados em um eletroduto subterrâneo. No entanto, não foi identificada a presença de blindagem nos cabos de energia contínua e alternada.

É importante ressaltar que na região de captação da usina fotovoltaica não há avisos visíveis contra choques elétricos e não há uma linha de sinal conectada. Esses

aspectos são relevantes para a segurança dos operadores e possíveis intervenções no sistema.

A edificação onde os inversores são alocados é constituída por uma estrutura de alvenaria com piso de concreto, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Abrigo dos inversores da minigeração fotovoltaica da propriedade rural



Fonte: Elaboração do autor, 2022.

Na edificação dos inversores, além dos equipamentos elétricos, também é introduzida uma linha de sinal para a comunicação dos dados de produção do inversor para um servidor. Essa linha de sinal é estabelecida de forma aérea e é composta por cabos de fibra ótica.

4.2. Cálculo do gerenciamento de risco do estudo de caso

No cálculo do gerenciamento de risco, foi utilizada uma planilha eletrônica automatizada no *software* Excel, seguindo os parâmetros estabelecidos na norma NBR 5419-2:2015. Essa planilha utiliza as características da estrutura e das linhas de energia e sinal conectadas como parâmetros de entrada para realizar a análise da viabilidade e inserção de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) ao sistema.

O estudo leva em consideração diversos fatores, como a localização geográfica da propriedade rural, as características da estrutura onde os equipamentos estão instalados e os tipos de cabos utilizados para a transmissão de energia e sinal. Com base nessas informações, foram realizados cálculos e avaliações de risco, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma, para determinar a necessidade e eficácia do SPDA no sistema.

A automatização da planilha facilita o processo de análise e tomada de decisão, fornecendo resultados rápidos e precisos. Dessa forma, os gestores e profissionais envolvidos podem utilizar as informações fornecidas pela planilha para planejar e implementar medidas de proteção adequadas, visando minimizar os riscos de danos causados por descargas atmosféricas e garantir a segurança do sistema fotovoltaico.

4.3. Situações de análise do estudo de caso

No presente estudo, a análise foi conduzida considerando cada edificação de forma individualizada, sendo dividida em diferentes zonas. Essas zonas incluem a zona de captação, onde os módulos fotovoltaicos estão alocados, a zona de transformação, onde os inversores são instalados, e a residência do fazendeiro.

Ao realizar a análise por zona, é possível avaliar de forma mais precisa e específica as características, riscos e necessidades de cada área da propriedade rural.

A zona de captação, por exemplo, pode exigir considerações relacionadas à orientação dos painéis solares, inclinação e sombreamento, visando otimizar a geração de energia. Já a zona de transformação requer atenção especial para a instalação adequada dos inversores, com considerações sobre a dissipação de calor, ventilação e proteção contra possíveis falhas elétricas. Além disso, é importante garantir que a conexão entre os painéis solares e os inversores seja realizada de forma segura e eficiente.

Por fim, a residência do fazendeiro, como um local habitado, requer análises específicas relacionadas à segurança elétrica, como sistemas de aterramento, proteção contra sobretensões e distribuição adequada da energia gerada.

Ao considerar cada edificação por zona, é possível realizar uma análise mais detalhada e direcionada, levando em conta as particularidades de cada área e garantindo uma implementação adequada do sistema fotovoltaico na propriedade rural.

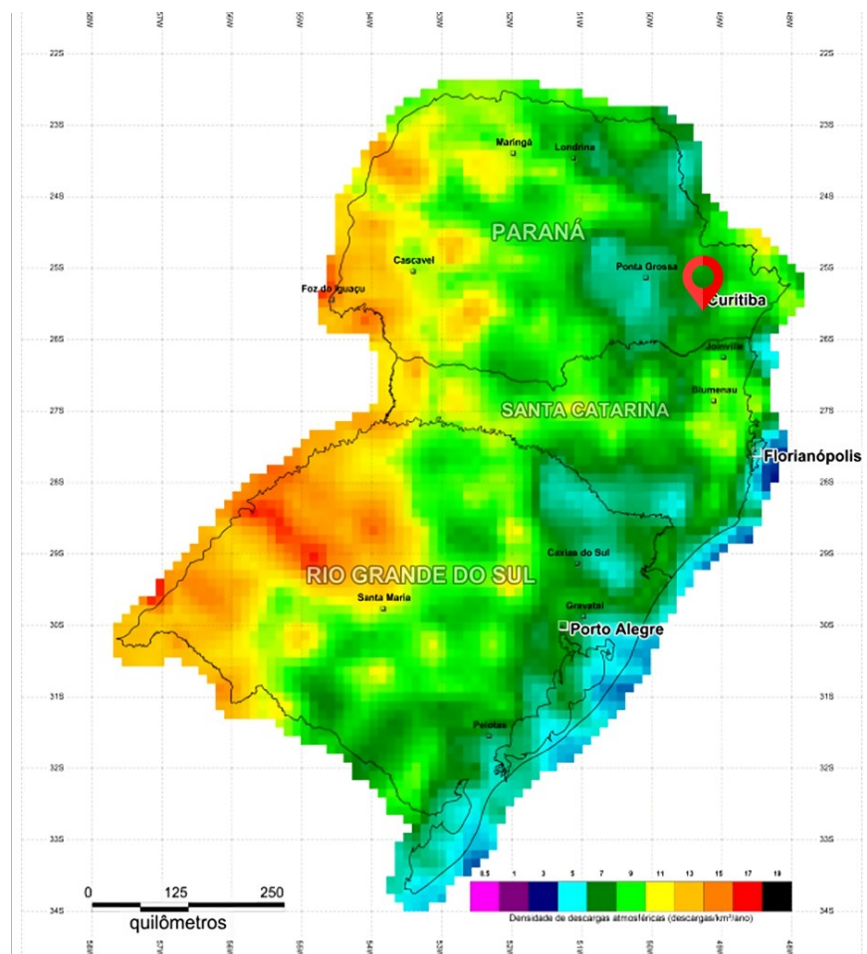
4.4. Cálculo do tempo médio para impacto direto na usina fotovoltaica

Calcular o tempo médio para ocorrer um impacto direto ou indireto de raio em um sistema fotovoltaico é uma abordagem válida para avaliar a exposição do

investimento a riscos relacionados a descargas atmosféricas. No entanto, é importante ressaltar que essa estimativa é baseada em fatores estatísticos e probabilísticos, e cada localidade possui características únicas que podem influenciar a ocorrência de raios.

Para isto, de acordo com a norma NBR 5419-2:2015 Anexo A, o primeiro passo é conhecer o índice NG da região da usina. Este valor corresponde à densidade de descargas atmosféricas para a terra em determinada região, por quilômetro quadrado, e pode ser consultado no anexo F da parte 2 da NBR 5419 conforme a Figura 18 destacada abaixo.

Figura 18 - Densidade de descargas atmosféricas NG – Mapa da região sul (descargas atmosféricas/km²/ano)



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5419 – Parte 2, 2015.

Segundo o mapa, a densidade de descargas atmosféricas em São José dos Pinhais é de aproximadamente 9 raios/(km².ano). Conhecendo o Ng podemos calcular o tempo estimado para que uma descarga atmosférica atinja diretamente um SFV, por meio da equação dada pela norma e expressa a seguir:

$$Td = 1 / (Ng * Ad) \quad (6)$$

Onde:

Td é o tempo estimado, em anos, para o impacto direto do raio no sistema.

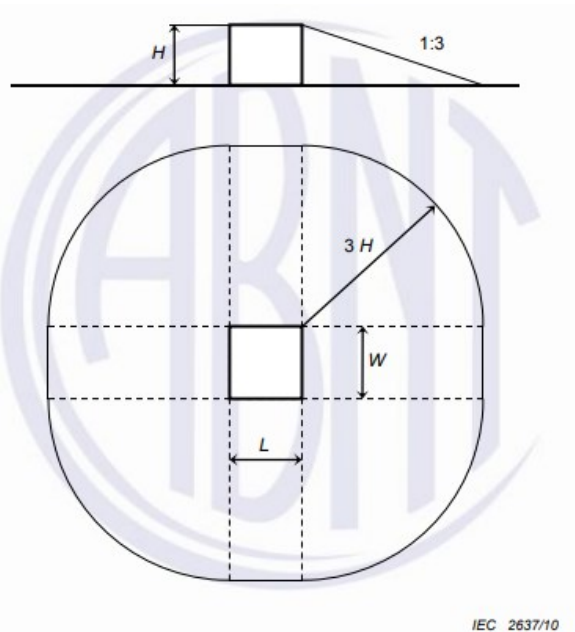
Ng é a densidade de descargas atmosféricas para a terra, em raios/(km².ano).

Ad é a área de exposição equivalente, em km².

A área de exposição equivalente da edificação ou usina (Ad) é calculada de forma diferente da área convencional, já que leva em consideração outros fatores além de comprimento e largura. Por exemplo, consultando a Figura 20, temos que para uma estrutura retangular simples, a fórmula de Ad, de acordo com a norma, será:

$$Ad = L * W + 2 * (3 * H) * (L + W) + \pi * (3 * H)^2 \quad (7)$$

Figura 19 - Área de exposição equivalente Ad de uma estrutura retangular



Fonte: ABNT NBR 5419 – Parte 2, 2015.

Onde:

L é a largura da edificação/usina, em m.

W é o comprimento da edificação/usina, em m.

H é a altura da edificação/usina, em m.

Na situação adaptada, consideremos o cálculo da área de exposição equivalente para uma usina fotovoltaica com dimensões de 20 m x 29,5 m e os painéis solares atingindo uma altura máxima de 1,5 m.

$$Ad = 723,585m^2 \text{ ou } 0,0000723585km^2$$

Considerando o índice Ng da localização do sistema fotovoltaico, o resultado da equação de tempo estimado, em anos, ficará da seguinte maneira:

$$Td = 153,56 \text{ anos}$$

Portanto, é possível que uma descarga atmosférica atinja diretamente a usina em um período de até 153,56 anos. É importante ressaltar que essa estimativa é baseada em dados estatísticos e, portanto, o período pode variar, tanto para mais quanto para menos.

4.5. Cálculo do tempo médio para descarga próxima ao sistema

Ainda de acordo com a norma NBR 5419-2:2015 Anexo A, é possível estimar quanto tempo levará para que ocorra uma descarga próxima ao sistema (indireta). Para isto, foi preciso utilizar uma outra equação:

$$Ti = 1/(Ng * Am) \quad (8)$$

Onde:

Ti é o tempo estimado, em anos, para o impacto indireto do raio no sistema.

Ng é a densidade de descargas atmosféricas para a terra, em raios/(km².ano).

Am é a área de exposição equivalente para descargas próximas a estrutura/edificação, em km².

A área de exposição equivalente para descargas próximas a edificação ou usina (Am) é calculada de forma diferente da área convencional e da área de exposição Ad. De forma simplificada, ela estende o perímetro da estrutura em 500 m.

$$Am = 2 * 500 * (L + W) + \pi * 500^2 \quad (9)$$

Onde:

L é a largura da edificação/usina, em m.

W é o comprimento da edificação/usina, em m.

Para as medidas informadas no exemplo anterior, o valor de Am será:

$$Am = 825.000 \text{ m}^2 \text{ ou } 0,825 \text{ km}^2$$

Usando este resultado na equação do tempo médio para o impacto do raio, considerando o mesmo valor Ng do exemplo anterior, obtemos o seguinte resultado:

$$Ti = 0,134 \text{ ano}$$

Nota-se que este valor é inferior a 1, indicando que, em menos de um ano, poderá ocorrer uma descarga atmosférica próxima ao SFV com capacidade de causar danos.

Ao transformar o resultado numérico obtido em Ti para meses, observamos que, se não forem adotadas medidas de proteção contra os efeitos indiretos do raio, poderemos ter danos no SFV em menos de 2 meses de operação. Embora estas equações sirvam de referência para justificar o investimento da proteção contra raios no SFV, a decisão não deve ser tomada unicamente por suas análises.

O gerenciamento de risco, conforme recomenda a norma ABNT NBR 5419-2:2015 e/ou as informações contidas na IEC TR 63227:2020, são fundamentais para a definição da obrigatoriedade (ou não) da instalação da PDA.

4.6. Cálculo da análise de riscos conforme NBR 5419:2015

Nesta seção, serão apresentadas as componentes de risco identificadas em cada situação analisada, assim como o risco total mensurado. O valor calculado será comparado com o risco tolerável descrito na norma NBR 5419:2015 para cada tipo de perda, conforme indicado no Quadro 3 da seção 3.3 deste trabalho.

É importante ressaltar que as componentes relacionadas às perdas do tipo L2 (serviço público) e L3 (patrimônio cultural) não foram mensuradas, uma vez que a instalação em questão não envolve nenhum tipo de serviço público ou patrimônio cultural.

No estudo do risco relacionado às perdas de vidas humanas, consideramos uma família composta por 5 pessoas, com uma permanência de 8760 horas por ano na casa do fazendeiro (24 horas por dia), para as linhas de energia e sinal foi considerado um comprimento de 1000m, visto de longa distância entre as estruturas e a rede de distribuição. Esses valores foram adotados considerando que sempre haverá algum membro da família presente dentro da residência. Por outro lado, para a casa de inversores e o parque fotovoltaico, não consideramos a presença de nenhuma pessoa, uma vez que durante uma tempestade a família se abrigará na residência principal.

Essas considerações permitem uma avaliação abrangente do risco em diferentes áreas da propriedade rural, levando em conta as atividades e a presença humana em cada uma delas durante condições climáticas adversas.

Para a avaliação do Risco R4, relacionado às perdas de valor econômico, foi adotado o valor representativo de risco tolerável igual a 10^{-3} . Essa escolha foi feita devido à indisponibilidade dos dados específicos da estrutura, do conteúdo das zonas e dos sistemas internos da propriedade rural. Sem essas informações, não é possível realizar uma avaliação de risco completa de acordo com o Anexo D da NBR 5419-2.

A falta de dados detalhados sobre a estrutura, o conteúdo e os sistemas internos da propriedade rural impossibilitam uma análise precisa dos possíveis prejuízos econômicos em caso de ocorrência de descargas atmosféricas. Portanto, a utilização de um valor representativo de risco tolerável é uma abordagem cautelara, considerando a importância de garantir um nível aceitável de segurança econômica para a propriedade rural.

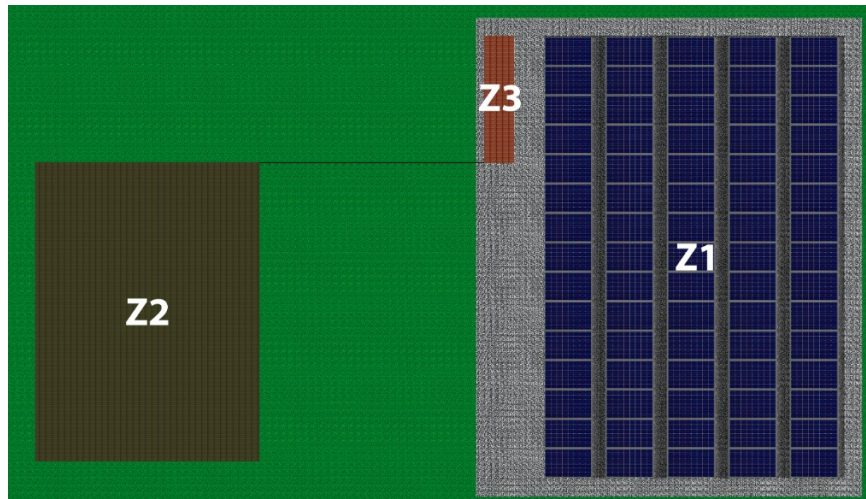
É importante ressaltar que, em situações reais, é recomendado realizar uma análise mais detalhada e precisa do valor econômico em risco, levando em consideração os dados específicos da estrutura, dos equipamentos e dos bens materiais presentes.

4.7. Análise da usina fotovoltaica como multizonas

Neste contexto específico, a estrutura da propriedade rural foi dividida em duas zonas distintas, denominadas ZS (Zona S): a Zona de Captação (Z1), que compreende a área externa onde estão localizados os módulos fotovoltaicos; e a Zona Residencial (Z2) e a Zona de Transformação (Z3), que são áreas internas específicas.

A Zona Residencial (Z2) é a área interna 1 da propriedade rural, onde se encontra a residência do fazendeiro. Essa área é destinada à habitação e é onde a família reside. Já a Zona de Transformação (Z3), conhecida como área interna 2, engloba o abrigo dos inversores, onde os equipamentos elétricos e sistemas de conversão de energia estão instalados. A Figura 20 mostra essa divisão espacial.

Figura 20 - Delimitações das zonas Z1, Z2 e Z3



Fonte: Elaboração do autor, 2022.

Na situação hipotética considerada, as dimensões das estruturas são as seguintes:

- Zona Z1: Comprimento de 20 metros, largura de 29,5 metros e altura de 1,5 metro.
- Zona Z2: Comprimento de 15 metros, largura de 20 metros e altura de 6 metros.
- Zona Z3: Comprimento de 2 metros, largura de 8,5 metros e altura de 3 metros.

Essas dimensões são importantes para realizar uma análise mais precisa e específica das áreas envolvidas no sistema de minigeração distribuída. Ao considerar as dimensões das zonas, é possível calcular e quantificar os riscos associados a cada uma delas, levando em conta suas características e peculiaridades.

4.8. Resultados análise de riscos por zonas

Com os dados já apresentados, foram realizados os cálculos na planilha que foi projetada para a resolução da situação. O memorial de cálculo gerado se encontra no anexo A deste documento e os principais resultados encontrados para cada combinação risco x zona estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados das variáveis do estudo de caso obtidos através da planilha de apoio

Riscos	Z1	Z2	Z3
R_A	0	$3,0 \times 10^{-5}$	0
R_B	–	$2,7 \times 10^{-3}$	0
R_U	–	$4,32 \times 10^{-3}$	4×10^{-3}
R_V	–	$4,32 \times 10^{-1}$	0
Total de R1 na Zona	0	$4,39 \times 10^{-1}$	4×10^{-3}

Fonte: Elaboração do autor, 2022.

Com isso, encontrou-se $R1 = 0,4434 \times 10^{-5}$ e chegou-se à conclusão de que o risco R1 calculado é inferior ao risco tolerável, de acordo com a Tabela 4 da NBR 5419-2:2015.

É importante ressaltar que neste estudo foram consideradas apenas as características físicas da unidade de minigeração para a análise de perdas econômicas, levando em conta o déficit nos valores econômicos da instalação. No entanto, em usinas de grande porte, com um alto valor agregado, é recomendada uma avaliação mais detalhada e criteriosa dos riscos relacionados às perdas do tipo L4, de acordo com o Anexo D da Parte II da NBR 5419:2015. Essa abordagem permitirá uma análise mais aprofundada dos riscos econômicos específicos dessas usinas, levando em consideração aspectos adicionais e peculiaridades do empreendimento.

Considerando os resultados obtidos na análise de riscos, e a dispensabilidade de instalação de SPDA, é sugerido a instalação de dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) Classe II de corrente contínua nos cabos provenientes dos painéis fotovoltaicos, alocados em suas respectivas *string box*, para proteção do sistema. Os circuitos terminais dos inversores são conectados aos barramentos fase, neutro e terra do quadro geral. Além disso, o circuito de saída para o transformador

elevador é conectado a um DPS de corrente alternada Classe II, proporcionando proteção adicional contra surtos elétricos, conforme a normativa IEC 63227:2020.

Essas medidas de proteção são importantes para mitigar os efeitos danosos causados por descargas atmosféricas e garantir a segurança e integridade do sistema fotovoltaico.

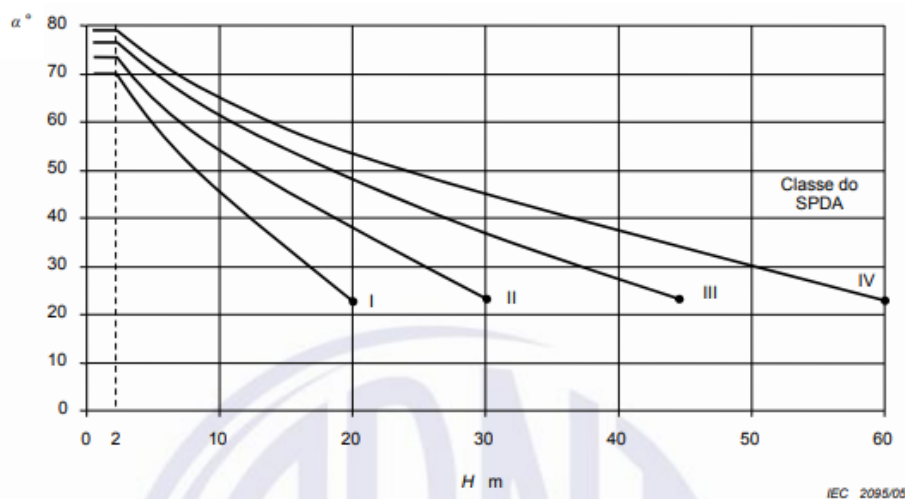
4.9. Solução para o sistema fotovoltaico com inserção de SPDA

Para usinas fotovoltaicas de solo, a IEC TR 63227:2020 recomenda que, no mínimo, seja adotada uma proteção contra raios de nível III, mesmo que o gerenciamento de risco aponte para valores inferiores ou dispense qualquer proteção, a instalação deste sistema representará um maior nível de segurança para os ativos da usina, além de segurança para as pessoas que residem próximo a este parque de geração de energia elétrica fotovoltaica.

Para realizar a análise, foi considerada a incidência de descargas atmosféricas através do ângulo de proteção, foi considerado que a planta deveria possuir SPDA com classe I (mais protegido). Neste caso, outra variável a ser analisada é a altura do painel fotovoltaico, que, conforme pode informado no estudo de caso é inferior a 2 metros.

Utilizando a curva de classe do SPDA I, que pode ser observado na Figura 21, e considerando a altura do painel de 1,53 m, obtemos um ângulo de proteção de 70° (NBR 5419-3, 2015).

Figura 21- Ângulo de proteção SPDA



Fonte: ABNT NBR 5419 – Parte 3, 2015

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou apresentar as mais recentes metodologias aplicadas para proteções contra descargas atmosféricas, diretas e indiretas, na forma de tensões e correntes elétricas induzidas em sistemas de microgeração fotovoltaica.

O estudo de caso deste trabalho, foi considerado um sistema de microgeração fotovoltaica localizado no terreno de uma propriedade rural. Nesta, foram mensurados todos os parâmetros para uma análise de riscos e verificação da necessidade ou não necessidade de um SPDA de inserido ao sistema. Através da confecção da planilha de gerenciamento de risco, foi possível realizar os cálculos das componentes e dos riscos associados com precisão, levando em consideração todas as casas decimais. A planilha evita possíveis erros que poderiam ocorrer no cálculo manual, sendo uma forma mais prática e rápida de realizar a análise de risco. Em um contexto de mercado de trabalho, a planilha seria uma ótima forma de apresentar um memorial de cálculo preciso com rapidez e clareza.

No Brasil não há uma normativa específica sobre proteção de sistemas fotovoltaicos contra surtos e descargas atmosféricas, com isso, utiliza-se como referência as normas IEC 63227:2020, organização da qual o Brasil faz parte. Nela estão presentes as recomendações direcionadas especificamente para o projeto da PDA de sistemas fotovoltaicos.

De acordo com o objetivo inicial do presente trabalho, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Na estrutura analisada, verificou-se que não é necessária a instalação do SPDA, uma vez que os riscos de perda de vida humana são baixos devido à baixa circulação de pessoas no local analisado. Com o aumento do tamanho da usina considerada, torna-se necessária a uma nova na análise de riscos para verificar a necessidade ou não da inserção de um SPDA para reduzir as perdas de valor econômico. Assim, conclui-se que usinas de pequeno porte, com as mesmas características apresentadas, não necessitam de um SPDA devido aos riscos baixos, levando em consideração a densidade de raios na cidade de São José dos Pinhais/PR. Para usinas fotovoltaicas de solo, a IEC TR 63227:2020 recomenda que, no mínimo, seja adotada uma proteção contra raios de nível III, mesmo que o gerenciamento de risco aponte para valores inferiores ou dispense qualquer proteção.

Em relação à perda de valor econômico, obteve-se um montante abaixo do risco tolerável adotado, resultando na não necessidade de inserção de um SPDA. No

entanto, uma análise mais detalhada desse tipo de perda poderia resultar em um valor diferente, considerando os sistemas internos, estrutura e conteúdo de cada zona. O custo para instalar um sistema de proteção adequação com produtos de maior qualidade pode parecer alto à primeira vista, porém este se paga pela disponibilidade do sistema, que por sua vez é necessária para garantir o retorno do investimento.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo de uma geração fotovoltaica em que seja possível realizar a análise descrita no anexo D da norma utilizada neste estudo. Também sugere-se avaliar o impacto financeiro da instalação do SPDA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1**: Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios Gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-2**: Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de Risco. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-3**: Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-4**: Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 61643-1**: Dispositivos de Proteção Contra Surto em Baixa Tensão – Parte 1. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto. Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, Sergio. **Proteção contra descargas atmosféricas em usinas fotovoltaicas**. CANALSOLAR, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/protacao-contradescargas-atmosfericas-em-usinas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 09/12/2021 às 17:58h.

PAULINO, José Osvaldo Saldanha. **Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações**. Minas Gerais: Ed. Clamper, 1ª Ed 2016.

DEHN, TERMOTÉCNICA. **Apostila Introdutória: Proteção contra descargas atmosféricas em sistemas fotovoltaicos (SFV)**. São Paulo, 2011.

Incidências de descargas no país: mapa do biênio 2018/2019. **INPE**, 2019. Disponível em:

<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/incidencia.de.descargas.no.pais.php>. Acesso em: 10/05/2022 às 17:57h.

FEITOSA, J. N. **Análise da inserção de SPDA em sistemas fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRSA, Brasil, 2021.

FILHO, Silvério Visacro; **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC TR 63227**: Lightning and surge voltage protection for photovoltaic (PV) power supply systems. Geneva, 2020.

Nova rede de dados permite registro mais preciso de raios. **INPE**, 2017. Disponível em:

http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=4603#:~:text=Levantamento%20in%20realizado%20pelo%20Instituto,foi%20de%2077%2C%20milh%C3%B5es. Acesso em: 10/12/2021 às 15:57h.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61643**: Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods. Geneva, 2011.

LISBOA, B. R. **Estudo de proteção contra descargas atmosféricas diretas em uma unidade de minigeração fotovoltaica distribuída**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, Brasil. 2018.

PAULINO, José Osvaldo Saldanha; BARBOSA, Célio Fonseca; MOREIRA; Ronaldo Kascher; BARBOSA, Wagner Almeida; LOBO, Marcelo Augusto Freire; LOBO, Ailton Ricaldoni. **Proteção De Equipamentos Elétricos E Eletrônicos Contra Surtos Elétricos Em Instalações**. Lagoa Santa:2016, Editora Campler, 1ª Ed., 2016.

PEREIRA, F.; OLIVEIRA, M. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. Porto: Publindústria, 2011.

PINHO, Joao Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

Energia solar: sistemas on-grid e off-grid. **REVISTA POTÊNCIA**, 2022. Disponível em: <https://revistapotencia.com.br/eletricista-consciente/instalacao-fotovoltaica/energia-solar-sistemas-on-grid-e-off-grid/>. Acesso em: 20/05/2022 às 23:14h.

SCHUCH, L. et al. **Sistemas autônomo de iluminação pública de alta eficiência baseado em energia solar e leds**. Eletrôn Potên. Campinas, vol. 16, n. 1, p.17-27, fev. 2011

VILLALVA, M.; GAZOLI, J. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Erica, 2012.

ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA O ESTUDO DE CASO

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO - ABNT NBR 5419-2:2015

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

ANÁLISE DE RISCO

Conforme a Norma ABNT NBR 5419-2:2015, a necessidade da utilização de medidas de proteção para reduzir as perdas devido às descargas atmosféricas deve ser determinada pela análise de risco.

O mau funcionamento dos sistemas eletroeletrônicos não é coberto pela série de Normas ABNT NBR 5419:2015. Para tanto, deverá ser consultada a Norma IEC 61000-4-5.

O fato de R_1 , R_2 e R_3 serem diferentes de zero implica que há riscos envolvidos, ainda que estes sejam menores que os valores tolerados e poderão ocorrer acidentes.

De acordo com a Norma ABNT NBR 5419-1:2015, os riscos R_1 , R_2 e R_3 devem ser considerados na avaliação da necessidade de proteção contra descargas atmosféricas, sendo R_4 opcionalmente utilizado.

Importante!

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

DETERMINAÇÃO DAS PERDAS RELEVANTES À ESTRUTURA

Conforme a seção 4.1.3 da ABNT NBR 5419-2:2015, são definidos os seguintes tipos de perdas:

L1: perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes);
 L2: perda de serviço ao público;
 L3: perda de patrimônio cultural;
 L4: perda de valores econômicos (estrutura, conteúdo e perda de atividades).

Para a estrutura em questão são feitas as seguintes observações:

A estrutura não é responsável por serviços públicos a usuários fora de seu interior (gás, água, energia, TV ou linhas de sinais);

A estrutura não possui patrimônio cultural em seu interior;

Não será realizado estudo de impacto econômico das soluções contra descargas atmosféricas, face às perdas econômicas decorrentes destas.

Dessa forma, são relevantes as seguintes perdas para as zonas definidas:

ZONA	DESCRIÇÃO	PERDAS
Zona 01	Microgeração	L1
Zona 03	Residência	L1
Zona 04	Casa inversores	L1

E, para os tipos de perdas, serão calculados os seguintes riscos:

ZONA	DESCRIÇÃO	PERDAS
Zona 01 (ext. 01)	Microgeração	R1
Zona 03	Residência	R1
Zona 04	Casa inversores	R1

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO


DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DOS RISCOS (R1)

Para a composição do risco R1, são feitas as seguintes considerações:

A estrutura não possui risco de explosão;
 A estrutura não é um hospital com equipamentos elétricos para salvar vidas;
 A falha dos sistemas internos não porá imediatamente em perigo a vida humana.

R1 será dado por:

ZONA	DESCRIÇÃO	COMPOSIÇÃO
Zona 01 (ext. 01)	O	R1
Zona 03	Microgeração	R1=RA
Zona 04	Residência	R1=RA+RB+RU+RV
	Casa inversores	R1=RA+RB+RU+RV

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMIÇÃO

R1: RISCO DE PERDA DE VIDA HUMANA - ZONA: Microgeração


R_A (ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico - desc. na est.)

Número de eventos perigosos para a estrutura (N _D)		
N _G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng	9,00 desc/km ² /ano
A _D	Área de exposição equivalente	590,00 m ²
	Microgeração Estrutura irregular. Calculada manualmente.	
C _D	Fator de localização da estrutura Isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
N _D	$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$	5,31 E-03 desc/ano

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico (P _A)		
P _{TA}	Probabilidade de uma descarga em uma estrutura causar choque a seres vivos (tensões de toque e de passo) Nenhuma medida de proteção	1
P _B	Probabilidade de uma descarga em uma estrutura causar danos físicos Estrutura não protegida por SPDA	1
P _A	$P_A = P_{TA} \times P_B$	1,00 E+00

Quantidade de perda L _A		
r _t	Tipo da superfície do solo ou piso Agricultura, concreto	1,00 E-02
L _T	Vítimas feridas por choque elétrico Todos os tipos	1,00 E-02
n _z	Número de pessoas na zona	0
n _t	Número total de pessoas na estrutura	5
t _z	Tempo total de pessoas presentes na estrutura (horas/ano)	0 h/ano
L _A	$L_A = r_t \times L_T \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	0,00 E+00

R_A	$R_A = N_D \times P_A \times L_A$	0,00 E+00 / ano
-------	-----------------------------------	-----------------

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

Para zonas externas, o único componente de risco relevante é R_A . Assim:

R_1	$R_1 = R_A$	0,00 E+00 / ano
-------	-------------	-----------------

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
		EMIÇÃO
		07/06/2023

R1: RISCO DE PERDA DE VIDA HUMANA - ZONA: Residência

R_A (ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico - desc. na est.)

Número de eventos perigosos para a estrutura (N _D)		
N _G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng	9,00 desc/km ² /ano
A _D	Área de exposição equivalente	300,00 m ²
	Residência Estrutura irregular. Calculada manualmente.	
C _D	Fator de localização da estrutura Isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
N _D	$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$	2,70 E-03 desc/ano

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico (P _A)		
P _{TA}	Probabilidade de uma descarga em uma estrutura causar choque a seres vivos (tensões de toque e de passo) Nenhuma medida de proteção	1
P _B	Probabilidade de uma descarga em uma estrutura causar danos físicos Estrutura não protegida por SPDA	1
P _A	$P_A = P_{TA} \times P_B$	1,00 E+00

Quantidade de perda L _A		
r _t	Tipo da superfície do solo ou piso Asfalto, linóleo, madeira	1,00 E-05
L _T	Vítimas feridas por choque elétrico Todos os tipos	1,00 E-02
n _z	Número de pessoas na zona	5
n _t	Número total de pessoas na estrutura	5
t _z	Tempo total de pessoas presentes na zona (horas/ano)	8.760 h/ano
L _A	$L_A = r_t \times L_T \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	1,00 E-07

R_A	$R_A = N_D \times P_A \times L_A$	2,70 E-10 / ano
-------	-----------------------------------	-----------------

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

R_B (danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura)

Número de eventos perigosos para a estrutura (N_D)		
(já calculado)		
N_D	$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$	2,70 E-03 desc/ano

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos (P_B)		
(já calculado)		
P_B	Estrutura não protegida por SPDA	1

Quantidade de perda L_B		
r_p	<i>Providências para redução de consequências de incêndios</i>	1
	Nenhuma providência	
r_f	<i>Risco de incêndio ou explosão na estrutura</i> Baixo risco de incêndio	1,00 E-03
h_z	<i>Presença de perigo especial</i>	1
	Sem perigo especial	
L_F	<i>Número de vítimas por danos físicos</i> Outros	1,00 E-02
n_z	<i>Número de pessoas na zona</i>	5
n_t	<i>Número total de pessoas na estrutura</i>	5
t_z	<i>Tempo total de pessoas presentes na zona (horas/ano)</i>	8760
L_B	$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	1,00 E-05

R_B	$R_B = N_D \times P_B \times L_B$	2,70 E-08 / ano
-------	-----------------------------------	-----------------

R_U (ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico - desc. na linha)

Número de eventos perigosos por descargas na linha (N_L)		
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng	9,00 desc/km ² /ano

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO


C_E	Fator ambiental (para todas as linhas) Rural		1
<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>A. exposição / Instalação / Tipo</i>	<i>Parâmetros</i>
1	Energia	A_{L1} A. de exposição equivalente da linha	40.000,00 m ²
<i>Descrição</i>		C_{I1} Aéreo	1,00
LINHAS DE ENERGIA 2		C_{T1} Linha de energia em AT (trafo AT/BT)	0,20
2	Sinal	A_{L2} A. de exposição equivalente da linha	40.000,00 m ²
<i>Descrição</i>		C_{I2} Aéreo	1,00
LINHAS DE SINAL 2		C_{T2} Linha de energia ou sinal	1,00

Número de eventos perigosos por descargas na linha (N_L)				
N_L	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação A.8</i>	N_L
	1	Energia	$N_{L1} = N_G \times A_{L1} \times C_{I1} \times C_{E1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	7,20 E-02
	2	Sinal	$N_{L2} = N_G \times A_{L2} \times C_{I2} \times C_{E2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	3,60 E-01

Número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente (N_{DJ})				
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng		9,00 desc/km ² /ano	
<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Estrutura adjacente / Localização / Tipo</i>		<i>Parâmetros</i>
1	Energia	A_{DJ1}	Não Aplicável	-
<i>Descrição</i>		C_{DJ1}	Não Aplicável	-
LINHAS DE ENERGIA 2		C_{T1}	Linha de energia em AT (trafo AT/BT)	0,20
2	Sinal	A_{DJ2}	Não Aplicável	-
<i>Descrição</i>		C_{DJ2}	Não Aplicável	-
LINHAS DE SINAL 2		C_{T2}	Linha de energia ou sinal	1,00

Número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente (N_{DJ})				
N_{DJ}	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação A.5</i>	N_{DJ}
	1	Energia	$N_{DJ1} = N_G \times A_{DJ1} \times C_{DJ1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	0,00 E+00
	2	Sinal	$N_{DJ2} = N_G \times A_{DJ2} \times C_{DJ2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	0,00 E+00

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico (P_U)		
P_{TU}	Medidas de proteção contra tensões de toque Nenhuma medida de proteção	1
P_{EB}	DPS's na entrada de linha (ligações equipotenciais) Sem DPS	1
<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Tipo de linha / U_w / Blindagem</i>
		<i>Parâmetros</i>

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA			
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE			
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br			
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO 07/06/2023		
0	Energia	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD1}	1
<i>Descrição</i>		U_{W1}	2,5 kV	P_{LD1}	1,00
LINHAS DE ENERGIA 2		R_{S1}	Sem blindagem		
2	Sinal	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD2}	1
<i>Descrição</i>		U_{W2}	1,5 kV	P_{LD2}	1,00
LINHAS DE SINAL 2		R_{S2}	Sem blindagem		

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico (P_U)				
P_U	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação B.8</i>	P_U
	1	Energia	$P_{U1} = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD1} \times C_{LD1}$	1,00 E+00
	2	Sinal	$P_{U2} = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD2} \times C_{LD2}$	1,00 E+00

Quantidade de perda L_U		
(já calculado)		
L_U	$L_U = L_A = r_t \times L_T \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	1,00 E-07

Risco R_U de ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico por descargas nas linhas conectadas				
R_U	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação 10</i>	R_U
	1	Energia	$R_{U1} = (N_{L1} + N_{D11}) \times P_{U1} \times L_U$	7,20 E-09 / ano
	2	Sinal	$R_{U2} = (N_{L2} + N_{D12}) \times P_{U2} \times L_U$	3,60 E-08 / ano

R_U	$R_U = R_{U1} + R_{U2} + R_{U3} + \dots$	4,32 E-08 / ano
-------	--	-----------------

R_v (danos físicos causados por centelhamentos - descargas nas linhas)

Número de eventos perigosos por descargas na linha (N_L)				
(já calculado)				
N_L	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação A.8</i>	N_L
	1	Energia	$N_{L1} = N_G \times A_{L1} \times C_{T1} \times C_{E1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	7,20 E-02
	2	Sinal	$N_{L2} = N_G \times A_{L2} \times C_{T2} \times C_{E2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	3,60 E-01

Número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente (N_{DJ})				
(já calculado)				
N_{DJ}	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação A.5</i>	N_{DJ}
	1	Energia	$N_{DJ1} = N_G \times A_{DJ1} \times C_{DJ1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	0,00 E+00
	2	Sinal	$N_{DJ2} = N_G \times A_{DJ2} \times C_{DJ2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	0,00 E+00

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos (P_v)				
P_{EB}	DPS's na entrada de linha (ligações equipotenciais) Sem DPS			1
Linha	Tipo	Tipo de linha / U_w / Blindagem		Parâmetros
1	Energia	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD1} 1
Descrição		U_{w1}	2,5 kV	P_{LD1} 1,00
LINHAS DE ENERGIA 2		R_{S1}	Sem blindagem	
2	Sinal	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD2} 1
Descrição		U_{w2}	1,5 kV	P_{LD2} 1,00
LINHAS DE SINAL 2		R_{S2}	Sem blindagem	

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos (P_v)				
P_v	Linha	Tipo	Equação B.9	P_v
	1	Energia	$P_{V1} = P_{EB} \times P_{LD1} \times C_{LD1}$	1,00 E+00
	2	Sinal	$P_{V2} = P_{EB} \times P_{LD2} \times C_{LD2}$	1,00 E+00

Quantidade de perda L_v		
(já calculado)		
L_v	$L_v = L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_f \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	1,00 E-05

Risco R_v de danos físicos centelhamentos perigosos por descargas nas linhas conectadas				
R_v	Linha	Tipo	Equação 11	R_v
	1	Energia	$R_{V1} = (N_{L1} + N_{DJ1}) \times P_{V1} \times L_v$	7,20 E-07 / ano
	2	Sinal	$R_{V2} = (N_{L2} + N_{DJ2}) \times P_{V2} \times L_v$	3,60 E-06 / ano

R_v	$R_v = R_{V1} + R_{V2} + R_{V3} + \dots$	4,32 E-06 / ano
-------	--	-----------------

A estrutura não possui risco de explosão, não é um hospital com equipamentos elétricos para salvar vidas ou a falha de seus sistemas internos não porá em risco a vida humana. Dessa forma, o valor do risco R_1 é dado por:

$R1=RA+RB+RU+RV$	4,39 E-06 / ano
------------------	-----------------

 UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
		EMIÇÃO
		07/06/2023

R1: RISCO DE PERDA DE VIDA HUMANA - ZONA: Casa inversores

R_A (ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico - desc. na est.)

Número de eventos perigosos para a estrutura (N _D)		
N _G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng	9,00 desc/km ² /ano
A _D	Área de exposição equivalente	17,00 m ²
	Casa inversor Estrutura irregular. Calculada manualmente.	
C _D	Fator de localização da estrutura Isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
N _D	$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$	1,53 E-04 desc/ano

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar ferimentos a seres vivos por meio de choque elétrico (P _A)		
P _{TA}	Probabilidade de uma descarga em uma estrutura causar choque a seres vivos (tensões de toque e de passo) Nenhuma medida de proteção	1
P _B	Probabilidade de uma descarga em uma estrutura causar danos físicos Estrutura não protegida por SPDA	1
P _A	$P_A = P_{TA} \times P_B$	1,00 E+00

Quantidade de perda L _A		
r _t	Tipo da superfície do solo ou piso Agricultura, concreto	1,00 E-02
L _T	Vítimas feridas por choque elétrico Todos os tipos	1,00 E-02
n _z	Número de pessoas na zona	5
n _t	Número total de pessoas na estrutura	5
t _z	Tempo total de pessoas presentes na zona (horas/ano)	8 h/ano
L _A	$L_A = r_t \times L_T \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	9,13 E-08

R_A	$R_A = N_D \times P_A \times L_A$	1,40 E-11 / ano
-------	-----------------------------------	-----------------

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

R_B (danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura)

Número de eventos perigosos para a estrutura (N_D)		
(já calculado)		
N_D	$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6}$	1,53 E-04 desc/ano

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar danos físicos (P_B)		
(já calculado)		
P_B	Estrutura não protegida por SPDA	1

Quantidade de perda L_B		
r_p	<i>Providências para redução de consequências de incêndios</i>	1
	Nenhuma providência	
r_f	<i>Risco de incêndio ou explosão na estrutura</i>	1,00 E-03
	Baixo risco de incêndio	
h_z	<i>Presença de perigo especial</i>	1
	Sem perigo especial	
L_F	<i>Número de vítimas por danos físicos</i>	1,00 E-02
	Outros	
n_z	<i>Número de pessoas na zona</i>	5
n_t	<i>Número total de pessoas na estrutura</i>	5
t_z	<i>Tempo total de pessoas presentes na zona (horas/ano)</i>	8
L_B	$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	9,13 E-09

R_B	$R_B = N_D \times P_B \times L_B$	1,40 E-12 / ano
-------	-----------------------------------	-----------------

R_U (ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico - desc. na linha)

Número de eventos perigosos por descargas na linha (N_L)		
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng	9,00 desc/km ² /ano

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO


C_E	Fator ambiental (para todas as linhas) Rural		1
Linha	Tipo	A. exposição / Instalação / Tipo	Parâmetros
1	Energia	A_{L1} A. de exposição equivalente da linha	40.000,00 m ²
Descrição		C_{T1} Aéreo	1,00
LINHAS DE ENERGIA 2		C_{T1} Linha de energia em AT (trafo AT/BT)	0,20
2	Sinal	A_{L2} A. de exposição equivalente da linha	40.000,00 m ²
Descrição		C_{T2} Aéreo	1,00
LINHAS DE SINAL 2		C_{T2} Linha de energia ou sinal	1,00

Número de eventos perigosos por descargas na linha (N_L)				
N_L	Linha	Tipo	Equação A.8	N_L
	1	Energia	$N_{L1} = N_G \times A_{L1} \times C_{T1} \times C_{E1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	7,20 E-02
	2	Sinal	$N_{L2} = N_G \times A_{L2} \times C_{T2} \times C_{E2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	3,60 E-01

Número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente (N_{DJ})				
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng		9,00 desc/km ² /ano	
Linha	Tipo	Estrutura adjacente / Localização / Tipo		Parâmetros
1	Energia	A_{DJ1}	Não Aplicável	-
Descrição		C_{DJ1}	Não Aplicável	-
LINHAS DE ENERGIA 2		C_{T1}	Linha de energia em AT (trafo AT/BT)	0,20
2	Sinal	A_{DJ2}	Não Aplicável	-
Descrição		C_{DJ2}	Não Aplicável	-
LINHAS DE SINAL 2		C_{T2}	Linha de energia ou sinal	1,00

Número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente (N_{DJ})				
N_{DJ}	Linha	Tipo	Equação A.5	N_{DJ}
	1	Energia	$N_{DJ1} = N_G \times A_{DJ1} \times C_{DJ1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	0,00 E+00
	2	Sinal	$N_{DJ2} = N_G \times A_{DJ2} \times C_{DJ2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	0,00 E+00

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico (P_U)		
P_{TU}	Medidas de proteção contra tensões de toque Nenhuma medida de proteção	1
P_{EB}	DPS's na entrada de linha (ligações equipotenciais) Sem DPS	1
<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Tipo de linha / U_w / Blindagem</i>
		<i>Parâmetros</i>

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ			
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA			
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE			
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br			
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO	07/06/2023	
0	Energia	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD1}	1
<i>Descrição</i>		U_{W1}	2,5 kV	P_{LD1}	1,00
LINHAS DE ENERGIA 2		R_{S1}	Sem blindagem		
2	Sinal	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD2}	1
<i>Descrição</i>		U_{W2}	1,5 kV	P_{LD2}	1,00
LINHAS DE SINAL 2		R_{S2}	Sem blindagem		

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico (P_U)				
	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação B.8</i>	P_U
P_U	1	Energia	$P_{U1} = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD1} \times C_{LD1}$	1,00 E+00
	2	Sinal	$P_{U2} = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD2} \times C_{LD2}$	1,00 E+00

Quantidade de perda L_U		
(já calculado)		
L_U	$L_U = L_A = n_t \times L_T \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	9,13 E-08

Risco R_U de ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico por descargas nas linhas conectadas				
	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação 10</i>	R_U
R_U	1	Energia	$R_{U1} = (N_{L1} + N_{DJ1}) \times P_{U1} \times L_U$	6,58 E-09 / ano
	2	Sinal	$R_{U2} = (N_{L2} + N_{DJ2}) \times P_{U2} \times L_U$	3,29 E-08 / ano

R_U	$R_U = R_{U1} + R_{U2} + R_{U3} + \dots$	3,95 E-08 / ano
-------	--	-----------------

R_V (danos físicos causados por centelhamentos - descargas nas linhas)

Número de eventos perigosos por descargas na linha (N_L)				
(já calculado)				
N_L	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação A.8</i>	N_L
	1	Energia	$N_{L1} = N_G \times A_{L1} \times C_{I1} \times C_{E1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	7,20 E-02
	2	Sinal	$N_{L2} = N_G \times A_{L2} \times C_{I2} \times C_{E2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	3,60 E-01

Número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente (N_{DJ})				
(já calculado)				
N_{DJ}	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação A.5</i>	N_{DJ}
	1	Energia	$N_{DJ1} = N_G \times A_{DJ1} \times C_{DJ1} \times C_{T1} \times 10^{-6}$	0,00 E+00
	2	Sinal	$N_{DJ2} = N_G \times A_{DJ2} \times C_{DJ2} \times C_{T2} \times 10^{-6}$	0,00 E+00

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto4@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMISSÃO

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos (P_v)				
P_{EB}	DPS's na entrada de linha (ligações equipotenciais) Sem DPS			1
<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Tipo de linha / U_w / Blindagem</i>		<i>Parâmetros</i>
1	Energia	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD1} 1
<i>Descrição</i>		U_{w1}	2,5 kV	P_{LD1} 1,00
LINHAS DE ENERGIA 2		R_{S1}	Sem blindagem	
2	Sinal	Aérea não blindada / Indefinida		C_{LD2} 1
<i>Descrição</i>		U_{w2}	1,5 kV	P_{LD2} 1,00
LINHAS DE SINAL 2		R_{S2}	Sem blindagem	

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar danos físicos (P_v)				
P_v	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação B.9</i>	P_v
	1	Energia	$P_{V1} = P_{EB} \times P_{LD1} \times C_{LD1}$	1,00 E+00
	2	Sinal	$P_{V2} = P_{EB} \times P_{LD2} \times C_{LD2}$	1,00 E+00

Quantidade de perda L_v		
(já calculado)		
L_v	$L_v = L_b = r_p \times r_f \times h_z \times L_f \times n_z / n_t \times t_z / 8760$	9,13 E-09

Risco R_v de danos físicos centelhamentos perigosos por descargas nas linhas conectadas				
R_v	<i>Linha</i>	<i>Tipo</i>	<i>Equação 11</i>	R_v
	1	Energia	$R_{V1} = (N_{L1} + N_{DJ1}) \times P_{V1} \times L_v$	6,58 E-10 / ano
	2	Sinal	$R_{V2} = (N_{L2} + N_{DJ2}) \times P_{V2} \times L_v$	3,29 E-09 / ano

R_v	$R_v = R_{V1} + R_{V2} + R_{V3} + \dots$	3,95 E-09 / ano
-------	--	-----------------

A estrutura não possui risco de explosão, não é um hospital com equipamentos elétricos para salvar vidas ou a falha de seus sistemas internos não porá em risco a vida humana. Dessa forma, o valor do risco R_1 é dado por:

$R1=RA+RB+RU+RV$	4,34 E-08 / ano
------------------	-----------------

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto@gmail.com, rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMIÇÃO 07/06/2023

GERENCIAMENTO DE RISCO - Riscos calculados

R1: PERDA DE VIDA HUMANA (INCLUINDO FERIMENTOS PERMANENTES)			
Zona: Microgeração		(valores x 10 ⁻⁵)	
S1: Descargas na estrutura		S3: Descargas nas linhas	
R _A	0,000	R _U	-
R _B	-	R _V	-
R _C	-	R _W	-
S2: Descargas próx. à estrutura		S4: Descargas próx. às linhas	
R _M	-	R _Z	-
Total: Microgeração		0,000	
Zona: Residência		(valores x 10 ⁻⁵)	
S1: Descargas na estrutura		S3: Descargas nas linhas	
R _A	0,000	R _U	0,004
R _B	0,003	R _V	0,432
R _C	-	R _W	-
S2: Descargas próx. à estrutura		S4: Descargas próx. às linhas	
R _M	-	R _Z	-
Total: Residência		0,439	
Zona: Casa inversores		(valores x 10 ⁻⁵)	
S1: Descargas na estrutura		S3: Descargas nas linhas	
R _A	0,000	R _U	0,004
R _B	0,000	R _V	0,000
R _C	-	R _W	-
S2: Descargas próx. à estrutura		S4: Descargas próx. às linhas	
R _M	-	R _Z	-
Total: Casa inversores		0,004	
RISCO TOTAL (todas as zonas)		(valores x 10 ⁻⁵)	
S1: Descargas na estrutura		S3: Descargas nas linhas	

R_A	0,000	R_U	0,008
R_B	0,003	R_V	0,432
R_C	-	R_W	-
<hr/>		<hr/>	
S2: Descargas próx. à estrutura		S4: Descargas próx. às linhas	
R_M	-	R_Z	-
<hr/>		<hr/>	
TOTAL DE R1:			0,443
<hr/>			

	EMPRESA	UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ	
	SETOR	DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA	
	PROFISSIONAL	CAROLINA PRIETO RIBEIRO, RAFAEL RODRIGUES HEBERLE	
	EMAIL/TEL	carolprieto@gmail.com rheberle@alunos.utfpr.edu.br	
	PROJETO	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	EMIÇÃO

O risco R1 calculado é inferior ao risco tolerável, de acordo com a Tabela 4 / NBR 5419-2:2015

CAROLINA PRIETO RIBEIRO

RAFAEL RODRIGUES HEBERLE