



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS RAPHAEL DE JESUS DA SILVA

**Análise e gerenciamento de risco contra descargas atmosféricas de uma usina
fotovoltaica**

Florianópolis

2024

LUCAS RAPHAEL DE JESUS DA SILVA

**Análise e gerenciamento de risco contra descargas atmosféricas de uma usina
fotovoltaica**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauricio V. Ferreira da Luz, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Silva, Lucas Raphael de Jesus
Análise e gerenciamento de risco contra descargas atmosféricas de uma usina fotovoltaica / Lucas Raphael de Jesus Silva ; orientador, Mauricio Valencia Ferreira da Luz, 2024.
107 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. spda. 3. sistemas fotovoltaicos. 4. NBR 5419. 5. análise de risco. I. da Luz, Mauricio Valencia Ferreira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Lucas Raphael de Jesus da Silva

Análise e Gerenciamento de Risco Contra Descargas Atmosféricas de Uma Usina Fotovoltaica

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 30 de abril de 2024.



Documento assinado digitalmente

Miguel Moreto

Data: 02/05/2024 21:03:48-0300

CPF: ***.850.100-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Mauricio Valencia Ferreira da Luz

Data: 30/04/2024 20:20:18-0300

CPF: ***.926.969-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Jean Viane Leite

Data: 02/05/2024 19:04:03-0300

CPF: ***.474.909-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

GEOVANE ROMEU RIBEIRO

Data: 30/04/2024 20:40:58-0300

CPF: ***.838.499-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Geovane Romeu Ribeiro, M.Sc.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que foi meu refúgio e sempre esteve comigo em todos os momentos e dificuldades enfrentadas nesse percurso e que me ajudou nessas conquistas.

Agradeço aos meus pais, Marcio e Michele e minha irmã Letícia, que me apoiaram de inúmeras formas, me incentivando e fazendo o máximo esforço para que eu pudesse correr atrás dos meus sonhos quando nem mesmo eu acreditava. Vocês são minha inspiração.

A minha namorada Cíntia, que na distância da família foi meu braço direito, ouvindo meus choros e reclamações e fazendo meu mundo sorrir diariamente, que me apoiou e compreendeu mesmo diante de semanas estudando e com pouco tempo disponível. Com certeza você foi e é essencial nessa caminhada.

Agradeço aos amigos e irmãos da Igreja Presbiteriana na Trindade, que eu, peregrino em terra estranha, fui acolhido, amado e cuidado durante o percurso que passei em Florianópolis. Amizades que levarei para a vida.

Aos meus amigos Vinicius, Flávio, Diego e Eduardo, que graças a companhia de vocês e as dificuldades compartilhadas, tornaram essa caminhada muito mais leve.

Por fim, agradeço imensamente ao meu orientador professor Mauricio, pelos seus ensinamentos técnicos e práticos de vida, pelas boas conversas, pela paciência comigo ao longo do trabalho e sua solicitude. Com certeza o levarei como exemplo de pessoa e profissional a ser seguido.

RESUMO

O avanço das usinas fotovoltaicas emergiu como uma solução promissora para suprir o crescente aumento da demanda energética no Brasil. No entanto, devido à sua localização em áreas abertas, sem a presença de edificações próximas e ocupando grandes extensões, em termos de área, essas usinas se tornam altamente suscetíveis a descargas atmosféricas diretas e indiretas. Diante desse cenário, este trabalho propõe realizar uma análise de risco contra descargas atmosféricas detalhada de usinas fotovoltaicas, seguindo as normas NBR 5419 e IEC 63227. Com o objetivo de tornar o processo mais eficiente e preciso, foi desenvolvido um programa que utiliza a linguagem *Python*, que tem como entrada os parâmetros da análise de risco e verifica se o sistema está em conformidade com as condições projetadas. Para a usina fotovoltaica em questão, foi adotado o nível de proteção II, conforme o critério da NBR 5419, utilizando o método da esfera rolante com minicaptadores individuais, visando evitar o sombreamento e garantir uma proteção eficaz contra descargas atmosféricas. A usina fotovoltaica foi dimensionada considerando o nível de proteção tipo III, sendo projetados os captadores por meio do método das esferas rolantes para a sala de medição e o método do ângulo de proteção para o *skid*, sendo dimensionado o DPS do tipo I. Já para a região dos módulos fotovoltaicos, foram considerados minicaptadores individuais, atendendo ao critério das esferas rolantes. Nesse sentido, a usina atendeu aos critérios na análise e gerenciamento de risco, assegurando sua proteção.

Palavras-chave: usina fotovoltaica; SPDA, NBR 5419; análise de risco.

ABSTRACT

The advancement of photovoltaic power plants has emerged as a promising solution to meet the growing energy demand in Brazil. However, due to their location in open areas without nearby buildings and occupying large expanses, these plants become highly susceptible to direct and indirect lightning strikes. In this scenario, this work proposes to perform a detailed lightning risk analysis of photovoltaic power plants, following the NBR 5419 and IEC 63227 standards. To make the process more efficient and precise, a program was developed using the Python language, which takes the parameters of the risk analysis as input and verifies if the system complies with the designed conditions. For the photovoltaic power plant in question, protection level II was adopted, according to the NBR 5419 criteria, using the rolling sphere method with individual minicaptors, aiming to avoid shading and ensure effective protection against lightning strikes. The photovoltaic power plant was dimensioned considering protection level type III, with captors designed using the rolling sphere method for the measurement room and the protection angle method for the skid, and a type I SPD was dimensioned. For the region of the photovoltaic modules, individual minicaptors were considered, meeting the rolling sphere criteria. In this sense, the plant met the criteria in the risk analysis and management, ensuring its protection.

Keywords: photovoltaic power station; SPDA; NBR 5419; risk analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo na Rede 2004-2017 (TWh).	22
Figura 2 - Geração de energia elétrica no ano de 2010.	23
Figura 3 - Geração de energia elétrica no ano de 2023.	23
Figura 4 - Geração de energia elétrica solar entre 2015-2022.	24
Figura 5 - Camadas célula solar.....	25
Figura 6 - Sistema <i>on-grid</i>	26
Figura 7 - Sistema <i>off-grid</i>	27
Figura 8 - Formação de uma descarga atmosférica.....	29
Figura 9 - Captura de uma descarga atmosférica	29
Figura 10 - Dano causado às placas fotovoltaicas devido a descargas atmosféricas.	30
Figura 11 - Fontes de danos, tipos de danos e tipos de perdas de acordo.....	31
Figura 12 - Ilustração da tensão de toque e da tensão de passo.....	32
Figura 13 - Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419.	34
Figura 14 - Tipos de perdas e riscos correspondentes que resultam de diferentes tipos de danos.....	37
Figura 15 - Procedimento para decisão da necessidade da proteção.....	38
Figura 16 - Área de exposição equivalente de uma estrutura de altura uniforme.	44
Figura 17 - Mapa de densidades de descargas atmosféricas no Brasil.	46
Figura 18 - Método do ângulo de proteção.	47
Figura 19 - Volume de proteção provido por um mastro.	48
Figura 20 - Ângulo de proteção correspondentes a classe do SPDA.....	48
Figura 21 - Método das esferas rolantes.....	49
Figura 22 - Método das malhas.....	50
Figura 23 - Comparativo condutores roteados e não roteados.	53
Figura 24 - Método de proteção dos módulos com hastes.....	54
Figura 25 - Uso de hastes nos módulos para proteção contra descargas.	55
Figura 26 - Uso de minicaptadores nos módulos para proteção contra descargas.....	55
Figura 27 - <i>Layout</i> de uma Usina Fotovoltaica.....	56
Figura 28 - Ferramenta: Aba Características da Estrutura.....	58

Figura 29 - Ferramenta: Aba linha de energia.....	59
Figura 30 - Ferramenta: Aba Linha de Sinais.....	60
Figura 31 - Ferramenta: Zona de exposição.	61
Figura 32 - Árvore de decisão para aterramento funcional/equipotencialização.	63
Figura 33 - Ferramenta: Análise de perdas tipo L1.	67
Figura 34 - Ferramenta: Análise de Perdas tipo L4.....	68
Figura 35 - Ferramenta: Resultado da análise de riscos.....	69
Figura 36 - Ferramenta: Exemplo de resultado fora do esperado.....	69
Figura 37 - Tabela gerada para memorial de cálculos.	70
Figura 38 - Método das esferas rolantes para salas.	71
Figura 39 - Minicaptor de aço utilizado.....	72
Figura 40 - Esquemático da aplicabilidade <i>skid</i>	72
Figura 41 - Modelo de <i>skid</i>	73
Figura 42 - Proteção do <i>skid</i> pelo método de ângulo de proteção.	73
Figura 43 - Instalação de DPS na instalação.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de risco tolerável - R_T	43
Tabela 2 - Fator de localização da estrutura (C_D).	45
Tabela 3 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe.	47
Tabela 4 - Relação do raio da esfera rolante.	49
Tabela 5 - Afastamento máximo dos condutores de malha.	50
Tabela 6 - Espaçamento médio entre os condutores de descida.....	51
Tabela 7 - Valor do fator KS_3 dependendo da fiação interna.....	53
Tabela 8 - Mínima distância entre as hastes e o sistema para evitar sombreamento.	55
Tabela 9 - Fator de redução r_t em função do tipo da superfície do solo ou piso.....	62
Tabela 10 - Valores de probabilidade PTA de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque e de passo perigosas.....	63
Tabela 11 - Valores da probabilidade PTU de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas.....	64
Tabela 12 - Fator de redução r_f em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura.	64
Tabela 13 - Fator de redução r_p em função das providências tomadas para reduzir.	65
Tabela 14 - Valores de probabilidade de PSPD e PEB em função do NP para o qual os DPS foram projetados.	65
Tabela 15 - Fator h_z aumentando a quantidade relativa de perda na presença.....	66
Tabela 16 - Tipo de perda L1: Valores médios típicos de LT, LF e LO.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

SIN Sistema integrado Nacional

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

DPS Dispositivo de proteção contra surtos

EPE Empresa de Pesquisa Energética

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

COP27 27^a Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

LEMP Lightning Eletromagnetic Impulse

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	22
2.1	PANORAMA GERAL.....	22
2.2	O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	24
2.3	TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	26
2.3.1	Sistemas <i>on-grid</i>	26
2.3.2	Sistemas <i>off-grid</i>	27
2.4	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	28
2.4.1	Definição	28
2.4.2	Consequências dos raios	29
2.4.3	Danos estruturais	30
2.4.4	Riscos à vida.....	31
3	SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	34
3.1	PRINCÍPIOS GERAIS	35
3.1.1	Fontes e tipos de danos a uma estrutura.....	35
3.1.2	Descargas atmosféricas próximas a linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura	35
3.1.3	Tipos de perdas	36
3.1.4	Riscos.....	36
3.2	GERENCIAMENTO DE RISCO.....	37
3.2.1	Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na estrutura (S1).....	39
3.2.2	Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto da estrutura (S2).....	40

3.2.3	Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura (S3).....	41
3.2.4	Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura (S4).....	42
3.2.5	Risco tolerável.....	43
3.2.6	Área da estrutura.....	44
3.2.7	Fator de localização da estrutura.....	45
3.3	DANOS FÍSICOS A ESTRUTURAS E PERIGOS À VIDA	46
3.4	MÉTODOS DE INSTALAÇÃO.....	47
3.4.1	Método do ângulo de proteção	47
3.4.2	Método das esferas rolantes	49
3.4.3	Método das malhas	50
3.5	ESPECIFICAÇÕES GERAIS	51
3.6	IEC 63227	51
3.6.2	Proteção dos módulos.....	54
4	ESTUDO DE CASO	56
4.1	FERRAMENTAS UTILIZADAS.....	57
4.2	INTERFACE DO SOFTWARE.....	57
4.2.1	Características da estrutura	57
4.2.2	Linha de energia.....	59
4.2.3	Linha de sinais.....	60
4.2.4	Zona de exposição	61
4.2.5	Perda L1	66
4.2.6	Perda L4	68
4.2.7	Resultado	69
4.3	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	71
4.3.1	Sala de controle.....	71

4.3.2	<i>Skid</i>	72
4.4	DPS	74
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – CÓDIGO DO PROGRAMA	82

1 INTRODUÇÃO

O aumento do desenvolvimento tecnológico experimentado pelo mundo no século XXI, trouxe inúmeras vantagens à população. A expansão da comunicação, do setor industrial, de equipamentos de resfriamento e do desenvolvimento urbano e dispositivos mais potentes inseridos no mercado tornou o mundo mais ágil e confortável, mas também trouxe um alerta referente ao aumento drástico do consumo de energia elétrica (MÓDULO ENERGIA, 2018).

A dependência das usinas hidrelétricas e termoelétricas tornou-se um problema, principalmente após as crises energéticas que surgiram, mostrando que essas fontes muitas vezes apresentam riscos à geração, por estarem atreladas a elementos naturais que estão relacionados a condições climáticas, como no caso das hidrelétricas, que estão sujeitas a épocas em que há vazão nos rios, ou também pelo alto custo e risco ao meio ambiente, na situação das termoelétricas (FERREIRA, 2021).

O desenvolvimento das usinas fotovoltaicas se tornou promissor para resolver a problemática, por se tratar de uma forma de energia limpa e renovável, principalmente no Brasil, devido a sua alta proporção continental e por ser o país que mais recebe irradiação solar no mundo, numa faixa de 4.500 a 6.300 Wh/m² (MARQUES et al., 2019). Os dados estatísticos levantados pelo EPE mostram que hoje os sistemas de geração de energia solar correspondem a 4,4% de toda a matriz energética nacional (EPE, 2023).

As usinas fotovoltaicas são instaladas em zonas rurais e descampados, para permitir a maior irradiação solar possível. Por essa razão, estão propensas a serem submetidas às descargas atmosféricas. Dessa forma, esse fenômeno natural, que dura segundos, pode prejudicar a geração de uma usina por horas, ocasionando grande prejuízo. Além disso, os equipamentos, como inversores, sistemas de comunicação e câmeras, além de terem um alto valor aquisitivo, são mais sensíveis e propensos a danos. Uma das razões de preocupação é que, segundo o INPE (2023), o Brasil é o país com maior incidência de raios no Mundo, com cerca de 57,8 milhões

de descargas. Além disso, Zhang (2020) afirmam que 26% dos problemas em usinas fotovoltaicas são ocasionados por descargas atmosféricas.

No presente trabalho, com o objetivo de realizar a análise de risco e a devida proteção contra descargas atmosféricas, serão aplicadas as normas NBR 5419:2015 para segurança das cabines de medição e proteção, e a norma IEC 63227:2020, para proteger os módulos da usina fotovoltaica. Embora essa norma internacional não contenha uma versão em português e não seja exigida no Brasil, ela vem preenchendo a lacuna na parte não atendida pela norma vigente, em relação ao dimensionamento de dispositivos de proteção contra descargas diretas nos módulos, assegurando maior proteção dos equipamentos da usina.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral do trabalho é realizar a análise e gerenciamento de risco contra descargas atmosféricas de uma usina fotovoltaica.

Os objetivos gerais do trabalho são apresentar e contextualizar as normas vigentes de proteção e segurança contra descargas atmosféricas; detalhar a análise de risco, presente na NBR 5419, para os locais apropriados em uma usina fotovoltaica; aplicar a IEC 63227 para as regiões dos módulos, garantindo a proteção e evitando sombreamento; e realizar um estudo de caso em uma usina fotovoltaica de geração distribuída.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Apresentar e contextualizar as normas vigente de proteção e segurança contra descargas atmosféricas;
- Detalhar o gerenciamento de risco da NBR 5419:2015;
- Aplicar a IEC 63227:2015;

- Realizar um estudo de caso em uma usina fotovoltaica de geração distribuída.

Para atingir os objetivos específicos apresentados acima, serão apresentados os resultados de um *Software* criado com a proposta de ser uma ferramenta para o cálculo do gerenciamento de risco de estruturas em uma usina fotovoltaica, com a proposta de se otimizar tempo e aumentar a eficiência e precisão na elaboração de projetos de proteção contra descargas atmosféricas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho divide-se em seis capítulos, sendo esse primeiro a introdução, destacando a motivação, os objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 é destinado à contextualização e panorama geral dos sistemas fotovoltaicos, apresentando o histórico, o crescimento, o funcionamento e os tipos de sistemas utilizados no Brasil. Além disso, ele define o conceito das descargas atmosféricas, seus efeitos, riscos e consequências, como também os conceitos de tensão de passo e de toque.

O capítulo 3 explica os conceitos básicos de descargas atmosféricas e também aborda a NBR 5419 e seus principais pontos para a análise e para o cálculo do gerenciamento de risco de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, bem como os métodos de proteção utilizados: ângulo de proteção, malhas e esferas rolantes. Além disso, traz informações acerca da IEC 63227, destinada à proteção dos módulos contra descargas.

O capítulo 4 aborda os conceitos tratados anteriormente para a elaboração de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para um sistema fotovoltaico de geração distribuída, os cálculos e tabelas consultadas, a escolha dos níveis de proteção e o método utilizado para alocação dos captos. Nesse capítulo são apresentados também os resultados gerados pelo *software* para o cálculo de análise e gerenciamento de risco.

O capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros realizados na área.

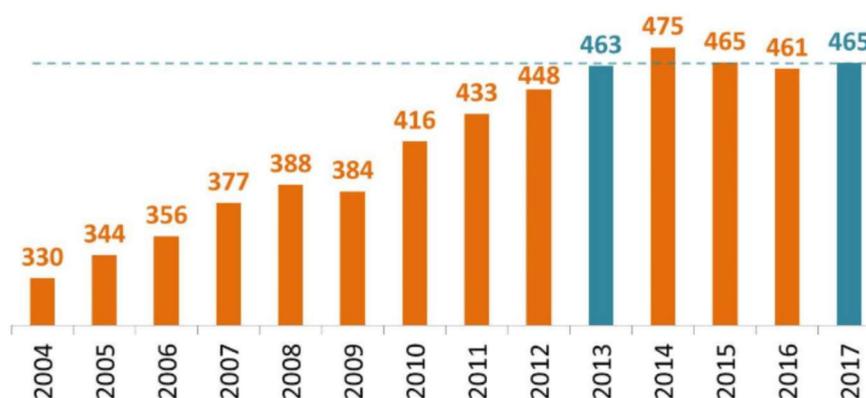
2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1 PANORAMA GERAL

A cada ano, o consumo de energia elétrica aumenta de forma elevada, em todo o cenário mundial. Esse fenômeno é impulsionado por diversos fatores, dentre eles: o crescimento da população, desenvolvimento tecnológico e industrial, o aumento de equipamentos eletrônicos e a diminuição de pessoas vivendo em zonas rurais.

Em termos de representação numérica, no ano de 1970, o consumo de energia elétrica no Brasil foi de 39.668 GWh comparado a 359.564 GWh no ano de 2004 (EPE, 2006). Comparando o ano de 2004, o consumo energético no Brasil em 2004 foi de 330 TWh, enquanto no ano de 2017 houve um salto para 465 TWh, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Consumo na rede 2004-2017 (TWh).

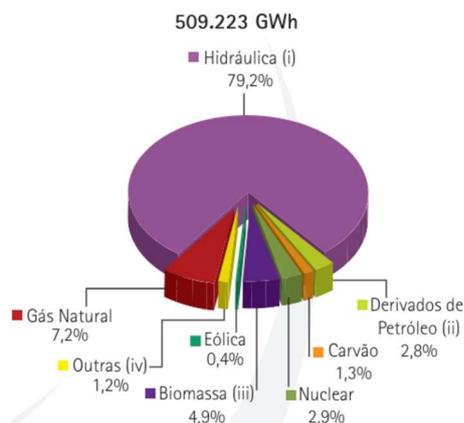


Fonte: EPE, 2018.

Além disso, de acordo com o anuário estatístico de energia elétrica feito pelo EPE, o consumo foi de 509.365 GWh no ano de 2022, garantindo ao país o quinto lugar mundial de consumo de energia elétrica (EPE, 2023). Esses dados crescentes indicam que é preciso expandir a matriz energética para atingir toda a demanda exigida pela população. Atualmente, a maior fonte de geração da energia elétrica são as hidrelétricas, correspondendo a 63% de toda a geração restando outros 37% em outras fontes de energia, dentre elas, a energia solar, que é o enfoque desse trabalho (EPE, 2023).

No ano de 2010, o registro de usinas solares era de somente uma, com a capacidade de 5 MW, em todo o território nacional, enquanto no mundo a geração correspondia a 0,1%. A Figura 2 mostra o gráfico da matriz energética brasileira que é perceptível a predominância da hidrelétrica e nenhum indicativo de fonte por meio de energia solar (EPE, 2011).

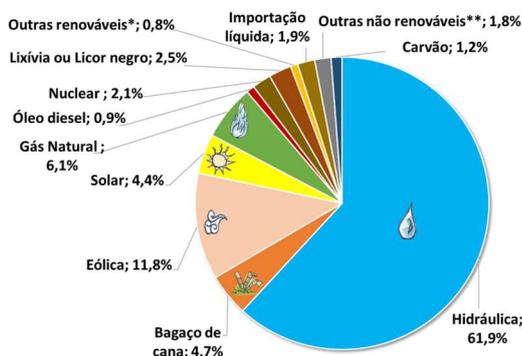
Figura 2 - Geração de energia elétrica no ano de 2010.



Fonte: EPE, 2011.

Em comparação, a Figura 3 traz um gráfico o último relatório em 2022, a produção da geração solar foi de 30.126 GWh sendo o somatório do ano, correspondendo a 4,4% de toda a matriz energética brasileira, com um crescimento de aproximadamente 80%, quando comparada ao ano anterior, tendo em torno de 500 mil usinas instaladas em todo país, conforme relatório da COP27 (EPE, 2011).

Figura 3 - Geração de energia elétrica no ano de 2023.

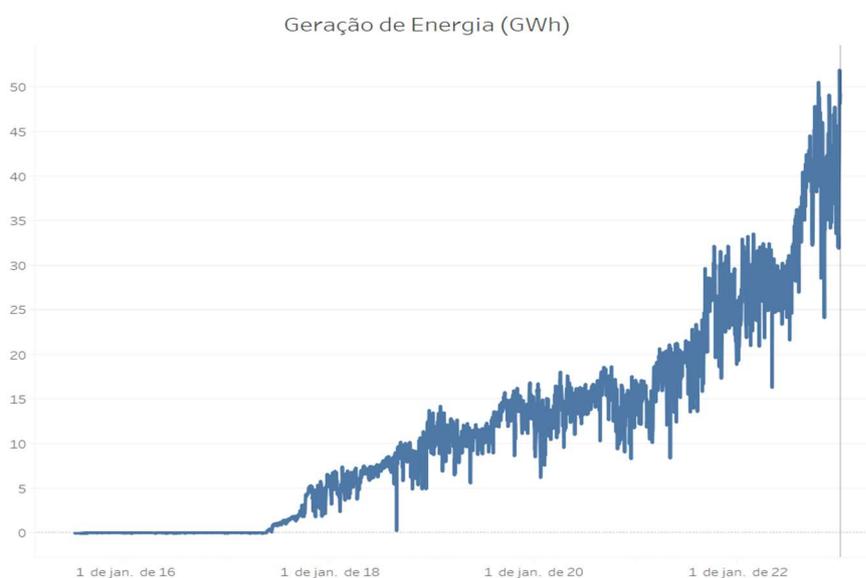


Fonte: EPE, 2023.

O gráfico na Figura 4 obtido com os dados do ONS que faz o monitoramento de geração e consumo de todo o sistema interligado nacional, mostra a evolução da

geração da energia fotovoltaica ao longo dos anos no Brasil. Nesse sentido, garantir a melhor eficiência e segurança desse sistema que vem crescendo na matriz energética nacional, torna-se uma preocupação e um desafio.

Figura 4 - Geração de energia elétrica solar entre 2015-2022.



Fonte: ONS, 2023.

2.2 O EFEITO FOTOVOLTAICO

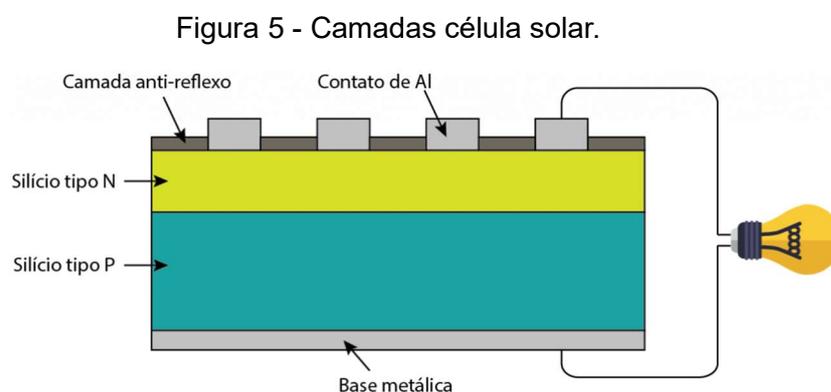
A descoberta do efeito fotovoltaico pelo cientista Becquerel no século XIX foi um marco significativo para a geração fotovoltaica. Por meio de sua experimentação com solução eletrolítica, ele concluiu que a exposição à irradiação solar resultava em uma melhor condução de corrente elétrica. No mesmo século, os pesquisadores Adams e Days criaram a primeira célula solar utilizando semicondutores, por meio da junção de selênio e platina. No ano de 1941, o engenheiro Russell Shoemaker Ohl utiliza a fotocélula de silício monocristalino, material difundido e utilizado até os dias atuais na produção de módulos fotovoltaicos (DIEDRICH, 2013).

Os semicondutores são materiais que possuem características de condutividade intermediárias entre os condutores e os isolantes e podem atuar das duas formas, dependendo das condições a qual ele é submetido. Um dos processos para controlar a condutividade desses materiais se dá pela variação da temperatura e por meio da

dopagem, que é o processo no qual se adicionam átomos de outros elementos em sua estrutura, chamadas impurezas. Um dos semicondutores mais utilizados é o silício. No entanto, ele é um condutor ruim devido a sua estabilidade na camada de valência. Por essa razão, é feito o processo de dopagem, que torna os átomos desses elementos instáveis, alterando a quantidade de elétrons em sua última camada, permitindo que uma pequena quantidade de energia seja suficiente para movimentá-los (DIAS, 2019).

Existem dois tipos de dopagem para os semicondutores, a tipo N e a tipo P. Na dopagem tipo N, átomos de um elemento com cinco elétrons são adicionados no cristal do silício. Como o silício possui quatro elétrons na camada de valência, resta um extra que não será emparelhado, facilitando a banda de condução. A dopagem do tipo P consiste na adição de materiais com três elétrons em sua última camada, deixando lacunas de elétrons (MARTINS, 2011).

As células fotovoltaicas são formadas por duas camadas semicondutoras dopadas, uma do tipo N e outra do tipo P, formando, assim, a junção pn. Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, os fótons da luz transferem sua energia para os elétrons na camada tipo N, criando pares elétron-lacuna. Esses pares elétron-lacuna criam um campo elétrico na região da junção pn, que age para separar os portadores de carga, movendo os elétrons para a camada tipo N e as lacunas para a camada tipo P. Esse movimento é importante para a produção de energia elétrica em grandes escalas. A Figura 5 mostra a configuração das junções numa célula fotovoltaica (MARTINS, 2011).



Fonte: Freire, 2024.

2.3 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em *on-grid* e *off-grid*, dependendo de sua conexão com a rede elétrica. Essas categorias definem a integração ou independência da conexão elétrica com a rede.

2.3.1 Sistemas *on-grid*

Um sistema de geração fotovoltaico *on-grid* é composto por módulos e inversores fotovoltaicos. Toda a energia gerada ou é consumida pelas cargas do sistema, ou enviada à rede de distribuição, no caso de o consumo ser menor que a geração. Esse é o método mais comum em edificações, pois a energia injetada na rede torna-se crédito ao consumidor, que paga somente o consumido. A Figura 6 mostra uma ilustração do esquema de sistema *on-grid*.

Figura 6 - Sistema *on-grid*.



Fonte: adaptado de EOS, 2023.

Na categoria de sistemas conectados à rede, existe o sistema de geração distribuída e o sistema de geração centralizada. O sistema de geração distribuída consiste em um conjunto de módulos fotovoltaicos, que compõem um sistema de alimentação responsável por um conjunto de carga destinadas a um consumidor (INEE, 2024). Nesse modelo, são aceitos sistemas de até 5 MW, de acordo com resolutivas da ANEEL.

Já na geração centralizada, essas usinas são um complexo muito maior, integram o SIN como fornecedores de energia para o sistema, com o objetivo de comercialização no mercado livre de energia. Essas usinas geralmente encontram-se em lugares mais isolados e têm uma produção de energia elétrica em escala, necessitando de um sistema robusto de proteção, medição e também de linhas de transmissão preparadas para transportar essa energia gerada.

2.3.2 Sistemas *off-grid*

No método *off-grid*, a proposta é um sistema autônomo que carregue as baterias completamente desconectado da rede elétrica, por meio da geração fotovoltaica. Ele é comumente utilizado em regiões rurais, fazendas e locais que não são atendidos pelas distribuidoras de energia elétrica. A Figura 7 mostra um exemplo de um sistema *off-grid*.

Figura 7 - Sistema *off-grid*.



Fonte: adaptado de EOS, 2023.

2.4 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.4.1 Definição

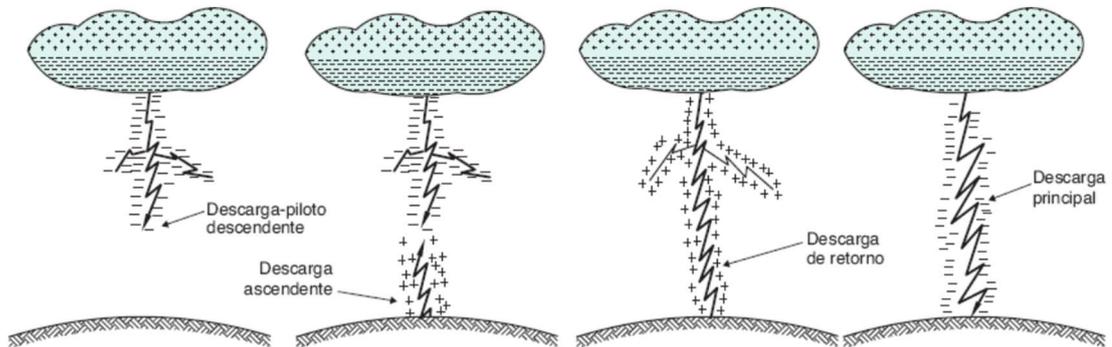
A descarga atmosférica, também conhecida como raio, é um fenômeno natural que acontece na atmosfera devido ao acúmulo de cargas elétricas em nuvens de tempestade. De acordo com o INPE (2011), essas descargas são caracterizadas por sua grande extensão e intensidade.

A rigidez dielétrica do ar é em torno de 3 kV/mm. Entretanto, quando há uma diferença de potencial elétrico entre as nuvens e a superfície da terra suficientemente grande para romper a rigidez dielétrica do isolante, que é o ar, ocorre uma intensa transferência de cargas elétricas, que se dá na forma de um arco elétrico, formando assim, o raio. Ele possui tensões na faixa de 100 milhões a 1 bilhão de volts, com uma temperatura elevadíssima, responsável por danificar estruturas, plantações, equipamentos e causar risco à vida (ESCANHOELA, 2000).

No momento inicial, ocorre uma polarização das cargas elétricas dentro da nuvem de tempestade devido a fricção das partículas, isso faz com que surja uma diferença de potencial entre a terra e a nuvem. A queda do raio é favorecida pelo enfraquecimento da rigidez dielétrica do ar, numa tempestade (KINDERMANN, 1997).

Quando ocorre o rompimento do dielétrico do ar, também acontece a ascendência da descarga piloto, que dará a passagem para o raio, permitindo a condução elétrica. O aumento da diferença de potencial a partir do momento do rompimento do dielétrico, proporciona uma ramificação da descarga piloto, que agora será ascendente. Essa descarga se encontra com a anterior, fechando um curto-circuito, permitindo assim, a descarga de retorno, que parte da terra para a nuvem. Esse processo gera a descarga principal, que é o fenômeno do raio (MAMEDE, 2017). A Figura 8 ilustra o fenômeno descrito.

Figura 8 - Formação de uma descarga atmosférica.



Fonte: Mamede, 2017.

A Figura 9 mostra uma captura de imagem do fenômeno das descargas atmosféricas, sendo destacadas a descarga ascendente, que parte do solo e sobe pelo para-raios do prédio ao encontro das ramificações principais do raio descendente.

Figura 9 - Captura de uma descarga atmosférica.



Fonte: FAPESP, 2023.

2.4.2 Consequências dos raios

O Brasil é o país que apresenta a maior incidência de raios, do Mundo, com cerca de 50 milhões de raios, por ano. Além disso, o país lidera o número de mortes por raios, registrando mais de 800 casos até o ano de 2013 (INPE, 2019). Conseqüentemente, o país é o mais afetado por danos.

Essas descargas podem ocorrer de forma direta (incidência sobre a estrutura, vida, ou instalações elétricas) ou de forma indireta (cai em um ponto e a tensão é induzida).

2.4.3 Danos estruturais

Os raios não possuem direção, nem local exato de queda. Dessa forma, as estruturas físicas mostram-se vulneráveis, sendo danificados edifícios, infraestruturas e instalações elétricas, como torres e linhas de transmissão. A Figura 10 mostra um exemplo de dano causado por descargas atmosféricas incidentes em um módulo fotovoltaico, que após a queda do raio, iniciou-se um princípio de incêndio, degradando os módulos ao redor do local.

Figura 10 - Dano causado às placas fotovoltaicas devido a descargas atmosféricas.



Fonte: Bad Wolf USA, 2024.

As descargas atmosféricas são uma das principais causas de problemas em usinas, sendo as maiores responsáveis pelos incidentes de incêndio nos equipamentos (ZHANG, 2020).

A Figura 11 mostra os pontos de impactos que um raio pode atingir uma superfície e as relações com os tipos de danos. Esse é um ponto importante, pois estruturas com maior propensão a pontos de impacto diretos, necessitam de cuidados maiores do ponto de vista do projeto.

Figura 11 - Fontes de danos, tipos de danos e tipos de perdas de acordo.

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

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

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

2.4.4 Riscos à vida

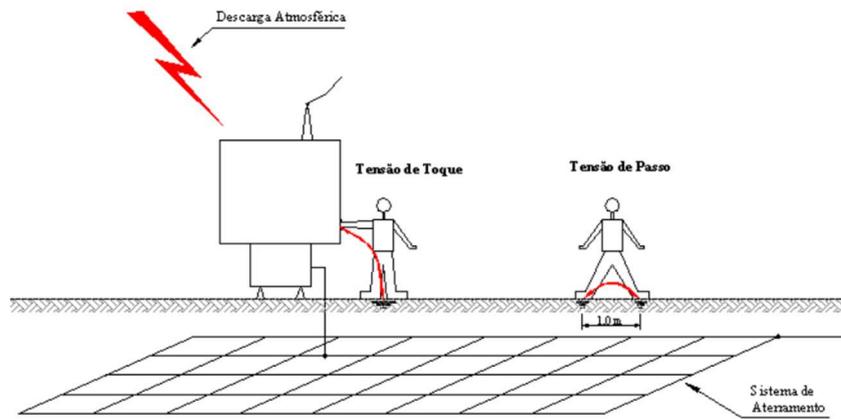
A NBR 5419 parte 2 prescreve medidas de segurança também contra os riscos à vida, dentre eles, as tensões de toque e de passo.

A tensão de passo é uma consequência das descargas atmosféricas e é uma forma de descarga indireta. Quando o raio atinge o solo ou alguma estrutura, ele cria uma distribuição de cargas elétricas no solo ao redor do ponto de impacto. Essa distribuição que se dá de forma radial, gera uma diferença de potencial elétrico entre pontos do solo, a depender da distância. Para seu cálculo e garantindo a segurança, considera-se a distância de um metro entre os apoios. Esse dado será comentado posteriormente na análise de riscos.

Já a tensão de toque se refere a uma tensão induzida medida entre a estrutura eletrizada tocada e o ponto de escoamento, que é o chão. Nesse caso, a descarga é direta, pois geralmente atinge uma estrutura e a pessoa está tocando um objeto condutor, permitindo a passagem da corrente elétrica. Nesse caso, o risco é muito

maior e geralmente pode levar à morte. A Figura 12 mostra uma representação desses conceitos.

Figura 12 - Ilustração da tensão de toque e da tensão de passo.



Fonte: Nogueira, 2006.

3 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são amparados pela NBR 5419:2015 parte 3, que propõe determinar medidas de proteção, por meio da análise e do cálculo de gerenciamento de risco, para mitigar efeitos causados por esses incidentes naturais. Na ausência de uma norma específica, utiliza-se, comumente, esta norma para todo dimensionamento da usina. No escopo desse trabalho será abordada também a norma IEC 63227, que não é obrigatória, mas que tem seu uso permitido no Brasil, garantindo maior segurança para as instalações fotovoltaicas.

A NBR 5419 é dividida nos seguintes tópicos:

Parte 1: Princípios gerais;

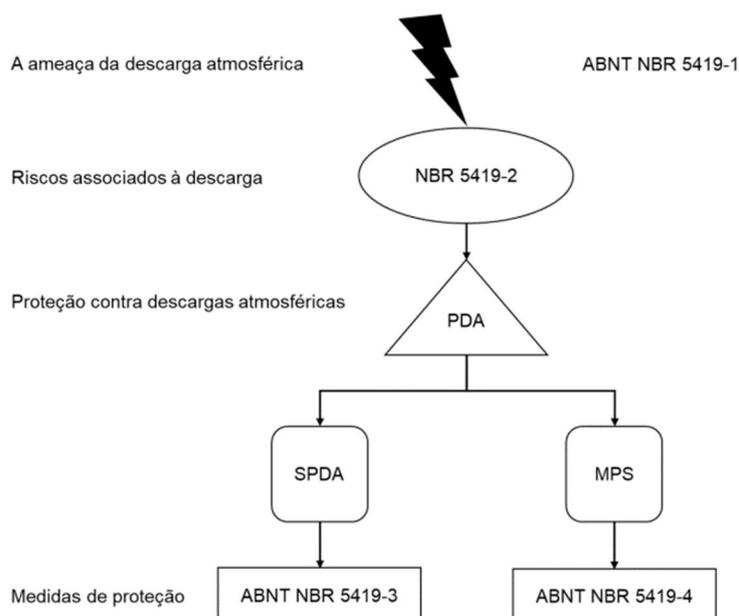
Parte 2: Gerenciamento de Risco;

Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida;

Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura.

A Figura 13 mostra como a norma é disposta e suas conexões, que serão abordadas.

Figura 13 - Conexões entre as partes da ABNT NBR 5419.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

3.1 PRINCÍPIOS GERAIS

A parte 1 dessa norma traz aspectos gerais e definições de termos que serão abordados posteriormente.

3.1.1 Fontes e tipos de danos a uma estrutura

A Norma classifica as situações que devem ser levadas em consideração ao se realizar uma análise de risco de um sistema de proteção:

- S1: descargas atmosféricas na estrutura;
- S2: descargas atmosféricas próximas à estrutura;
- S3: descargas atmosféricas sobre as linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura;
- S4: descargas atmosféricas próximas às linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura.

3.1.2 Descargas atmosféricas próximas a linhas elétricas e tubulações metálicas que entram na estrutura

Nessa seção da norma, ela traz os tipos de danos que podem ser ocasionados:

- D1: danos às pessoas devido a choque elétrico;
- D2: danos físicos (fogo, explosão, destruição mecânica, liberação de produtos químicos) devido aos efeitos das correntes das descargas atmosféricas, inclusive centelhamento;
- D3: falhas de sistemas internos devido a LEMP.

3.1.3 Tipos de perdas

A norma ainda elenca alguns atributos consideráveis para os cálculos, referentes às perdas. Tendo em vista que cada construção ou estrutura está condicionada a um tipo de situação, se faz necessário avaliar cada contexto, para que se otimize recursos no projeto de um sistema de proteção, mas garantindo a devida segurança em projetos mais complexos e de maior propensão a acidentes e riscos. Os tipos de perda são:

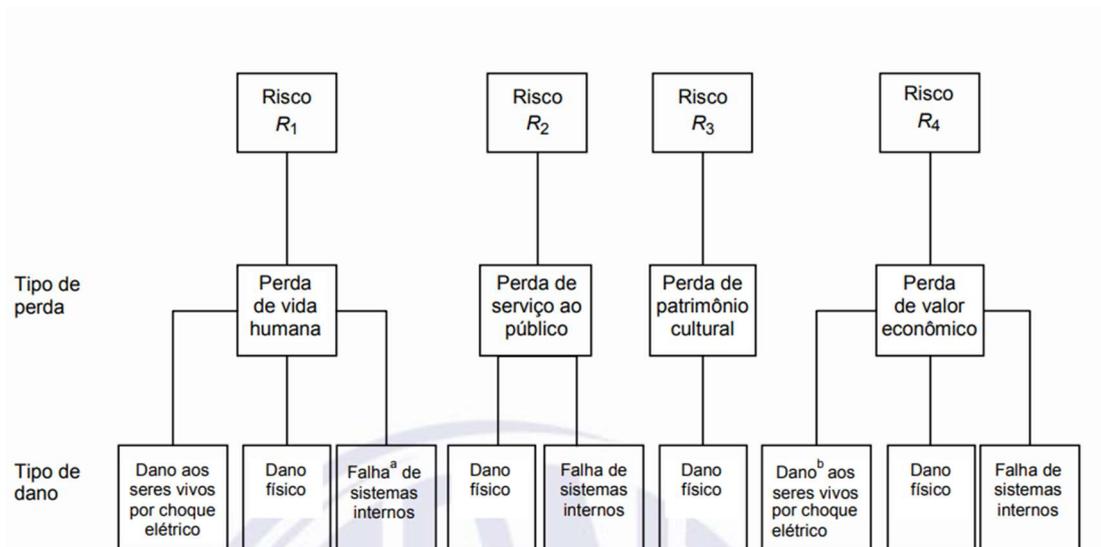
- L1: perda de vida humana (incluindo-se danos permanentes);
- L2: perda de serviço ao público;
- L3: perda de patrimônio cultural;
- L4: perda de valor econômico (estrutura e seu conteúdo, assim como interrupções de atividades).

3.1.4 Riscos

A análise de riscos é um dos fatores mais importantes, e está diretamente ligada com as perdas. A norma mostra uma síntese, conforme mostrado na Figura 14. Os tipos de risco são:

- R1: risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;
- R2: risco de perdas de serviços ao público;
- R3: risco de perdas do patrimônio cultural;
- R4: risco de perdas de valor econômico.

Figura 14 - Tipos de perdas e riscos correspondentes que resultam de diferentes tipos de danos.

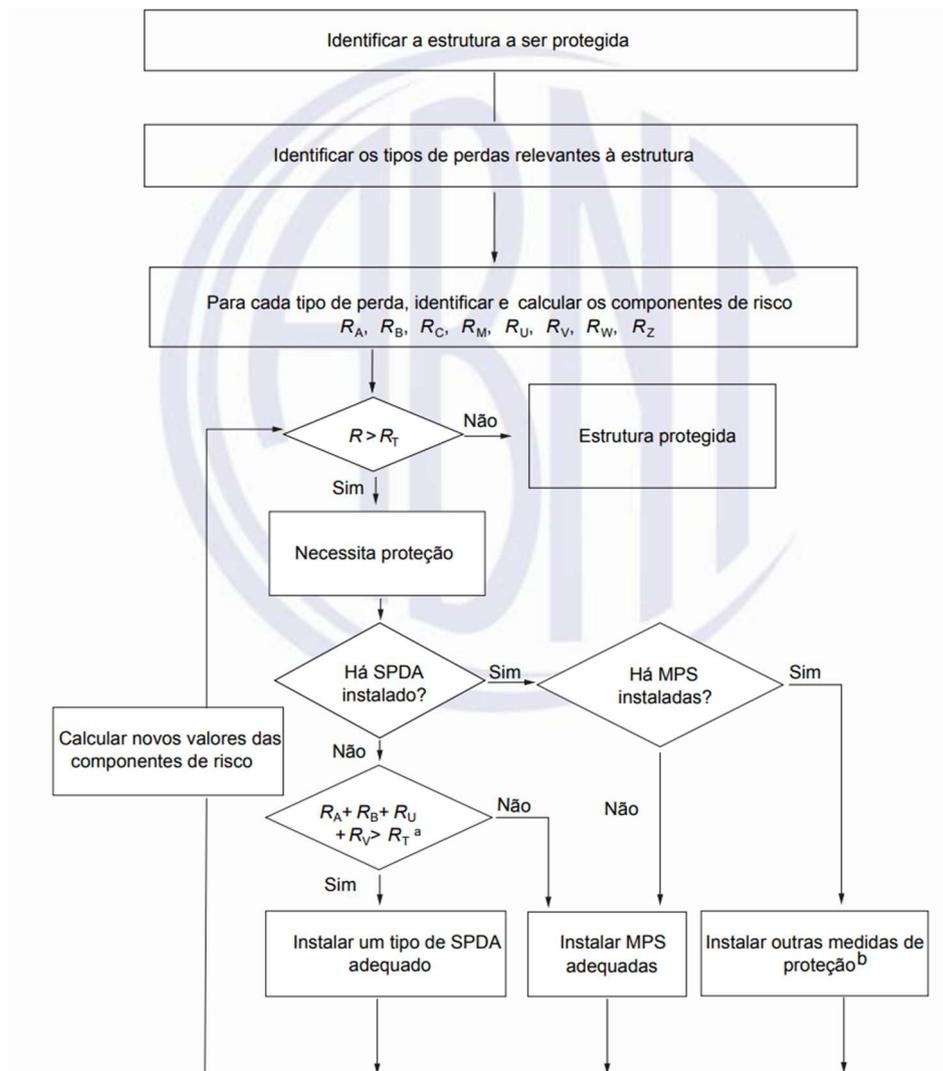


Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

3.2 GERENCIAMENTO DE RISCO

Nessa seção são definidos os parâmetros de cálculo, as medidas de proteção da estrutura, das pessoas e dos equipamentos, para garantir a redução de riscos e conseqüentemente a maior segurança. O fluxograma indicado na Figura 15 mostra os passos a serem feitos para o correto cálculo da análise de risco.

Figura 15 - Procedimento para decisão da necessidade da proteção.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

Para compreensão correta do fluxograma, é preciso identificar as equações e seus termos.

3.2.1 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na estrutura (S1)

Essa seção trata sobre a análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas na estrutura. Para a realização da correta avaliação dessas componentes, são utilizadas as seguintes equações:

a) componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico (D1):

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A \quad (1)$$

Sendo:

R_A : Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na estrutura);

P_A : Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura);

L_A : Perda relacionada aos ferimentos a seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura);

N_D : Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura.

b) componente relacionado a danos físicos (D2):

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B \quad (2)$$

Sendo:

R_B : Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na estrutura);

P_B : Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura);

L_B : Perda em uma estrutura relacionada a danos físicos (descargas atmosféricas à estrutura).

c) componente relacionado à falha de sistemas internos (D3):

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C \quad (3)$$

Sendo:

R_C : Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na estrutura);

P_C : Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura);

L_C : Perda relacionada à falha dos sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura).

3.2.2 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto da estrutura (S2)

Essa seção trata das equações referentes à análise dos componentes de risco das descargas em locais próximos às estruturas. Para isso, as seguintes equações são utilizadas:

a) componente relacionado à falha dos sistemas internos (D3):

$$R_M = N_M \times P_M \times L_M \quad (4)$$

Sendo:

R_M : Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da estrutura);

N_M : Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma estrutura;

P_M : Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada);

L_M : Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da estrutura).

3.2.3 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura (S3)

Nesse item, são mostradas as equações referentes à análise dos componentes de risco em uma linha conectada à estrutura. As equações são dadas por:

a) componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico (D1):

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U \quad (5)$$

Sendo:

R_U : Componente de risco (ferimentos a seres vivos – descarga atmosférica na linha conectada);

N_L : Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma linha;

N_{DJ} : Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura adjacente;

P_U : Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas perto da linha conectada);

L_U : Perda relacionada a ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas na linha).

b) componente relacionado a danos físicos (D2):

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V \quad (6)$$

Sendo:

R_V : Componente de risco (danos físicos na estrutura – descarga atmosférica na linha conectada);

P_V : Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas perto da linha conectada);

L_V : Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas perto da linha conectada).

c) componente relacionado à falha dos sistemas internos (D3):

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W \quad (7)$$

Sendo:

R_W : Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica na linha conectada);

P_W : Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha conectada);

L_W : Perda devido à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha).

3.2.4 Análise dos componentes de risco devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura (S4)

A correta avaliação do critério para análise dos componentes de risco perto de uma linha conectada à estrutura, é definida por meio das seguintes equações:

a) componente relacionado à falha dos sistemas internos (D3):

$$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z \quad (8)$$

Sendo:

R_Z : Componente de risco (falha dos sistemas internos – descarga atmosférica perto da linha);

N_I : Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha;

P_Z : Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada);

L_Z : Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha).

3.2.5 Risco tolerável

Por fim, das informações presentes para o cálculo correto, baseado no fluxograma fornecido por norma, há o estabelecimento de valores de risco tolerável, que servem para verificar a necessidade ou não de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Dentre os fatores, se houver uma edificação situada entre outros prédios mais altos, que atenda as condições pré-estabelecidas, pode ser dispensada da obrigatoriedade de seu uso. A Tabela 1 mostra os valores aceitáveis de tolerância.

Tabela 1 - Valores típicos de risco tolerável - R_T .

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, 2015.

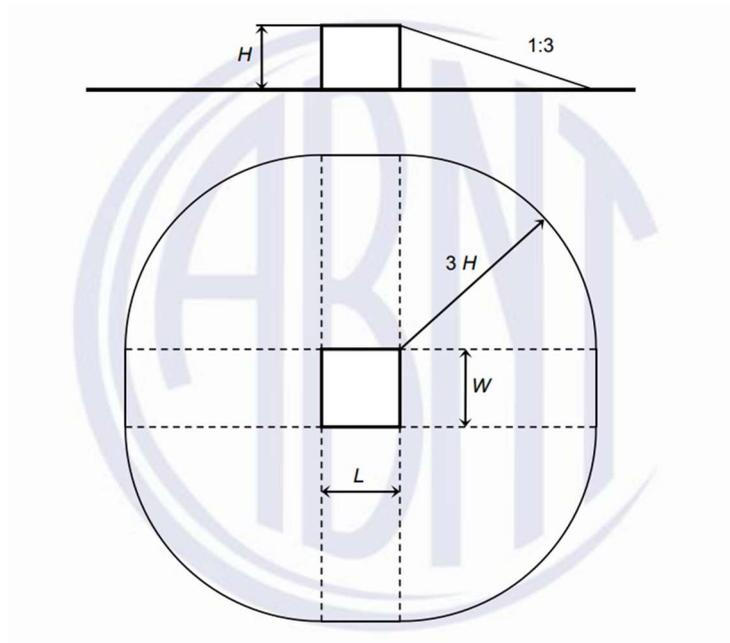
No caso específico abordado nesse estudo, de uma usina fotovoltaica de geração distribuída, faz-se a necessidade da implementação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Devido a sua localização ser em área aberta e descampada, em uma região rural, sem edificações próximas, a usina está sujeita a

uma elevada exposição de descargas diretas, que afetam diretamente os equipamentos, bem como descargas atmosféricas indiretas, atuando em linhas de transmissão.

3.2.6 Área da estrutura

Um fator que também deve ser levado em conta, é a área de exposição da estrutura. Para tal, a Figura 16 mostra o cálculo que deve ser realizado para o correto dimensionamento do sistema de proteção contra descargas. É importante salientar que o caso contido na norma é para estruturas com alturas uniformes. No escopo desse trabalho será abordada somente esse tipo, que é o que será usado para o caso de aplicação.

Figura 16 - Área de exposição equivalente de uma estrutura de altura uniforme.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

A equação que descreve o cálculo da área é dada por (9).

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 \quad (9)$$

Sendo:

L: comprimento da estrutura (m);

H: altura da estrutura (m);

W: largura da estrutura (m).

3.2.7 Fator de localização da estrutura

A localização da estrutura referente às instalações próximas também deve ser considerada, conforme a norma. A Tabela 2 mostra os valores de acordo com as especificações. Considerando a aplicação em usinas fotovoltaicas, não há nenhum objeto localizado nas vizinhanças, pois caso houvesse, poderia haver região de sombreamento.

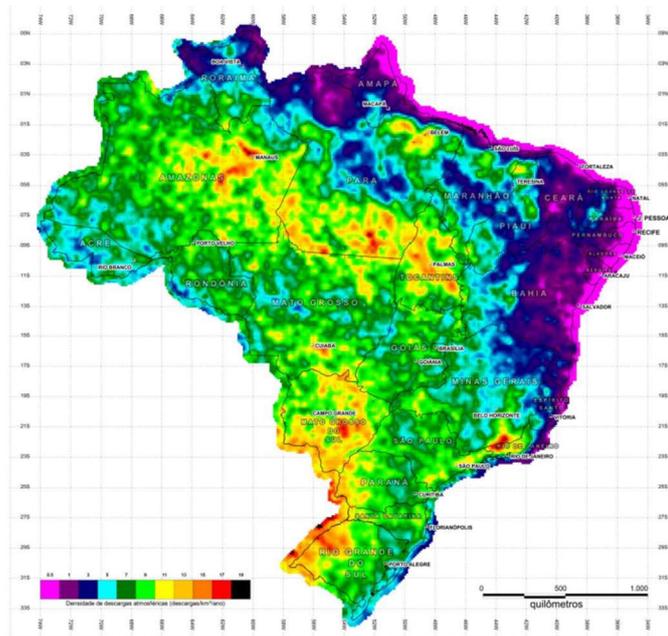
Tabela 2 - Fator de localização da estrutura (C_D).

Localização relativa	C_D
Estrutura cercada por objetos mais altos	0,25
Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos	0,5
Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte	2

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

Além do mais, a localização geográfica também é importante. Conforme abordado no capítulo 2, há regiões em que tem maior ocorrência de raios. Tal determinação é feita por meio do mapa isoceráunico, mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Mapa de densidades de descargas atmosféricas no Brasil.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

Esse mapa torna-se importante para a determinação da densidade de descargas atmosféricas para a terra. Por meio desse valor, pode-se calcular o número de eventos perigosos para a estrutura, conforme a equação 10.

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} \quad (10)$$

Sendo:

N_G : densidade de descargas atmosféricas para a terra (1/km² x ano);

A_D : Área de exposição equivalente da estrutura (m²);

C_D : fator de localização da estrutura.

3.3 DANOS FÍSICOS A ESTRUTURAS E PERIGOS À VIDA

Nessa parte 3, o objetivo da norma trata da proteção no interior e exterior e ao redor da estrutura. A norma traz a relação do nível de proteção indicando qual a classe de SPDA que deve ser utilizado, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre níveis de proteção para descargas atmosféricas e classe.

Nível de proteção	Classe de SPDA
I	I
II	II
III	III
IV	IV

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

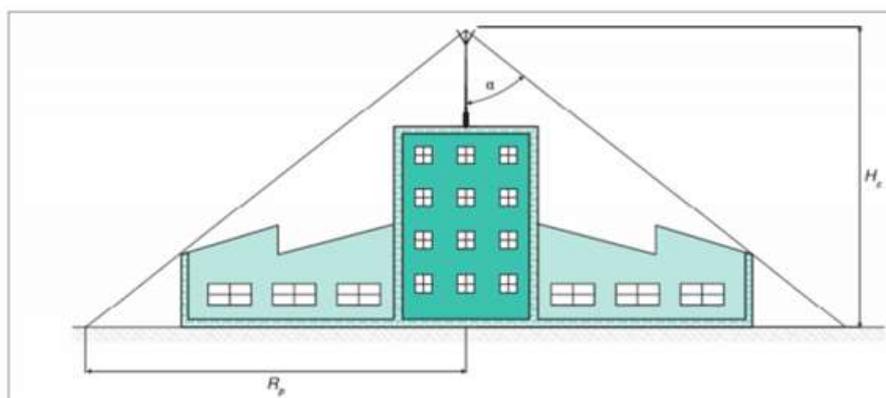
3.4 MÉTODOS DE INSTALAÇÃO

Essa seção da norma aborda também informações mais específicas a respeito da forma de instalação e métodos de proteção, bem como os tipos de captores e captações permitidas. Dentre os métodos de instalações, a norma traz três: método do ângulo de proteção; método das esferas rolantes e método das malhas.

3.4.1 Método do ângulo de proteção

O método do ângulo de proteção, também chamado de método de Franklin, leva o nome de seu autor por usar um para-raios do tipo Franklin na ponta, conforme mostrado na Figura 18.

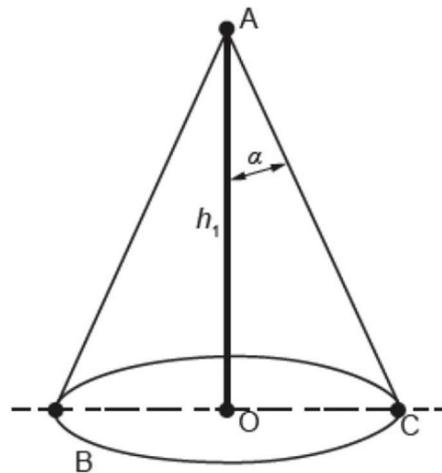
Figura 18 - Método do ângulo de proteção.



Fonte: EMF ENGENHARIA, 2019.

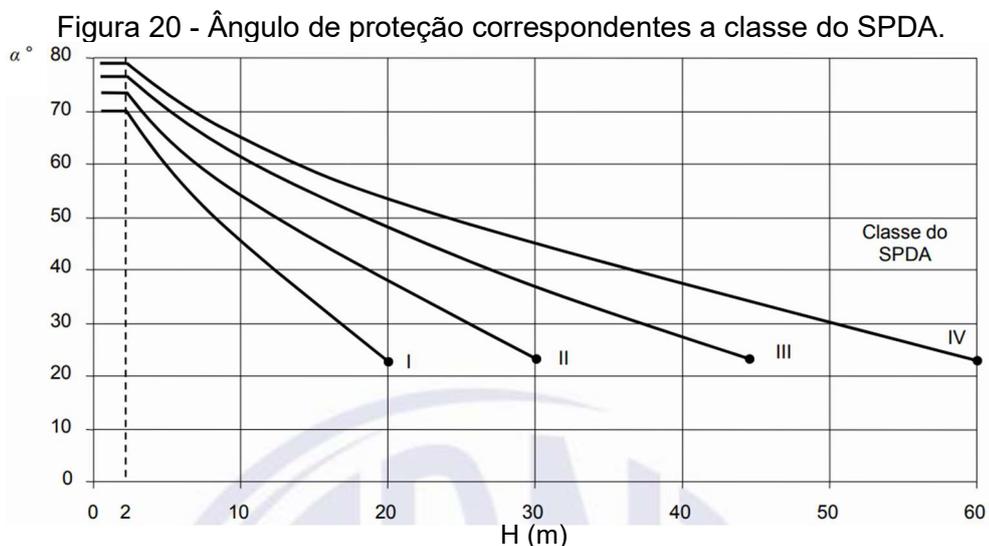
A altura do captor central é fundamental, pois determina a sua capacidade de atrair os raios. Por meio dos parâmetros definidos em norma, é definida uma angulação, no formato de um cone, que permite ao captor abranger área suficiente para proteger a edificação contra descargas elétricas atmosféricas. As alternativas, em caso de não atender aos requisitos é alterar a altura do captor. Já a angulação, depende da classe adotada no projeto do SPDA e da altura da estrutura. Esse ângulo é medido a partir do valor de α , conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Volume de proteção provido por um mastro.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

Tendo em vista essas informações, a norma fornece a relação entre o ângulo permitido e a altura da edificação, relacionando com a classe do SPDA adotado, conforme apresentado na Figura 20.



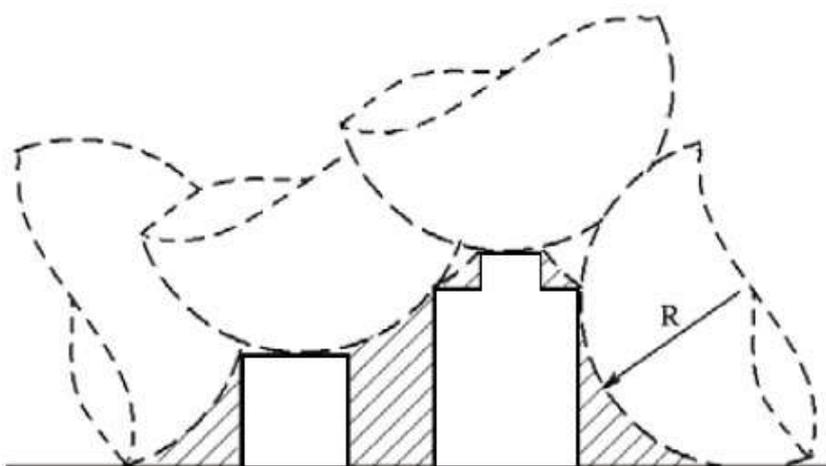
Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

A altura H refere-se ao plano do chão até a ponta do captor, e não a altura do edifício. Ainda, para valores de H acima dos valores finais indicados na Figura 20, só poderão ser aplicados o método das esferas rolantes ou o método das malhas.

3.4.2 Método das esferas rolantes

Esse método consiste em selecionar as áreas expostas da edificação e girar em todos os sentidos uma esfera imaginária e nos pontos em que houver contato, deverá ser instalado um captor. Se nenhum ponto da estrutura, com exceção do subsistema de captação, tocar na esfera fictícia, a área está protegida. A Figura 21 ilustra uma aplicação desse método.

Figura 21 - Método das esferas rolantes.



Fonte: Guimarães, 2024.

O raio dessa esfera é definido pela norma, conforme o tipo de SPDA adotado. Dessa forma, quanto menor for o raio, maior será a proteção, pois haverá a necessidade da instalação de mais captores, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação do raio da esfera rolante.

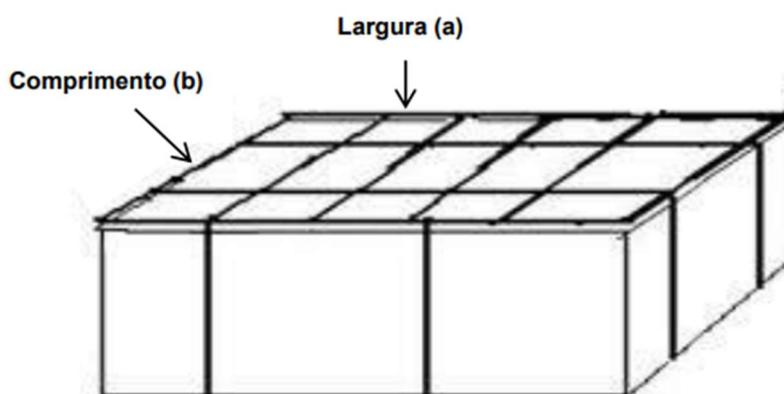
Classe do SPDA	Raio da esfera rolante (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015.

3.4.3 Método das malhas

Esse método é bastante útil para estruturas com uma grande área horizontal, pois o objetivo é criar uma grande malha para proteger a edificação. O funcionamento se dá em utilizar os condutores no formato de anel para formar uma gaiola de Faraday, que pelo princípio, a carga percorrerá somente a área externa, anulando os efeitos de campos elétricos internos (Ferreira A. A., 2010). A Figura 22 mostra um esquema do dimensionamento por esse método.

Figura 22 - Método das malhas.



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

De forma análoga às anteriores, os condutores devem respeitar um limite máximo de afastamento, definido por norma, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Afastamento máximo dos condutores de malha.

Classe do SPDA	Máximo Afastamento dos Condutores da Malha, em metros
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015.

3.5 ESPECIFICAÇÕES GERAIS

Além dos métodos, algumas informações são importantes para o correto dimensionamento do sistema de proteção. Dentre eles, é que, a distância a ser considerada para os condutores de descida é determinada pela classe do SPDA adotada. A Tabela 6 relaciona esses dois parâmetros.

Tabela 6 - Espaçamento médio entre os condutores de descida.

Classe do SPDA	Distâncias m
I	10
II	10
III	15
IV	20

NOTA É aceitável que o espaçamento dos condutores de descidas tenha no máximo 20 % além dos valores acima.

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

É importante, nesse contexto, estudar e avaliar a melhor decisão, pois um projeto superdimensionado de sistema de proteção contra descargas atmosféricas poderá inviabilizá-lo devido ao elevado custo, enquanto um subdimensionado, poderá ocasionar em danos severos e riscos à vida, no local.

3.6 IEC 63227

Embora existam as normas NBR 5419:2015 e a NBR 16690:2020, ambas acabam sendo muito vagas para detalhes mais específicos de um sistema fotovoltaico. Inclusive, para as áreas abertas, a norma vigente não dá cobertura suficiente, gerando questionamentos em como projetar o sistema de proteção contra descargas incidentes nos módulos. Por esse motivo, utiliza-se a IEC 63227 para direcionamentos mais específicos.

Essa norma é focada e exclusiva para o desenvolvimento de proteção de sistemas fotovoltaicos contra raios e surtos, com detalhes para as regiões dos

módulos, ponto que não é considerado pelas normas brasileiras vigentes. Sua importância reside na abordagem da relação entre a disposição dos painéis solares e as especificidades dos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) necessários para garantir a segurança das instalações elétricas do sistema contra surtos. Ela dá diretrizes sobre o tipo ou classe de DPS a serem instalados nas linhas do sistema.

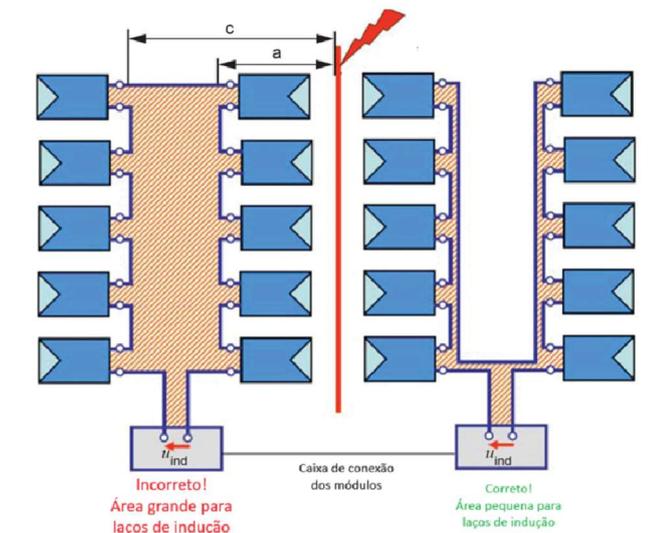
Considerando que essa norma é de 2020, ainda não existe uma equivalência nacional para essa IEC. Porém, utilizar suas especificações garante acima de tudo, uma maior confiabilidade e segurança para os equipamentos.

3.6.1.1 Fiação interna

O roteamento de cabos é uma forma de minimizar os riscos de perda com surtos elétricos e os laços de indução gerados. Essa técnica ajuda a mitigar a criação de surtos de tensão nos condutores de energia e de sinais e ela é feita alterando o caminho percorrido pelos condutores, a fim de que se evite laços (DEHN, 2022).

A Figura 23 mostra o comparativo de um esquema de arranjos fotovoltaicos com as ligações de cabos roteados e não roteados. É perceptível que se deseja a menor área hachurada entre os cabos, embora isso possa ocasionar no maior número de cabos para a instalação. Essa área maior está mais propensa a fluxos de campo elétrico e magnético de uma descarga atmosférica, mesmo que seja indireta (DEHN, 2022).

Figura 23 - Comparativo condutores roteados e não roteados.



Fonte: adaptado de IEC 63227, 2020.

Esse item refere-se ao termo K_{S3} da NBR 5419 que é o fator relevante às características do cabeamento interno. A Tabela 7 mostra os valores previstos pela norma.

Tabela 7 - Valor do fator K_{S3} dependendo da fiação interna.

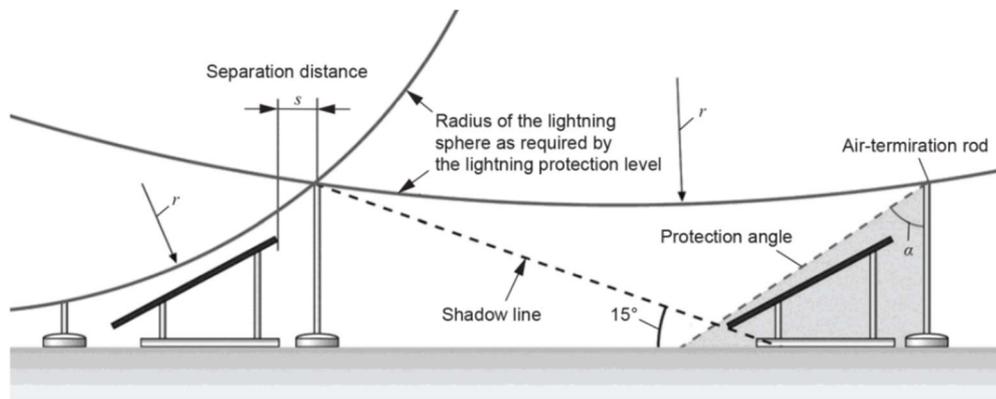
Tipo de fiação interna	K_{S3}
Cabo não blindado – sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços ^a	1
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes laços ^b	0,2
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar laços ^c	0,01
Cabos blindados e cabos instalados em eletrodutos metálicos ^d	0,000 1

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015.

3.6.2 Proteção dos módulos

A proteção da área dos módulos da usina fotovoltaica é ainda pouco discutida na literatura, e é raramente efetuada no Brasil devido à ausência de legislação obrigatória a esse respeito. A IEC 63227 traz duas possibilidades de proteção contra essas descargas. A Figura 24 mostra a proteção com a utilização de hastes.

Figura 24 - Método de proteção dos módulos com hastes.



Fonte: IEC 63227, 2020.

Nesse caso, adota-se um mastro próximo à área dos módulos fotovoltaicos dispostos no solo a uma certa distância que deve ser calculada considerando a posição do sol, para que se evite sombreamento. Essa distância de separação é importante também para evitar centelhamento. A Tabela 8 mostra valores mínimos de diâmetro da haste relacionado à distância dela até os módulos fotovoltaicos. O raio da esfera rolante r que percorre os mastros é determinado pelo método das esferas rolantes e, conforme indicação da NBR 63227, usando o nível de proteção III, esse raio é de 45 metros. Esse método é classificado como isolado, pois a corrente do raio não percorre a região dos módulos. A Figura 25 mostra uma instalação em campo desse tipo de montagem.

Figura 25 - Uso de hastes nos módulos para proteção contra descargas.



Fonte: Canal Solar, 2023.

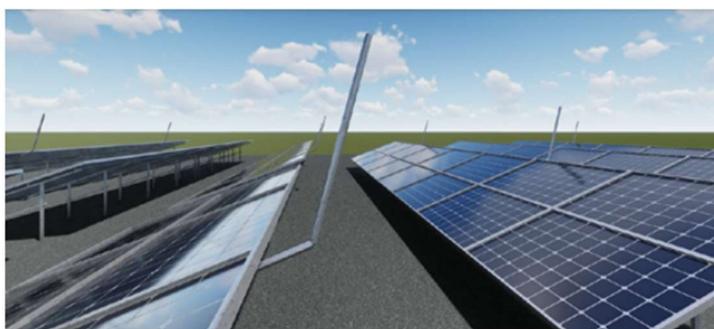
Tabela 8 - Mínima distância entre as hastes e o sistema para evitar sombreamento.

Diameter of the air-termination system m	Distance of the air-termination system to the PV module m
0,008	0,86
0,010	1,08
0,016	1,73

Fonte: IEC 63227, 2020.

Uma outra forma, é por meio de minicaptadores acoplados às estruturas dos módulos. Esse método é classificado como não isolado, pois a corrente do raio percorrerá a estrutura dos módulos. É importante ressaltar que todo o sistema deverá ser conectado ao sistema de aterramento, para que haja a coordenação correta, e por meio de dispositivos de proteção contra surtos e sobretensões, como o DPS, evitando danos maiores por ações diretas e indiretas também (GUSTAVO; COELHO, 2021). A Figura 26 mostra um exemplo da disposição desses captadores na prática.

Figura 26 - Uso de minicaptadores nos módulos para proteção contra descargas.



Fonte: DEHN, 2021.

4 ESTUDO DE CASO

A usina em análise para o estudo de caso é uma usina de geração distribuída, de 3 MW. O objetivo desse estudo é fazer a análise de risco dos seguintes componentes da usina fotovoltaica: a sala de controle, o *skid* que é uma base móvel contendo os equipamentos de medição e proteção de média e baixa tensão, e a cabine de medição.

A Figura 27 apresenta um modelo de *Layout* de uma usina fotovoltaica similar ao do escopo de cálculo desse trabalho. Os agrupamentos dos módulos fotovoltaicos são denominados *clusters*, representados por Planta 1 e Planta 2 na figura.

Figura 27 - *Layout* de uma usina fotovoltaica.



Fonte: adaptado de Teixeira, Donadon e Retorta, 2016.

Todo o parque solar deve ser alvo de proteção contra as descargas, sejam diretas ou indiretas. A sala de O&M ou sala de controle, contém equipamentos mais sensíveis e de alto valor aquisitivo e, por isso, requer maior segurança para evitar prejuízos. A representação da figura também mostra que há linhas de transmissão responsáveis pelo transporte da energia. Essas linhas quando submetidas a um raio, são alvo de descargas atmosféricas indiretas, danificando também os equipamentos.

4.1 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Para a resolução da análise de risco, considerando o alto número de equações a serem resolvidas e a minuciosidade que envolve o processo do cálculo, propõe-se uma ferramenta de cálculo de análise de risco na linguagem de programação *Python*. O código desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso se encontra no Apêndice A.

Utilizando uma interface gráfica, o usuário pode selecionar os parâmetros corretos e no final ter um panorama geral, avaliando assim, se os requisitos selecionados atendem às condições necessárias para o correto dimensionamento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas para as estruturas da usina. Além disso, ao fim do programa, é gerada uma planilha com as variáveis de entrada selecionadas pelo usuário e seus valores correspondentes, de acordo com as tabelas da norma NBR 5419, bem como o resultado. O objetivo desse documento é facilitar a elaboração de um memorial descritivo pelo usuário.

4.2 INTERFACE DO SOFTWARE

O *Software* foi feito na linguagem de programação *Python*, por meio do editor de código fonte *Visual Studio Code*. Para a elaboração da janela gráfica, seus menus, exibições e resultados, foi utilizada a biblioteca disponível *Tkinter*. Já para a elaboração de um documento no *Excel*, foi utilizada a biblioteca *pandas* e *os*. Além da biblioteca *math* para as operações matemáticas, utilizadas nos cálculos das equações.

4.2.1 Características da estrutura

A ferramenta é dividida em abas, sendo cada uma responsável por uma especificação, de acordo com a NBR 5419. Para tal, foram selecionados os parâmetros e dimensionados a região do transformador, a sala de controle e a sala de

medição. A primeira aba é específica para os aspectos físicos da estrutura, como suas dimensões e localizações. A Figura 28 mostra a primeira janela do *software*.

Figura 28 - Ferramenta: Aba características da estrutura.

Consulta de Densidade de Descarga

- Características da Estrutura Linha de Energia Linha de Sinais Zona de Exposição Perda L1 Perda L4

Selecione o Estado: SC

Selecione a Cidade: São Lourenço do Oeste

Densidade de descarga: 9,99

Largura: 6

Comprimento: 2,44

Altura: 3,9

Fator de localização da estrutura (CD): Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças

SPDA Instalado (Pb): Classe III

DPS projetado (Peb): I

OK

Fonte: Autor.

A NBR 5419 disponibiliza um mapa de densidade de descargas atmosféricas no Brasil, mostrado na Figura 17. No entanto, para diminuir as interações externas do usuário e facilitar o cálculo, além de aumentar a precisão, visto que o mapa contempla uma vasta região, foram retiradas informações do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) com a informação da densidade atmosférica de cada cidade do Brasil (INPE, 2011).

As dimensões contempladas e demais características da sala de controle estão especificadas na Figura 28. A usina localiza-se numa região rural e isolada, por esse motivo foi selecionada a opção “Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças”, definido pelo parâmetro Cd, e seus valores estão especificados na Tabela 2.

Além disso, projeta-se inicialmente, um SPDA de Classe III, pois de acordo com a IEC 63227, a menor classe de um SPDA deverá ser III. Na prática, esse valor definirá as limitações físicas, conforme especificados nas Figura 20, Tabela 4,

Figura 19 e Tabela 5. Foi projetado também um DPS do tipo I, que é usado para locais onde há probabilidade de descargas diretas (LIMA, 2024).

4.2.2 Linha de energia

A segunda janela refere-se às informações a respeito da linha de energia, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29 - Ferramenta: Aba linha de energia.

A imagem mostra uma janela de software intitulada 'Consulta de Densidade de Descarga'. No topo, há uma barra de navegação com as seguintes abas: 'Características da Estrutura', 'Linha de Energia' (selecionada), 'Linha de Sinais', 'Zona de Exposição', 'Perda L1' e 'Perda L4'. O formulário principal contém os seguintes campos:

- Comprimento: Campo de texto com o valor '1000' inserido.
- Fator de localização da linha de energia (CI): Menu suspenso com o valor 'Enterrado' selecionado.
- Tipo de linha de energia (Ct): Menu suspenso com o valor 'Linha de energia ou sinal' selecionado.
- Tipo de ambiente (Ce): Menu suspenso com o valor 'Rural' selecionado.
- Tipo de linha (CII): Menu suspenso com o valor 'Linha enterrada não blindada' selecionado.
- Fator de localização da linha de energia (Cdj): Menu suspenso com o valor 'Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças' selecionado.

Na base do formulário, há um botão 'OK'.

Fonte: Autor.

O primeiro parâmetro de comprimento, é denominado L_L , na norma. Como não há o conhecimento do real comprimento desse percurso, será adotado o valor de 1000 metros, conforme recomendação: "Onde o comprimento da seção da linha é desconhecido, pode ser assumido $L_L = 1.000 \text{ m}$ " (ABNT, 2015).

O parâmetro fator de localização da linha de energia indica a forma de instalação. No caso das usinas fotovoltaicas, em geral, são instalados em eletrodutos enterrados, por meio de valas. Já o ambiente, é rural, conforme comentado anteriormente.

Para a determinação da blindagem dos cabos, utilizou-se a recomendação da norma que informa que em áreas rurais, utiliza-se cabos não blindados, para baixa

tensão (ABNT, 2015). O fator de localização da linha de energia é resolvido em estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças.

4.2.3 Linha de sinais

A aba de linha de sinais segue a mesma lógica das justificativas apresentadas no item anterior. A Figura 30 mostra as configurações dessa janela da ferramenta.

Figura 30 - Ferramenta: Aba linha de sinais.

Consulta de Densidade de Descarga

- Características da Estrutura | Linha de Energia | **Linha de Sinais** | Zona de Exposição | Perda L1 | Perda L4

Comprimento: 1000

Fator de localização da linha de sinais (CI): Enterrado

Tipo de linha de sinais (Ct): Linha de energia ou sinal

Tipo de ambiente (Ce): Rural

Tipo de linha (Cli): Linha enterrada não blindada

Fator de localização da linha de sinais (Cdj): Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças

OK

Fonte: Autor.

4.2.4 Zona de exposição

A janela de zona de exposição traz algumas informações técnicas a respeito do nível de segurança contra descargas atmosféricas da usina. A Figura 31 mostra essa aba e as configurações adotadas.

Figura 31 - Ferramenta: Zona de exposição.

Características da Estrutura	Linha de Energia	Linha de Sinais	Zona de Exposição	Perda L1	Perda L4
Tipo de piso rt			Agricultura		
Proteção contra choque (Pta):			Equipotencialização efetiva do solo		
Probabilidade de raio na linha (Ptu):			Isolação elétrica		
Fator de Risco de Incêndio (rf):			Incêndio risco normal		
Fator contra Incêndio (rp):			Extintor, hidrantes, setor à prova de fogo		
Fiação Interna:			Cabo não blindado - Com roteamento (grandes laços)		
DPS Coordenado (Energia):			II		
DPS Coordenado (Sinais):			II		
Tipo de Perigo Especial:			Sem perigo especial		

Fonte: Autor.

4.2.4.1 Tipo de piso

O primeiro item, referente ao tipo de solo, é importante. O melhor solo é o que oferece baixa resistividade, pois permite o escoamento da corrente elétrica de maneira mais uniforme. A Tabela 9 mostra a resistência de contato para cada tipo de solo.

Tabela 9 - Fator de redução r_t em função do tipo da superfície do solo ou piso.

Tipo de superfície ^b	Resistência de contato $k \Omega^a$	r_t
Agricultura, concreto	≤ 1	10^{-2}
Marmore, cerâmica	1 – 10	10^{-3}
Cascalho, tapete, carpete	10 – 100	10^{-4}
Asfalto, linóleo, madeira	≥ 100	10^{-5}

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

4.2.4.2 Proteção contra choques

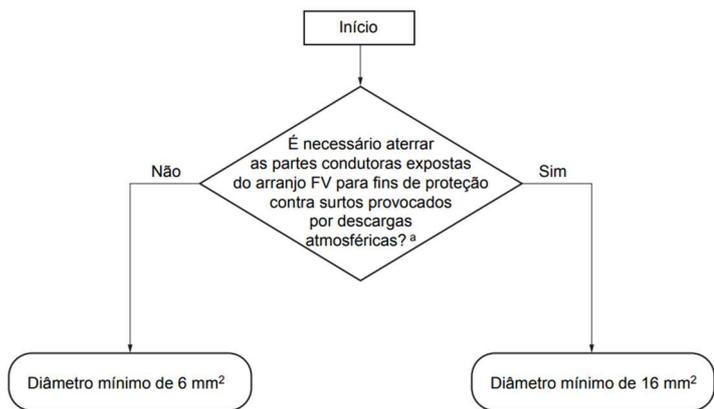
Já no segundo item, referente à proteção contra choques, a usina é projetada para um sistema de equipotencialização completo, abrangendo os *trackers*, inversores, cercas e todos os dispositivos metálicos da instalação, que devem seguir as especificações da NBR 16690:2019, que diz:

Existem as seguintes opções para aterramento ou equipotencialização de partes de um arranjo fotovoltaico:

- a) aterramento funcional de peças metálicas não energizadas (por exemplo, para permitir uma melhor detecção de correntes de fuga para a terra).
- b) aterramento para proteção contra descargas atmosféricas.
- c) barramento de equipotencialização, para evitar diferentes potenciais elétricos em uma instalação.
- d) aterramento funcional de um polo do arranjo fotovoltaico, chamado aterramento funcional do arranjo fotovoltaico (NBR 16690, 2019).

Além disso, essa norma dá informações acerca do dimensionamento de cabos utilizados para a equipotencialização, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Árvore de decisão para aterramento funcional/equipotencialização.



Fonte: ABNT NBR 16690, 2013.

No presente estudo de caso, o diâmetro mínimo será de 16 mm², seguindo as orientações dadas pela NBR 5419. Os parâmetros de cálculo referentes ao item P_{TA} são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de probabilidade P_{TA} de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque e de passo perigosas.

Medida de proteção adicional	P _{TA}
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos de alerta	10 ⁻¹
Isolação elétrica (por exemplo, de pelo menos 3 mm de polietileno reticulado das partes expostas (por exemplo, condutores de descidas)	10 ⁻²
Equipotencialização efetiva do solo	10 ⁻²
Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida	0

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

4.2.4.3 Probabilidade de raio na linha

A probabilidade P_{TU} é descrita como a probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas. Nesse caso será considerado a isolação elétrica. Os valores de parâmetros são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores da probabilidade PTU de uma descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas.

Medida de proteção	PTU
Nenhuma medida de proteção	1
Avisos visíveis de alerta	0,01
Isolação elétrica	0,001
Restrições físicas	0

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015.

4.2.4.4 Fator de risco de incêndio

Para os ambientes fechados da sala de medição e sala de controle, serão considerados riscos de incêndio como normal. De acordo com a NBR 5419 “Estruturas com um risco normal de incêndio podem ser assumidas como estruturas com uma carga específica de incêndio entre 800 MJ/m² e 400 MJ/m²” (NBR 5419, 2015). Pela falta de uma regulamentação efetiva e descrição para essas construções em usinas fotovoltaicas, considera-se como escritório, que conforme descrito pelas normas dos bombeiros de Santa Catarina, prevê 700 MJ/m², adequando-se às especificações (CORPO DE BOMBEIROS DE SANTA CATARINA, 2020). A Tabela 12 mostra os valores referentes para cada tipo de risco.

Tabela 12 - Fator de redução r_f em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura.

Risco	Quantidade de risco	r_f
Explosão	Zonas 0, 20 e explosivos sólidos	1
	Zonas 1, 21	10^{-1}
	Zonas 2, 22	10^{-3}
Incêndio	Alto	10^{-1}
	Normal	10^{-2}
	Baixo	10^{-3}
Explosão ou incêndio	Nenhum	0

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

Também serão instalados extintores e hidrantes próximos as edificações para garantir maior segurança em caso de acidentes e utilizado o fator de redução mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 - Fator de redução r_p em função das providências tomadas para reduzir.

Providências	r_p
Nenhuma providência	1
Uma das seguintes providências: extintores, instalações fixas operadas manualmente, instalações de alarme manuais, hidrantes, compartimentos à prova de fogo, rotas de escape	0,5
Uma das seguintes providências: instalações fixas operadas automaticamente, instalações de alarme automático	0,2

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015.

4.2.4.5 Coordenação de DPS

Como a implantação dessa usina está no projeto básico, ou seja, não foi executada, é possível prever e estimar da forma desejada de modo que se tenha um menor custo, mas que não deixe de garantir a segurança. Por esse motivo, considerando as condições geográficas de uma usina fotovoltaica e por ser uma instalação de alto valor aquisitivo, adotou-se a escolha de se utilizar o DPS coordenado do tipo II, que são valores comumente usados em projetos fotovoltaicos. A Tabela 14 mostra esses valores, segundo a norma.

Tabela 14 - Valores de probabilidade de PSPD e PEB em função do NP para o qual os DPS foram projetados.

NP	PSPD e PEB
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015

4.2.4.6 Fator de perigo especial

De acordo com a norma técnica, fator h_z é “um fator de aumento da perda devido a danos físicos quando um perigo especial estiver presente” (NBR 5419, 2015). Nesse caso, ele descreve situações de risco a depender das condições do ambiente e possibilidade de fuga e mobilização. Considerando que poucas pessoas estarão nas instalações da usina, esse fator acaba sendo irrelevante e, portanto, adota-se como sem perigo especial. A Tabela 15 mostra os valores do fator h_z .

Tabela 15 - Fator h_z aumentando a quantidade relativa de perda na presença.

Tipo de perigo especial	h_z
Sem perigo especial	1
Baixo nível de pânico (por exemplo, uma estrutura limitada a dois andares e número de pessoas não superior a 100)	2
Nível médio de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes entre 100 e 1 000 pessoas)	5
Dificuldade de evacuação (por exemplo, estrutura com pessoas imobilizadas, hospitais)	5
Alto nível de pânico (por exemplo, estruturas designadas para eventos culturais ou esportivos com um número de participantes maior que 1 000 pessoas)	10

Fonte: ABNT NBR 5419.

4.2.5 Perda L1

Esse termo se refere ao item da norma perda de vida humana, que estima o risco de danos permanentes às pessoas ou até sua morte. O risco em relação à vida humana é o maior de todos, por ser considerado uma perda de valor social. As perdas L2 e L3 não serão abordadas, por se tratarem de Tipos de Perdas Inaceitáveis de Serviço ao Público e Tipos de Perdas Inaceitáveis ao Patrimônio Cultural, respectivamente. Casos esses, não aplicáveis nesse estudo. A Figura 33 mostra a definição dos parâmetros da análise de perdas do tipo L1 no *software*.

Figura 33 - Ferramenta: Análise de perdas tipo L1.

The image shows a software window titled "Consulta de Densidade de Descarga" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). Below the title bar is a tabbed interface with five tabs: "Características da Estrutura", "Linha de Energia", "Linha de Sinais", "Zona de Exposição", and "Perda L1". The "Perda L1" tab is currently selected. The main area of the window contains several input fields and dropdown menus:

- "Número de pessoas na zona de perigo:" with a text box containing the value "6".
- "Número de pessoas na estrutura:" with a text box containing the value "6".
- "Tempo de presença (jornada de trabalho):" with a text box containing the value "8".
- "Total de dias por ano:" with a text box containing the value "50".
- "Danos físicos Lf:" with a dropdown menu showing "Outros".
- "Falhas de sistemas internos Lo:" with a dropdown menu showing "Outros".
- An "OK" button at the bottom center.

Fonte: Autor.

As considerações acerca do número de pessoas na zona de perigo, na estrutura, o tempo de presença e o total de dias por ano, referem-se especificamente a periódicos de manutenção enquanto a usina estiver em funcionamento. Em boa parte do tempo, a usina opera de forma remota, por meio dos dispositivos de comunicação, mas para alguns procedimentos é necessário que se acesse localmente as instalações. De acordo com as opções da Tabela 16, é visto que nenhuma das opções se encaixa para o presente caso. Por esse motivo, foi selecionado a opção outros.

Tabela 16 - Tipo de perda L1: Valores médios típicos de LT, LF e LO.

Tipos de danos	Valor de perda típico		Tipo da estrutura
	LT	LF	
D1 ferimentos	10-2		Todos os tipos
D2 danos físicos		10-1	Risco de explosão
		10-1	Hospital, hotel, escola, edifício cívico
		0,005	Entretenimento público, igreja, museu
		0,002	Industrial, comercial
		10-2	Outros
D3 falhas de sistemas internos		10-1	Risco de explosão
		10-2	Unidade de terapia intensiva e bloco cirúrgico de hospital
		10-3	Outras partes de hospital

Fonte: adaptado de ABNT NBR 5419, 2015.

4.2.6 Perda L4

As perdas L4 referem-se a perdas econômicas. Nesse sentido, é importante realizar essa avaliação por ser um projeto de alto valor aquisitivo. Dessa forma, as informações preenchidas são valores aproximados da obra, dados em milhões de reais. A Figura 34 mostra a definição dos parâmetros da análise de perdas do tipo L4 no *software*.

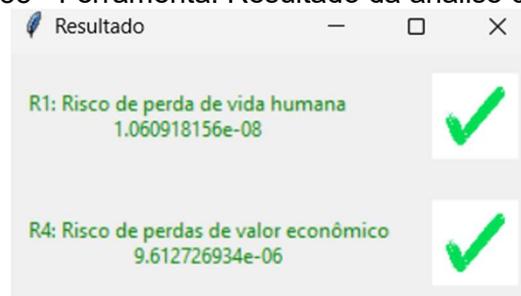
Figura 34 - Ferramenta: Análise de perdas tipo L4.

Fonte: Autor.

4.2.7 Resultado

Após a seleção de todos os parâmetros, é possível verificar que, com as condições especificadas, a análise de risco atende às especificações da norma. É importante ressaltar que, devido às baixas dimensões das edificações presentes em uma usina fotovoltaica, além de todo cabeamento ser enterrado, é esperado o resultado estar dentro do aceitável. A Figura 35 mostra a tela de resultados do *software*.

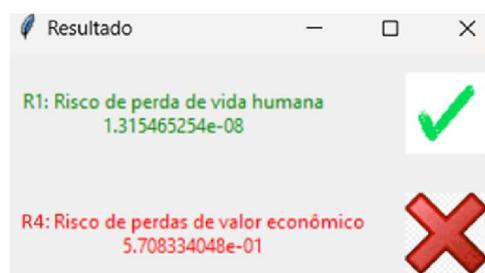
Figura 35 - Ferramenta: Resultado da análise de riscos.



Fonte: Autor.

A fim de demonstração da ferramenta, a Figura 36 mostra um exemplo do aviso de inviabilidade das categorias escolhidas na análise de gerenciamento de risco. Nesse caso, foi elevado o custo financeiro do projeto e dessa forma, o critério de risco de perda de valor econômico não seria atendido, sendo necessário alterar a classe ou os elementos de proteção.

Figura 36 - Ferramenta: Exemplo de resultado fora do esperado.



Fonte: Autor.

Além disso, um arquivo chamado resultado_variaveis.xlsx é gerado após a finalização dos dados na ferramenta. O objetivo dessa tabela é auxiliar na elaboração

de um memorial de cálculos e realizar a correta conferência dos resultados emitidos pelo *Software*. A tabela apresentada na Figura 37 mostra o resultado gerado, dentro da planilha.

Figura 37 - Tabela gerada para memorial de cálculos.

Nome da Variável	Descrição	Valor
Ng	Densidade de descargas atmosféricas:	9,99
rt	Tipo de piso	0,01
Lt	Ferimento devido a choque	0,001
nz_global	Número de pessoas na zona de perigo	6
nt_global	Número de pessoas na estrutura inteira	6
tz	Tempo, em horas por ano, em que as pessoas estão presentes em um local perig	400
Lo0	Falhas de sistemas internos	0,001
Lt4	Ferimentos	0
ca4_global	Valor dos animais na zona	0
ct4_global	Valor total da estrutura	6
Lo4	Falha de sistemas	0,0001
cs4_global	Valor dos sistemas internos incluindo suas atividades	2
Ad	Área da estrutura referente a NBR 5419	642,19
Pcp	Probabilidade da descarga na estrutura causar falha nos sistemas internos (en	0,02
Cldd	Blindagem rede de dados	1
ePld	ePld	1
Pld	Pld	1
ePli	ePli	0,6
Pli	Pli	0,5
Pcd	Probabilidade da descarga na estrutura causar falha nos sistemas interno (sina	0,02
Pmsp	Pmsp	0,667
Pmst	Pmst	0,667
Pmp	Probabilidade da descarga perto da estrutura causar danos internos (energia)	0,01334
Pmd	Probabilidade da descarga perto da estrutura causar danos internos (sinais)	0,01334
Pup	Probabilidade da descarga na linha causar ferimentos a seres vivos por choque	0,0001
Pud	Probabilidade da descarga na linha causar ferimentos a seres vivos por choque	0,0001
Pwp	Probabilidade da descarga na linha causar falhas de sistemas internos (energia)	0,01
Pwd	Probabilidade da descarga na linha causar falhas de sistemas internos (dados)	0,01
Pzp	Probabilidade da descarga perto da linha causar falhas de sistemas internos (e	0,012
Pzd	Probabilidade da descarga perto da linha causar falhas de sistemas internos (c	0,01
Pvp	Probabilidade da descarga em uma linha causar danos físicos (energia)	0,01
Pvd	Probabilidade da descarga em uma linha causar danos físicos (dados)	0,01
RA1	Análise das componentes de risco para R1	2,9E-12
RB1	Análise das componentes de risco para R1	1,5E-09
RC1	Análise das componentes de risco para R1	0
RM1	Análise das componentes de risco para R1	0
RU1	Análise das componentes de risco para R1	1,8E-11
RV1	Análise das componentes de risco para R1	9,1E-09
RZ1	Análise das componentes de risco para R1	0
hz	Nível de pânico	1
L	Largura	6
W	Comprimento	2,44
H	Altura	3,9
R11	Resultado de R1	1,1E-08
R12	Resultado de R2	9,6E-06

Fonte: Autor.

4.3 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

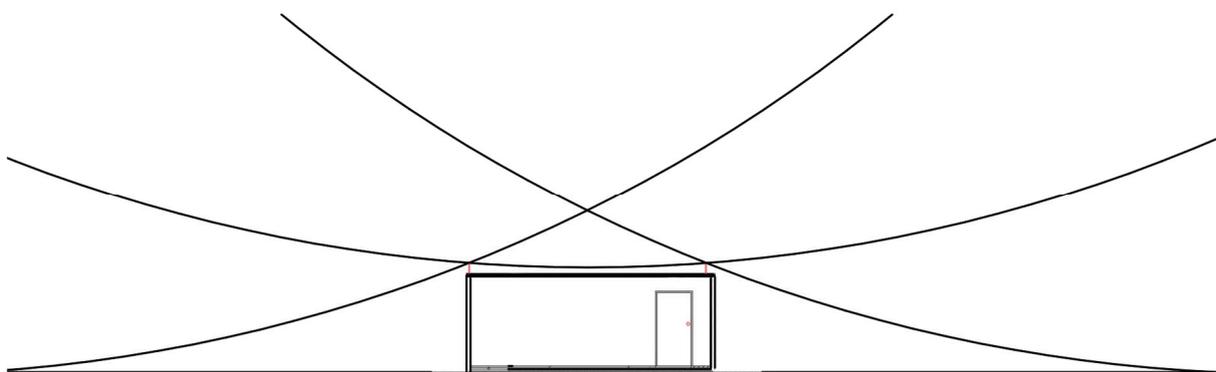
Os dispositivos de proteção são a parte final do projeto do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, pois consistem na aplicação dos métodos disponíveis e escolha dos dispositivos e componentes.

4.3.1 Sala de controle

A sala de controle O&M (Operação e manutenção) da usina é o local onde os operadores podem controlar os sistemas da usina. Essa sala é composta por equipamentos e sistemas de comunicação como *no-breakers*, banco de baterias, *dataloggers*, *rack*, além de computadores de monitoramento das usinas e dos sistemas de segurança compostos nela. Na ocorrência de falhas na energia elétrica ou a sua completa interrupção, o sistema de comunicação para de funcionar, parando a usina. Dessa forma, a sala de controle possui baterias de backup, permitindo a correta comunicação e ligação dos componentes (MILLS-PRICE, 2014).

Utilizando o método das esferas rolantes, com o SPDA Nível III, foi utilizado o raio da esfera de 45 metros, que segue o parâmetro estabelecido na Tabela 4 e houve a necessidade da instalação de dois minicapttores, como mostra a Figura 38.

Figura 38 - Método das esferas rolantes para salas.



Fonte: Autor.

O minicaptor utilizado será o indicado pela Figura 39, com altura de 300 mm.

Figura 39 - Minicaptor de aço utilizado.

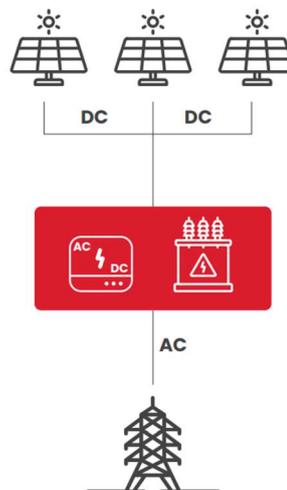


Fonte: Termotécnica, 2024.

4.3.2 Skid

O *skid* é uma plataforma compacta, que é comumente utilizada em sistemas fotovoltaicos, que abrange equipamentos de proteção, medição e seccionamento da usina e os dispositivos de média tensão para enviar às linhas de transmissão. Ele contém o transformador, os quadros gerais de baixa tensão e os dispositivos de alimentação dos inversores. Portanto, ele acaba sendo um integrador da corrente alternada da rede de energia elétrica com a corrente contínua gerada pela usina fotovoltaica. O seu uso ganhou notoriedade, pois ele já vem montado, facilitando sua instalação. A Figura 40 mostra um esquemático dessa aplicação.

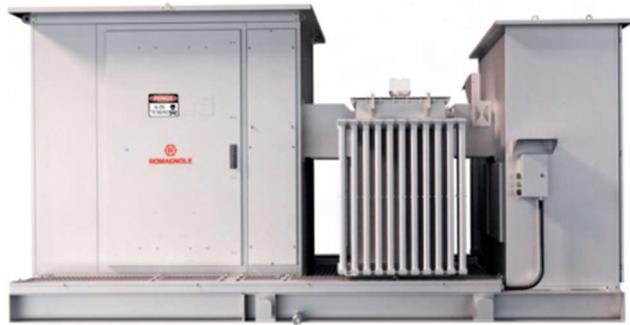
Figura 40 - Esquemático da aplicabilidade *skid*.



Fonte: Romagnole, 2023.

A Figura 41 mostra um modelo de *skid* utilizado em obras de usinas fotovoltaicas.

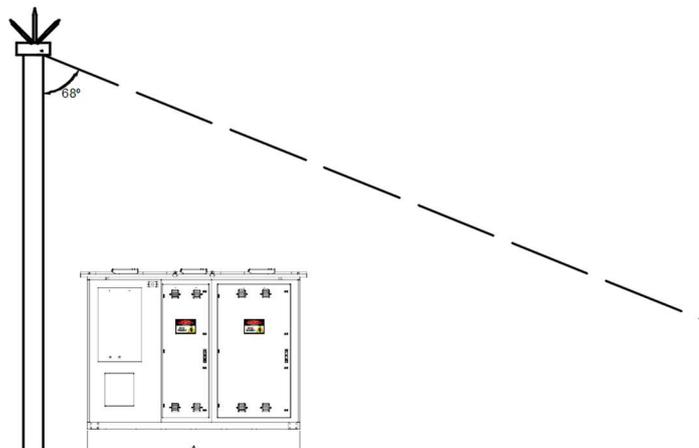
Figura 41 - Modelo de *skid*.



Fonte: Romagnole, 2023.

Um ponto importante de ser ressaltado é que embora ele seja totalmente metálico e conforme a NBR 5419, é permitido considerar como um captor natural do SPDA, foi implementado uma haste de comprimento de 7 metros com um para-raios tipo Franklin em sua extremidade para que se evitem descargas diretas sob os equipamentos. Dessa forma, foi considerado o método do ângulo de proteção. Conforme mostrado na Figura 20, para uma altura de 7 metros, é obtido um ângulo de aproximadamente 68° , suficiente para abarcar a região do *skid*. A Figura 42 mostra o detalhe dessa proteção.

Figura 42 - Proteção do *skid* pelo método de ângulo de proteção.



Fonte: Autor.

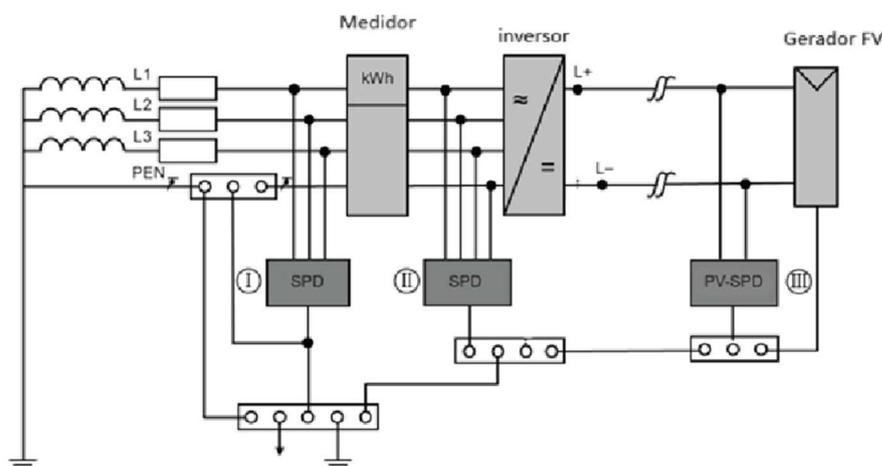
Dessa forma, no presente trabalho, o método utilizado foi o de hastes acopladas ao sistema fotovoltaico, pois dessa forma, garante que se evite o sombreamento.

4.4 DPS

O DPS é um dispositivo de proteção contra surtos, que tem como finalidade proteger equipamentos contra sobretensões e surtos. Para os casos de usinas fotovoltaicas, esses surtos são ocasionados por descargas atmosféricas, sejam elas diretas, incidentes sob as superfícies construtivas, ou indireta, afetando o sistema por influência do campo eletromagnético.

A IEC 63227 recomenda a utilização de cabos 6 mm² para estruturas sem um sistema de proteção externa contra raios e de DPS do tipo II para todas as regiões indicadas na Figura 43, sendo III, um dispositivo de corrente contínua. Dessa forma, esses equipamentos são instalados na entrada do sistema (I), e na cabine de medição, contendo os dispositivos em corrente alternada (antes do inversor) e de corrente contínua (depois do inversor). Todos eles devem estar conectados ao barramento de equipotencialização, que será unificado ao sistema de aterramento. É importante ressaltar também, que se deve utilizar DPS para a linha de sinais, protegendo os equipamentos de telecomunicações e controle.

Figura 43 - Instalação de DPS na instalação.



Fonte: adaptado de IEC 63227, 2020.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou a metodologia utilizada para elaborar um projeto de sistema de proteção contra descargas atmosféricas em sistemas de usinas fotovoltaicas. Foi feita uma revisitação bibliográfica na evolução dos sistemas de energia solar e nos conceitos técnicos, baseados na NBR 5419, indicando o equacionamento, aspectos de dimensionamentos e partes que compõem esse sistema. Foi abordada também a IEC 63227, norma que faz a tratativa a respeito da proteção dos módulos fotovoltaicos, um tema pouco abordado em literaturas nacionais.

A análise e o gerenciamento de risco são cruciais em uma usina por se tratar de obras de alto valor aquisitivo devido aos equipamentos – inversores, módulos, sensores, câmeras, transformadores – e de vida humana, nos locais das salas de medição. Para o cálculo desses parâmetros, foi desenvolvido um *software* em Python com o objetivo de propor uma ferramenta para agilizar o processo de cálculo, que geralmente acaba sendo moroso devido a quantidade elevada de equações e parâmetros a serem considerados. No estudo de caso demonstrado, mostrou-se que o SPDA do tipo III atende o caso, garantindo a proteção adequada, sendo utilizado o método das esferas rolantes para a sala de medição, por ter uma área maior de alcance. Já na região do *skid*, foi proposto um sistema captor utilizado pelo método do ângulo de proteção, tendo o devido cuidado para evitar o sombreamento. A definição do tipo do sistema de proteção é determinante para ter ciência do raio da esfera rolante, do perímetro da malha e do ângulo de proteção do captor, dependendo do método adotado.

Foi abordado também, a proteção contra descargas diretas nos módulos, que apresentam um alto risco de dano devido ao alto grau de exposição. A norma de proteção contra descargas atmosféricas vigente no Brasil, que é a NBR 5419, trata de forma genérica para aplicações em usinas fotovoltaicas. Por esse motivo foi abordada a IEC 63227 e seus métodos utilizados para a determinação do captor nos módulos. Para o caso estudado, foi utilizado o minicaptor acoplado às placas, a fim de também

evitar sombreamento. Por fim, o dispositivo de proteção contra surtos adotado foi do tipo II, devido ao alto risco de exposição direta – para proteção dos módulos – e a proteção indireta dos equipamentos da usina, que por sua maior incidência, acabam sendo mais perigosos.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo das análises de aterramento em acoplamento com o sistema de proteção contra descargas, bem como a influência da malha do sistema para evitar danos indiretos. Além disso, sugere-se uma avaliação para usinas de geração centralizada, integrantes do mercado livre de energia elétrica, sobre o melhor método de proteção contra descargas incidentes diretamente nos módulos fotovoltaicos, do ponto de vista financeiro, visto que cada uma das alternativas representa um determinado custo para a obra.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690**: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2019.

BAD WOLF USA. **Solar Surge Protéticos**. 2024. Acesso em: <https://badwolfusa.com/solar-surge-protection/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

CORPO DE BOMBEIROS DE SANTA CATARINA. 2020. **CARGA DE INCÊNDIO - Normas de Segurança Contra Incêndio IN3**. Acesso em: <https://documentoscbmsc.cbm.sc.gov.br/uploads/7bbba4b4b0a460d44e5c17a9901576c0.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

DEHN. 2022. **APOSTILA INTRODUTÓRIA Proteção Contra Descargas Atmosféricas em Sistemas Fotovoltaicos (SFV)**.

DIAS, F. 2019. **Semicondutores**. Fonte: Educa Mais Brasil: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/semicondutores>

DIEDRICH, V. A. 2013. **Geração distribuída baseada em um sistema Fotovoltaico**. Porto Alegre: UFRGS.

ENGENHARIA, E. 2024. **História sobre os raios**. Acesso em: EMF Engenharia: <https://emf-engenharia.com.br/spda/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

EOS. **Entendendo as Diferenças Entre Sistemas de Energia Solar On-grid e Off-grid**. 2023. Acesso em: <https://academy.eosfin.com.br/2023/04/26/entendendo-as-diferencas-entre-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-on-grid-e-off-grid/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

EPE. **Caderno de Demanda de Eletricidade**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2018. 14 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes->

dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-295/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Eletricidade.pdf. Acesso em: 15 abr. 2024.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2011**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2018. 14 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2023**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2018. 14 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ESCANHOELA, Felipe Moron. **A Física das tempestades e dos raios**. 2000. Acesso em: <https://www.sbfisica.org.br/v1/portalpion/index.php/artigos/30-a-fisica-das-tempestades-e-dos-raios>. Acesso em: 15 abr. 2024.

FAPESP. **Imagem obtida por brasileiros com câmera ultrarrápida revela como funcionam os para-raios**. 2023. Acesso em: <https://agencia.fapesp.br/imagem-obtida-por-brasileiros-com-camera-ultrarrapida-revela-como-funcionam-os-para-raios/40693>. Acesso em: 20 abr. 2024.

FERREIRA, A. A. 2010. **Avaliação do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas da Empresa Acumuladores Moura S.A. (Un.01)**. Campina Grande.

FERREIRA, L. 2021. **Crise hidro-energética e sua relação com os investimentos brasileiros em hidrelétricas**. Acesso em: PETREL: <http://petrel.unb.br/destaques/143-crise-hidro-energetica-e-sua-relacao-com-os-investimentos-brasileiros-em-hidreletricas>. Acesso em: 15 abr. 2024.

FREIRE, F. 2024. **Célula fotovoltaica: como funciona?** Acesso em: Share Energy: <https://www.shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

GUIMARÃES, P. 2024. **SPDA pelo Método da Esfera Rolante**. Acesso em: <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/spda-pelo-metodo-da-esfera-rolante>. Acesso em: 15 abr. 2024.

GUSTAVO, J. G., & COELHO, V. L. 2021. **Sistema de proteção contra descargas atmosféricas em usina solar fotovoltaica em campo aberto – estudo de caso.** Unisatc.

INPE. (2019). **Incidência de Raios no Brasil [Infográfico].** Acesso em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/mortes.por.raios.-.infografico.php>

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

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. 2024. **O que é geração distribuída.** Acesso em: INEE: [http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp#:~:text=Gera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADa%20\(GD\)%20%C3%A9%20uma,tecnologia%20e%20fonte%20de%20energia](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp#:~:text=Gera%C3%A7%C3%A3o%20distribu%C3%ADa%20(GD)%20%C3%A9%20uma,tecnologia%20e%20fonte%20de%20energia). Acesso em: 15 abr. 2024.

KINDERMANN, Geraldo. **Descargas atmosféricas.** Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. 134 p.

LIMA, Andrea Maria. **Proteção contra descargas atmosféricas (raios).** 2014.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MARQUES, Guilherme IANUSCKIEWICZ; ROSENO, Karina Tamião de CAMPOS; NIZZOLI FILHO, Irio. **Usina fotovoltaica: Simulação para Energia Renovável no Vale do Açu-RN - Brasil.** Unisanta, Santos, v. 1, n. 1, p. 1-7, 3 jul. 2019.

MARTINS, Pâmela Oliveira. **Síntese, caracterização e aplicação do poli (ácido 3-Hidroxifenilacético) no desenvolvimento de biossensor para detecção de marcador cardíaco.** 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, Uberlândia, 2011. Acesso em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/17336>. Acesso em: 20 abr. 2024.

MILLS-PRICE, M. **A Importância dos Sistemas de Controle Coordenados nas Usinas de Geração Solar.** 2014. Acesso em: <https://selinc.com/api/download/105928/?lang=pt>.

MODULO ENERGIA. **Ecnologia e consumo de energia: o que esperar para as próximas gerações?** 2018. Acesso em: <https://moduloenergia.com/tecnologia-e-consumo-de-energia-o-que-esperar-para-as-proximas-geracoes/>. Acesso em: 20 abr. 2024.

NOGUEIRA, R. L. **Análise de sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas: otimização e critérios de segurança em aterramentos de estruturas de linhas de transmissão.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ONS. **Geração de energia.** 2023. Acesso em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 03 maio 2024.

ROMAGNOLE. **Skid.** Acesso em: <https://www.romagnole.com.br/produtos/skid-rss>. Acesso em: 15 abr. 2024.

TEIXEIRA, Mateus; DONADON, Antonio Roberto; RETORTA, Fábio. **Análise da Qualidade de Energia de um Sistema Fotovoltaico em Larga Escala.** In: XXI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., 2016, Curitiba. Seminário. Curitiba: Sendi, 2016. p. 1-11.

TERMOTÉCNICA. **Minicaptores em Aço GF Horizontal.** Acesso em: <https://tel.com.br/produto/minicaptores-em-aco-gf-sem-bandeira-horizontal/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

ZHANG, Yang; CHEN, Hongcai; DU, Yaping. **Considerations of Photovoltaic System Structure Design for Effective Lightning Protection.** *Ieee Transactions On Electromagnetic Compatibility*, [S.L.], v. 62, n. 4, p. 1333-1341, ago. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/temc.2020.2990930>.

APÊNDICE A – CÓDIGO DO PROGRAMA

O código em *Python*, desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso, está descrito abaixo:

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox
import pandas as pd
import os
import math

from PIL import Image, ImageTk

# Carregar dados do Excel
excel_folder = "C:\\\\Users\\lucas\\OneDrive\\Desktop\\tcc"
excel_filename = "Densidade.xlsx"
excel_path = os.path.join(excel_folder, excel_filename)
df = pd.read_excel(excel_path)

Ng = 0
L = 0
W = 0
H = 0
Cd = 0
Pb = 0
Peb = 0
eLI = 0
eCl = 0
eCt = 0
eCe = 0
eCli = 0
eCdj = 0
tz = 0

LI = 0
Cl = 0
Ct = 0
Ce = 0
Cli = 0
Cdj = 0

def find_density_for_city(state, city):
    city_data = df[(df['UF'] == state) & (df['Município'] == city)]
    if not city_data.empty:
        return city_data.iloc[0]['Densidade de descargas.Km-2.Ano-1']
```

```

else:
    return None

def on_state_select(event):
    selected_state = state_combo.get()
    cities = list(df[df['UF'] == selected_state]['Município'])
    city_combo['values'] = sorted(cities, key=str)

def on_city_select(event):
    selected_state = state_combo.get()
    selected_city = city_combo.get()
    density = find_density_for_city(selected_state, selected_city)
    if density is not None:
        result_label.config(text=f"Densidade de descarga: {density}")
        global Ng
        Ng = density
    else:
        result_label.config(text="Número não encontrado para esta cidade")

def save_dimensions():
    global L, W, H
    L = float(L_entry.get())
    W = float(W_entry.get())
    H = float(H_entry.get())
    print("Dimensões salvas com sucesso:", L, W, H)

def save_factors():
    global Cd, Pb, Peb
    Cd_options_dict = {
        "Estrutura cercada por objetos mais altos": 0.25,
        "Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos": 0.5,
        "Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças": 1,
        "Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte": 2
    }
    Cd = Cd_options_dict[Cd_combo.get()]

    Pb_options_dict = {
        "Sem SPDA": 1,
        "Classe I": 0.02,
        "Classe II": 0.05,
        "Classe III": 0.1,
        "Classe IV": 0.2,
        "Estrutura metálica": 0.001,
        "Subsistema de captação": 0.01
    }
    Pb_option_selected = Pb_combo.get()
    Pb = Pb_options_dict[Pb_option_selected]

    Peb_options_dict = {

```

```

        "Sem DPS": 1,
        "III-IV": 0.05,
        "II": 0.02,
        "I": 0.01
    }
    Peb = Peb_options_dict[Peb_combo.get()]

    Ad = L * W + 2 * (3 * H) * (L + W) + math.pi * (3 * H) ** 2

def save_line_and_environmental_factors():
    global eLI, eCl, eCt, eCe, eCli, eCdj
    eLI = float(comprimento_entry.get())
    eCl_options_dict = {
        "Aéreo": 1,
        "Enterrado": 0.5,
        "Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento": 0.1
    }
    eCl = eCl_options_dict[cl_combo.get()]

    eCt_options_dict = {
        "Linha de energia ou sinal": 1,
        "Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)": 0.5
    }
    eCt = eCt_options_dict[ct_combo.get()]

    eCe_options_dict = {
        "Rural": 1,
        "Suburbano": 0.5,
        "Urbano": 0.1,
        "Urbano com edifícios mais altos que 20m": 0.01
    }
    eCe = eCe_options_dict[ce_combo.get()]

    eCli_options_dict = {
        "Linha aérea não blindada": 1,
        "Linha enterrada não blindada": 1,
        "Linha de energia com neutro multiaterrado": 0.2,
        "Linha enterrada blindada": 0.3,
        "Linha aérea blindada": 0.1,
        "Linha enterrada blindada": 0
    }
    eCli = eCli_options_dict[linha_combo.get()]

    eCdj_options_dict = {
        "Estrutura cercada por objetos mais altos": 0.25,
        "Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos": 0.5,
        "Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças": 1,

```

```

        "Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte": 2
    }
    eCdj = eCdj_options_dict[Cd_combo_tab2.get()]

def save_signal_line_and_environmental_factors():
    global LI, Cl, Ct, Ce, Cli, Cdj
    LI = float(comprimento_entry.get())
    Cl_options_dict = {
        "Aéreo": 1,
        "Enterrado": 0.5,
        "Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento": 0.1
    }
    Cl = Cl_options_dict[scl_combo.get()]

    Ct_options_dict = {
        "Linha de energia ou sinal": 1,
        "Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)": 0.5
    }
    Ct = Ct_options_dict[sct_combo.get()]

    Ce_options_dict = {
        "Rural": 1,
        "Suburbano": 0.5,
        "Urbano": 0.1,
        "Urbano com edifícios mais altos que 20m": 0.01
    }
    Ce = Ce_options_dict[sce_combo.get()]

    Cli_options_dict = {
        "Linha aérea não blindada": 1,
        "Linha enterrada não blindada": 1,
        "Linha de energia com neutro multiaterrado": 0.2,
        "Linha enterrada blindada": 0.3,
        "Linha aérea blindada": 0.1,
        "Linha enterrada blindada": 0
    }
    Cli = Cli_options_dict[slinha_combo.get()]

    Cdj_options_dict = {
        "Estrutura cercada por objetos mais altos": 0.25,
        "Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos": 0.5,
        "Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças": 1,
        "Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte": 2
    }
    Cdj = Cdj_options_dict[sCd_combo_tab2.get()]

root = tk.Tk()

```

```

root.title("Consulta de Densidade de Descarga")

# Criar notebook de abas
notebook = ttk.Notebook(root)
notebook.pack(fill='both', expand=True)

# Tab 1 - Características da Estrutura
tab_frame_1 = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab_frame_1, text="- Características da Estrutura")
state_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="Selecione o Estado:")
state_label.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)
states = sorted(df['UF'].astype(str).unique())
state_combo = ttk.Combobox(tab_frame_1, values=states, state='readonly', width=20)
state_combo.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)
state_combo.bind("<<ComboboxSelected>>", on_state_select)
city_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="Selecione a Cidade:")
city_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)
cities = sorted(df[df['UF'] == states[0]]['Município'].astype(str).unique())
city_combo = ttk.Combobox(tab_frame_1, values=cities, state='readonly', width=20)
city_combo.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)
city_combo.bind("<<ComboboxSelected>>", on_city_select)
result_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="")
result_label.grid(row=2, column=0, colspan=2, padx=10, pady=10)

L_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="Largura:")
L_label.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)
L_entry = ttk.Entry(tab_frame_1, width=20)
L_entry.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)

W_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="Comprimento:")
W_label.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)
W_entry = ttk.Entry(tab_frame_1, width=20)
W_entry.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)
H_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="Altura:")
H_label.grid(row=5, column=0, padx=10, pady=10)
H_entry = ttk.Entry(tab_frame_1, width=20)
H_entry.grid(row=5, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para fator de localização da estrutura (CD)
Cd_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="Fator de localização da estrutura (CD):")
Cd_label.grid(row=6, column=0, padx=10, pady=10)
Cd_options = [
    "Estrutura cercada por objetos mais altos",
    "Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos",
    "Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças",
    "Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte"
]

```

```

]
Cd_combo = ttk.Combobox(tab_frame_1, values=Cd_options, state='readonly', width=50)
Cd_combo.grid(row=6, column=1, padx=10, pady=10)
# Adicionar menu de seleção para SPDA Instalado (Pb)
Pb_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="SPDA Instalado (Pb):")
Pb_label.grid(row=7, column=0, padx=10, pady=10)
Pb_options = [
    "Sem SPDA",
    "Classe I",
    "Classe II",
    "Classe III",
    "Classe IV",
    "Estrutura metálica",
    "Subsistema de captação"
]
Pb_combo = ttk.Combobox(tab_frame_1, values=Pb_options, state='readonly', width=50)
Pb_combo.grid(row=7, column=1, padx=10, pady=10)

Peb_label = ttk.Label(tab_frame_1, text="DPS projetado (Peb):")
Peb_label.grid(row=8, column=0, padx=10, pady=10)
Peb_options = [
    "Sem DPS",
    "III-IV",
    "II",
    "I"
]
Peb_combo = ttk.Combobox(tab_frame_1, values=Peb_options, state='readonly', width=50)
Peb_combo.grid(row=8, column=1, padx=10, pady=10)

# Botão de OK
ok_button = ttk.Button(tab_frame_1, text="OK", command=lambda: [save_dimensions(),
save_factors()])
ok_button.grid(row=9, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)

tab_frame_2 = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab_frame_2, text="Linha de Energia")

# Adicionar caixa de entrada para comprimento
comprimento_label = ttk.Label(tab_frame_2, text="Comprimento:")
comprimento_label.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)
comprimento_entry = ttk.Entry(tab_frame_2, width=20)
comprimento_entry.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)

```

```

# Adicionar menu de seleção para fator de localização da linha de energia (Cl)
cl_label = ttk.Label(tab_frame_2, text="Fator de localização da linha de energia (Cl):")
cl_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)
cl_options = [
    "Aéreo",
    "Enterrado",
    "Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento"
]
cl_combo = ttk.Combobox(tab_frame_2, values=cl_options, state='readonly', width=50)
cl_combo.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para tipo de linha de energia (Ct)
ct_label = ttk.Label(tab_frame_2, text="Tipo de linha de energia (Ct):")
ct_label.grid(row=2, column=0, padx=10, pady=10)
ct_options = [
    "Linha de energia ou sinal",
    "Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)"
]
ct_combo = ttk.Combobox(tab_frame_2, values=ct_options, state='readonly', width=50)
ct_combo.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para tipo de ambiente (Ce)
ce_label = ttk.Label(tab_frame_2, text="Tipo de ambiente (Ce):")
ce_label.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)
ce_options = [
    "Rural",
    "Suburbano",
    "Urbano",
    "Urbano com edifícios mais altos que 20m"
]
ce_combo = ttk.Combobox(tab_frame_2, values=ce_options, state='readonly', width=50)
ce_combo.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para tipo de linha (Cli)
linha_label = ttk.Label(tab_frame_2, text="Tipo de linha (Cli):")
linha_label.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)
linha_options = [
    "Linha aérea não blindada",
    "Linha enterrada não blindada",
    "Linha de energia com neutro multiaterrado",
    "Linha enterrada blindada",
    "Linha aérea blindada",
    "Linha enterrada blindada"
]
linha_combo = ttk.Combobox(tab_frame_2, values=linha_options, state='readonly', width=50)
linha_combo.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)

```

```

# Adicionar menu de seleção para fator de localização da linha de energia (Cdj)
Cd_label_tab2 = ttk.Label(tab_frame_2, text="Fator de localização da linha de energia
(Cdj):")
Cd_label_tab2.grid(row=5, column=0, padx=10, pady=10)
Cd_options_tab2 = [
    "Estrutura cercada por objetos mais altos",
    "Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos",
    "Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças",
    "Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte"
]
Cd_combo_tab2 = ttk.Combobox(tab_frame_2, values=Cd_options_tab2, state='readonly',
width=50)
Cd_combo_tab2.grid(row=5, column=1, padx=10, pady=10)

# Botão de OK
ok_button_tab2 = ttk.Button(tab_frame_2, text="OK", command=lambda:
[save_line_and_environmental_factors()])
ok_button_tab2.grid(row=6, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)

```

#TAB 3 - Linha de Sinais

```

tab_frame_3 = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab_frame_3, text="Linha de Sinais")

# Adicionar caixa de entrada para comprimento
comprimento_label_tab3 = ttk.Label(tab_frame_3, text="Comprimento:")
comprimento_label_tab3.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)
comprimento_entry_tab3 = ttk.Entry(tab_frame_3, width=20)
comprimento_entry_tab3.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para fator de localização da linha de sinais (Cl)
scl_label = ttk.Label(tab_frame_3, text="Fator de localização da linha de sinais (Cl):")
scl_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)
scl_options = [
    "Aéreo",
    "Enterrado",
    "Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento"
]
scl_combo = ttk.Combobox(tab_frame_3, values=scl_options, state='readonly', width=50)
scl_combo.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para tipo de linha de sinais (Ct)
sct_label = ttk.Label(tab_frame_3, text="Tipo de linha de sinais (Ct):")

```

```

sct_label.grid(row=2, column=0, padx=10, pady=10)
sct_options = [
    "Linha de energia ou sinal",
    "Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)"
]
sct_combo = ttk.Combobox(tab_frame_3, values=sct_options, state='readonly', width=50)
sct_combo.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para tipo de ambiente (Ce)
sce_label = ttk.Label(tab_frame_3, text="Tipo de ambiente (Ce):")
sce_label.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)
sce_options = [
    "Rural",
    "Suburbano",
    "Urbano",
    "Urbano com edifícios mais altos que 20m"
]
sce_combo = ttk.Combobox(tab_frame_3, values=sce_options, state='readonly', width=50)
sce_combo.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para tipo de linha (Cli)
slinha_label = ttk.Label(tab_frame_3, text="Tipo de linha (Cli):")
slinha_label.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)
slinha_options = [
    "Linha aérea não blindada",
    "Linha enterrada não blindada",
    "Linha de energia com neutro multiterrado",
    "Linha enterrada blindada",
    "Linha aérea blindada",
    "Linha enterrada blindada"
]
slinha_combo = ttk.Combobox(tab_frame_3, values=slinha_options, state='readonly', width=50)
slinha_combo.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar menu de seleção para fator de localização da linha de sinais (Cdj)
sCd_label_tab3 = ttk.Label(tab_frame_3, text="Fator de localização da linha de sinais (Cdj):")
sCd_label_tab3.grid(row=5, column=0, padx=10, pady=10)
sCd_options_tab3 = [
    "Estrutura cercada por objetos mais altos",
    "Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos",
    "Estrutura isolada: nenhum outro objeto nas vizinhanças",
    "Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte"
]
sCd_combo_tab2 = ttk.Combobox(tab_frame_3, values=sCd_options_tab3, state='readonly', width=50)
sCd_combo_tab2.grid(row=5, column=1, padx=10, pady=10)

```

```

# Botão de OK
ok_button_tab3 = ttk.Button(tab_frame_3, text="OK", command=lambda:
save_signal_line_and_environmental_factors())

ok_button_tab3.grid(row=6, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)

#TAB4 - ZONA DE EXPOSIÇÃO

rt = None
pta = None
ptu = None
rf = None
rp = None
ks3p = None
ks3t = None
pspdp = None
pspdd = None
hz = None

def save_exposure_zone_characteristics(rt_value, pta_value, ptu_value, rf_value, rp_value,
ks3p_value, ks3t_value, pspdp_value, pspdd_value, hz_value):
    global rt, pta, ptu, rf, rp, ks3p, ks3t, pspdp, pspdd, hz
    rt = rt_value
    pta = pta_value
    ptu = ptu_value
    rf = rf_value
    rp = rp_value
    ks3p = ks3p_value
    ks3t = ks3t_value
    pspdp = pspdp_value
    pspdd = pspdd_value
    hz = hz_value

# Tab 4 - Características da Zona de Exposição
tab_frame_4 = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab_frame_4, text="Zona de Exposição")

#Proteção contra choque (Pta)
rt_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Tipo de piso rt")
rt_label.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)
rt_options = {
    "Agricultura": 0.01,
    "Mármore, Cerâmica": 0.001,
    "Cascalho, Tapete, Carpete": 0.0001,

```

```

        "Asfalto, Linóleo, Madeira": 0.00001
    }
    rt_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(rt_options.keys()), state='readonly',
width=50)
    rt_combo.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)

    #Proteção contra choque (Pta)
    pta_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Proteção contra choque (Pta):")
    pta_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)
    pta_options = {
        "Nenhuma medida de proteção": 1,
        "Avisos de alerta": 0.1,
        "Isolação elétrica": 0.01,
        "Equipotencialização efetiva do solo": 0.01,
        "Restrições físicas ou estrutura do edifício utilizada como subsistema de descida": 0
    }
    pta_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(pta_options.keys()), state='readonly',
width=50)
    pta_combo.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

    #Probabilidade de raio na linha (Ptu)
    ptu_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Probabilidade de raio na linha (Ptu):")
    ptu_label.grid(row=2, column=0, padx=10, pady=10)
    ptu_options = {
        "Nenhuma medida de proteção": 1,
        "Avisos visíveis de alerta": 0.1,
        "Isolação elétrica": 0.01,
        "Restrições físicas": 0
    }
    ptu_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(ptu_options.keys()), state='readonly',
width=50)
    ptu_combo.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=10)

    #Fator de Risco de Incêndio (rf)
    rf_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Fator de Risco de Incêndio (rf):")
    rf_label.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)
    rf_options = {
        "Explosão": 0.001,
        "Incêndio risco alto": 0.1,
        "Incêndio risco normal": 0.01,
        "Incêndio risco baixo": 0.001,
        "Sem riscos": 0
    }
    rf_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(rf_options.keys()), state='readonly',
width=50)
    rf_combo.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)

```

```

#Fator contra Incêndio (rp)

rp_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Fator contra Incêndio (rp):")
rp_label.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)
rp_options = {
    "Nenhuma providência": 1,
    "Extintor, hidrantes, setor à prova de fogo": 0.5,
    "Instalações de alarme automático": 0.2
}
rp_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(rp_options.keys()), state='readonly',
width=50)
rp_combo.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)

#Fiação Interna (Ks3p e Ks3t)
ks3_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Fiação Interna:")
ks3_label.grid(row=6, column=0, padx=10, pady=10)
ks3_options = {
    "Cabo não blindado - Sem roteamento": 1,
    "Cabo não blindado - Com roteamento (grandes laços)": 0.2,
    "Cabo não blindado - com roteamento para evitar laços": 0.01,
    "Cabos blindados e instalados em eletrodutos metálicos": 0.0001
}
ks3_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(ks3_options.keys()), state='readonly',
width=50)
ks3_combo.grid(row=6, column=1, padx=10, pady=10)

#Coordenado (Energia)
pspdp_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="DPS Coordenado (Energia):")
pspdp_label.grid(row=7, column=0, padx=10, pady=10)
pspdp_options = {
    "Nenhum sistema de DPS coordenado": 1,
    "III-IV": 0.05,
    "II": 0.02,
    "I": 0.01,
}
pspdp_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(pspdp_options.keys()),
state='readonly', width=50)
pspdp_combo.grid(row=7, column=1, padx=10, pady=10)

#DPS Coordenado (Sinais)
pspdd_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="DPS Coordenado (Sinais):")
pspdd_label.grid(row=8, column=0, padx=10, pady=10)
pspdd_options = {
    "Nenhum sistema de DPS coordenado": 1,
    "III-IV": 0.05,
    "II": 0.02,
}

```

```

        "I": 0.01,
    }
    pspdd_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(pspdd_options.keys()),
state='readonly', width=50)
    pspdd_combo.grid(row=8, column=1, padx=10, pady=10)

#Tipo de Perigo Especial (hz)
hz_label = ttk.Label(tab_frame_4, text="Tipo de Perigo Especial:")
hz_label.grid(row=9, column=0, padx=10, pady=10)
hz_options = {
    "Sem perigo especial": 1,
    "Baixo nível de pânico": 2,
    "Nível médio de pânico": 5,
    "Dificuldade de evacuação": 5,
    "Alto nível de pânico": 10
}
hz_combo = ttk.Combobox(tab_frame_4, values=list(hz_options.keys()), state='readonly',
width=50)
hz_combo.grid(row=9, column=1, padx=10, pady=10)

# Botão de OK
ok_button_tab4 = ttk.Button(tab_frame_4, text="OK", command=lambda:
save_exposure_zone_characteristics(
    rt_options[rt_combo.get()],
    pta_options[pta_combo.get()],
    ptu_options[ptu_combo.get()],
    rf_options[rf_combo.get()],
    rp_options[rp_combo.get()],
    ks3_options[ks3_combo.get()],
    ks3_options[ks3_combo.get()], # As variáveis ks3p e ks3t devem ter o mesmo valor
    pspdp_options[pspdp_combo.get()],
    pspdd_options[pspdd_combo.get()],
    hz_options[hz_combo.get()]
))
ok_button_tab4.grid(row=10, column=0, colspan=2, padx=10, pady=10)
##### TAB5 ##### PERDA L1

import matplotlib.pyplot as plt
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox

# Função para salvar as características da perda L1

nz_global = None
nt_global = None
Thor_global = None
Tdia_global = None

```

```

Lf1 = None
Lo0 = None
def save_loss_characteristics(nz, nt, Thor, Tdia, Lf1_value, Lo0_value):
    global nz_global, nt_global, Thor_global, Tdia_global, Lf1, Lo0
    nz_global = nz
    nt_global = nt
    Thor_global = Thor
    Tdia_global = Tdia
    Lf1 = Lf1_value
    Lo0 = Lo0_value

# Tab 5 - Perda L1

tab_frame_5 = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab_frame_5, text="Perda L1")

#Número de pessoas na zona de perigo
nz_label = ttk.Label(tab_frame_5, text="Número de pessoas na zona de perigo:")
nz_label.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)
nz_entry = ttk.Entry(tab_frame_5)
nz_entry.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)

#Número de pessoas na estrutura
nt_label = ttk.Label(tab_frame_5, text="Número de pessoas na estrutura:")
nt_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)
nt_entry = ttk.Entry(tab_frame_5)
nt_entry.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

# Tempo de presença (jornada de trabalho)
Thor_label = ttk.Label(tab_frame_5, text="Tempo de presença (jornada de trabalho):")
Thor_label.grid(row=2, column=0, padx=10, pady=10)
Thor_entry = ttk.Entry(tab_frame_5)
Thor_entry.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=10)

# Total de dias por ano
Tdia_label = ttk.Label(tab_frame_5, text="Total de dias por ano:")
Tdia_label.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)
Tdia_entry = ttk.Entry(tab_frame_5)
Tdia_entry.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)

# caixa de seleção para Danos físicos Lf
Lf1_label = ttk.Label(tab_frame_5, text="Danos físicos Lf:")
Lf1_label.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)
Lf1_options = {
    "Risco de explosão": 0.1,
    "Hospital, hotel, escola, edifício cívico": 0.1,
    "Entretenimento publico, igreja, museu": 0.05,

```

```

        "Industrial, comercial": 0.02,
        "Outros": 0.01
    }
    Lf1_combo = ttk.Combobox(tab_frame_5, values=list(Lf1_options.keys()), state='readonly',
width=50)
    Lf1_combo.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)

# Adicionar caixa de seleção para Falhas de sistemas internos Lo
Lo0_label = ttk.Label(tab_frame_5, text="Falhas de sistemas internos Lo:")
Lo0_label.grid(row=5, column=0, padx=10, pady=10)
Lo0_options = {
    "Risco de explosão": 0.1,
    "Unidade de terapia intensiva e bloco crúrgico de hospital": 0.01,
    "Outros": 0.001
}
Lo0_combo = ttk.Combobox(tab_frame_5, values=list(Lo0_options.keys()), state='readonly',
width=50)
Lo0_combo.grid(row=5, column=1, padx=10, pady=10)

ok_button_tab5 = ttk.Button(tab_frame_5, text="OK", command=lambda:
save_loss_characteristics(
    nz_entry.get(),
    nt_entry.get(),
    float(Thor_entry.get()),
    float(Tdia_entry.get()),
    Lf1_options[Lf1_combo.get()],
    Lo0_options[Lo0_combo.get()]
))

ok_button_tab5.grid(row=6, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)

ca4_global = None
cb4_global = None
cc4_global = None
cs4_global = None
ct4_global = None
Lf4 = None
Lo4 = None

def show_loss_l4_values(ca4, cb4, cc4, cs4, ct4, Lf4_value, Lo4_value):
    global ca4_global, cb4_global, cc4_global, cs4_global, ct4_global, Lf4, Lo4
    ca4_global = ca4

```

```

cb4_global = cb4
cc4_global = cc4
cs4_global = cs4
ct4_global = ct4
Lf4 = Lf4_value
Lo4 = Lo4_value

# Tab 6 - Perda L4
tab_frame_6 = ttk.Frame(notebook)
notebook.add(tab_frame_6, text="Perda L4")

# Caixa de texto para Valor dos animais na zona ca
ca4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Valor dos animais na zona ca: (milhões)")
ca4_label.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10)
ca4_entry = ttk.Entry(tab_frame_6)
ca4_entry.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)

# Caixa de texto para Valor da edificação relevante à zona cb
cb4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Valor da edificação relevante à zona cb
(milhões):")
cb4_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10)
cb4_entry = ttk.Entry(tab_frame_6)
cb4_entry.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

# Caixa de texto para Valor do conteúdo da zona cc
cc4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Valor do conteúdo da zona cc (milhões):")
cc4_label.grid(row=2, column=0, padx=10, pady=10)
cc4_entry = ttk.Entry(tab_frame_6)
cc4_entry.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=10)

# Caixa de texto para Valor dos sistemas internos cs
cs4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Valor dos sistemas internos cs (milhões):")
cs4_label.grid(row=3, column=0, padx=10, pady=10)
cs4_entry = ttk.Entry(tab_frame_6)
cs4_entry.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=10)

# Caixa de texto para Valor total da estrutura ct
ct4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Valor total da estrutura ct (milhões):")
ct4_label.grid(row=4, column=0, padx=10, pady=10)
ct4_entry = ttk.Entry(tab_frame_6)
ct4_entry.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=10)

# Variável Lt4
Lt4 = 0

```

```

lf4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Danos físicos LF:")
lf4_label.grid(row=5, column=0, padx=10, pady=10)
lf4_options = {
    "Risco de explosão": 1,
    "Hospital, industrial, museu, agricultura": 0.5,
    "Hotel, escola, escritório, igreja, entretenimento público, comercial": 0.2,
    "Outros": 0.1
}
lf4_combo = ttk.Combobox(tab_frame_6, values=list(lf4_options.keys()), state='readonly',
width=50)
lf4_combo.grid(row=5, column=1, padx=10, pady=10)

lo4_label = ttk.Label(tab_frame_6, text="Falha de sistemas internos Lo:")
lo4_label.grid(row=6, column=0, padx=10, pady=10)
lo4_options = {
    "Risco de explosão": 0.1,
    "Hospital, industrial, escritório, hotel, comercial": 0.01,
    "Museu, agricultura, escola, igreja, entretenimento público": 0.001,
    "Outros": 0.0001
}
lo4_combo = ttk.Combobox(tab_frame_6, values=list(lo4_options.keys()), state='readonly',
width=50)
lo4_combo.grid(row=6, column=1, padx=10, pady=10)

ok_button_tab6 = ttk.Button(tab_frame_6, text="OK", command=lambda: show_loss_l4_values(
    float(ca4_entry.get()),
    float(cb4_entry.get()),
    float(cc4_entry.get()),
    float(cs4_entry.get()),
    float(ct4_entry.get()),
    lf4_options[lf4_combo.get()],
    lo4_options[lo4_combo.get()]
))
ok_button_tab6.grid(row=7, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)
def close_window():
    # Função para fechar a janela
    root.destroy()

close_button_tab6 = ttk.Button(tab_frame_6, text="Concluir", command=close_window)
close_button_tab6.grid(row=8, column=0, columnspan=2, padx=10, pady=10)
root.mainloop()

#### EQUAÇÕES

Lt = 0.001
variables = {

```

```

    "rt": rt,
    "Lt": Lt,
    "nz_global": nz_global,
}
rt = float(rt)
Lt = float(Lt)
nz_global = float(nz_global)
nt_global = float(nt_global)
tz = float(tz)
Lo0 = float(Lo0)
Lt4 = float(Lt4)
ca4_global = float(ca4_global)
ct4_global = float(ct4_global)
Lo4 = float(Lo4)
cs4_global = float(cs4_global)
ct4_global = float(ct4_global)
tz = Thor_global * Tdia_global

Lf2 = 0
Lu = rt*Lt*nz_global/nt_global*tz/8760
La = Lu
Lb = rp*rf*hz*Lf1*nz_global/nt_global*tz/8760
Lv = Lb
Lc1 = Lm1 = Lw1 = Lz1 = Lo0*nz_global/nt_global*tz/8760
Lb2 = Lv2 = rp*rf*Lf2*nz_global/nt_global
Lc2 = Lm2 = Lw2 = Lz2 = 0
Lu4 = La4 = rt*Lt4*ca4_global*ct4_global
Lb4 = Lv4 = rp*rf*hz*Lf4*(ca4_global+cb4_global+cc4_global+cs4_global)/ct4_global
Lc4 = Lm4 = Lw4 = Lz4 = Lo4*cs4_global/ct4_global

Ad = L*W + 2*(3*H)*(L+W)+ math.pi*(3*H)**2 # OK
Am = 2*500*(L+W)+math.pi*500**2
Alp = 40*eLI
Aip = 4000*LI
eLj = 0
eWj = 0
eHj = 0
Adjp = eLj*eWj+2*(3*eHj)*(eLj+eWj)+math.pi*(3*eHj)**2 #ok
Lj = 0
Wj = 0
Hj = 0
Ald = 40*LI
Aid = 4000*LI
Adjd = Lj*Wj+2*(3*Hj)*(Lj+Wj)+math.pi*(3*Hj)**2
Nd = Ng*Ad*Cd*10e-7
Nm = Ng*Am*10e-7 #ok
Nlp = Ng*Alp*eCl*eCe*eCt*10e-7

```

$Nd_{jp} = Ng * Adj_p * e_{Cdj} * e_{Ct} * 10e-7$
 $Nd_l = Ng * Ald * Cl * Ce * Ct * 10e-7$
 $Nd_{jd} = Ng * Adj_d * Cd_j * Ct * 10e-6$

$Pa = p_{ta} * Pb$
 $c_{ldp} = 1$
 $P_{cp} = p_{spdp} * c_{ldp}$
 $C_{ldd} = 1$
 $e_{Pld} = 1$
 $P_{ld} = 1$
 $e_{Pli} = 0.6$
 $P_{li} = 0.5$
 $P_{cd} = p_{spdd} * C_{ldd}$
 $P_c = 1 - (1 - P_{cp}) * (1 - P_{cd})$
 $P_{msp} = (Ks_1 * Ks_2 * Ks_3 * Ks_4) ** 2$

 $P_{mst} = (Ks_1 * Ks_2 * Ks_3 * Ks_4) ** 2$

$P_{mp} = p_{spdp} * P_{msp}$
 $P_{md} = p_{spdd} * P_{mst}$
 $P_{up} = p_{tu} * P_{eb} * e_{Pld} * c_{ldp}$
 $P_{ud} = p_{tu} * P_{eb} * P_{ld} * C_{ldd}$
 $P_{wp} = p_{spdp} * P_{ld} * Cl$
 $P_{wd} = p_{spdd} * P_{ld} * Cl$
 $P_{zp} = p_{spdp} * e_{Pli} * e_{Cli}$
 $P_{zd} = p_{spdd} * P_{li} * Cl_i$
 $P_{vp} = P_{eb} * P_{ld} * C_{ldd}$
 $P_{vd} = P_{eb} * P_{ld} * C_{ldd}$
 $P_m = 1 - (1 - P_{mp}) * (1 - P_{md})$

$RA_1 = Nd * Pa * La$
 $RB_1 = Nd * Pb * Lb$
 $RC_1 = Nd * Pc * Lc_2$
 $RM_1 = Nm * Pm * Lm_2$
 $RU_{p1} = (N_{lp} + Nd_{jp}) * P_{up} * Lu$
 $RU_{d1} = (Nd_l + Nd_{jd}) * P_{ud} * Lu$
 $RU_1 = RU_{p1} + RU_{d1}$
 $RV_{p1} = (N_{lp} + Nd_{jp}) * P_{vp} * Lv$
 $RV_{d1} = (Nd_l + Nd_{jd}) * P_{vd} * Lv$
 $RV_1 = RV_{p1} + RV_{d1}$
 $RW_p = (N_{lp} + Nd_{jp}) * P_{wp} * Lw_1$
 $RW_d = (Nd_l + Nd_{jd}) * P_{wd} * Lw_1$
 $RW_1 = 0$
 $RZ_p = (N_{lp} + Nd_{jp}) * P_{zp} * Lz_1$
 $RZ_d = (Nd_l + Nd_{jd}) * P_{zd} * Lz_1$
 $RZ_1 = 0$

```

R11 = RA1+RB1+RC1+RM1+RU1+RV1+RW1+RZ1
RA2 = Nd*Pa*La4
RB2 = Nd*Pb*Lb4
RC2 = Nd*Pc*Lc4
RM2 = Nm*Pm*Lm4
RUp2 = (Nlp+Ndjp)*Pup*Lu4
Rud2 = (Nd1+Ndjd)*Pud*Lu4
RU2 = RUp2 + Rud2
RVp2 = (Nlp+Ndjp)*Pvp*Lv4
RVd2 = (Nd1+Ndjd)*Pvd*Lv4
RV2 = RVp2+RVd2
RWp2 = (Nlp+Ndjp)*Pwp*Lw4
RWd2 = (Nd1+Ndjd)*Pwd*Lw4
RW2 = RWp2 + RWd2
RZp2 = (Nlp+Ndjp)*Pzp*Lz4
RZd2 = (Nd1+Ndjd)*Pzd*Lz4
RZ2 = RZp2 + RZd2
R12 = RA2+RB2+RC2+RM2+RU2+RV2+RW2+RZ2
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
from PIL import Image, ImageTk
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
from PIL import Image, ImageTk
def exhibir_resultado_r11_r12():
    R11 = RA1+RB1+RC1+RM1+RU1+RV1+RW1+RZ1
    R12 = RA2+RB2+RC2+RM2+RU2+RV2+RW2+RZ2
    root = tk.Tk()
    root.title("Resultado")
    if R11 > 1e-5:
        r11_message = "Inadequado"
        r11_image_path = "x.png"
        r11_color = "red"
    else:
        r11_message = "Aceitável"
        r11_image_path = "ok.png"
        r11_color = "green"

    if R12 > 1e-3:
        r12_message = "Inadequado"
        r12_image_path = "x.png"
        r12_color = "red"
    else:
        r12_message = "Aceitável"
        r12_image_path = "ok.png"

```

```

        r12_color = "green"
        r11_label = tk.Label(root, text=f"R1: Risco de perda de vida humana\n{R11:.9e}",
fg=r11_color)
        r12_label = tk.Label(root, text=f"R4: Risco de perdas de valor econômico\n{R12:.9e}",
fg=r12_color)
        r11_image = Image.open(r11_image_path)
        r12_image = Image.open(r12_image_path)
        width, height = 50, 50
        r11_image = r11_image.resize((width, height))
        r12_image = r12_image.resize((width, height))
        r11_tk_image = ImageTk.PhotoImage(r11_image)
        r12_tk_image = ImageTk.PhotoImage(r12_image)
        r11_image_label = tk.Label(root, image=r11_tk_image)
        r12_image_label = tk.Label(root, image=r12_tk_image)
        r11_label.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10, sticky="w")
        r11_image_label.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=10)
        r12_label.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=10, sticky="w")
        r12_image_label.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=10)

        root.mainloop()

exibir_resultado_r11_r12()
root.mainloop()
print(R11,R12)

```