

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - CAMPUS IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Albert Lucas Silva Lima e Márcio César Souza Junior

**SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO
ABERTO PARA USINA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE CASO**

Ipatinga - MG

2026

ALBERT LUCAS SILVA LIMA E MÁRCIO CÉSAR SOUZA JUNIOR

**SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CAMPO
ABERTO PARA USINA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ipatinga, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Willian Marlon Ferreira

Ipatinga - MG

2026

Albert Lucas Silva Lima e Márcio César Souza Junior

L732s Lima, Albert Lucas Silva; Souza Junior, Márcio César.

Sistema de proteção contra descargas atmosféricas em campo aberto para usina fotovoltaica: um estudo de caso. Albert Lucas Silva Lima; Márcio César Souza Júnior. – 2026.

51f.;il.

Orientador: Willian Marlon Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2026.

1. Descargas Atmosféricas. 2. Usina fotovoltaica. 3. Aterramento elétrico. I. Ferreira, Willian Marlon. II. Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 621.3192

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Ipatinga
Rua Maria Silva, n.º 125, Veneza - Ipatinga - MG - CEP 35.164-261
(31) 3829-8615 / (31) 97133-4399 - gabinete.ipatinga@ifmg.edu.br

ANEXO III ATA DA DEFESA DO TCC

Aos 21 dias do mês de Maio de 2025, às 13h30 horas, na sala 211 do IFMG Campus Avançado Ipatinga, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pelo(a)/pelos(as) aluno(a)/alunos(as), sendo aprovado com a nota 87,5 pela Banca Examinadora, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) deverá(ão) apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 05 de junho de 2025.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) está(ão) ciente(s) de que, caso não cumpra(m) os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua(s) nota(s) será(ão) considerada(s) zero e a sua defesa será anulada. Também está(ão) ciente(s) de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes à defesa:

Realizar as alterações solicitadas pela banca.

NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO DISCENTE ORIENTADO

Orientador: <u>William Marlon Ferveira</u>	Assinatura: <u>Wm</u>
Membro: <u>Gabriel Miranda Freitas</u>	Assinatura: <u>Freitas</u>
Membro: <u>Bêta Sandrine Louveira Batista</u>	Assinatura: <u>Bêta</u>
Aluno(a): <u>Albert Lucas Lima Lima</u>	Assinatura: <u>Albert</u>
Aluno(a): <u>Márcio César Louço Junior</u>	Assinatura: <u>Márcio</u>

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) aplicado a uma usina fotovoltaica de 1,4 MWp localizada no município de Naque, Minas Gerais. O estudo teve como objetivo avaliar os riscos associados às descargas atmosféricas em instalações de geração solar e propor um sistema de proteção adequado, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5419:2015. Inicialmente foi realizada a análise de risco da instalação, considerando parâmetros como densidade de descargas atmosféricas da região, características construtivas da usina e exposição dos equipamentos. Com base nos resultados obtidos, foi definido um SPDA de Classe IV, utilizando o método da esfera rolante para o dimensionamento do sistema de captação. O projeto resultou na instalação de 43 mastros de captação com altura de 4,3 m, distribuídos ao longo da área da usina, interligados por uma malha de aterramento em aço galvanizado de 70 mm². Adicionalmente, foi realizado ensaio de resistividade do solo pelo método de Wenner para caracterização das condições de aterramento da área. Após a implantação do sistema, foi registrado um evento atmosférico nas proximidades da usina, evidenciado pela atuação dos dispositivos de proteção contra surtos, sem ocorrência de danos aos equipamentos da instalação. Os resultados indicam que o sistema de proteção implantado apresentou desempenho satisfatório, contribuindo para a proteção dos ativos da usina e para a confiabilidade operacional do empreendimento.

Palavras-chave: SPDA. Descargas atmosféricas. Usina fotovoltaica. Proteção contra surtos. Aterramento elétrico.

ABSTRACT

This work presents the development and analysis of a Lightning Protection System (LPS) applied to a 1.4 MWp photovoltaic power plant located in the municipality of Naque, Minas Gerais, Brazil. The objective of this study was to evaluate the risks associated with lightning strikes in solar power installations and to propose an adequate protection system according to the criteria established by ABNT NBR 5419:2015. Initially, a risk assessment of the installation was performed considering parameters such as lightning ground flash density in the region, structural characteristics of the plant and exposure of electrical equipment. Based on the results obtained, a Class IV Lightning Protection System was adopted, using the rolling sphere method for the design of the air-termination system. The project resulted in the installation of 43 air-termination masts with a height of 4.3 m distributed across the plant area, interconnected by a grounding grid made of galvanized steel conductors with a cross-sectional area of 70 mm². In addition, soil resistivity tests were carried out using the Wenner method to characterize the grounding conditions of the site. After the implementation of the protection system, a lightning-related event was recorded near the plant, evidenced by the operation of surge protection devices, with no damage observed to the main equipment of the installation. The results indicate that the implemented protection system performed satisfactorily, contributing to the protection of the plant assets and to the operational reliability of the photovoltaic power generation system.

Keywords: Lightning protection system. Lightning discharges. Photovoltaic power plant. Surge protection. Electrical grounding.

SUMÁRIO

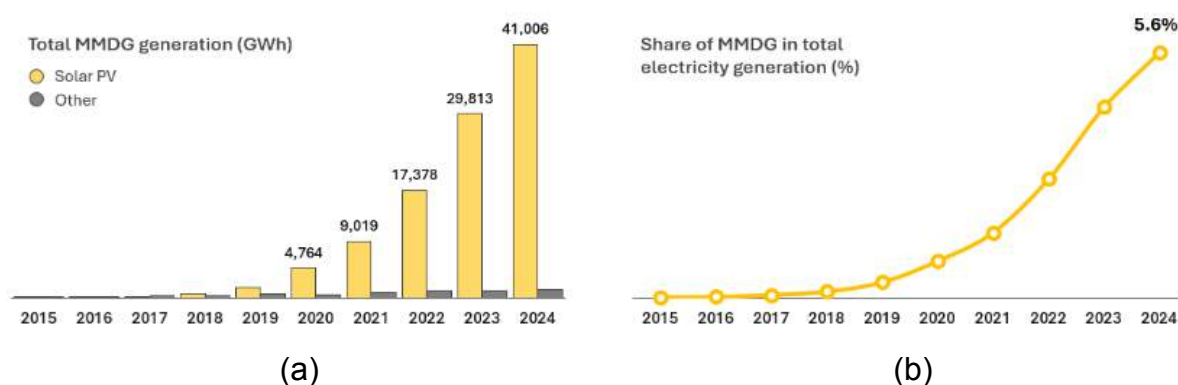
1 INTRODUÇÃO.....	6
1.1 Justificativa.....	7
1.2 Objetivos.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Sistemas Fotovoltaicos On-Grid.....	9
2.2 Fenômeno das Descargas Atmosféricas.....	11
2.3 Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.....	13
2.3.1 Gerenciamento de Risco.....	14
2.3.2 Nível de Proteção e Classes do SPDA.....	15
2.3.3 Sistema Externo.....	16
2.3.4 Sistema Interno.....	18
2.3.5 Aterramento em Usinas Fotovoltaicas.....	19
2.4 Especificidades de Usinas Fotovoltaicas.....	20
3 DESENVOLVIMENTO.....	22
3.1 Apresentação da Usina Naque I.....	22
3.2 Projeto de SPDA.....	25
3.2.1 Gerenciamento de risco.....	25
3.2.2 Ensaio de Resistividade do Solo.....	30
3.2.3 Dimensionamento do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.....	32
3.2.4 Coordenação de Proteção contra Surtos (DPS).....	38
3.2.4.1 Proteção contra surtos no lado CA.....	39
3.2.4.2 Proteção contra surtos no lado CC.....	40
4 RESULTADOS E ANÁLISE DO SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	41
4.1 Resultado da Implantação do Sistema de Proteção.....	41
4.2 Registro de Evento Atmosférico.....	42
4.3 Avaliação Técnica do Sistema de Proteção.....	43
4.4 Avaliação Econômica do Projeto.....	44
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
REFERÊNCIAS.....	47
Anexo I - Planta de Situação.....	49
Anexo II - Diagrama Trifilar Geral.....	50

1 INTRODUÇÃO

Conforme relatado pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 2023, um relatório publicado em 14 de janeiro de 2022 revelou que a demanda global por eletricidade aumentou 6% em 2021. A expansão das redes elétricas inclui a construção de novas usinas e melhorias contínuas na infraestrutura (MARVEL; AGVAANLUVSAN, 2010).

Em 2018, segundo a IEA, a matriz energética global era majoritariamente composta por combustíveis fósseis, com apenas 7,3% provenientes de fontes renováveis, como solar, eólica, geotérmica e maremotriz. Segundo o EPE (Escritório de pesquisa energética), juntas, as fontes de energia eólica e solar fotovoltaica responderam por 23,7% da geração total de eletricidade no país em 2024, demonstrando a evolução dessas fontes no mix elétrico brasileiro. Dentro da composição da geração da microgeração e minigeração distribuída (MMGD) a geração de energia solar cresceu de 2018 a 2024 de forma exponencial, conforme a Figura 1a. A MMGD atingiu 5,6% da geração total de eletricidade no Brasil em 2024 (EPE, 2025), conforme a Figura 1b:

Figura 1 (a,b) - Gráfico de crescimento MMGD.



Fonte: EPE, 2025.

Sistemas fotovoltaicos em campo aberto demandam grandes áreas para alcançar alta potência, o que aumenta a exposição a descargas atmosféricas. No Brasil, onde a incidência de raios é a maior do mundo, com cerca de 77,8 milhões de ocorrências anuais (JULIATE; LAGE, 2019), as descargas atmosféricas podem

comprometer a segurança e integridade das instalações de geração solar. Para proteger esses sistemas, um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) bem projetado é essencial.

O Brasil possui normas técnicas específicas para essa proteção, como a ABNT NBR 5419 - 2015, “Proteção contra descargas atmosféricas”, e a ABNT NBR 16690 - 2019, que define requisitos de proteção para instalação dos módulos fotovoltaicos. No entanto, esses documentos ainda apresentam lacunas em diversos aspectos para proteção de grandes usinas solares em campo aberto. Estudos adicionais, como a IEC TR 63227:2020 e o guia alemão (*DEHN, LIGHTNING PROTECTION GUIDE, 3rd updated edition, 2014*), podem contribuir para uma melhor compreensão e aprimoramento dos sistemas de proteção.

1.1 Justificativa

As descargas atmosféricas representam a ameaça natural mais significativa e a principal causa de danos a sistemas fotovoltaicos (SFVs) instalados. A alta energia contida nessas descargas pode atingir os módulos, inversores, caixas de junção e demais componentes eletrônicos sensíveis, resultando em falhas operacionais, perdas financeiras consideráveis devido à interrupção da geração de energia e, em casos extremos, incêndios.

De acordo com dados recentes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2026) o Brasil registra aumento de raios em todo o território nacional, com cerca de 100 a 150 milhões de descargas anuais a depender da técnica de monitoramento adotada e, o município de Naque, localizado no estado de Minas Gerais, apresenta uma incidência notável de descargas atmosféricas. Especificamente, a média anual registrada é de 5,0885 raios por quilômetro quadrado. Esta métrica de densidade de raios é um indicador crucial para a avaliação de riscos e planejamento de infraestrutura de SPDA na região. Ao analisar o cenário estadual, essa taxa posiciona Naque na 268ª colocação no *ranking* de ocorrências de descargas elétricas do total de 853 municípios em Minas Gerais, conforme o levantamento mais atualizado fornecido pelo próprio INPE em 2024.

Essa posição, embora não esteja entre as mais altas, sublinha a relevância da gestão de riscos associados a fenômenos elétricos, como danos a equipamentos e estruturas, e a necessidade de medidas de proteção adequadas para a população e os sistemas de distribuição de energia. Os dados detalhados do INPE são fundamentais para estudos de climatologia e para o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce.

Diante desse risco inerente e da necessidade de garantir a longevidade e a segurança operacional dos SFVs, a implementação de um SPDA eficaz e bem dimensionado torna-se um requisito de projeto de suma importância.

Considerando um consumo médio residencial mensal de 200kWh (quilowatt-hora), a UFV a ser analisada tem capacidade média de abastecimento de até 800 residências por mês, e possui área de 12.000 metros quadrados, sendo de suma importância o mínimo de intervenções corretivas à usina, além disso, a implementação de sistemas de proteção e investimento em manutenções preventivas são atrativas aos investidores para garantir retorno do investimento e maximizar os lucros a longo prazo.

Com o alto investimento e rentabilidade diária, a manutenção e a proteção da UFV se tornam fundamentais. A segurança e a preservação não são apenas uma medida preventiva, mas sim uma necessidade crítica para assegurar a continuidade de geração de energia mantendo a rentabilidade.

1.2 Objetivos

O presente estudo tem por objetivo desenvolver um estudo de caso sobre proteção contra descargas atmosféricas em uma planta de geração solar fotovoltaica real, utilizando normas e diretrizes nacionais e internacionais. Será projetado um SPDA para uma usina fotovoltaica de 1,4 MWp (Megawatt-pico), instalada em uma área de aproximadamente 12.000 m² (metros quadrados), localizada no município de Naque, em Minas Gerais, Brasil. Durante o desenvolvimento deste trabalho, o SPDA será projetado, implementado e avaliado, a fim de comprovar sua eficácia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem como propósito fundamental a exploração dos principais conceitos, estudos científicos e regulamentações técnicas vigentes que regem a proteção contra os efeitos destrutivos das descargas atmosféricas (raios) em instalações de grande porte de geração de energia solar fotovoltaica (FV) de campo aberto.

Como estudo de caso de referência internacional, destaca-se a aplicação das diretrizes apresentadas no *Lightning Protection Guide*, elaborado pela empresa alemã **DEHN + Söhne**, amplamente reconhecida no desenvolvimento de soluções para proteção contra descargas atmosféricas e surtos elétricos. O guia apresenta metodologias consolidadas para o projeto de SPDA e Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), baseadas nas normas internacionais IEC 62305. Em aplicações como usinas solares de grande porte, o estudo de caso técnico demonstra que a adoção integrada de captadores adequadamente dimensionados, sistemas de aterramento otimizados e DPS coordenados contribui de forma significativa para a redução de falhas operacionais, aumento da confiabilidade do sistema e diminuição de custos associados a danos por descargas atmosféricas, evidenciando a importância da integração de normas internacionais e boas práticas de engenharia na concepção de SPDAs (DEHN, 2015).

2.1 Sistemas Fotovoltaicos On-Grid

Segundo a Resolução Normativa nº 1.000/2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os sistemas fotovoltaicos são definidos como On-Grid (quando conectados à rede elétrica) ou Off-Grid (quando não são conectados à rede elétrica). Nos sistemas fotovoltaicos a serem abordados, On-Grid, são compostos por módulos responsáveis pela conversão da radiação solar em corrente contínua (CC), inversores que realizam a conversão para corrente alternada (CA), dispositivos de proteção nas partes CC e CA, sistema de conexão à rede de distribuição, podendo haver um ou mais transformadores. Em usinas fotovoltaicas (UFVs) de

campo aberto, o circuito elétrico é formado por *strings*¹ conectadas às caixas de junção (*string boxes*²), inversores, transformador elevador e interligação ao ponto de acoplamento com a concessionária.

De acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 1059/2023, as UFVs podem ser classificadas quanto à sua potência de geração de energia elétrica, UFVs com potência de até 75kW são classificadas como microgeração, e UFVs de potência superior a 75kW e inferior a 3MW são classificadas como minigeração, algumas diferenças entre elas, além da faixa de potência, são os custos para conexão, taxas, regras de faturamento, e também o fornecimento de energia, sendo que em usinas de minigeração há a necessidade da conexão com a rede de distribuição ser em média tensão (no caso estudado em 13,8kV), sendo necessário o uso de transformadores.

Os dados do EPE (2025), expõem o crescimento da MMGD no Brasil, ampliando significativamente a presença de sistemas fotovoltaicos conectados em baixa e média tensão. Esse crescimento pressiona as empresas para que tenham um maior nível técnico quanto à qualidade de energia, confiabilidade e proteção contra sobretensões transitórias, especialmente em plantas conectadas em média tensão, onde surtos provenientes da rede podem se propagar para os equipamentos internos.

Em usinas de minigeração de médio porte, como a analisada neste trabalho, a continuidade operacional está diretamente associada ao retorno econômico do investimento. Dessa forma, falhas em inversores e dispositivos de proteção decorrentes de descargas atmosféricas podem comprometer a viabilidade financeira do empreendimento, justificando a adoção de medidas técnicas fundamentadas em normas e literatura especializada.

¹ Circuito formado por um conjunto de painéis solares ligados em série.

² Caixas elétricas usadas para agrupar, proteger e seccionar as strings em campo, antes da conexão com inversores.

2.2 Fenômeno das Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas são fenômenos resultantes de processos de eletrificação em nuvens *cumulonimbus*, onde ocorre o fenômeno em que as cargas elétricas opostas se acumulam em regiões distintas das nuvens ou entre as nuvens e o solo. Essa separação de cargas resulta em descargas de energia com alta intensidade, frequentemente acompanhadas de correntes elétricas que podem ultrapassar 200 kA (quiloampere), conforme descrito por Rakov e Uman (2003). Esses eventos representam um risco significativo para as instalações de Usinas Fotovoltaicas (UFVs), especialmente as localizadas em áreas de campo aberto, como ocorre em grande parte das regiões do Brasil, que é o caso da UFV em estudo.

Segundo o *Lightning Protection, Surge Protection and Earthing Manual* (EIT, 2018). Os impactos das descargas atmosféricas podem ser classificados em diretos e indiretos:

- a) Impacto Direto: Ocorre quando um raio atinge fisicamente uma estrutura, podendo causar danos materiais severos ou até incêndios, conforme apresentado na Figura 2. Em UFVs, módulos fotovoltaicos e estruturas metálicas frequentemente funcionam como condutores naturais para descargas diretas.
- b) Impacto Indireto: Refere-se a sobretensões e campos eletromagnéticos induzidos pelas descargas próximas, que podem prejudicar circuitos eletrônicos sensíveis, como inversores e sistemas de monitoramento.

Figura 2 - Dano causado às placas fotovoltaicas devido a descargas atmosféricas.

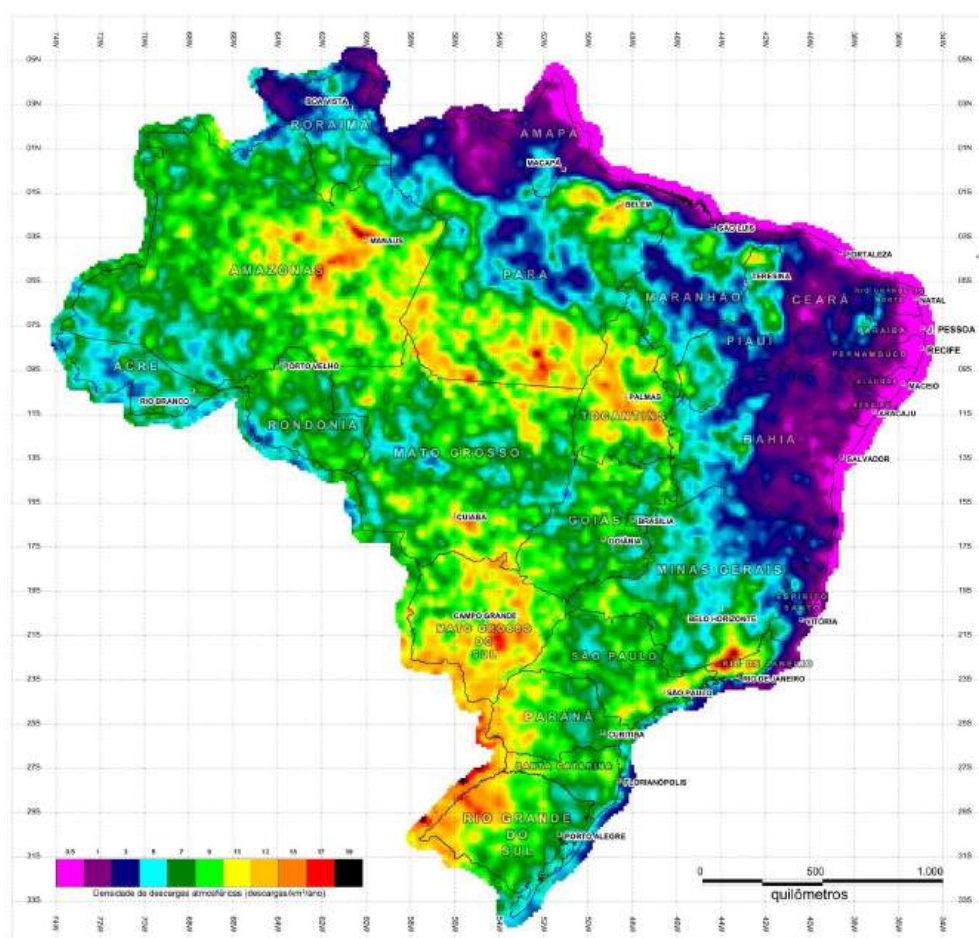


Fonte: Bad Wolf USA, 2024.

No Brasil, a densidade média anual de raios é uma das maiores do mundo, variando regionalmente de acordo com fatores meteorológicos e geográficos. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, “os dados mais recentes indicam que o Brasil registrou, na média dos últimos 10 anos, cerca de 100 a 150 milhões de descargas elétricas por ano, a depender da técnica de monitoramento adotada” (INPE, 2023).

Também de acordo com o INPE, o município de Naque possui uma média anual de 5,0885 raios por quilômetro quadrado (2024), o que destaca a importância do projeto e instalação de um SPDA adequado, garantindo a UFV possa continuar gerando energia, minimizando os impactos naturais. Pode ser visto na Figura 3 um mapa de incidência de raios no território brasileiro.

Figura 3 - Mapa de incidência de raios



Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

2.3 Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

O estudo da necessidade de implementação de um SPDA em UFVs de campo aberto constitui requisito fundamental de projeto, especialmente em regiões com elevada densidade de descargas ao solo. Diferentemente de edificações convencionais, as usinas solares apresentam extensas áreas metálicas expostas, baixa altura relativa das estruturas e grande dispersão espacial dos equipamentos, características que ampliam tanto a probabilidade de incidência direta quanto os efeitos de surtos induzidos.

De acordo com a norma ABNT NBR 5419:2015, a proteção contra descargas atmosféricas deve ser concebida de forma sistêmica, integrando medidas de proteção externa — responsáveis pela interceptação e condução segura da corrente do raio ao solo — e medidas de proteção interna, destinadas à limitação de sobretensões transitórias e à equipotencialização das massas metálicas e circuitos elétricos. Essa abordagem integrada é essencial para assegurar não apenas a integridade estrutural da instalação, mas também a continuidade operacional do empreendimento e a preservação dos ativos de alto valor agregado, como inversores, transformadores e sistemas de monitoramento.

A combinação eficaz dessas duas camadas de proteção – externa e interna – é fundamental para garantir a segurança integral dos equipamentos da usina e, igualmente importante, dos operadores e pessoal de manutenção que atuam no local. A conformidade com a norma ABNT NBR 5419:2015 não é apenas uma exigência técnica, mas uma medida preventiva essencial para a longevidade e a eficiência operacional das usinas fotovoltaicas, minimizando riscos e assegurando a continuidade da produção de energia limpa e renovável.

A norma ABNT NBR 5419:2015 estabelece os critérios técnicos para proteção contra descargas atmosféricas, dividindo o tema em:

- a) Parte 1 – Princípios gerais;
- b) Parte 2 – Gerenciamento de risco;
- c) Parte 3 – Danos físicos e risco à vida;

d) Parte 4 – Proteção de sistemas elétricos e eletrônicos;

A norma define que a necessidade de proteção deve ser determinada por meio de gerenciamento de risco, não sendo admissível a escolha arbitrária de classe de SPDA.

2.3.1 Gerenciamento de Risco

Conforme a norma ABNT NBR 5419:2015, o gerenciamento de risco considera alguns fatores como por exemplo, o número anual de eventos perigosos (que é quantas vezes, em média por ano, uma descarga atmosférica pode atingir ou influenciar a estrutura), a probabilidade de dano (que representa a chance de um evento perigoso realmente provocar um dano na estrutura ou nos equipamentos), e a magnitude das perdas, sendo classificadas como:

- a) L1 – Perda de vida humana;
- b) L2 – Perda de serviço ao público;
- c) L3 – Perda de patrimônio cultural;
- d) L4 – Perda econômica;

Em usinas fotovoltaicas, a perda econômica (L4) é frequentemente predominante, devido ao alto valor dos equipamentos, como inversores, transformadores e dispositivos eletrônicos. Entretanto, a circulação eventual de equipes técnicas exige avaliação também da perda de vida humana (L1).

A classe do SPDA é definida a partir da comparação entre risco calculado, que é a frequência anual esperada de perdas causadas por descargas atmosféricas e risco tolerável, que corresponde ao limite máximo aceitável definido pela norma para determinado tipo de perda conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Risco tolerável por tipo de perda.

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}

Em princípio, para perda de valor econômico (L4), a rotina a ser seguida é a comparação custo/benefício dada no Anexo D. Se os dados para esta análise não estão disponíveis, o valor representativo de risco tolerável $R_T = 10^{-3}$ pode ser utilizado.

Fonte: ABNT NBR 5419, 2015.

2.3.2 Nível de Proteção e Classes do SPDA

A NBR 5419 estabelece quatro classes de proteção (I a IV), associadas a parâmetros como:

- a) Raio da esfera rolante;
- b) Dimensões máximas da malha;
- c) Ângulo de proteção;

A escolha da classe deve ser realizada com base na análise de risco, não sendo permitida sua definição de forma arbitrária conforme a norma ABNT NBR 5419:2015. Inicialmente, calcula-se o risco associado às descargas atmosféricas, considerando parâmetros como densidade de raios da região, características da estrutura, probabilidade de danos e magnitude das perdas. Em seguida, esse risco é comparado com o risco tolerável definido pela norma, caso o risco calculado seja superior ao tolerável, medidas de proteção devem ser adotadas. A classe do SPDA é então definida como a menor classe capaz de reduzir o risco a níveis inferiores ao tolerável, garantindo simultaneamente a segurança da instalação e a viabilidade técnico-econômica do projeto.

A escolha da classe impacta diretamente o dimensionamento do sistema de captação e a distribuição dos mastros, conforme a Tabela 2:

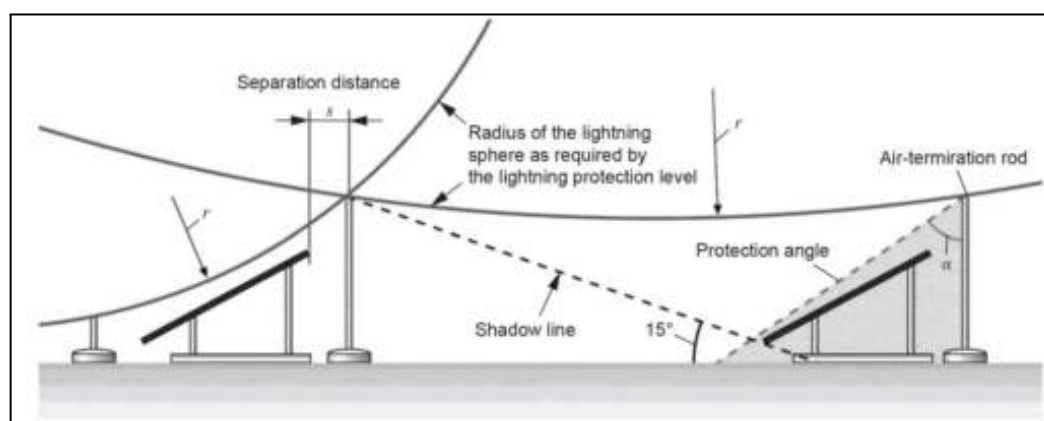
Tabela 2 - Valores máximos dos raios da esfera rolante, tamanho da malha e ângulo de proteção correspondentes a classe do SPDA.

Classe do SPDA	Método de proteção		
	Raio da esfera rolante - R m	Máximo afastamento dos condutores da malha m	Ângulo de proteção α°
I	20	5 × 5	Ver Figura 1
II	30	10 × 10	
III	45	15 × 15	
IV	60	20 × 20	

Fonte: ABNT NBR5419-1, 2015.

Em plantas de grande área, o método da esfera rolante é amplamente utilizado por permitir verificação geométrica do volume protegido, conforme exemplificado na Figura 4:

Figura 4 - Método de proteção dos módulos com hastes.



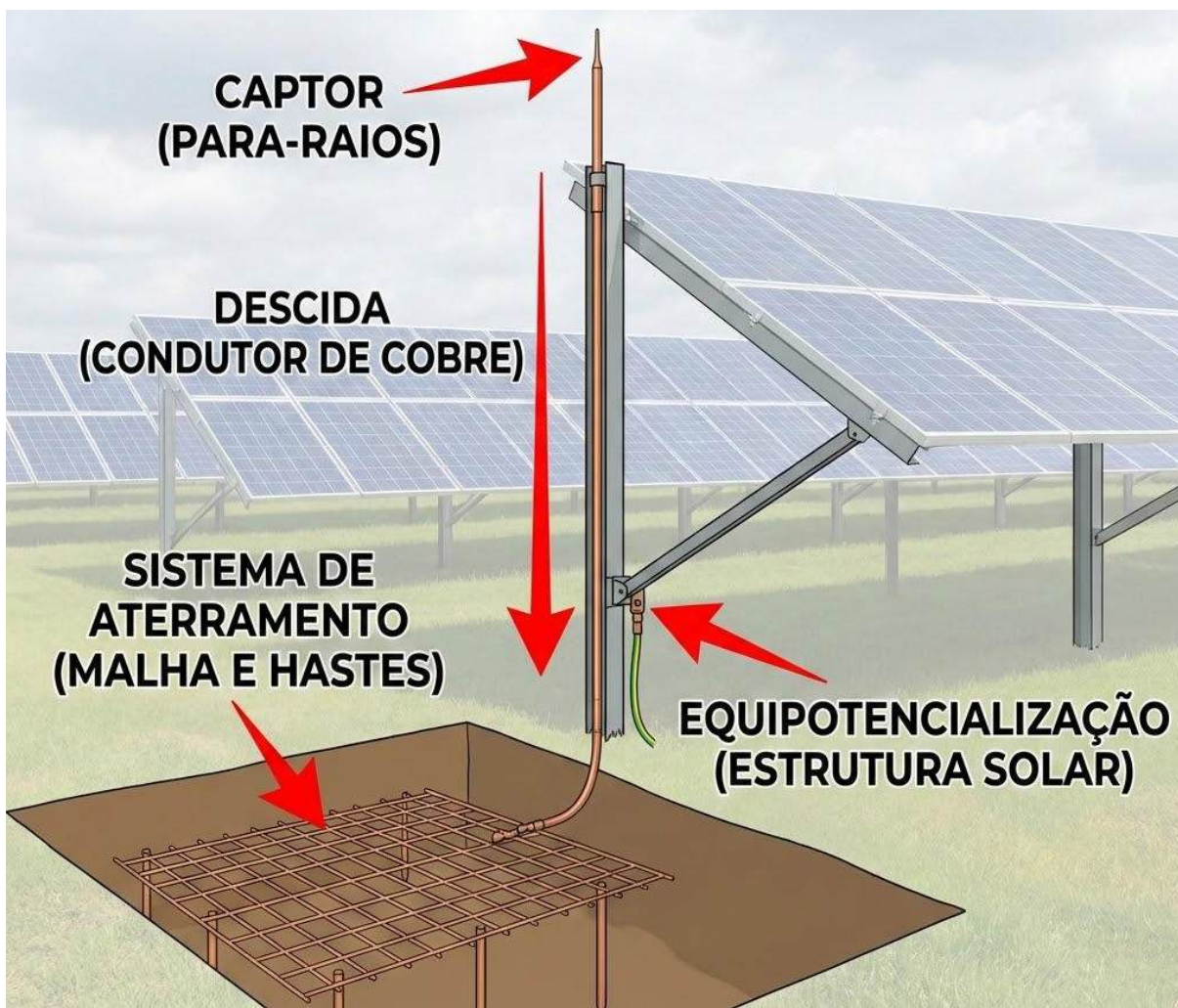
Fonte: IEC 63227, 2020.

2.3.3 Sistema Externo

O sistema externo é composto por componentes que interceptam diretamente as descargas atmosféricas e conduzem a corrente elétrica para o solo de maneira controlada (ABNT, 2015). São divididos nos subsistemas de Captores, Condutores

de Descida e Sistema de Aterramento, conforme ilustrado na Figura 5:

Figura 5 - Subsistemas do Sistema Externo de um SPDA.



Fonte: Adaptado pelos Autores.

- a) Os captores compreendem hastes, malhas ou cabos metálicos posicionados estrategicamente para garantir a proteção da área da usina. O modelo eletrogeométrico é amplamente utilizado para determinar a altura e o posicionamento ideal destes captores.
- b) Os condutores de descida são elementos metálicos que conectam os captores ao sistema de aterramento, conduzindo a corrente elétrica com baixa resistência. A separação adequada entre os condutores é crucial para evitar efeitos de acoplamento eletromagnético.

- c) O sistema de Aterramento possui a função de dispersar as correntes das descargas no solo por meio de malhas ou hastes de aterramento. Segundo a ABNT NBR 5419:2015, não é estabelecido um valor máximo obrigatório para a resistência de aterramento, uma vez que a eficácia do SPDA está associada principalmente à equipotencialização e à adequada dissipação da corrente do raio no solo. Entretanto, valores de resistência inferiores a 10Ω são usualmente adotados como boa prática de engenharia para sistemas de SPDA, visando maior segurança e confiabilidade da instalação.

A eficácia do sistema não depende exclusivamente do valor da resistência de aterramento, mas da geometria da malha e da integração equipotencial entre todos os elementos condutores.

2.3.4 Sistema Interno

O sistema interno atua como um complemento à proteção externa, prevenindo danos a equipamentos sensíveis devido a sobretensões induzidas.

Os Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) são instalados em pontos de conexão crítica, como inversores e quadros de distribuição, limitando as sobretensões transitórias, desviando surtos elétricos para o aterramento. A classificação dos DPS (classes I, II e III) determina sua aplicação em diferentes estágios do sistema:

- a) No lado CC, a proteção é feita nas string boxes e entrada dos inversores;
- b) No lado CA, a proteção é feita nos quadros de distribuição e ponto de conexão com a rede;

De acordo com a norma ABNT NBR 5419:2015, a coordenação adequada exige que o nível de proteção do DPS (U_p) seja inferior à suportabilidade dielétrica do equipamento protegido (U_w), assegurando que a tensão residual não ultrapasse limites de segurança.

De acordo com a norma ANBT NBR IEC 61643-32 (2022) em inversores fotovoltaicos, cuja eletrônica é sensível a surtos transitórios, a verificação da condição $U_p < U_w$ é fundamental para comprovar eficácia da proteção.

A equipotencialização garante a uniformidade do potencial elétrico entre estruturas condutoras, reduzindo a probabilidade de falhas ou choques elétricos.

2.3.5 Aterramento em Usinas Fotovoltaicas

O sistema de aterramento constitui um dos elementos fundamentais do SPDA, sendo responsável pela dissipação no solo das correntes impulsivas associadas às descargas atmosféricas. Além da dissipação de corrente, o aterramento contribui para a equipotencialização das estruturas metálicas da instalação, reduzindo diferenças de potencial que podem causar tensões de passo e toque perigosas para pessoas e equipamentos (ABNT, 2015).

Em usinas fotovoltaicas de campo aberto, o sistema de aterramento assume importância ainda maior devido à grande extensão da planta e à presença de estruturas metálicas distribuídas ao longo da área de geração. Nesses casos, recomenda-se a utilização de malhas de aterramento interligadas às estruturas metálicas de suporte dos módulos e aos sistemas de proteção elétrica, garantindo uma equipotencialização eficaz e contribuindo para a redução de sobretensões transitórias no sistema (NBR 16690, 2019).

O dimensionamento adequado do aterramento depende diretamente das características elétricas do solo, especialmente de sua resistividade. A determinação desse parâmetro é geralmente realizada por meio de ensaios de resistividade do solo, sendo o método dos quatro pontos, também conhecido como método de Wenner, um dos mais utilizados em projetos de aterramento. Nesse método, quatro eletrodos são posicionados no solo com espaçamento uniforme, permitindo a estimativa da resistividade aparente do terreno a partir da relação entre corrente aplicada e diferença de potencial medida entre os eletrodos internos (ABNT, 2009; MODENA; SUETA, 2011).

A avaliação da resistividade do solo fornece subsídios para o dimensionamento da malha de aterramento e para a definição da geometria do sistema, permitindo projetar uma solução capaz de dissipar de forma segura as correntes associadas às descargas atmosféricas e atender aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 5419 para sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

2.4 Especificidades de Usinas Fotovoltaicas

As usinas fotovoltaicas apresentam características que ampliam os desafios associados à proteção contra descargas atmosféricas:

- a) **Dimensão e Exposição:** A grande área de instalação de painéis fotovoltaicos aumenta a probabilidade de impactos diretos. Usinas em campo aberto estão expostas a condições climáticas adversas e não possuem barreiras naturais contra raios.
- b) **Componentes Eletrônicos Sensíveis:** Equipamentos essenciais, como inversores e sistemas de monitoramento, são altamente vulneráveis a sobretensões, demandando proteção adicional.
- c) **Distribuição Geográfica:** Localizações remotas, muitas vezes em áreas com alta densidade de descargas atmosféricas, exigem estudos detalhados sobre a topografia e a condutividade do solo para otimizar o SPDA.

Um estudo conduzido por Martinez et al. (2018) destacou que estruturas metálicas de suporte podem atuar como elementos auxiliares de captação, mas não substituem um SPDA devidamente projetado. A inclusão de redundâncias no sistema de aterramento é uma recomendação recorrente para instalações fotovoltaicas. Com isso, existem dois tipos de SPDA comumente utilizados em usinas solares, os da Figura 6, que utilizam o método de captação de esfera rolante e os da Figura 7 que utilizam o método de captação de Franklin.

Figura 6 - Uso de mastros livres para proteção contra descargas.



Fonte: <https://canalsolar.com.br>, acesso em dez/2025.

Figura 7 - Uso de mini captosres nos módulos para proteção contra descargas.



Fonte: DEHN, 2021.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o estudo de caso referente ao projeto de SPDA aplicado à usina solar fotovoltaica Naque I, com potência instalada de 1,4 MWp, localizada no município de Naque, no estado de Minas Gerais. O objetivo é projetar, implementar e analisar a instalação descrevendo os critérios técnicos adotados para o desenvolvimento do SPDA, em conformidade com as normas técnicas vigentes.

Inicialmente, é apresentada uma contextualização geral da usina fotovoltaica, incluindo sua localização geográfica, principais características físicas, capacidade instalada, arranjo dos módulos, sistema de conversão de energia e infraestrutura elétrica associada. Em seguida, é realizada a análise da implantação do SPDA, considerando a exposição da planta a descargas atmosféricas e os impactos potenciais sobre a operação e a confiabilidade do empreendimento.

Por fim, são apresentados os procedimentos adotados para o desenvolvimento do projeto do SPDA, incluindo a definição da classe de proteção, a escolha do método de proteção, o dimensionamento do sistema de captação e sua implementação. Dessa forma, o capítulo estabelece as bases técnicas necessárias para a compreensão do sistema de proteção proposto e de sua aplicação prática em uma instalação real de geração fotovoltaica.

3.1 Apresentação da Usina Naque I

A usina solar fotovoltaica analisada neste estudo, denominada Naque I, está localizada no município de Naque, no leste do estado de Minas Gerais, a aproximadamente 300 m de altitude em relação ao nível do mar, conforme a planta de situação no Anexo I. O empreendimento foi desenvolvido por iniciativa privada com o objetivo de comercialização de energia elétrica no estado de Minas Gerais.

A usina possui potência instalada de 1,4 MWp e geração média mensal estimada de aproximadamente 160.000 kWh, conforme apresentado no gráfico de geração do ano de 2025 mostrado na Figura 8. O sistema é composto por 2.546

módulos fotovoltaicos Nexen, modelo NXN-550-144M, com potência nominal de 550 W cada, instalados em uma área aproximada de 12.000 m².

Figura 8 - Geração anual de 2025.



Fonte: <https://web3.isolarcloud.com.hk> (Acesso em 21 de fevereiro de 2026).

A conversão de energia é realizada por quatro inversores solares Sungrow, representados no anexo II, do modelo SG250-HX, cada um com potência nominal de 250 kW, eles operam conectados a uma rede de baixa tensão trifásica de 800 V, que é interligada a uma subestação interna equipada com um transformador a seco de 1.250 kVA com fechamento Y- Δ (Estrela - Triângulo), conforme ilustrado na Figura 9.

No sistema de proteção elétrica, a rede de média tensão é equipada com pára-raios, enquanto a rede de baixa tensão possui dispositivos de proteção contra surtos (DPS) da marca Embrastec, classe I + II V 60 kA – 1000 V.

O sistema também conta com um relé de proteção Pextron URP 6100, responsável pela supervisão das condições elétricas da instalação e pela proteção tanto da concessionária quanto da geração distribuída. Esse relé incorpora funções de proteção como sobrecorrente bidirecional, sobretensão, subtensão, detecção de curto-circuito e falta de fase. O equipamento encontra-se instalado na cabine de medição e proteção apresentada na Figura 10, comandando o disjuntor de média tensão responsável pela abertura do circuito em caso de atuação das proteções.

Figura 9 - Transformador a seco 1250kVA.



Fonte: Os autores.

Figura 10 - Cabine de medição e proteção.



Fonte: Os autores.

3.2 Projeto de SPDA

De acordo com a norma, o dimensionamento de um SPDA deve ser precedido pela análise de risco, que permite avaliar a probabilidade de ocorrência de danos decorrentes de descargas atmosféricas e verificar a necessidade de adoção de medidas de proteção. A partir dessa análise são definidos os parâmetros necessários para o projeto, incluindo a classe de proteção do SPDA, os métodos de proteção aplicáveis e os requisitos para os subsistemas de captação, descida e aterramento.

Assim, o desenvolvimento do projeto foi conduzido em etapas, iniciando-se pela análise de risco da instalação, seguida da definição da classe de proteção do SPDA e da avaliação das características do solo por meio de ensaio de resistividade, parâmetros fundamentais para o dimensionamento do sistema de aterramento. As etapas subsequentes contemplam o dimensionamento dos elementos do SPDA e a adaptação do sistema às características geométricas e operacionais da usina fotovoltaica.

3.2.1 Gerenciamento de risco

O gerenciamento de risco da usina fotovoltaica Naque I foi conduzido conforme os critérios estabelecidos na ABNT NBR 5419-2:2015 – Proteção contra Descargas Atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de Risco.

Segundo a norma, o risco anual (R) associado a descargas atmosféricas é determinado pela Equação (1):

$$R = Nd \cdot P \cdot L \quad (1)$$

Onde:

R = risco anual associado a descargas atmosféricas.

Nd = número anual de eventos perigosos;

P = probabilidade de ocorrência de dano;

L = perda ou consequência associada ao dano.

A necessidade de proteção é verificada pela comparação entre o risco calculado (R) e o risco tolerável (Rt) estabelecido pela norma. Caso o risco calculado for maior que o risco tolerável ($R > R_t$), devem ser adotadas medidas de proteção destinadas à redução do risco.

Para a avaliação do risco foram considerados os seguintes parâmetros da estrutura existente:

- a) Área da planta: 12.000 m² (0,012 km²);
- b) Altura máxima das estruturas (módulos fotovoltaicos): 2,2 m;
- c) Implantação em campo aberto, sem estruturas adjacentes de sombreamento;
- d) Alimentação por rede de média tensão com transformação para baixa tensão;
- e) Presença de rede de monitoramento cabeada interligada aos inversores;
- f) Ocupação humana eventual (aproximadamente 5 pessoas durante eventos de manutenção).

A densidade de descargas atmosféricas ao solo (Ng) adotada para o município de Naque/MG foi de aproximadamente 5,0885 descargas/km²/ano, conforme dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Conforme a NBR 5419-2, o número anual de eventos perigosos associados a descargas diretas na estrutura pode ser estimado pela Equação (2):

$$Nd = Ng \cdot Ae \cdot Cd \quad (2)$$

Onde:

Nd = número de eventos perigosos associados a descargas atmosféricas

Ng = densidade de descargas ao solo (descargas/km²/ano);

Ae = área equivalente de captação da estrutura (km²);

C_d = fator de localização.

Considerando a implantação em campo aberto, na parte mais alta da cidade e sem obstáculos maiores ao redor, o fator de localização considerado foi $C_d = 2$. A área equivalente de captação foi estimada através da seguinte aproximação da equação (3):

$$A_e \approx A + 2 \cdot H \cdot (C + L) + \pi \cdot H \cdot 2 \quad (3)$$

Onde:

A = área em planta (m^2);

H = altura da estrutura (m);

$C + L$ = comprimento e largura (m);

$\pi \cdot H \cdot 2$ = contribuição da projeção circular superior.

Devido a usina possuir uma forma geométrica irregular, foi necessário utilizar uma aproximação para uma planta quadrada para obter os valores de C e L , calculadas pela Equação (4):

$$C \approx L \approx \sqrt{A} \approx \sqrt{12.000} \approx 109,54 \text{ m} \quad (4)$$

Obtidos os valores de comprimento e largura, foi possível calcular os termos da Equação (3), conforme detalhado pelas Equações (4, 5 e 6), e logo após, chegar ao valor da área equivalente de captação da estrutura total:

Cálculo do termo $2 \cdot H \cdot (C + L)$:

$$2 \cdot H \cdot (C + L) = 22,2 \times (109,54 + 109,54) = 964,0 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Cálculo do termo $\pi \cdot H \cdot 2$:

$$\pi \cdot H \cdot 2 = \pi \cdot 2,2 \cdot 2 \approx 13,82 \text{ m}^2 \quad (6)$$

Área equivalente total:

$$Ae = 12.000 + 964,0 + 13,82 = 12.977,82 \text{ m}^2 = 0,012978 \text{ km}^2 \quad (7)$$

Com os valores da densidade de descargas ao solo, da área equivalente de captação da estrutura e do fator de localização, é possível usar a Equação (2) para calcular o número de eventos perigosos associados a descargas atmosféricas conforme a seguinte Equação (8):

$$Nd = 5,0885 \times 0,012978 \times 2 = 0,1320 \text{ eventos/ano} \quad (8)$$

A partir do valor obtido de Nd, pode-se estimar o intervalo médio entre descargas diretas, aplicando a seguinte Equação (9), obtendo a frequência média de ocorrência encontrada de 1 descarga direta a cada 7,58 anos:

$$T = \frac{1}{Nd} \approx 7,58 \text{ anos} \quad (9)$$

Onde:

T = tempo necessário para ocorrer uma descarga direta (ano);

Além das descargas diretas na estrutura (S1), foram consideradas as demais fontes de dano previstas na ABNT NBR 5419-2:

- a) Descargas próximas à estrutura (S2);
- b) Descargas sobre linhas conectadas (S3);
- c) Descargas próximas às linhas (S4).

A presença de alimentação em rede média tensão de 13,8kV e sistemas de comunicação cabeados aumenta a probabilidade de surtos conduzidos e induzidos, contribuindo para parcelas adicionais do risco total.

Para a avaliação do risco residual da usina fotovoltaica em estudo, foram considerados parâmetros correspondentes a um SPDA de Classe IV, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5419:2015. A análise foi conduzida considerando os tipos de perdas aplicáveis à instalação.

Os coeficientes de probabilidade de dano (P) e magnitude da perda (L) utilizados no cálculo do risco foram obtidos a partir das tabelas apresentadas na ABNT NBR 5419-2:2015, considerando as características da instalação analisada, tais como tipo de estrutura, presença de SPDA, utilização de dispositivos de proteção contra surtos coordenados e condições de ocupação humana da planta. Esses coeficientes permitem estimar a parcela de risco associada a cada tipo de perda considerado na análise.

a) Perda econômica (L4): Danos a inversores, módulos fotovoltaicos, transformadores e dispositivos eletrônicos, custos de manutenção corretiva, interrupção da geração e perda de receita. Dado o elevado valor agregado dos equipamentos e a dependência da continuidade operacional para retorno do investimento, essa categoria representa a principal parcela de risco.

Adotando como valor representativo um risco tolerável 4 ($Rt4$) igual a 10^{-3} ano $^{-1}$, obteve-se a comparação da Equação (10), com o valor do risco 4 ($R4$) considerando SPDA de Classe IV e DPS coordenado:

$$R4 = 4,73 \times 10^{-4} \text{ ano}^{-1} < Rt4 \quad (10)$$

O valor do risco tolerável 4 é maior que o risco 4, portanto, o risco econômico residual se encontra em conformidade com a norma.

b) Perda de vidas humanas (L1): Considerada em caráter secundário, associada à presença eventual de equipes de manutenção na planta. Embora a ocupação não seja permanente, a circulação de trabalhadores em área aberta durante as intervenções justifica a avaliação dessa categoria. Para L1, a norma ABNT NBR 5419-2 estabelece como risco tolerável 1 ($Rt1$) o valor de 10^{-5} ano $^{-1}$. Considerando os fatores de Classe IV de SPDA, DPS coordenados (NP III/IV), e controle operacional da permanência de pessoas em campo:

Obteve-se o valor calculado do risco 1 (R1) pela Equação (11):

$$R1 = 6,19 \times 10^{-7} \text{ ano}^{-1} < Rt1 \quad (11)$$

Portanto, devido ao valor do risco 1 ser menor que o risco tolerável 1, o risco para a perda de vida humana encontra-se dentro do limite normativo.

c) As perdas relacionadas a serviços essenciais ao público (L2) e patrimônio cultural (L3) não se aplicam ao caso estudado, portanto não foram levadas em conta para o estudo.

3.2.2 Ensaio de Resistividade do Solo

Antes da implantação da malha de aterramento, foi realizado ensaio de resistividade do solo utilizando terrômetro digital pelo método dos quatro pontos (método de Wenner), conforme diretrizes da ABNT NBR 15749 (ABNT, 2009).

Foram executadas medições com espaçamentos entre eletrodos de 2m, 4m, 8m e 16m, com três repetições para cada distância, a fim de garantir maior confiabilidade dos dados obtidos. Os valores médios de resistência medidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios de resistência do solo.

Espaçamento (m)	Média da Resistência (Ω)
2	43,7
4	17,4
8	6,65
16	4,41

Fonte: Os Autores.

Observa-se que, à medida que o espaçamento entre os eletrodos aumenta, os valores de resistência diminuem, sugerindo a presença de regiões com menor resistividade em maiores profundidades. Esse comportamento indica um solo com possível estratificação, favorável à dissipação de correntes impulsivas provenientes

de descargas atmosféricas, conforme descrito em metodologias de ensaio de resistividade pelo método de Wenner (ABNT, 2009; IEEE, 2012).

A resistividade aparente do solo foi estimada por meio da Equação (12):

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (12)$$

Onde:

ρ = resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

a = espaçamento entre eletrodos (m);

R = resistência medida (Ω);

Foram calculados os valores de resistividade do solo a partir dos valores de resistência média encontrados pelos ensaios (método de Wenner) e os resultados encontrados estão na Tabela 4:

Tabela 4 - Valores calculados de resistividade do solo.

Espaçamento (m)	Resistividade do solo ($\Omega \cdot m$)
2	549,15
4	437,31
8	334,27
16	443,34

Fonte: Os Autores.

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade do solo indicam que o terreno da área de implantação da usina apresenta resistividade aparente variando entre aproximadamente 334 $\Omega \cdot m$ e 549 $\Omega \cdot m$, valores compatíveis com solos naturais e que não caracterizam condição de alta resistividade. A variação observada em função do espaçamento entre eletrodos sugere que o solo não é perfeitamente homogêneo, apresentando possíveis diferenças de composição ou umidade ao longo da profundidade investigada, comportamento comum em formações geológicas naturais.

De modo geral, os valores obtidos não indicam a necessidade de tratamento do solo ou adoção de soluções especiais para redução de resistividade, como aditivos químicos ou substituição de material, uma vez que se encontram dentro de faixas típicas de solos naturais que permitem a utilização de sistemas de aterramento convencionais, desde que devidamente dimensionados, conforme práticas recomendadas na literatura técnica (IEEE, 2012; VISACRO FILHO, 2002).

Dessa forma, o ensaio de resistividade forneceu informações confiáveis sobre as características elétricas do solo local, servindo como base para a validação das condições do terreno para implantação do sistema de aterramento da usina fotovoltaica.

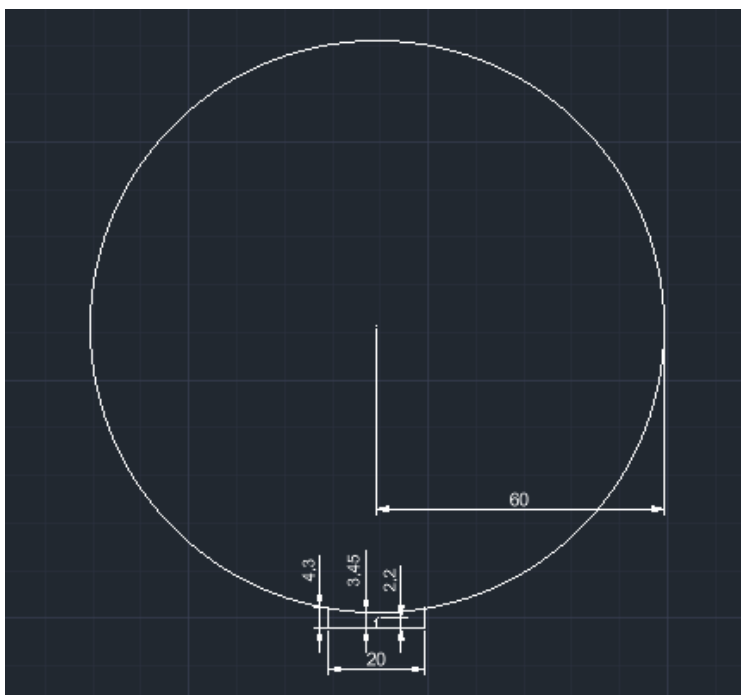
3.2.3 Dimensionamento do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

Com base nos resultados da análise de risco, ensaio de resistividade e nas características da instalação, foi realizado o dimensionamento do SPDA, contemplando a definição da classe de proteção, o projeto do sistema de captação e o dimensionamento da malha de aterramento.

Diante da validação da classe IV, escolhemos o método da esfera rolante como ideal ao caso, usamos a Tabela 2 para determinar o raio da esfera rolante que para utilizar como base do projeto e o máximo afastamento dos condutores da malha.

Foi adotado a classe IV de proteção, cujo raio da esfera rolante é de 60m, com base nesta decisão foi definido o arranjo preliminar do sistema de captação, a Figura 11 ilustra a simulação com a dimensão completa da esfera rolante.

Figura 11 - Vista geral do Projeto da Esfera Rolante.

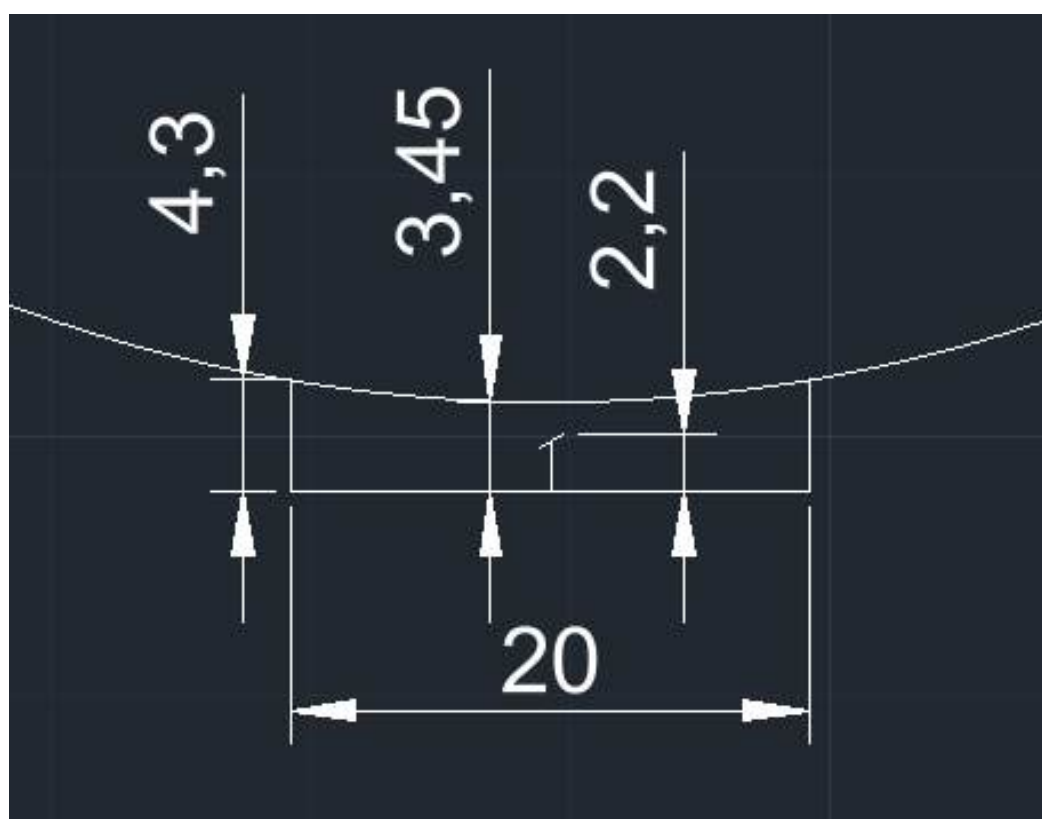


Fonte: Os autores.

A partir da simulação geométrica do método da esfera rolante, foi adotada como premissa de projeto a necessidade de proteção de uma altura mínima de 3,45 m nos pontos mais críticos da área analisada. Esse valor foi considerado de forma a garantir uma margem de segurança em relação à altura máxima das estruturas dos módulos fotovoltaicos, que atingem aproximadamente 2,20 m em relação ao solo.

Com base nessa condição, foram realizadas simulações em ambiente CAD para avaliar diferentes configurações de posicionamento dos captores. Os resultados indicaram que a utilização de mastros com altura de 4,3 m, distribuídos com distanciamento máximo de 20 m entre si, é suficiente para garantir a cobertura mínima de proteção definida, assegurando que os módulos fotovoltaicos permaneçam dentro do volume protegido pelo método da esfera rolante, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Vista aproximada do Projeto da Esfera Rolante.



Fonte: Os autores.

De posse da altura dos mastros e os distanciamentos entre os mesmos, é necessário posicioná-los de forma estratégica na planta, visando a otimização do espaço para não prejudicar a geração da usina e não ter gastos excessivos com a montagem do SPDA.

Conforme é perceptível na Figura 13, as fileiras de placas foram montadas acompanhando a inclinação e o formato do terreno, o que não é tão claro se visto por uma imagem de vista superior como da Figura 14:

Figura 13 - Vista Lateral da Usina Fotovoltaica.



Fonte: Os autores.

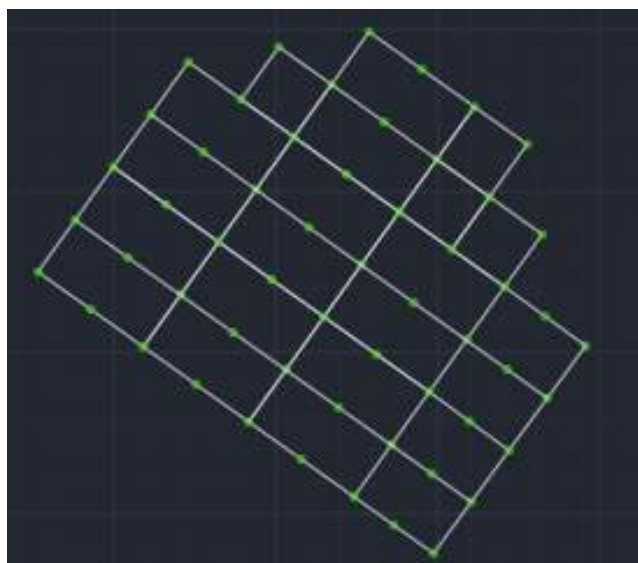
Figura 14 - Vista Superior da Usina Fotovoltaica.



Fonte: Os Autores.

Portanto, o SPDA teve que ser adaptado ao mesmo formato. Com base no projeto da usina foi esboçado o croqui da Figura 15:

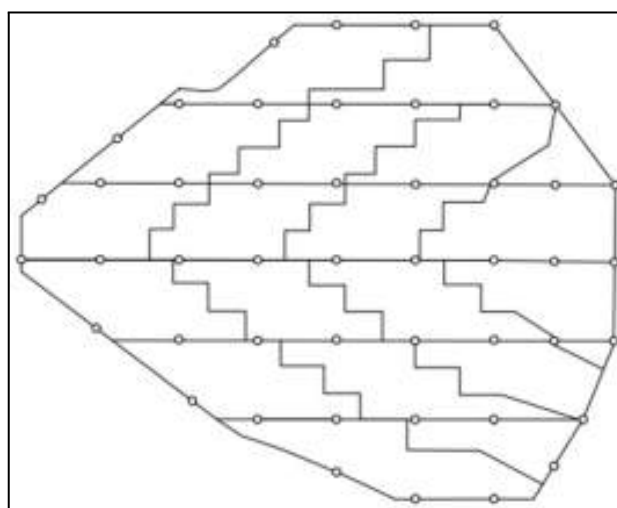
Figura 15 - Croqui da Usina Fotovoltaica.



Fonte: Os Autores.

O formato de malha quadrada não se adequa bem ao formato da usina, desperdiçando material e ultrapassando os limites físicos do terreno, portanto, foi desenvolvido o croqui da Figura 16 com o objetivo de melhor aproveitamento da estrutura existente.

Figura 16 - Desenvolvimento do Croqui da Usina Fotovoltaica.



Fonte: Os Autores.

Após algumas adequações, foi alcançado o modelo final, conforme ilustrado

pela Figura 17:

Figura 17 - Modelo Final do Croqui da Usina Fotovoltaica.



Fonte: Os Autores.

O modelo final do sistema contou com 43 mastros de captação, com altura livre de 4,3 m acima do solo, confeccionados em aço galvanizado a fogo e com diâmetro de 3/4", distribuídos ao longo da área da usina, que possui aproximadamente 12.000 m². Essa configuração garante que as estruturas fotovoltaicas permaneçam dentro do volume de proteção definido pelo método da esfera rolante, assegurando a interceptação de descargas atmosféricas.

Os mastros foram interligados por meio de malha de aterramento em aço galvanizado a fogo encordado com seção de 70 mm², atendendo às dimensões mínimas estabelecidas na Tabela 7 da ABNT NBR 5419:2015 para condutores de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Com o croqui desenvolvido em mãos, foi possível realizar os pontos de marcações para a instalação dos mastros de captação. As Figuras 18 (a,b,c) ilustram a disposição de alguns dos mastros instalados na Usina Fotovoltaica.

Figura 18 (a,b,c) - Disposição dos mastros instalados na Usina Fotovoltaica.



Fonte: Os Autores.

3.2.4 Coordenação de Proteção contra Surtos (DPS)

Além do sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas, composto pelos captosres e pelo sistema de aterramento, foi prevista a utilização de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) com o objetivo de limitar sobretensões transitórias que possam atingir os equipamentos eletrônicos da usina fotovoltaica.

Em sistemas de geração fotovoltaica conectados à rede elétrica, as sobretensões podem atingir a instalação tanto pelo lado de corrente alternada (CA), provenientes da rede elétrica ou de descargas atmosféricas indiretas, quanto pelo lado de corrente contínua (CC), induzidas nos circuitos das strings fotovoltaicas. Dessa forma, a proteção adequada da instalação requer a utilização de DPS em ambos os lados do sistema.

3.2.4.1 Proteção contra surtos no lado CA

Para a proteção no lado de corrente alternada da instalação foi adotado um DPS da linha Ecobox, fabricante Embrastec, classificado como Classe I+II, adequado para proteção contra correntes de impulso associadas a descargas atmosféricas e sobretensões transitórias provenientes da rede elétrica.

O dispositivo selecionado apresenta os seguintes parâmetros principais:

- a) Tensão nominal: 577/1000 VCA;
- b) Máxima tensão de operação contínua (U_c): 1000 VCA;
- c) Corrente de impulso (I_{imp}): 12,5 kA;
- d) Corrente nominal de descarga (I_n): 30 kA;
- e) Corrente máxima de descarga (I_{max}): 60 kA;
- f) Nível de proteção de tensão (U_p): 4,8 kV.

A escolha desse modelo foi motivada pelas características elétricas da instalação. A usina opera em sistema trifásico com ligação em triângulo, não dispondo de condutor neutro no lado de baixa tensão. Nessa condição, os dispositivos de proteção contra surtos devem ser dimensionados considerando a tensão entre linhas do sistema, uma vez que não existe referência de tensão fase-neutro disponível.

De acordo com a ABNT NBR IEC 61643-11, a máxima tensão contínua de operação do DPS (U_c) deve ser igual ou superior à tensão máxima permanente presente no ponto de instalação. Assim, para sistemas trifásicos sem neutro, a seleção do DPS deve considerar a tensão entre fases do sistema elétrico. Dessa forma, foi adotado um dispositivo com U_c de 1000 VCA, garantindo compatibilidade com a topologia elétrica da instalação.

Considerando que o DPS selecionado apresenta $U_p = 4,8$ kV, e admitindo-se que os inversores utilizados na instalação tenham $U_w \approx 6$ kV, ou seja, atendam aos requisitos mínimos de suportabilidade dielétrica estabelecidos pela norma IEC 60664-1, que estabelece os princípios, requisitos e testes para a coordenação de isolamento em equipamentos de baixa tensão.

Dessa forma, com o valor de $U_p < U_w$, o DPS atua desviando as correntes de surto para o sistema de aterramento da instalação, limitando a tensão residual aplicada aos terminais dos inversores e reduzindo o risco de danos aos equipamentos.

3.2.4.2 Proteção contra surtos no lado CC

No lado de corrente contínua do sistema fotovoltaico foram adotados dispositivos de proteção contra surtos específicos para circuitos fotovoltaicos, instalados nas caixas de junção das strings (string boxes), com o objetivo de limitar sobretensões induzidas nos cabos que interligam os módulos fotovoltaicos aos inversores.

Para essa aplicação foi utilizado um DPS fotovoltaico modelo BUD-1500, desenvolvido para sistemas de geração solar com tensão elevada em corrente contínua. De acordo com o datasheet do equipamento, o dispositivo apresenta as seguintes características principais:

- a) Tensão máxima do sistema fotovoltaico: 1500 VCC
- b) Corrente nominal de descarga (I_n): 20 kA
- c) Corrente máxima de descarga: 40 kA
- d) Nível de proteção de tensão: $U_p \leq 5,5$ kV
- e) Tempo de resposta: ≤ 25 ns

Considerando que o DPS selecionado apresenta $U_p = 5,5$ kV, e admitindo-se que os inversores utilizados na instalação possuam $U_w \approx 8$ kV, novamente, atendendo aos requisitos mínimos da norma IEC 60664-1.

Portanto, o valor de $U_p < U_w$, então proteção é considerada adequada, garantindo que a tensão residual aplicada aos inversores permaneça dentro de limites suportáveis. Permitindo que as correntes de surto associadas a descargas atmosféricas ou acoplamentos eletromagnéticos sejam desviadas para a malha de aterramento, evitando que essas sobretensões atinjam os terminais de entrada dos inversores.

4 RESULTADOS E ANÁLISE DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do projeto e da implantação do SPDA aplicado à usina fotovoltaica Naque I. São analisados os resultados associados à implementação do sistema de captação, aterramento e dispositivos de proteção contra surtos, bem como o comportamento da instalação frente a eventos atmosféricos registrados após a conclusão do projeto.

A análise considera tanto os aspectos técnicos do sistema implantado quanto as evidências observadas durante o período de operação da usina após a instalação do SPDA. Dessa forma, busca-se avaliar a eficácia das soluções adotadas no projeto em relação à proteção dos equipamentos da planta fotovoltaica, à continuidade operacional do sistema de geração e à mitigação dos efeitos associados a descargas atmosféricas na região de implantação do empreendimento.

4.1 Resultado da Implantação do Sistema de Proteção

O SPDA projetado para a usina fotovoltaica Naque I foi implantado no mês de agosto de 2024, seguindo os critérios técnicos definidos no capítulo anterior e em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5419:2015.

O sistema implementado é composto por 43 mastros de captação, com altura livre de 4,3 m acima do solo, confeccionados em aço galvanizado a fogo, distribuídos ao longo da área total da usina, que possui aproximadamente 12.000 m². Esses mastros atuam como elementos captadores destinados à interceptação das descargas atmosféricas antes que estas possam atingir diretamente os módulos fotovoltaicos ou demais equipamentos da instalação.

Os mastros de captação são interligados por meio de uma malha de aterramento em aço galvanizado encordado com seção de 70 mm², instalada ao nível do solo e responsável pela condução segura das correntes provenientes das descargas atmosféricas até o sistema de dissipação no terreno. Essa malha também promove a equipotencialização das estruturas metálicas da usina, reduzindo diferenças de potencial perigosas que poderiam surgir durante a ocorrência de

eventos atmosféricos.

A configuração final do sistema foi definida com base no método da esfera rolante, adotando-se o raio correspondente à Classe IV de proteção, conforme estabelecido pela ABNT NBR 5419. A distribuição dos mastros e a altura adotada garantem que toda a área ocupada pelos módulos fotovoltaicos permaneça dentro do volume de proteção do SPDA, assegurando que descargas atmosféricas incidentes na região sejam preferencialmente interceptadas pelos captadores instalados.

Dessa forma, o sistema implantado proporciona proteção tanto para os equipamentos da planta fotovoltaica quanto para as estruturas metálicas da instalação, contribuindo para a redução dos riscos associados a descargas atmosféricas e para o aumento da confiabilidade operacional da usina.

4.2 Registro de Evento Atmosférico

Desde a implantação do SPDA, a usina vem sendo acompanhada quanto ao comportamento do sistema de proteção durante sua operação normal.

No mês de janeiro de 2025, foi registrado um evento atmosférico nas proximidades da região da usina. A ocorrência foi identificada por meio da atuação dos dispositivos de proteção contra surtos (DPS) instalados no lado de corrente alternada (CA) da instalação, os quais apresentaram sinais de degradação e posterior substituição, característicos da absorção de energia associada a sobretensões transitórias.

A atuação dos DPS indica a ocorrência de sobretensões transitórias induzidas ou conduzidas, possivelmente associadas a descargas atmosféricas nas proximidades da instalação ou nas linhas elétricas conectadas ao sistema. Esses dispositivos têm como função limitar os níveis de sobretensão que podem atingir os equipamentos da usina, desviando as correntes de surto para o sistema de aterramento.

Após a ocorrência do evento, foi realizada inspeção nos principais

equipamentos da instalação, incluindo inversores, módulos fotovoltaicos, sistemas de monitoramento e demais componentes do sistema elétrico, não sendo identificados danos ou falhas operacionais decorrentes do evento atmosférico.

Esse comportamento evidencia que o conjunto formado pelo SPDA externo e pelos dispositivos de proteção contra surtos desempenhou adequadamente sua função de mitigação dos efeitos das descargas atmosféricas, contribuindo para a preservação dos equipamentos da usina e para a continuidade da operação do sistema de geração.

4.3 Avaliação Técnica do Sistema de Proteção

A ocorrência do evento atmosférico registrada após a implantação do SPDA fornece um indicativo prático do comportamento do sistema de proteção projetado para a usina fotovoltaica. A atuação dos dispositivos de proteção contra surtos observada durante o evento demonstra que o sistema foi capaz de limitar as sobretensões transitórias associadas à descarga atmosférica, desviando a energia do surto para o sistema de aterramento e impedindo que níveis perigosos de tensão atingissem os equipamentos da instalação.

A ausência de danos aos inversores, módulos fotovoltaicos e demais componentes eletrônicos após o evento indica que o conjunto formado pelo SPDA externo e pelos dispositivos de proteção contra surtos atuou de forma adequada na mitigação dos efeitos das descargas atmosféricas. Esse comportamento está alinhado com os princípios estabelecidos pela ABNT NBR 5419, que recomenda a integração entre sistemas de captação, aterramento e proteção contra surtos para a redução dos riscos associados a fenômenos atmosféricos.

Além da preservação dos ativos da usina, a implementação do sistema de proteção contribui para o aumento da confiabilidade operacional da planta fotovoltaica, reduzindo a probabilidade de interrupções na geração de energia decorrentes de eventos atmosféricos. Adicionalmente, o sistema implantado também contribui para a segurança das equipes de operação e manutenção, ao reduzir diferenças de potencial perigosas e os riscos associados à incidência de descargas

atmosféricas na área da instalação.

4.4 Avaliação Econômica do Projeto

A implantação do SPDA representou um investimento relativamente reduzido quando comparado ao valor total dos equipamentos presentes na usina fotovoltaica. O custo total do sistema de proteção foi inferior ao valor de aquisição de um único inversor solar utilizado na instalação.

Considerando que a usina possui diversos equipamentos de elevado valor agregado, como módulos fotovoltaicos, inversores, transformadores e sistemas eletrônicos de monitoramento, a implementação do SPDA se apresenta como uma medida economicamente justificável para mitigação dos riscos associados a descargas atmosféricas.

Além da proteção patrimonial, deve-se considerar também os impactos econômicos indiretos associados a possíveis falhas causadas por surtos elétricos ou descargas atmosféricas, como interrupções na geração de energia, custos de manutenção corretiva e perdas de receita decorrentes da indisponibilidade da planta.

Dessa forma, mesmo representando um investimento relativamente baixo dentro do contexto do empreendimento, o sistema de proteção implantado contribui significativamente para a redução de riscos operacionais e financeiros, aumentando a confiabilidade da usina e preservando a integridade dos ativos envolvidos na geração de energia.

Assim, sob o ponto de vista técnico e econômico, a implantação do SPDA demonstrou ser uma solução eficiente e viável, proporcionando proteção adequada à infraestrutura da usina e contribuindo para a continuidade operacional do empreendimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e analisar um projeto de SPDA aplicado a uma usina fotovoltaica de 1,4 MWp localizada no município de Naque, no estado de Minas Gerais. A partir da aplicação dos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 5419:2015, foi possível realizar a análise de risco da instalação, definir a classe de proteção adequada e desenvolver o dimensionamento do sistema de captação e aterramento para a proteção da infraestrutura da usina.

Os resultados obtidos demonstraram que a adoção de um SPDA de Classe IV, associado à utilização do método da esfera rolante e à implantação de uma malha de aterramento adequada, é capaz de fornecer níveis satisfatórios de proteção para instalações fotovoltaicas de características semelhantes. A implementação do sistema permitiu garantir que os módulos fotovoltaicos e demais equipamentos da usina permanecessem dentro do volume de proteção definido pela norma.

Além da análise teórica e do desenvolvimento do projeto, o estudo também contou com a observação do comportamento do sistema após sua implantação. Durante o período de monitoramento da usina, foi registrado um evento atmosférico nas proximidades da instalação, evidenciado pela atuação dos dispositivos de proteção contra surtos. A ausência de danos aos equipamentos principais da usina após esse evento indica que o sistema de proteção implantado atuou de forma eficaz na mitigação dos efeitos associados às descargas atmosféricas.

Sob o ponto de vista econômico, o investimento necessário para a implantação do SPDA mostrou-se relativamente reduzido quando comparado ao valor dos equipamentos protegidos, evidenciando que a adoção desse tipo de sistema representa uma solução viável para a proteção patrimonial e para a continuidade operacional de usinas fotovoltaicas.

Dessa forma, o estudo de caso reforça a importância da correta aplicação das normas técnicas e do desenvolvimento de projetos específicos para cada instalação, considerando fatores como características construtivas, condições ambientais e

densidade de descargas atmosféricas da região. A adoção de sistemas de proteção adequadamente dimensionados contribui não apenas para a preservação dos ativos da usina, mas também para a segurança das equipes de operação e manutenção e para o aumento da confiabilidade do sistema de geração de energia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa N° 1059/2023. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.059-de-7-de-fevereiro-de-2023-463828999>. Acesso em: 04 abr. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas — parte 02: Gerenciamento de risco. Rio de Janeiro, 2015. 100 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR IEC 61643-32: Dispositivos de proteção contra surtos em baixa tensão – Parte 32: Dispositivos de proteção contra surtos conectados ao lado em corrente contínua de instalações fotovoltaicas – Princípios de seleção e aplicação. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de Projeto. São Paulo: ABNT, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE, 2026). Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/brasil-registra-aumento-de-raios-em-todo-o-territorio-nacional>. Acesso em: 04 abr. 2026.

DEHN + SÖHNE. *Lightning protection guide*. 3. ed. atualizada. Neumarkt: DEHN + SÖHNE GmbH + Co. KG, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2025: Relatório Síntese (ano-base 2024). Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ENGINEERING INSTITUTE OF TECHNOLOGY - EIT. Lightning protection, surge protection and earthing manual. Perth: Engineering Institute of Technology, 2018.

International Electrotechnical Commission - IEC 60664-1: Coordenação de isolamento para equipamentos em sistemas de alimentação de baixa tensão, 2020.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Std 81-2012: Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system. New York: IEEE, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Portal institucional. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe>. Acesso em: 04 abr. 2026.

MODENA, J.; SUETA, H. Aterramentos elétricos. O Setor Elétrico, 2011.

RAKOV, Vladimir A.; UMAN, Martin A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

VISACRO FILHO, Silvio. Descargas atmosféricas uma abordagem de engenharia. [S. l.]: Artliber Editora, São Paulo, 2005. v. 1.

VISACRO FILHO, Silvio. Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber, 2002.

Anexo I - Planta de Situação



Anexo II - Diagrama Trifilar Geral

