



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



Jhonifer Lourenço Miranda Marques

**ATERRAMENTO SPDA EM MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

OURO PRETO  
2025

Jhonifer Lourenço Miranda Marques

## **ATERRAMENTO SPDA EM MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E  
AUTOMACAO



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Jhonifer Lourenço Miranda Marques**

**Aterramento SPDA em Microgeração Fotovoltaica**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 10 de setembro de 2025.

Membros da banca

Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. João Carlos Vilela de Castro - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Universidade Federal de Ouro Preto

Danny Augusto Vieira Tonidandel, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/11/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Danny Augusto Vieira Tonidandel, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/11/2025, às 20:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0978218** e o código CRC **D014E92F**.

## RESUMO

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, conhecido como SPDA, é um conjunto de medidas técnicas aplicadas em edificações e instalações elétricas com o objetivo de minimizar ou evitar os impactos causados por raios. Diante do crescimento expressivo da energia solar fotovoltaica, especialmente na microgeração, torna-se essencial implementar o SPDA para garantir a segurança dos indivíduos, da estrutura física e dos equipamentos eletrônicos envolvidos. Este estudo teve como principal objetivo desenvolver um projeto de aterramento com aplicação do SPDA em uma microgeração fotovoltaica. Para isso, foram abordados temas como descargas atmosféricas, os diferentes níveis de proteção e os subsistemas que compõem o SPDA, incluindo captação, descida e aterramento. Também foi explorado o conceito de microgeração fotovoltaica, com destaque para os sistemas *on grid*, *off grid* e híbrido, além da classificação entre microgeração, minigeração e usinas solares. O projeto técnico incluiu cinco propostas principais, detalhando os padrões de hastes de aterramento e condutores utilizados, com apoio do software SolidWorks Electrical Schematics, conforme apresentado nos anexos. A comparação com a literatura mostrou que os dados obtidos estão alinhados com estudos anteriores, reforçando a validade dos resultados. Conclui-se que a implementação do SPDA em sistemas fotovoltaicos é essencial, representando um investimento em segurança, confiabilidade e durabilidade, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade da energia solar a longo prazo.

**Palavras-chave:** Aterramento. Energia fotovoltaica. Microgeração. SPDA.

## ABSTRACT

The Lightning Protection System (LPS) is a technical requirement designed to minimize or prevent the impacts of atmospheric discharges. With the exponential growth of solar photovoltaic energy, especially in microgeneration systems, it has become essential to implement LPS to protect individuals, buildings, and electronic equipment. This study aimed to develop a project focused on grounding and LPS applied to a photovoltaic microgeneration system. To achieve this, the first chapter addressed the nature of atmospheric discharges, followed by a chapter on LPS grounding, describing the different levels of protection and its subsystems for capture, descent, and grounding. The third chapter focused on photovoltaic microgeneration, starting with the basic concepts of solar energy, including photovoltaic systems, on grid, off grid, and hybrid configurations, the definitions of microgeneration, minigeneration, and photovoltaic plants, and finally, the role of LPS in solar systems. The project presented five main designs, detailing the standard specifications for grounding rods and conductors, illustrated in the annexes developed using SolidWorks Electrical Schematics. When compared to literature, the results aligned with previous studies, confirming the validity of the findings. In conclusion, the implementation of LPS in photovoltaic panels is essential and should be considered an investment in safety, reliability, and system durability. It minimizes risks to the population and supports the long-term sustainability of solar energy. As a recommendation for future studies, it is suggested to include measurements of soil resistivity and a detailed analysis of the geographic and climatic conditions of photovoltaic installations, as these factors directly influence the efficiency and reliability of the grounding system and the overall performance of LPS in different environments.

**Keywords:** Grounding. Photovoltaic energy. Microgeneration. Lightning Protection System (LPS).

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de SPDA. ....	13
Figura 2 - Método de malhas no topo de uma edificação.....	17
Figura 3 - Método do ângulo de proteção através de um mastro captor. ....	18
Figura 4 - Gráfico para consulta dos ângulos de proteção. ....	19
Figura 5 - Esfera rolante com edificação menor que 60m.....	20
Figura 6 - Esfera rolante com edificação maior que 60m.....	20
Figura 7 - Exemplo do anel de aterramento não natural. ....	22
Figura 8 - Incremento anual (%) e a evolução da potência instalada de geração solar fotovoltaica no mundo (GW).....	25
Figura 9 - Evolução da potência instalada de geração solar fotovoltaica nos 10 principais países (GW).....	26
Figura 10 - Potencial de usufruto da energia solar em diferentes regiões do planeta. ....	27
Figura 11 - Potencial fotovoltaico brasileiro. ....	28
Figura 12 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	30
Figura 13 - Ilustração dos sistemas de instalação das células solares comerciais. a) <i>on grid</i> . b) <i>off grid</i> . ....	333
Figura 14 - <i>Layout</i> de um SPDA de um sistema fotovoltaico. ....	366
Figura 15 - Curva da tensão elétrica no solo. ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de estruturas e nível de SPDA. ....	15
Tabela 2 - Valores dos Raios da Esfera Rolante. ....	16
Tabela 3 - Seções mínimas dos materiais do SPDA.....	211
Tabela 4 - Relação das medições de aterramento nos cinco projetos.....	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	8
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	11
2.1. Descargas Atmosféricas	11
2.2. Aterramento SPDA	12
2.3. Nível de proteção do SPDA	14
2.4. Subsistemas de um SPDA	15
2.4.1. Subsistema de Capitação	15
2.4.2. Subsistema de Descida	21
2.4.3. Subsistema de Aterramento	22
2.5. Energia Solar	23
2.6. Energia Solar Fotovoltaica	28
2.6.1. Vantagens do Sistema Fotovoltaico	30
2.6.2. Desvantagens do Sistema Fotovoltaico	31
2.7. Sistemas <i>On grid</i> , <i>Off grid</i> e Híbrido	32
2.8. Minigeração, Microgeração e Usinas Fotovoltaicas	34
2.9. SPDA em Sistemas Fotovoltaicos	35
<b>3. METODOLOGIA</b>	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	39
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	43
<b>REFERÊNCIAS</b>	44
<b>ANEXO I – Diagrama Unifilar 1</b>	47
<b>ANEXO II – Diagrama Unifilar 2</b>	48
<b>ANEXO III – Diagrama Unifilar 3</b>	49
<b>ANEXO IV – Diagrama Unifilar 4</b>	50
<b>ANEXO V – Diagrama Unifilar 5</b>	51

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, a energia elétrica passou a ocupar um papel indispensável no dia a dia das pessoas e das organizações. Seja em grandes indústrias, comércios, empresas ou mesmo em residências e pequenos negócios, ela é essencial para o funcionamento das atividades rotineiras. Ao mesmo tempo, o crescimento acelerado das cidades e a concentração populacional nos centros urbanos aumentam a responsabilidade com a segurança das instalações elétricas. Nesse contexto, torna-se fundamental investir em sistemas de aterramento bem projetados, capazes de prevenir falhas, proteger os equipamentos e preservar a integridade física dos usuários. Além disso, esses sistemas contribuem diretamente para a estabilidade e continuidade do fornecimento de energia, garantindo eficiência e confiabilidade ao longo do tempo (DE OLIVEIRA, 2018).

Os sistemas de aterramento desempenham um papel fundamental na proteção de pessoas, animais e equipamentos contra falhas no sistema elétrico. Essas falhas podem variar desde pequenas fugas de corrente até situações mais graves, como arcos elétricos provocados por fatores externos. Por isso, é essencial que o aterramento seja cuidadosamente projetado e mantido, garantindo não apenas os níveis mínimos de segurança, mas também o funcionamento contínuo e confiável da instalação elétrica como um todo (PETRATO; PICCINI, 2022).

O Brasil ocupa o primeiro lugar mundial em incidência de raios, registrando cerca de 78 milhões de descargas atmosféricas por ano. Esse número elevado está diretamente relacionado à sua localização geográfica em uma zona tropical, onde as condições climáticas favorecem a formação de tempestades intensas. Diante desse cenário, torna-se fundamental adotar sistemas de aterramento eficientes, capazes de proteger pessoas, animais e equipamentos contra os efeitos das descargas elétricas. Além de promover segurança, essas medidas contribuem para a preservação das instalações e para a continuidade dos serviços de energia, especialmente em áreas densamente povoadas (CARDIM, 2022).

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é uma medida obrigatória no Brasil, exigida pelo Corpo de Bombeiros e regulamentada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 5419. Sua principal função é reduzir ou até mesmo evitar os impactos causados por raios, que podem provocar sérios danos às edificações, como incêndios, explosões e prejuízos materiais. Em situações mais críticas, essas descargas representam riscos reais à vida de pessoas e animais. Por isso, a instalação adequada do SPDA é essencial para garantir a segurança das estruturas e de todos que circulam por elas (ABNT, 2015).

Existem diferentes configurações e topologias para o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), cada uma projetada para atender a situações específicas com níveis de proteção adequados. Por isso, é fundamental que o profissional responsável pelo projeto tenha pleno domínio das características da obra e das exigências técnicas envolvidas, a fim de definir e implementar o sistema mais apropriado. Essa escolha criteriosa garante não apenas a segurança da estrutura e de seus ocupantes, mas também a conformidade com as normas vigentes e a eficiência do sistema ao longo do tempo

O Brasil possui um dos maiores potenciais do mundo para a geração de energia solar, graças à sua localização privilegiada e à abundância de radiação solar ao longo do ano. Nos últimos anos, essa fonte limpa e renovável tem ganhado espaço na matriz elétrica nacional, impulsionada por seus inúmeros benefícios em relação às fontes convencionais, como o carvão e o gás natural. Por ser considerada inesgotável do ponto de vista humano, a energia solar representa uma alternativa estratégica e sustentável, com capacidade de transformar o cenário energético brasileiro e contribuir para a redução dos impactos ambientais (BEZERRA, 2023).

Uma das grandes vantagens da energia solar é sua versatilidade. Ela pode ser integrada ao sistema da concessionária elétrica, ajudando a reduzir significativamente os custos com o consumo de energia. Além disso, é uma solução eficiente para regiões remotas ou de difícil acesso, onde a instalação de torres e cabos elétricos é inviável. Nesses locais, a energia gerada pelos painéis solares pode ser armazenada em baterias, garantindo o abastecimento mesmo em períodos sem sol. Essa autonomia energética contribui diretamente para a melhoria da qualidade de vida dos moradores, oferecendo acesso à eletricidade de forma sustentável e contínua (DA SILVA; ARAÚJO, 2022).

Diante desse cenário, torna-se evidente a relevância da aplicação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em instalações de microgeração fotovoltaica destinadas ao consumo próprio. Tal medida assegura a proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis, que podem ser comprometidos por picos de tensão provocados por descargas atmosféricas, além de contribuir significativamente para a segurança de moradores ou trabalhadores ao reduzir os riscos de incêndios. Ademais, o SPDA evita interrupções no fornecimento de energia, garantindo uma operação contínua e confiável, preservando a eficiência do sistema e protegendo o investimento realizado, de modo a assegurar uma vida útil satisfatória dos componentes ao longo do tempo.

Diante da relevância crescente da energia solar como alternativa sustentável e da necessidade de garantir a segurança das instalações elétricas frente às descargas atmosféricas, este trabalho tem como objetivo desenvolver cinco projetos aplicando o Sistema de Proteção

contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em sistemas de microgeração fotovoltaica voltados ao consumo próprio. Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma revisão de literatura abordando os fundamentos e as principais topologias do SPDA, bem como os conceitos relacionados à energia solar e à microgeração fotovoltaica. Em seguida, foram elaborados os projetos com base nessas tecnologias, e por fim, discutiu-se a metodologia adotada em comparação com estudos semelhantes disponíveis na literatura técnica.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Descargas Atmosféricas

O termo “descarga atmosférica” refere-se a três tipos principais de fenômenos elétricos: as descargas intra nuvens, que ocorrem dentro de uma mesma nuvem; as internuvens, que se manifestam entre nuvens próximas; e as descargas entre nuvens e o solo, que são as mais conhecidas por causarem os raios visíveis. Essas últimas podem ocorrer tanto no sentido nuvem-terra quanto no sentido terra-nuvem, dependendo da polaridade das cargas envolvidas. Os eventos acontecem após um processo de eletrização das nuvens, provocado pela movimentação e separação de cargas elétricas em seu interior. Embora estejam diretamente ligados às condições climáticas, as descargas atmosféricas também possuem uma abordagem meteorológica relevante para o desenvolvimento de projetos de proteção, como o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). Compreender a dinâmica desses fenômenos é essencial para projetar sistemas eficazes que garantam a segurança de edificações e pessoas frente aos riscos associados às tempestades (PETRATO; PICCINI, 2022).

A atmosfera terrestre, em condições normais, apresenta uma rigidez dielétrica em torno de  $3 \times 10^6$  V/m, o que a caracteriza como um meio isolante para baixas tensões. Isso ocorre porque as moléculas presentes no ar possuem poucos elétrons livres, dificultando a condução de corrente elétrica. No entanto, essa rigidez não é constante: fatores como umidade, temperatura e pressão podem influenciar diretamente sua variação, tornando o ar mais ou menos propenso à condução elétrica. Essas alterações são determinantes para a ocorrência de descargas atmosféricas, como os raios. Curiosamente, menos de 10% das descargas entre nuvens e o solo são provocadas por cargas positivas, sendo a maioria originada por regiões de carga negativa nas nuvens. (RAKOV; MARTIN, 2003).

Mesmo os materiais considerados isolantes, como os dielétricos, podem se tornar condutores quando submetidos a um campo elétrico suficientemente intenso. Nessas condições, ocorre uma diferença de potencial capaz de polarizar a estrutura atômica do material, liberando elétrons que formam um canal ionizado. Com a presença desses elétrons livres, o material passa a oferecer baixa resistência à passagem da corrente elétrica. No caso da atmosfera, quando uma nuvem está fortemente carregada, o campo elétrico gerado pode romper a rigidez dielétrica do ar. Esse rompimento fornece energia suficiente para que os elétrons das moléculas do ar se desprendam, permitindo que a corrente elétrica se propague pelo canal ionizado — processo que dá origem às descargas atmosféricas, como os raios (PETRATO; PICCINI, 2022).

A propagação dos elétrons durante uma descarga atmosférica ocorre de maneira tão rápida que o olho humano é incapaz de distinguir suas etapas. O processo se inicia com o chamado raio precursor, que se desloca em direção ao solo a uma velocidade impressionante, próxima de 1.500 km/s. Esse raio inicial cria um canal ionizado de baixa resistência entre a nuvem e a terra, funcionando como um caminho condutor. É por esse canal que ocorre a descarga principal — conhecida como descarga de retorno — que, diferentemente do raio precursor, parte do solo em direção à nuvem com uma velocidade ainda mais elevada, chegando a cerca de 30.000 km/s. Esse fenômeno é o que geralmente percebemos como o clarão intenso de um raio (RAKOV; MARTIN, 2003).

Diante da frequência e dos riscos associados às descargas atmosféricas, tornou-se essencial a padronização dos sistemas de proteção, especialmente por meio da elaboração de laudos técnicos que comprovem a conformidade das instalações com a norma ABNT NBR 5419 publicada no ano de 2015. Esses documentos devem registrar de forma detalhada as inspeções realizadas, as medições efetuadas, bem como a verificação da instalação e do sistema de aterramento. A análise técnica leva em consideração diversos fatores, como o nível de proteção exigido para o SPDA, a probabilidade de ocorrência de raios na região, as características físicas da edificação e das linhas elétricas, além da densidade de descargas atmosféricas. Também são avaliados aspectos como o dimensionamento dos materiais utilizados, garantindo que o sistema seja eficiente, seguro e esteja em conformidade com os parâmetros normativos (MINTO; NUNES, 2022).

## 2.2. Aterramento SPDA

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) foi criado com o objetivo de proteger edificações e as pessoas que ocupam esses espaços dos riscos provocados por raios, que podem causar desde danos materiais até acidentes fatais. Para garantir que essa proteção seja eficiente e padronizada, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu a norma NBR 5419. Essa norma define todos os componentes que integram o SPDA, tanto os elementos externos, como captores e condutores de descida, quanto os internos, como sistemas de equipotencialização e aterramento, assegurando que o projeto e a instalação estejam em conformidade com os critérios técnicos necessários para minimizar os impactos das descargas atmosféricas (ABNT, 2015).

O dimensionamento dos componentes de um Sistema de Proteção contra Descargas

Atmosféricas (SPDA) deve levar em conta uma série de fatores, como as características físicas da edificação, as condições naturais da região e a finalidade do local. Para garantir a segurança das pessoas e da estrutura, é essencial que o projeto esteja alinhado com as exigências legais e normativas. Em locais considerados de risco, a ausência de um SPDA adequado deixa a construção vulnerável à incidência direta ou indireta de raios, o que pode resultar em prejuízos materiais significativos e, em casos mais graves, colocar vidas em perigo. Por isso, antes da implantação do sistema, é indispensável realizar uma avaliação de risco criteriosa. Essa análise permite identificar os fatores técnicos e ambientais que influenciam a proteção, orientando o desenvolvimento de um projeto eficiente e seguro (MAMEDE, 2017).

A instalação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) não tem como função impedir ou atrair raios, mas sim reduzir os danos que esses fenômenos podem causar às estruturas e às pessoas. Segundo Araújo (2010), o SPDA é dividido em dois sistemas complementares: o sistema externo e o sistema interno. O sistema externo é composto por subsistemas responsáveis por captar a descarga elétrica, conduzi-la até o solo e dissipá-la com segurança — incluindo os captores, os condutores de descida e o aterramento elétrico. Já o sistema interno é formado por dispositivos que atuam na proteção contra os efeitos eletromagnéticos gerados pela corrente de descarga, como surtos e tensões induzidas, protegendo equipamentos e pessoas dentro da edificação. As funções específicas de cada tipo de SPDA, seus subsistemas e os métodos de aplicação estão ilustrados na Figura 1, que complementa essa abordagem técnica.

Figura 1 - Tipos de SPDA.

	<b>FINALIDADE</b>	<b>SUBSISTEMA</b>	<b>MÉTODO</b>
<b>SPDA EXTERNO</b>	Captar a descarga	Captação	Esfera rolante
			Ângulo de proteção
			Malhas
	Conduzir a descarga até o solo	Descida	
	Dispersar a descarga no solo	Aterramento	
<b>SPDA INTERNO</b>	Evitar choques e incêndio	Equipotencialização	

Fonte: PETRATO; PICCINI, 2022.

### 2.3. Nível de proteção do SPDA

O conceito de Nível de Proteção no Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) está diretamente relacionado à eficiência do sistema em minimizar os impactos causados por raios. Em outras palavras, ele representa a probabilidade de o SPDA proteger uma determinada área contra os efeitos das descargas atmosféricas. De acordo com a norma ABNT NBR 5419, esses níveis são classificados de 1 a 4, sendo o nível 1 o mais rigoroso e, portanto, o que oferece maior grau de proteção. A escolha do nível adequado depende da intensidade das correntes de raio que se espera atingir a edificação. Com base nessa estimativa, o SPDA é dimensionado para captar a descarga elétrica e conduzi-la com segurança até o solo, evitando danos à estrutura e aos seus ocupantes (ABNT, 2015).

Diversos fatores influenciam diretamente na definição do nível de proteção exigido para um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Entre eles, destacam-se as chamadas estruturas especiais, que podem apresentar diferentes tipos de risco: desde áreas com risco confinado, passando por edificações que oferecem perigo aos arredores, até aquelas que representam ameaça ao meio ambiente. Cada uma dessas situações exige uma análise criteriosa para determinar o grau de proteção necessário, conforme orientações técnicas e normativas (PETRATO; PICCINI, 2022). Com base nessa avaliação, a Tabela 1 apresenta a correlação entre os tipos de estrutura e o nível de proteção recomendado para o SPDA.

Tabela 1 - Classificação de estruturas e nível de SPDA.

<b>Classificação da Estrutura</b>	<b>Tipo de Estrutura</b>	<b>Nível de Proteção (SPDA)</b>
Estruturas comuns	Teatros, lojas de departamentos, escolas, áreas esportivas e igrejas	II
	Bancos, companhias comerciais, companhias de seguro, entre outros	
	Hospitais, prisões, casas de repouso	
	Museus, locais arqueológicos	
	Residências e indústrias	III
	Fazendas e estabelecimentos agropecuários	III / IV
Estruturas com risco confinado	Estações de telecomunicação, usina elétrica, indústria com risco de incêndio	
Estruturas com risco para os arredores	Refinaria, posto de combustíveis, fábrica de fogos, fábrica de munição	I
Estruturas com risco para o meio ambiente	Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios químicos	

Fonte: ABNT, 2015.

#### 2.4. Subsistemas de um SPDA

Para garantir a proteção eficaz contra descargas atmosféricas, o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é estruturado em três subsistemas principais: captação, descida e aterramento. Cada um desses componentes desempenha um papel essencial na condução segura da corrente elétrica gerada pelos raios, desde o momento em que são interceptados até sua dissipação no solo. A seguir, cada subsistema será abordado individualmente, destacando suas funções, características técnicas e importância dentro do conjunto do SPDA.

##### 2.4.1. Subsistema de Captação

A captação é a primeira etapa do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) e tem como função interceptar os raios antes que atinjam diretamente a estrutura da

edificação. No caso de sistemas externos, essa captação é visível e composta por elementos instalados na parte superior do imóvel, com atenção especial às áreas mais expostas, como quinas e bordas do telhado. Em algumas situações, coberturas metálicas e telhados podem funcionar como captadores naturais, desde que atendam aos critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 5419, sendo devidamente integrados ao subsistema de captação (PETRATO; PICCINI, 2022).

Os componentes utilizados para essa função podem ser classificados em dois grupos principais: os captadores verticais, como mastros, postes e mini captadores de inserção, e os captadores horizontais, como condutores dispostos ao longo da cobertura e malhas condutoras. A combinação entre captadores verticais e horizontais é bastante comum e recomendada, pois amplia a área de proteção e melhora a eficiência do sistema, garantindo que as descargas sejam conduzidas de forma segura para as próximas etapas do SPDA (PETRATO; PICCINI, 2022).

Para definir a área de cobertura e o posicionamento ideal dos captadores, a norma ABNT NBR 5419 estabelece três métodos de cálculo: o método do ângulo de proteção, o método das malhas e o método da esfera rolante. Cada um desses métodos é aplicado conforme a classe de proteção exigida para a edificação, levando em conta fatores como o nível de risco, a atividade exercida no local, a presença de materiais explosivos, o valor histórico ou cultural da estrutura, entre outros critérios técnicos. A escolha da classe de proteção influencia diretamente nas dimensões das malhas e no raio da esfera rolante (ABNT, 2015), conforme apresentado na Tabela 2, garantindo que o sistema seja dimensionado de forma segura e eficaz.

Tabela 2 - Valores dos Raios da Esfera Rolante.

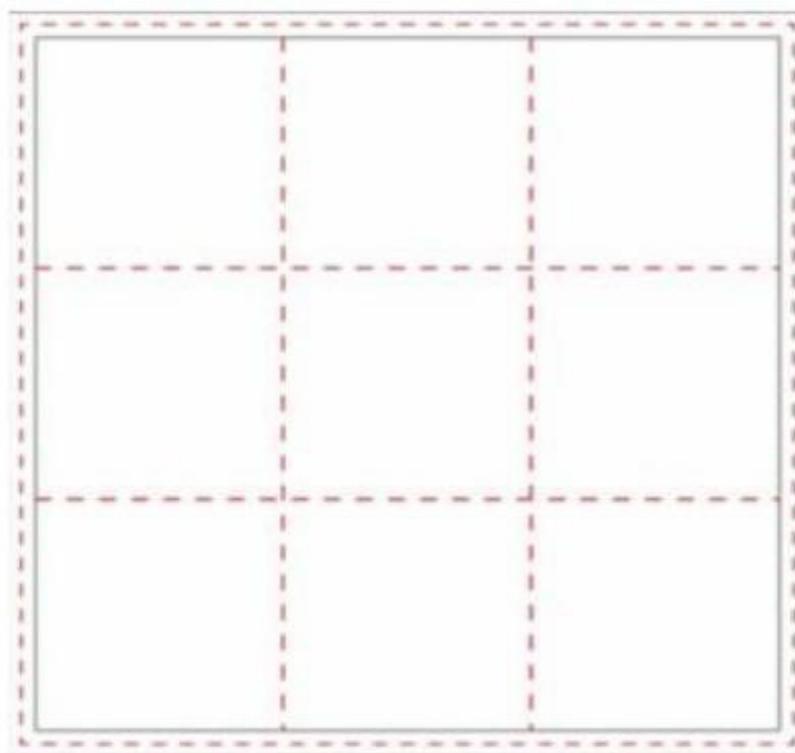
Classe do SPDA	Método de Proteção	
	Raio da esfera rolante – R (m)	Máximo afastamento dos condutores de malha (m)
I	20	5 x 5
II	30	10 x 10
III	45	15 x 15
IV	60	20 x 20

Fonte: ABNT, 2015.

A Gaiola de Faraday, representada na Figura 2, é um dos métodos mais tradicionais e eficazes de captação no Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), sendo composta por uma malha de condutores metálicos instalada no topo da edificação e distribuída

ao longo de todo o seu perímetro. Essa malha, geralmente formada por cabos de cobre nu ou chapas de alumínio, deve respeitar os espaçamentos máximos definidos pela norma ABNT NBR 5419, sendo especialmente indicada para telhados planos ou com superfícies laterais regulares, sem curvaturas acentuadas. A função da Gaiola de Faraday é criar uma zona de proteção que distribui uniformemente as cargas elétricas provenientes dos raios, evitando que elas atinjam diretamente a estrutura interna da edificação e garantindo maior segurança às pessoas e aos equipamentos no interior do imóvel (PETRATO; PICCINI, 2022).

Figura 2 - Método de malhas no topo de uma edificação



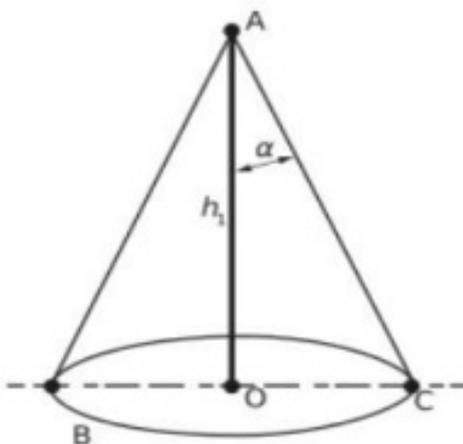
Fonte: PETRATO; PICCINI, 2022.

Conforme demonstrado na Figura 2, os condutores horizontais de captação são os fios metálicos que formam a malha, sendo instalados paralelamente e perpendicularmente entre si, criando os quadrados ou retângulos uniformes. As linhas internas da malha apresentam os caminhos por onde a corrente elétrica de uma descarga atmosférica é conduzida até o ponto de descida. Já as linhas de contornos mais espessas indicam o perímetro da malha, ou seja, a borda da cobertura da edificação em que há condutores para garantir a segurança total. Por fim, os pontos de interligação são onde os condutores são conectados eletricamente para garantir a continuidade (PETRATO; PICCINI, 2022).

O método do Ângulo de Proteção, também conhecido como Método Franklin, é baseado

na utilização de captosres pontiagudos instalados em mastros verticais, aproveitando o chamado “efeito das pontas” para interceptar as descargas atmosféricas. Quanto maior a altura do captor, maior será o volume de proteção gerado ao seu redor, que assume a forma de um cone — representado geometricamente por um triângulo retângulo em torno do mastro, conforme ilustrado na Figura 3. Esse método é especialmente indicado para edificações com formato simples, baixa altura e pequena área horizontal, pois permite a utilização de poucos captosres, tornando o projeto mais enxuto e economicamente viável. A eficiência da proteção está diretamente relacionada à altura dos mastros e ao ângulo de cobertura definido pela norma ABNT NBR 5419, que varia conforme o nível de proteção exigido para a estrutura (MAMEDE, 2017).

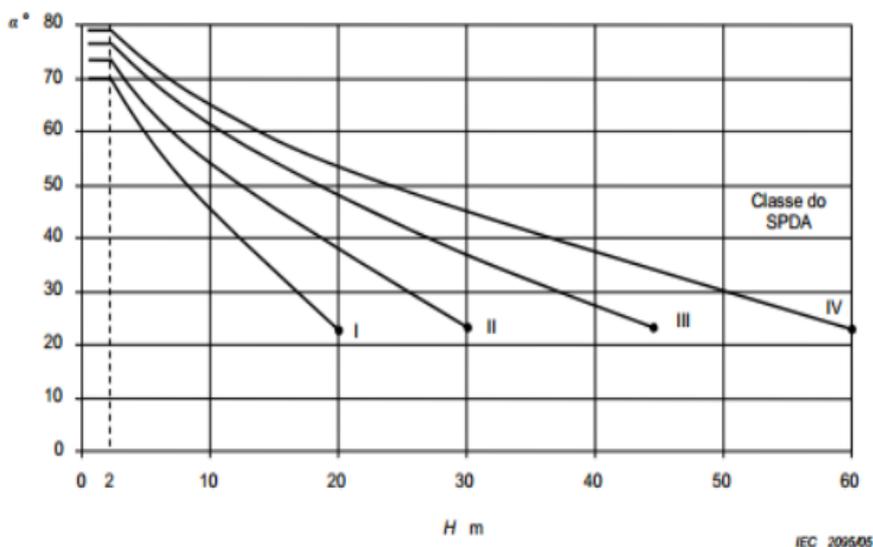
Figura 3 - Método do ângulo de proteção através de um mastro captor



**Fonte:** ABNT, 2015.

No método do Ângulo de Proteção, a geometria envolvida é fundamental para definir a zona de cobertura oferecida pelo captor. O ponto A representa o topo do captor, enquanto o ponto B corresponde ao plano de referência — geralmente o nível da cobertura da edificação. A linha OC indica o raio da área protegida, formando a base do cone de proteção. Já o valor  $h_1$  refere-se à altura do mastro em relação ao plano de referência. O ângulo  $\alpha$ , por sua vez, é variável e depende diretamente da classe de proteção definida para o SPDA, bem como da altura total H da estrutura. Esses elementos devem ser alinhados conforme demonstrado na Figura 4, garantindo que o volume protegido esteja corretamente dimensionado e em conformidade com os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 5419 (ALTOQI, 2021).

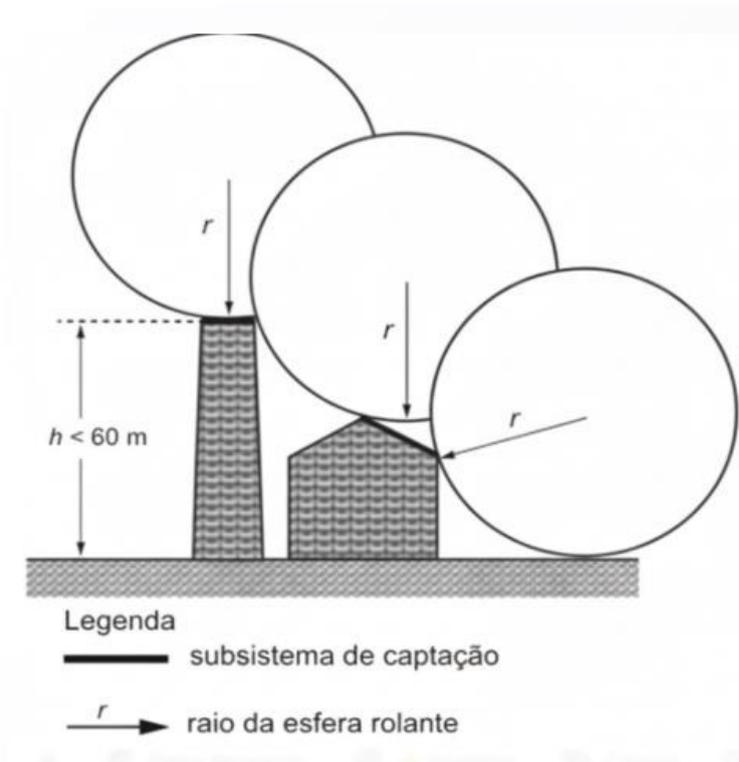
Figura 4 - Gráfico para consulta dos ângulos de proteção



Fonte: ALTOQI, 2021.

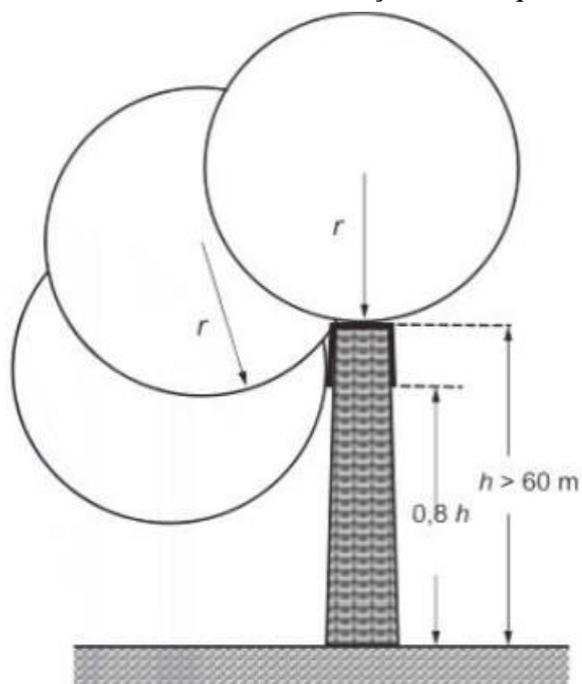
O método da esfera rolante, também conhecido como modelo eletro geométrico, é amplamente utilizado em edificações com grande altura ou arquitetura complexa. Esse método consiste em simular o movimento de uma esfera fictícia sobre toda a superfície da estrutura — incluindo topo, fachadas e saliências — em todas as direções possíveis. A área é considerada protegida quando nenhum ponto da edificação, exceto os elementos do subsistema de captação, entra em contato com essa esfera. Em outras palavras, a esfera deve “rolar” livremente sobre a estrutura sem tocar partes vulneráveis. Para garantir essa proteção, a análise deve ser feita em todas as faces da construção. Em casos de edificações com mais de 60 metros de altura, a norma recomenda que a proteção alcance pelo menos 20% da altura total da estrutura (SOUZA *et al.*, 2013), conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Esfera rolante com edificação menor que 60m.



Fonte: ABNT, 2015.

Figura 6 - Esfera rolante com edificação maior que 60m



Fonte: ABNT, 2015.

#### 2.4.2. Subsistema de Descida

Os condutores de descida são responsáveis por garantir a continuidade elétrica entre os captosres e o sistema de aterramento, conduzindo a corrente elétrica de forma segura até o solo. Esses elementos podem ser instalados de maneira aparente ou embutida, desde que respeitem os critérios técnicos para evitar riscos como a indução de corrente em condutores próximos ou o centelhamento lateral — fenômenos que podem comprometer a segurança da edificação e de seus ocupantes. Para minimizar esses efeitos secundários, os condutores devem ser distribuídos ao longo da estrutura em caminhos paralelos, com o menor comprimento possível e espaçamento adequado entre si. Essa configuração permite que a corrente seja escoada de forma eficiente, reduzindo a resistência do trajeto e aumentando a confiabilidade do sistema como um todo (PETRATO; PICCINI, 2022).

Eles podem ser classificados de acordo com sua natureza construtiva em naturais ou não naturais. Os condutores naturais são elementos já presentes na estrutura da edificação, como pilares metálicos, armaduras de concreto ou tubulações condutivas (exceto de gás), que podem ser aproveitados para conduzir a corrente elétrica até o sistema de aterramento, desde que atendam aos critérios de continuidade elétrica e dimensões mínimas exigidas pela norma. Já os condutores não naturais são instalados especificamente para essa função, sendo compostos por materiais com condutividade mínima de 98%, como cobre ou alumínio, dispostos em trajetos preferencialmente retilíneos e verticais. Esses condutores devem ser fixados à edificação em intervalos de, no máximo, 2 metros e protegidos contra danos mecânicos até uma altura mínima de 2,5 metros acima do nível do solo, conforme estabelecido pela ABNT NBR 5419:2015 (ABNT, 2015). A Tabela 3 apresenta a correlação entre os tipos de condutores e os requisitos técnicos para sua aplicação.

Tabela 3 - Seções mínimas dos materiais do SPDA

<b>Material</b>	<b>Captor e anéis intermediários (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Descida (altura até 20 m) (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Descida (altura superior a 20 m) (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Eletrodo de aterramento (mm<sup>2</sup>)</b>
Cobre	35	16	35	50
Alumínio	70	25	70	-
Aço galvanizado a quente ou embutido em concreto	50	50	50	80

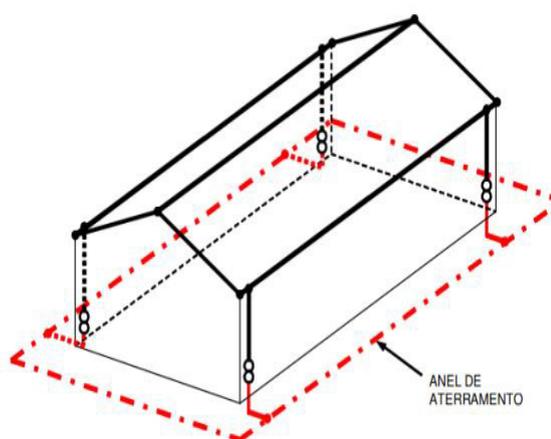
Fonte: ABNT, 2015.

### 2.4.3. Subsistema de Aterramento

O subsistema de aterramento é responsável por conduzir e dissipar, de forma segura, toda a corrente elétrica proveniente das descargas atmosféricas diretamente para o solo. Para que essa transferência ocorra de maneira eficiente, é essencial a presença de uma malha de equipotencialização, que atua reduzindo as diferenças de potencial entre os elementos condutivos da estrutura e minimizando a intensidade dos campos magnéticos gerados. Essa malha contribui para a proteção de pessoas e equipamentos, evitando tensões perigosas de toque e de passo. O sistema de aterramento é geralmente composto por uma combinação de eletrodos horizontais e verticais, estrategicamente posicionados para otimizar a dispersão da corrente elétrica no solo, garantindo baixa resistência e maior segurança operacional (ABNT, 2015).

Em configurações onde se utiliza o subsistema de aterramento não natural, é necessário implementar um anel fechado ao redor de toda a estrutura protegida. Esse anel deve ser instalado acompanhando o perímetro das paredes externas, com um afastamento mínimo de 1 metro da edificação e enterrado a uma profundidade de, pelo menos, 50 cm. Para garantir a eficiência do sistema, o condutor utilizado nesse anel precisa estar em contato direto com o solo em, no mínimo, 80% de seu comprimento total (PETRATO; PICCINI, 2022). Essa configuração contribui para uma melhor dispersão da corrente elétrica proveniente das descargas atmosféricas, reduzindo riscos associados à tensão de passo e de toque. A disposição do anel e seus critérios técnicos estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo do anel de aterramento não natural



Fonte: PETRATO; PICCINI, 2022.

Para garantir a dispersão segura da corrente elétrica gerada por uma descarga atmosférica, é fundamental que o subsistema de aterramento seja projetado com foco na redução

da sobretensão, que representa um risco potencial à integridade da estrutura e dos sistemas internos. A chave para essa eficiência está na otimização da geometria e das dimensões do aterramento, buscando sempre a menor resistência possível. Essa resistência depende diretamente do arranjo dos eletrodos, da topologia adotada e da resistividade do solo no local. Quando bem dimensionado, o sistema de aterramento não apenas protege contra os efeitos das descargas atmosféricas, mas também contribui para a segurança de instalações elétricas, sistemas de telecomunicações, redes de TV e outros equipamentos sensíveis (SOUZA *et al.*, 2013).

Ao se projetar uma estrutura de concreto armado com ferragens devidamente amarradas, conectadas ou soldadas entre si, forma-se uma espécie de gaiola metálica que envolve todo o edifício. Essa configuração atua como uma blindagem natural, capaz de reduzir significativamente os campos magnéticos gerados pelas descargas atmosféricas e, com isso, minimizar as tensões induzidas nos condutores internos da edificação. O uso dessa gaiola como parte integrante do sistema de proteção contra raios tem se consolidado como uma tendência moderna, pois permite que as correntes elétricas provenientes das descargas sejam conduzidas ao longo da própria estrutura metálica, de forma segura e eficiente (MAMEDE, 2017).

## 2.5. Energia Solar

Desde os primórdios da civilização, a natureza esteve diretamente ligada ao progresso humano, servindo como fonte essencial de energia e recursos, mesmo quando ainda não existiam meios eficientes para sua exploração. A energia elétrica, por sua vez, é classificada como uma energia secundária, obtida a partir da conversão de diversas fontes primárias — como hidráulica, térmica, solar, eólica e nuclear — e distribuída aos consumidores por meio de redes de transmissão e distribuição. Com o avanço tecnológico, houve uma significativa diversificação na matriz energética, permitindo maior eficiência na geração e suprimento da eletricidade, especialmente diante do crescimento acelerado da demanda por consumo energético que se intensifica a cada ano (LOPES; DE ANDRADE, 2023).

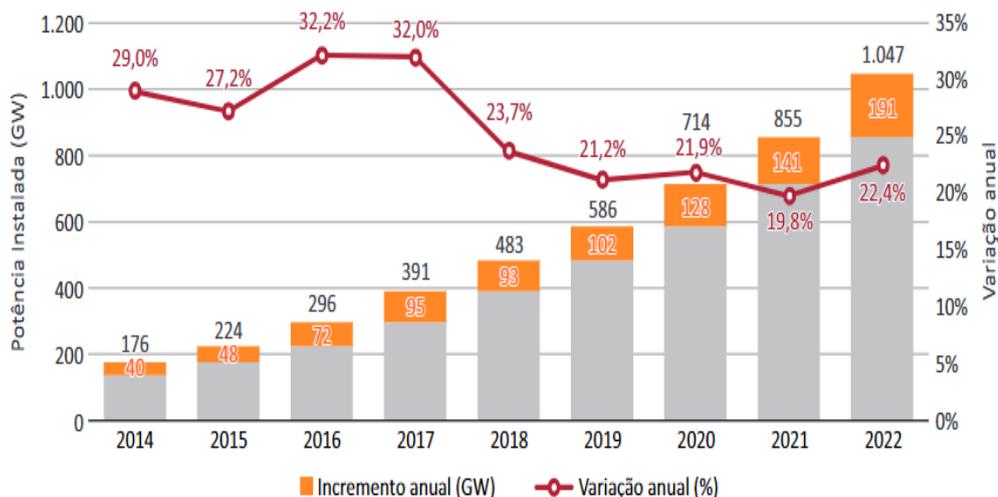
O aumento expressivo no consumo de energia elétrica trouxe à tona uma preocupação urgente: como conciliar o progresso com a preservação do meio ambiente? Essa reflexão tornou-se essencial ao se considerar a limitação das matérias-primas disponíveis e o papel estratégico da tecnologia, muitas vezes guiada por interesses comerciais, na criação de soluções inovadoras. Nesse cenário, a energia solar emergiu como uma protagonista indispensável.

Utilizada desde os primórdios da humanidade, ela não apenas sustentou formas básicas de vida e organização social, como também, com o avanço das tecnologias modernas, passou a representar uma alternativa viável e promissora para um modelo de desenvolvimento sustentável, capaz de equilibrar as demandas energéticas com os desafios ambientais e econômicos do mundo contemporâneo (FARIAS; SELLITTO, 2011).

O uso intensivo de fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o carvão mineral, ganhou destaque durante a Revolução Industrial, período em que seu alto poder calorífico impulsionou o surgimento de automóveis e a expansão dos processos industriais mecanizados. A preferência por essas fontes se deu, em grande parte, pela rapidez com que geravam retorno econômico e operacional. No entanto, esse modelo energético revelou-se insustentável ao longo do tempo. A dependência de combustíveis fósseis não apenas acelera a degradação ambiental, como também compromete a disponibilidade futura de recursos naturais, evidenciando a urgência de repensar as formas de produção e consumo de energia (DA SILVA; ARAUJO, 2022).

Com o aumento progressivo dos custos do petróleo e o fortalecimento da consciência ecológica na sociedade, tornou-se necessário implementar políticas públicas voltadas ao incentivo do uso de fontes de energia renováveis e sustentáveis, capazes de promover maior eficiência no aproveitamento energético. Dentre essas alternativas, a energia solar destacou-se de forma expressiva. Ao analisar o panorama das fontes renováveis, observa-se que a indústria solar apresentou um crescimento notável, consolidando-se como uma das principais soluções energéticas sustentáveis da atualidade (MARTINS, 2017), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Incremento anual (%) e a evolução da potência instalada de geração solar fotovoltaica no mundo (GW)



Fonte: IRENA, 2023.

A energia solar é reconhecida como uma alternativa eficiente para a geração de eletricidade, utilizando a radiação do sol em aplicações térmicas e fotovoltaicas. O aproveitamento térmico pode ocorrer em diferentes faixas de temperatura, como alta, média e baixa, por meio de sistemas que captam o calor solar para usos diversos, incluindo o aquecimento de piscinas e o fornecimento de água quente em residências. Por outro lado, a energia fotovoltaica é gerada pela transformação direta da luz solar em eletricidade, realizada por células solares que reagem à incidência da luz. Quanto maior o número de células conectadas em série ou em paralelo, maior será a tensão e a corrente elétrica produzida, o que amplia a capacidade de geração do sistema (PEREIRA, 2006).

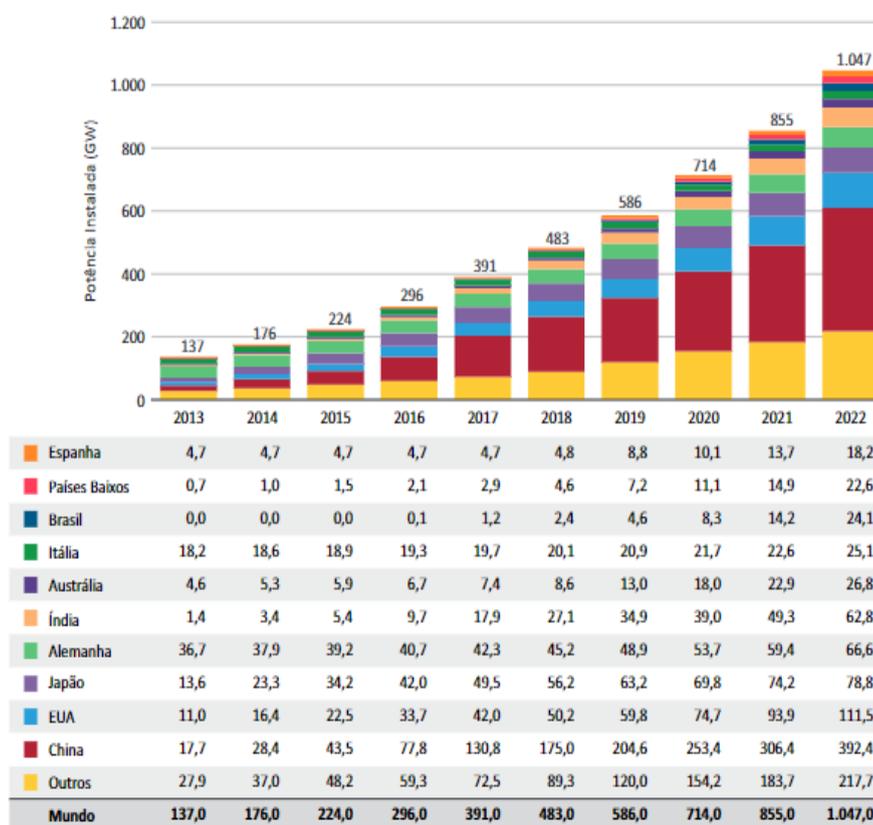
Segundo Pereira (2006), o aproveitamento da energia solar representa uma das formas mais promissoras de suprir a crescente demanda energética global, especialmente em países com alta incidência solar. O autor destaca que, além de ser uma fonte limpa e renovável, a energia solar contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação dos impactos ambientais causados por modelos energéticos convencionais. Essa perspectiva reforça a importância de investimentos em tecnologias solares e políticas públicas que favoreçam sua expansão.

Diversos países têm adotado estratégias para ampliar o uso da energia solar, impulsionados pela queda nos custos de instalação e pela crescente eficiência dos sistemas fotovoltaicos. A popularização dessa tecnologia tem permitido não apenas grandes usinas solares, mas também a geração distribuída, em que consumidores produzem sua própria

energia. Esse modelo tem se mostrado eficaz na descentralização da matriz energética e na democratização do acesso à eletricidade, promovendo maior autonomia energética e redução de gastos com energia elétrica (BEZERRA, 2023).

No contexto brasileiro, a energia solar apresenta um elevado potencial de aplicação, com capacidade para se consolidar como uma das matrizes energéticas mais abrangentes, graças à ampla possibilidade de aproveitamento da radiação solar em diversas regiões do país, conforme descrito na norma ABNT NBR 10899. Entre os anos de 2014 e 2022, conforme ilustrado na Figura 8, observa-se que o Brasil passou a intensificar o uso da energia solar a partir de 2016, alcançando níveis mais expressivos de geração em gigawatts. Atualmente, o país ocupa a oitava posição no ranking global de potência fotovoltaica instalada, contribuindo com 2,3% da produção mundial (BEZERRA, 2023), como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Evolução da potência instalada de geração solar fotovoltaica nos 10 principais países (GW)



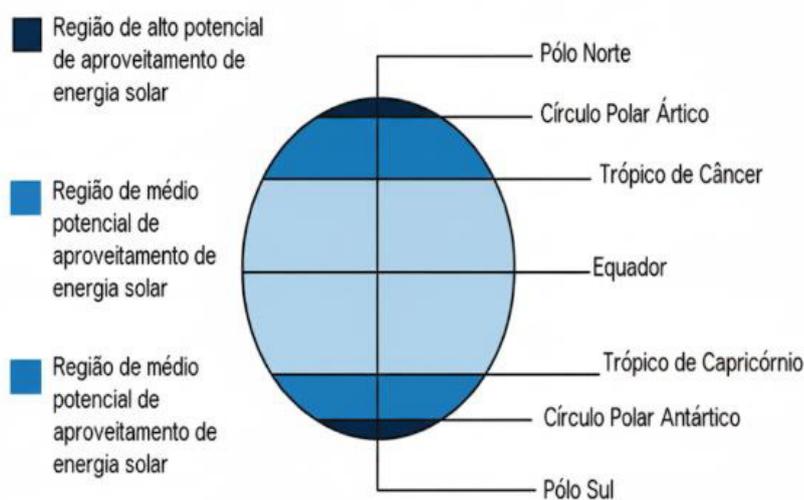
Fonte: IRENA, 2023.

A crescente demanda global por fontes de energia limpa tem impulsionado investimentos em tecnologias solares em diversos países. A energia solar, por sua abundância e baixo impacto ambiental, tornou-se uma das principais alternativas para atender às

necessidades energéticas de forma sustentável. Países com ampla incidência solar têm se beneficiado dessa vantagem natural, desenvolvendo políticas públicas e infraestrutura voltadas à expansão da geração fotovoltaica. Esse movimento tem contribuído para a consolidação de uma nova matriz energética mundial, mais diversificada e menos dependente de combustíveis fósseis (GUARNIERI, 2017).

Conforme apresentado na Figura 9, os países que lideraram em capacidade energética no ano de 2022 foram China, Estados Unidos e Japão, consolidando-se como referências globais na geração de energia solar. Ao observar os mapas de distribuição da radiação solar ao redor do planeta, nota-se que o Brasil possui uma das maiores incidências solares, comparável à de nações com elevado aproveitamento dessa fonte energética. O território brasileiro se destaca pela média diária de irradiação, que apresenta desempenho consistente e uniforme em praticamente todas as regiões do país (GUARNIERI, 2017), como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Potencial de usufruto da energia solar em diferentes regiões do planeta



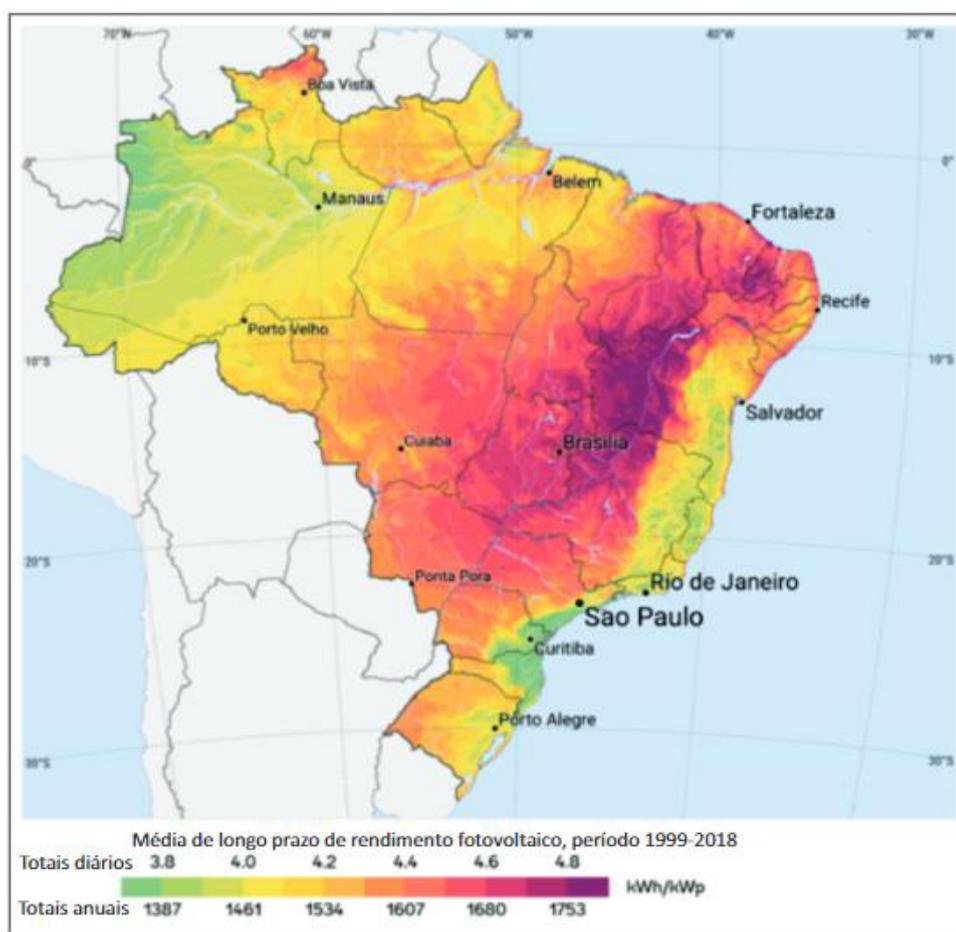
Fonte: SANTOS, 2018.

A busca por fontes de energia renovável tem se intensificado diante dos desafios ambientais e da necessidade de diversificação da matriz energética nacional. Nesse contexto, a energia solar desponta como uma alternativa estratégica, especialmente em países com condições climáticas favoráveis. O Brasil, por sua localização geográfica privilegiada, recebe altos índices de radiação solar ao longo do ano, o que o torna especialmente apto para o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos e térmicos em larga escala. Essa vantagem natural, somada ao avanço tecnológico e à crescente conscientização ambiental, tem impulsionado o

interesse por soluções energéticas mais limpas e sustentáveis (BEZERRA, 2023).

Portanto, a extensão territorial do Brasil e a área expressiva de telhados nas unidades residenciais e comerciais, associadas ao alto nível de irradiação do país, são suficientes para apresentar um enorme potencial de geração solar centralizada e distribuída. Em relação à análise de radiação solar no território nacional, observa-se que o país apresenta geração elétrica com alta eficiência, destacando-se especialmente nas regiões do interior do Nordeste, do Sudeste e do Centro-Oeste (BEZERRA, 2023), conforme está apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Potencial fotovoltaico brasileiro.



Fonte: BEZERRA, 2023.

## 2.6. Energia Solar Fotovoltaica

De acordo com o estudo desenvolvido por Villalva e Gazoli (2012), a energia proveniente do sol é transmitida do espaço até a Terra por meio da radiação eletromagnética. Essa radiação é composta por ondas que variam em frequência e comprimento, e seu fluxo de

potência é o que define a chamada irradiação solar. A energia transportada por essas ondas é diretamente proporcional à frequência, ou seja, quanto maior a frequência, maior será a quantidade de energia transferida.

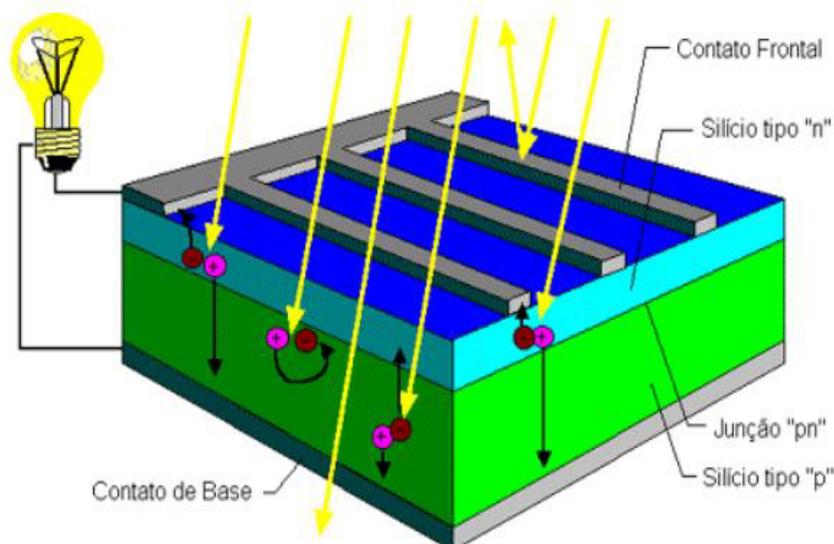
O fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839, ao perceber que certos materiais expostos à luz solar geravam uma diferença de potencial elétrico entre dois pontos. Esse efeito é responsável pela conversão direta da luz solar em eletricidade, processo que ocorre por meio da movimentação de lacunas e elétrons livres (PINHO; GALDINO, 2014).

Nos painéis solares, o material mais utilizado para viabilizar esse processo é o silício. Para que ele funcione como um gerador de energia, é necessário modificar suas propriedades elétricas por meio de um processo chamado dopagem. O silício puro possui quatro elétrons disponíveis para ligação, formando uma estrutura cristalina estável. Ao adicionar átomos de fósforo, que possuem cinco elétrons na camada de valência, cria-se uma região com excesso de elétrons livres. Essa região é chamada de tipo N, pois contém uma maior quantidade de cargas negativas disponíveis para condução elétrica (DA SILVA; ARAÚJO, 2022).

Por outro lado, ao adicionar átomos de boro, que possuem apenas três elétrons na camada de valência, forma-se uma região com deficiência de elétrons, criando lacunas que funcionam como cargas positivas. Essa região é chamada de tipo P, pois apresenta predominância de cargas positivas que atraem os elétrons livres (DA SILVA; ARAÚJO, 2022).

Quando essas duas regiões são colocadas em contato, forma-se a chamada junção PN. Essa junção cria um campo elétrico interno que impede o movimento espontâneo dos elétrons do lado N para o lado P. Esse campo estabelece uma barreira de potencial que mantém os elétrons e lacunas separados, criando uma zona de equilíbrio. Quando a luz solar incide sobre essa estrutura, os fótons fornecem energia suficiente para que os elétrons sejam excitados e atravessem essa barreira, gerando corrente elétrica. Esse processo é fundamental para o funcionamento das células solares (CRESESB, 2006), sendo representado na Figura 12.

Figura 12 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



Fonte: CRESESB, 2006.

O silício é amplamente utilizado na fabricação de células solares por ser um dos elementos mais abundantes na natureza, representando cerca de 25 % da massa da crosta terrestre. Ele está presente em diversos materiais, como rochas, minérios e principalmente na areia, o que facilita seu acesso e torna seu uso economicamente viável. No entanto, o silício em sua forma pura não conduz eletricidade de maneira eficiente, pois seus elétrons estão fortemente ligados à estrutura cristalina, impedindo a livre movimentação de cargas elétricas (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Para que esse material possa ser utilizado na geração de energia solar, é necessário passar por um processo chamado dopagem, que consiste na introdução de elementos químicos específicos em sua estrutura. Esse procedimento permite a formação das chamadas regiões tipo P e tipo N, que são fundamentais para criar a junção PN, estrutura responsável por gerar o campo elétrico interno necessário para o funcionamento das células solares. A partir dessa modificação, o silício passa a se comportar como um material capaz de converter luz solar em eletricidade de forma eficiente (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

### 2.6.1. Vantagens do Sistema Fotovoltaico

A energia solar, por utilizar diretamente a luz do sol como fonte de geração, destaca-se por ser uma alternativa limpa, renovável e acessível, trazendo benefícios significativos para o meio ambiente, a sociedade e a economia. Entre suas principais vantagens está o fato de não

emitir poluentes durante o processo de geração elétrica, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para o combate às mudanças climáticas. Além disso, os sistemas solares possuem instalação simples, exigem pouco espaço físico e podem ser implementados tanto em áreas urbanas quanto em regiões rurais. Essa versatilidade torna a energia solar especialmente útil em locais onde ainda não há cobertura de redes elétricas convencionais, oferecendo uma solução prática e sustentável para comunidades isoladas e promovendo inclusão energética (CARSTERN; CUNHA, 2019).

Ela é considerada uma fonte totalmente renovável e constante, já que o sol está presente diariamente e sua radiação é previsível em grande parte do território brasileiro. Quando comparada a outras fontes como a energia dos ventos e das águas, ela se destaca por oferecer resultados mais estáveis, com menor dependência das variações climáticas. Além disso, os sistemas solares funcionam de forma silenciosa, o que elimina qualquer tipo de poluição sonora, tornando-os ideais para ambientes residenciais e urbanos. A manutenção desses sistemas é simples, geralmente limitada a uma limpeza anual, e sua vida útil pode ultrapassar 25 anos. Outro ponto de destaque é a economia gerada: em muitos casos, é possível reduzir até 95% do valor da conta de luz, o que torna a energia solar uma solução com excelente custo-benefício, tanto pela durabilidade dos equipamentos quanto pela quantidade de eletricidade produzida ao longo do tempo (ASSUNÇÃO; SCHUTZE, 2017).

Considerada uma fonte limpa e totalmente renovável, a energia solar oferece uma alternativa energética constante e confiável. Em comparação com os recursos eólicos e hídricos, essa forma de geração apresenta maior previsibilidade e estabilidade diante das variações climáticas. Por operar de forma silenciosa, não causa poluição sonora, o que a torna ideal para ambientes residenciais e urbanos. Além disso, os sistemas que utilizam essa tecnologia exigem manutenção simples, geralmente limitada a uma limpeza anual, e possuem vida útil que pode ultrapassar 25 anos. Outro destaque é a economia proporcionada ao consumidor, que pode alcançar até 95% de redução na conta de luz, tornando essa solução extremamente vantajosa em termos de custo e benefício ao longo do tempo (SILVA, 2015).

#### 2.6.2. Desvantagens do Sistema Fotovoltaico

Embora o sistema fotovoltaico ofereça diversos benefícios, é importante reconhecer algumas limitações que ainda desafiam sua aplicação plena. Como depende diretamente da luz solar, sua operação ocorre apenas durante o dia, o que exige soluções de armazenamento para

garantir o fornecimento de eletricidade durante a noite, especialmente em regiões remotas ou sem acesso à rede elétrica convencional. Para contornar essa limitação, torna-se essencial investir no aprimoramento da geração distribuída no Brasil, com foco em tecnologias de armazenamento mais eficientes e acessíveis. Com sistemas capazes de conservar a energia gerada ao longo do dia, será possível ampliar o uso dessa fonte renovável para todos os períodos, promovendo maior autonomia energética e fortalecendo a segurança do abastecimento (CARSTERN; CUNHA, 2019).

Outro desafio importante relacionado à adoção da energia solar está no custo inicial de implantação, que ainda é considerado elevado. A aquisição das células e dos painéis solares exige um investimento imediato significativo, o que pode dificultar o acesso para famílias de baixa renda, pequenos produtores e empreendimentos de menor porte. Para superar essa barreira, é essencial fomentar o desenvolvimento de indústrias nacionais voltadas à fabricação de componentes e equipamentos solares, o que contribuiria para a redução dos custos e para o fortalecimento da cadeia produtiva interna. Além disso, a criação de projetos públicos e incentivos governamentais voltados ao financiamento tecnológico e à capacitação de profissionais é fundamental para ampliar o acesso à energia solar, tornando sua instalação mais acessível e promovendo a inclusão energética em todo o território nacional (SILVA, 2015).

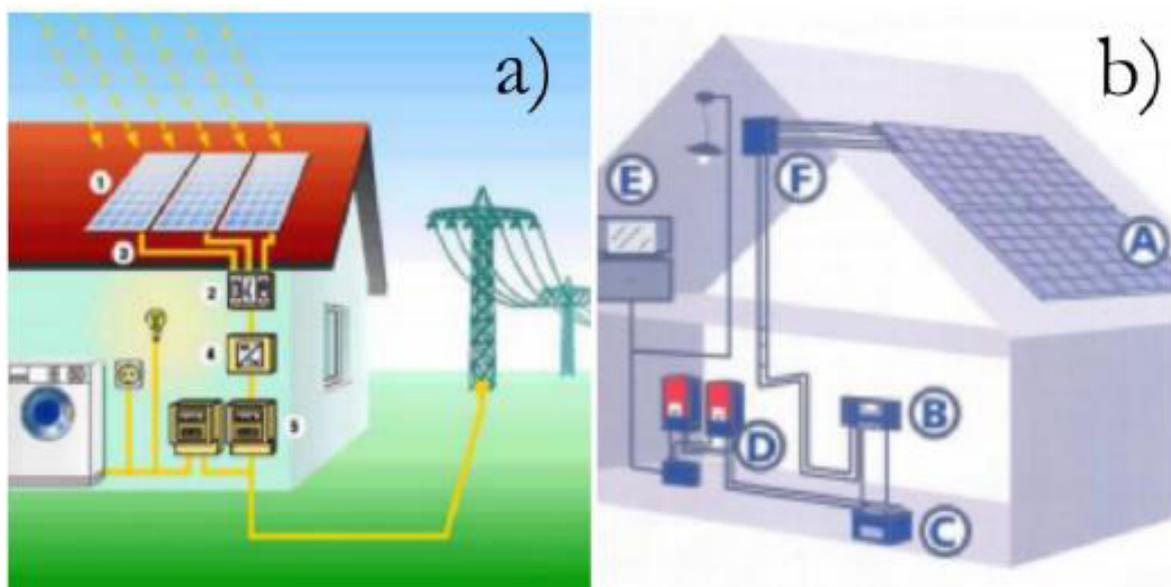
Apesar do grande potencial da energia solar no Brasil, ainda existem barreiras que dificultam sua ampla adoção, especialmente no que diz respeito de incentivos fiscais voltados para essa tecnologia. Sem políticas de apoio consistentes, o acesso aos sistemas solares permanece restrito a uma parcela da população, já que os financiamentos disponíveis costumam apresentar taxas de juros elevadas, tornando a implantação inviável para muitas famílias. Diante desse cenário, é fundamental propor medidas que envolvam a criação de políticas públicas em nível nacional, com foco na redução de custos, na ampliação do crédito acessível e no fortalecimento da indústria nacional de componentes. Além disso, é essencial que as informações sobre essa solução energética cheguem às camadas mais vulneráveis da sociedade, promovendo inclusão socioeconômica e garantindo que os benefícios da energia solar sejam distribuídos de forma mais justa e democrática (ASSUNÇÃO; SCHUTZE, 2017).

## 2.7. Sistemas *On grid*, *Off grid* e Híbrido

A energia solar pode ser aplicada em diferentes configurações, o que permite sua adaptação a variados contextos de consumo e infraestrutura. Essa flexibilidade é uma das

principais vantagens dessa tecnologia, que pode operar por meio de três sistemas distintos: conectado à rede elétrica, isolado da rede e combinado. A seguir, são apresentados os principais tipos de sistemas utilizados na geração de energia solar, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Ilustração dos sistemas de instalação das células solares comerciais  
a) *on grid*. b) *off grid*.



Fonte: DE SOUZA; SOUZA; MINORI, 2019.

O sistema *on grid* é uma das configurações mais utilizadas na geração de energia solar, especialmente em áreas urbanas e comerciais. Ele funciona de forma integrada à rede elétrica da concessionária, permitindo que o consumidor produza sua própria energia por meio dos painéis solares e, ao mesmo tempo, mantenha conexão com a rede pública. Durante o dia, quando há incidência solar, os módulos fotovoltaicos geram energia que é utilizada prioritariamente para abastecer o consumo local. Caso a produção seja superior à demanda, o excedente é injetado na rede elétrica, gerando créditos energéticos que podem ser utilizados posteriormente, principalmente à noite ou em dias nublados (DE SOUZA; SOUZA; MINORI, 2019).

Os sistemas *off grid* são indicados para locais remotos, onde não há acesso à rede elétrica convencional. Nesses casos, a energia solar se torna uma solução autônoma e essencial para garantir o abastecimento. Como não há conexão com a concessionária, é necessário utilizar baterias para armazenar o excedente de energia gerado durante o dia, permitindo o uso contínuo durante a noite ou em períodos de baixa incidência solar. Esse modelo é especialmente útil em comunidades rurais, áreas isoladas ou propriedades que buscam independência energética (DE

SOUZA; SOUZA; MINORI, 2019).

Já os sistemas híbridos combinam as vantagens do modelo conectado à rede com a segurança do armazenamento em baterias. Mesmo estando ligados à rede elétrica, os usuários optam por instalar baterias de reserva para garantir o fornecimento de energia em casos de interrupção no serviço da concessionária. Essa configuração oferece maior autonomia e estabilidade, sendo ideal para locais que enfrentam quedas frequentes de energia ou que desejam manter o funcionamento de equipamentos essenciais sem depender exclusivamente da rede pública (DE SOUZA; SOUZA; MINORI, 2019).

## 2.8. Minigeração, Microgeração e Usinas Fotovoltaicas

A geração distribuída pode ser organizada em três categorias principais, de acordo com a capacidade de produção de energia elétrica. A primeira delas é a microgeração, que corresponde a sistemas com potência instalada de até 75 quilowatts, geralmente utilizados em residências, pequenos comércios ou propriedades rurais. Em seguida, há a minigeração, que abrange sistemas com potência entre 75 quilowatts e 3 megawatts, sendo mais comuns em empreendimentos de médio porte, como indústrias, condomínios ou cooperativas. Por fim, classificam-se como usinas os sistemas com potência superior a 3 megawatts, voltados para grandes projetos de geração de energia. Essa divisão está estabelecida pela Lei número 14300 de 2022, que regulamenta a geração distribuída no Brasil e define os critérios técnicos e legais para cada modalidade (BRASIL, 2022).

A atratividade econômica dos sistemas de microgeração e minigeração está diretamente relacionada à redução das tarifas convencionais de energia elétrica. Ao produzir sua própria eletricidade por meio da energia solar, o consumidor deixa de depender integralmente das concessionárias, o que resulta em uma diminuição significativa nos custos mensais com energia. Esse benefício financeiro é especialmente relevante para residências, comércios e propriedades rurais que buscam maior autonomia e previsibilidade nos gastos. Além disso, ao compensar o consumo com a energia gerada, o microgerador ou minigerador passa a pagar apenas pelos encargos mínimos exigidos pela distribuidora, tornando o investimento ainda mais vantajoso ao longo do tempo (NAKABAYASHI, 2014).

Em 2023, o Brasil registrou uma produção de 18 gigawatts em potência instalada por meio da microgeração distribuída de energia solar fotovoltaica. Esse avanço representa um marco importante na transição energética do país, trazendo uma série de benefícios para a

população. Entre os principais impactos estão a geração de empregos em diversas regiões, o estímulo à economia local e nacional, a redução dos danos ambientais causados por fontes poluentes e a melhoria na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Ao descentralizar a produção de eletricidade e incentivar o uso de fontes renováveis, o país fortalece sua matriz energética e promove maior segurança e sustentabilidade no setor (BRASIL, 2023; LUCENA, 2020).

## 2.9. SPDA em Sistemas Fotovoltaicos

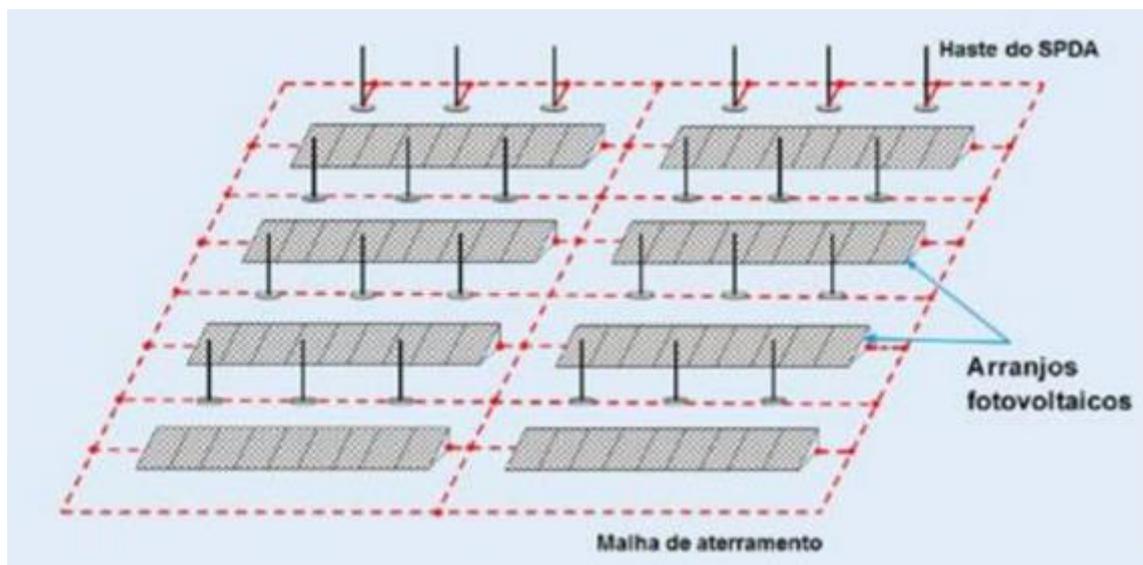
Nos sistemas de geração de energia elétrica por meio da energia solar, os módulos fotovoltaicos são geralmente instalados sobre telhados ou diretamente no solo, sempre posicionados de forma estratégica para captar o máximo possível da radiação solar. Essa orientação, voltada para o céu aberto, acaba tornando os equipamentos mais vulneráveis à ocorrência de descargas atmosféricas, tanto diretas quanto indiretas. Como o desempenho dos painéis está diretamente relacionado à área disponível para captação solar, sistemas de maior porte exigem superfícies mais amplas, o que aumenta ainda mais o risco de exposição a raios e surtos elétricos. Essa condição exige cuidados específicos na instalação, como o uso de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento adequado, garantindo a segurança dos equipamentos e a continuidade da geração de energia (NASCIMENTO, 2016).

A instalação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas é altamente recomendada em projetos de geração de energia solar, especialmente em locais com alta incidência de raios. Como os módulos fotovoltaicos ficam expostos ao ambiente externo, estão sujeitos a impactos diretos e indiretos que podem causar danos significativos aos equipamentos e comprometer o funcionamento do sistema. Por isso, é fundamental que o projeto leve em consideração os riscos associados às descargas elétricas, realizando uma análise criteriosa para dimensionar corretamente os dispositivos de proteção. A adoção de para-raios, sistemas de aterramento e dispositivos de proteção contra surtos elétricos contribui para a segurança da instalação e reduz a possibilidade de falhas, garantindo maior durabilidade e confiabilidade na geração de energia (GOMES, 2018).

Portanto, para garantir a segurança das instalações de energia solar, é essencial que os módulos fotovoltaicos estejam posicionados dentro do perímetro de proteção das hastes do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). Essa medida permite que a edificação funcione como abrigo para os equipamentos responsáveis pelo condicionamento da

potência, protegendo-os contra possíveis danos causados por raios. Além disso, o sistema deve estar devidamente interligado a um conjunto de aterramento eficiente, que inclua o inversor, o Dispositivo de Proteção contra Surtos elétricos (DPS) e o quadro geral de aterramento da instalação. Esses elementos são fundamentais para garantir a integridade dos componentes e a continuidade da geração de energia (PINHO; GALDINO, 2014), conforme demonstrado na Figura 14.

Figura 14 - *Layout* de um SPDA de um sistema fotovoltaico.



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014.

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma abordagem teórico-prática, combinando revisão bibliográfica com estudo de caso, com o objetivo de compreender e aplicar os conceitos relacionados ao aterramento em Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) em projetos de microgeração fotovoltaica.

A metodologia foi estruturada em três etapas principais. A primeira consistiu em uma revisão aprofundada da literatura técnica, abordando os fundamentos do SPDA e da microgeração solar. Foram consultados livros, artigos científicos e normas como a ABNT NBR 10899 do ano 2023, NBR 5419 de 2015 e a ND-5.30 de 2019, que orientam as melhores práticas para projetos de aterramento e proteção contra descargas atmosféricas. Essa etapa foi essencial para consolidar o conhecimento sobre as diferentes topologias de aterramento e suas aplicações em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Na segunda etapa, foi realizado um estudo de caso envolvendo cinco projetos de microgeração fotovoltaica implantados na concessionária CEMIG, em diferentes localidades de Minas Gerais. Esses projetos foram selecionados por representarem uma amostra relevante para a avaliação do desempenho dos sistemas de aterramento SPDA em instalações fotovoltaicas. Cada sistema possuía potência instalada entre 3 kWp e 15 kWp, com painéis fotovoltaicos conectados à rede de baixa tensão.

Em cada projeto, foram observados os seguintes aspectos:

- A topologia de aterramento utilizada, incluindo malhas de aterramento, hastes verticais de aço cobreado, condutores de cobre e conexões equipotenciais;
- A conformidade com as normas técnicas vigentes, especialmente quanto à resistência de aterramento e à zona de proteção definida pelo SPDA;
- A eficiência do sistema de proteção em termos de segurança elétrica, durabilidade dos equipamentos e prevenção de falhas.

A análise foi realizada por meio de medições de resistência ôhmica do aterramento, executadas pela própria equipe de pesquisa. Foram utilizados equipamentos específicos para aferir a resistência do sistema de aterramento de cada projeto, garantindo que os valores obtidos estivessem em conformidade com os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas. Essas medições foram essenciais para avaliar a eficiência dos sistemas de aterramento implementados nos projetos analisados. Os valores obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pelas normas, garantindo que os sistemas estivessem dentro dos parâmetros de segurança exigidos. Além disso, foram analisados os diagramas unifilares, memoriais descritivos e plantas

de situação fornecidos pela CEMIG, que detalham a disposição dos módulos fotovoltaicos, inversores, dispositivos de proteção e pontos de conexão com a rede elétrica.

Na última etapa, os resultados obtidos foram comparados com estudos semelhantes disponíveis na literatura técnica. Essa análise permitiu identificar boas práticas, limitações e oportunidades de melhoria nos projetos avaliados. A técnica aplicada pela CEMIG foi discutida à luz das metodologias acadêmicas e das exigências normativas, contribuindo para uma reflexão crítica sobre a eficiência dos sistemas de aterramento em instalações fotovoltaicas.

Os resultados foram avaliados considerando critérios como segurança, confiabilidade, viabilidade econômica e impacto na qualidade de vida dos usuários, especialmente em áreas rurais e de difícil acesso. Com isso, o trabalho oferece subsídios relevantes para futuras implementações de sistemas de microgeração fotovoltaica com SPDA, reforçando a importância da proteção elétrica em contextos de geração distribuída.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o desenvolvimento do estudo, foram elaborados cinco projetos em parceria com a empresa Solarium Energia Solar, localizada na cidade de Piumhi, Minas Gerais. A primeira etapa consistiu na separação dos componentes do sistema, com a seleção de um conjunto de painéis solares responsáveis pela geração da energia elétrica. Para viabilizar o uso nas instalações convencionais, foi utilizado um inversor fotovoltaico, que realiza a conversão da corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada.

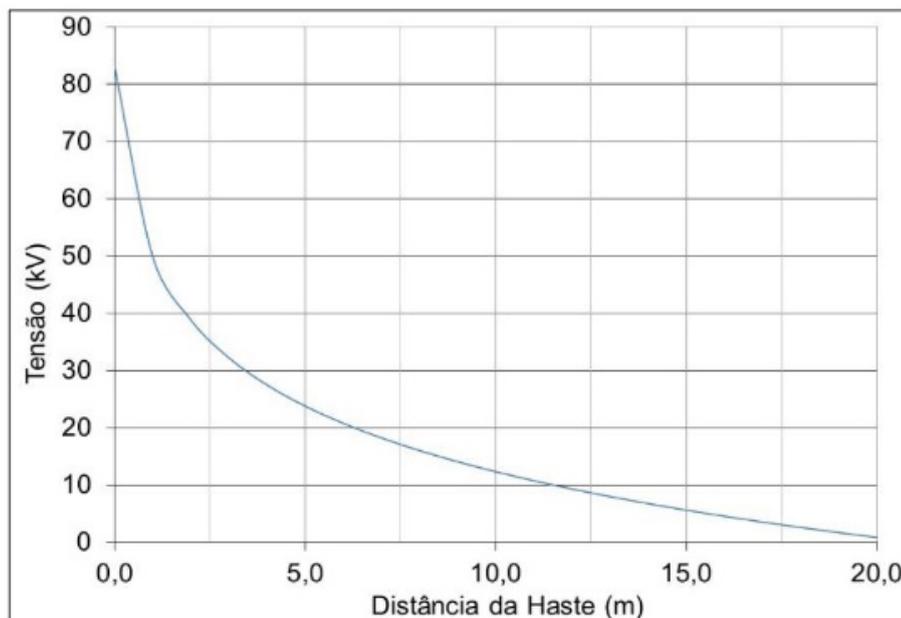
O sistema de aterramento foi estruturado com uma haste cobreada cravada no solo, garantindo a dissipação segura de possíveis surtos elétricos. Os condutores de aterramento foram confeccionados com fios de cobre, interligando os diversos componentes do sistema e conectados por meio de uma caixa de seccionamento, que protege e organiza os circuitos elétricos. Em seguida, foi elaborado o diagrama unifilar utilizando o software *SolidWorks Electrical Schematics*, conforme apresentado nos Anexos I a V.

Durante o dimensionamento, foi analisada a posição ideal da haste de aterramento, que deve estar próxima ao inversor para minimizar o comprimento dos condutores e, conseqüentemente, reduzir perdas e resistência elétrica. A profundidade recomendada para cravação da haste é de 2,4 m, garantindo uma resistência adequada conforme as exigências técnicas.

No que diz respeito à conexão de aterramento, cada estrutura metálica dos módulos fotovoltaicos foi ligada ao condutor de aterramento. Além disso, a carcaça metálica do inversor foi conectada ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), como medida preventiva contra choques elétricos. A saída de corrente alternada do inversor foi conectada ao quadro de distribuição por meio de um condutor de aterramento eficiente, enquanto o ponto de entrada da rede elétrica da concessionária também foi integrado ao sistema de aterramento, assegurando a equipotencialização de toda a instalação.

O dimensionamento dos componentes foi realizado de forma criteriosa, separando os condutores e as hastes metálicas. Os condutores de aterramento foram confeccionados em cobre nu, com seção transversal de 6 mm<sup>2</sup>, atendendo às exigências da norma NBR 5410 para instalações residenciais. O comprimento mínimo foi respeitado para garantir baixa resistência elétrica, conforme a curva de tensão do solo apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Curva da tensão elétrica no solo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A haste de aterramento utilizada nos projetos foi confeccionada em aço cobreado, com diâmetro de 16 mm, sendo adequada para aplicações residenciais. Seu comprimento de 2,4 metros foi escolhido com base em critérios técnicos para garantir uma resistência elétrica eficiente e segura. Após a montagem completa das instalações, foi realizada a validação da continuidade dos condutores e de todas as conexões do sistema de aterramento utilizando um multímetro digital com pinça amperométrica.

Inicialmente, efetuou a medida de tensão entre fase e terra (V) com o sistema energizado, em seguida mediu a corrente de fuga real (I) pela leitura de corrente alternada posicionada no condutor de aterramento e, ao final, aplicou-se a Lei de Ohm para estimar a resistência. Com os componentes devidamente instalados e em conformidade com as normas técnicas vigentes, procedeu-se à medição da resistência de aterramento. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4, evidenciando a eficácia do sistema implementado.

Tabela 4 - Relação das medições de aterramento nos cinco projetos

<b>Projeto</b>	<b>Medição de aterramento (ohm)</b>
Projeto 1	9,1
Projeto 2	8,3
Projeto 3	5,1
Projeto 4	7,4
Projeto 5	7,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores obtidos na medição de aterramento estão dentro do padrão desejado, garantindo a segurança e a eficiência do sistema. A corrente proveniente de descargas atmosféricas é dissipada no solo por meio do sistema de aterramento, seguindo trajetórias em forma de linhas equipotenciais de tensão. Esse processo ocorre de maneira exponencial, conforme os princípios da Lei de Ohm, e exige que a resistência do aterramento seja inferior a 10 ohms para assegurar a proteção adequada dos equipamentos. Vale destacar que essa resistência pode variar de acordo com a resistividade do solo, a intensidade da corrente elétrica e o comprimento da haste cravada na terra. Por isso, o dimensionamento correto e a escolha dos materiais são fundamentais para garantir o desempenho ideal do sistema em diferentes condições ambientais (TAVARES; GOMES; DE LIMA, 2020).

A análise dos dados obtidos ao longo do projeto demonstra consonância com os resultados apresentados por Almeida e colaboradores (2017), que realizaram testes experimentais para investigar a influência da geometria das hastes na redução da resistência elétrica do sistema de aterramento em placas fotovoltaicas. Os estudos indicam que o desempenho do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas está diretamente relacionado ao número de hastes aterradas utilizadas na instalação. Quanto maior a quantidade e melhor a distribuição dessas hastes, mais eficiente se torna a dissipação da corrente elétrica no solo, reduzindo os riscos de falhas e garantindo maior segurança para os equipamentos e para os usuários. Esses achados reforçam a importância de um projeto bem dimensionado, que considere não apenas os componentes principais da geração solar, mas também os elementos de proteção e segurança elétrica.

Com base nos dados obtidos ao longo dos projetos desenvolvidos em parceria com a empresa Solarium Energia Solar, foi possível validar a eficiência técnica e a conformidade normativa das instalações fotovoltaicas realizadas. A análise dos sistemas de aterramento demonstrou que os valores de resistência medidos estão dentro dos limites recomendados,

garantindo a segurança elétrica e a proteção contra descargas atmosféricas. A escolha adequada dos materiais, como hastes de aço cobreado com diâmetro de 16 mm e condutores com seção transversal de 6 mm<sup>2</sup>, contribuiu diretamente para a redução da resistência do sistema, conforme previsto pela norma NBR 5410.

Além disso, os resultados corroboram com estudos anteriores, como os de Almeida *et al.* (2017), que destacam a influência da geometria e da quantidade de hastes aterradas na eficiência do sistema de proteção. A integração entre os módulos fotovoltaicos, o inversor, o sistema de aterramento e os dispositivos de proteção contra surtos elétricos mostrou-se eficaz na equipotencialização da instalação, minimizando riscos de falhas e choques elétricos.

Portanto, os projetos analisados não apenas atenderam aos requisitos técnicos e normativos, como também reforçaram a importância de um planejamento detalhado e da aplicação de boas práticas na implantação de sistemas de geração distribuída. Os resultados obtidos evidenciam que, quando bem dimensionado, o sistema fotovoltaico pode oferecer segurança, eficiência energética e benefícios sustentáveis para os usuários e para o setor elétrico como um todo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos projetos realizados em parceria com a empresa Solarium Energia Solar confirma a importância da proteção elétrica em sistemas de geração solar, especialmente por meio da implementação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Com o crescimento expressivo da energia solar em residências, indústrias e áreas rurais, torna-se essencial garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas envolvidas.

As instalações fotovoltaicas, por estarem posicionadas em locais abertos e elevados, apresentam maior vulnerabilidade à ação de raios. Sem um dimensionamento adequado, a energia de uma descarga atmosférica pode causar danos severos aos equipamentos, falhas operacionais, interrupções no fornecimento e altos custos de reparo. Além disso, a ausência de proteção eficaz representa um risco à segurança humana, podendo provocar incêndios e choques elétricos em situações de falha na isolação ou na equipotencialização do sistema.

A proteção contra surtos induzidos também reforça a necessidade do sistema de proteção, já que mesmo descargas indiretas podem gerar campos eletromagnéticos capazes de danificar inversores e sistemas de monitoramento. A integração do sistema de proteção com o aterramento adequado garante que a energia gerada seja entregue com segurança e eficiência, mesmo durante tempestades elétricas.

Portanto, conclui-se que a implementação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em instalações fotovoltaicas é um investimento essencial em segurança, confiabilidade e durabilidade. Essa medida assegura que a energia solar continue sendo uma alternativa sustentável e eficiente a longo prazo.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a inclusão da medição da resistividade do solo e a análise das condições geográficas e climáticas dos locais de instalação. Esses fatores influenciam diretamente o desempenho do sistema de aterramento e podem contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e adaptadas às diferentes realidades brasileiras.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5419 Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ALMEIDA, J. F. S.; DA COSTA, R. O. S.; GONÇALVES, K. F.; MONTEIRO, L. H. O.; MARQUES, G. T.; DA SILVA, B. M. P.; DOS ANJOS, A. C. S.; GOMES, A. A. C. Sistemas de aterramento para painéis fotovoltaicos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL. 9. Anais [...]*. Belo Horizonte, 2017.
- ALTOQI. **Dimensionamento do projeto de SPDA através do método Franklin**. 2022. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115002602253>. Acesso em: 10 maio 2024.
- ARAÚJO, M. **Projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para uma linha de transmissão de 69kV**. São Carlos, 2010.
- ASSUNÇÃO, J.; SCHUTZE, A. **Developing Brazil's Market for Distributed Solar Generation**. Rio de Janeiro: Núcleo de Avaliação de Políticas Climáticas – PUC-Rio, 2017.
- BEZERRA, F. D. Energia Solar. **Caderno Setorial ETENE**, v. 8, n. 295, p. 1-14, 2023.
- BRASIL. **Capacidade Instalada de Geração Solar Cresce e Atinge 18 GW**. Brasília-DF: Ministério de Minas e Energia, 2023.
- BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nº 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Poder Legislativo**. Brasília-DF, 2022.
- CARDIM, I. Brasil é o país com maior incidência de raios no mundo. **Agência Brasil**, 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/geral/audio/2022-01/brasil-e-o-pais-com-maior-incidencia-de-raios-no-mundo>. Acesso em: 12 out. 2022.
- CARTENS, D. D.; CUNHA, S. K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, v. 125, p. 396-404, 2019.
- CRESESB. **Energia solar fotovoltaica**. 2006. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321). Acesso em: 13 jun. 2024.
- DA SILVA, H. M. F.; ARAÚJO, F. J. C. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 859-869, 2022.
- DE OLIVEIRA, P. D. V. **Projeto de sistema de aterramento e SPDA para estrutura edificada: um retrofit aplicado a uma edificação administrativa da UFERSA**. 2018. 117 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

DE SOUZA, W. A.; SOUZA, R. C. R.; MINORI, A. M. Good preventive maintenance practices in photovoltaic systems. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 8, p. 12779-12791, 2019.

DORSA, A. C. O papel da revisão de literatura na escrita de artigos científicos. **Interações**, v. 21, n. 4, p. 681-683, 2020.

FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 7-16, 2011.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

KINDERMANN, G. **Aterramento Elétrico**. 5. ed. Florianópolis, 2002.

GOMES, A. J. S. **Proteção contra raios e surtos em sistemas fotovoltaicos**. 2018. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Energia Elétrica) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018.

GUARNIERI, M. V. **Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custo e expectativa de desempenho**. 2017. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

IRENA. **Renewable capacity statistics 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>. Acesso em: 13 jun. 2023.

LOPES, J. P. C.; DE ANDRADE, J. A. B. Esquematização de estrutura de usina de energia solar no Brasil: uma revisão de literatura. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 4, p. 1528-1537, 2023.

LUCENA, M. D. **Um algoritmo baseado na busca tabu para Localização Ótima de Geradores Fotovoltaicos**. 2020. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Status, Trends, Challenges, and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics**. Handbook of photovoltaic science and engineering. 1. ed. Great Britain: Wiley, 2011.

MAMEDE, J. F. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2017.

MARTINS, F. R. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017.

MINTO, M. B. M.; NUNES, L. A. S. **A importância de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas: um estudo acerca da elaboração de laudos de SPDA**. 2022. 8 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, 2022.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

NASCIMENTO, D. A. **Instalações de Sistemas de Geração Solar Fotovoltaica: Um estudo**

sobre sistemas de aterramento, proteção contra surto e descargas atmosféricas. Campinas: Brazilian Technology Symposium, 2016.

PEREIRA, E. B. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Inpe, 2006.

PETRATO, A. G.; PICCINI, M. A. Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA): apresentação e manutenção. **Caderno de Estudos de Engenharia Elétrica**, v. 4, n. 2, p. 1-38, 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de energia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

RAKOV, V.; MARTIN, U. **Lightning, Physics and Effects**. Cambridge, University Press, 2003.

SANTOS, I. G. **Análise da inserção e funcionamento de uma usina solar na UFERSA – Campus Caraúbas**. 2018. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Caraúbas, 2018.

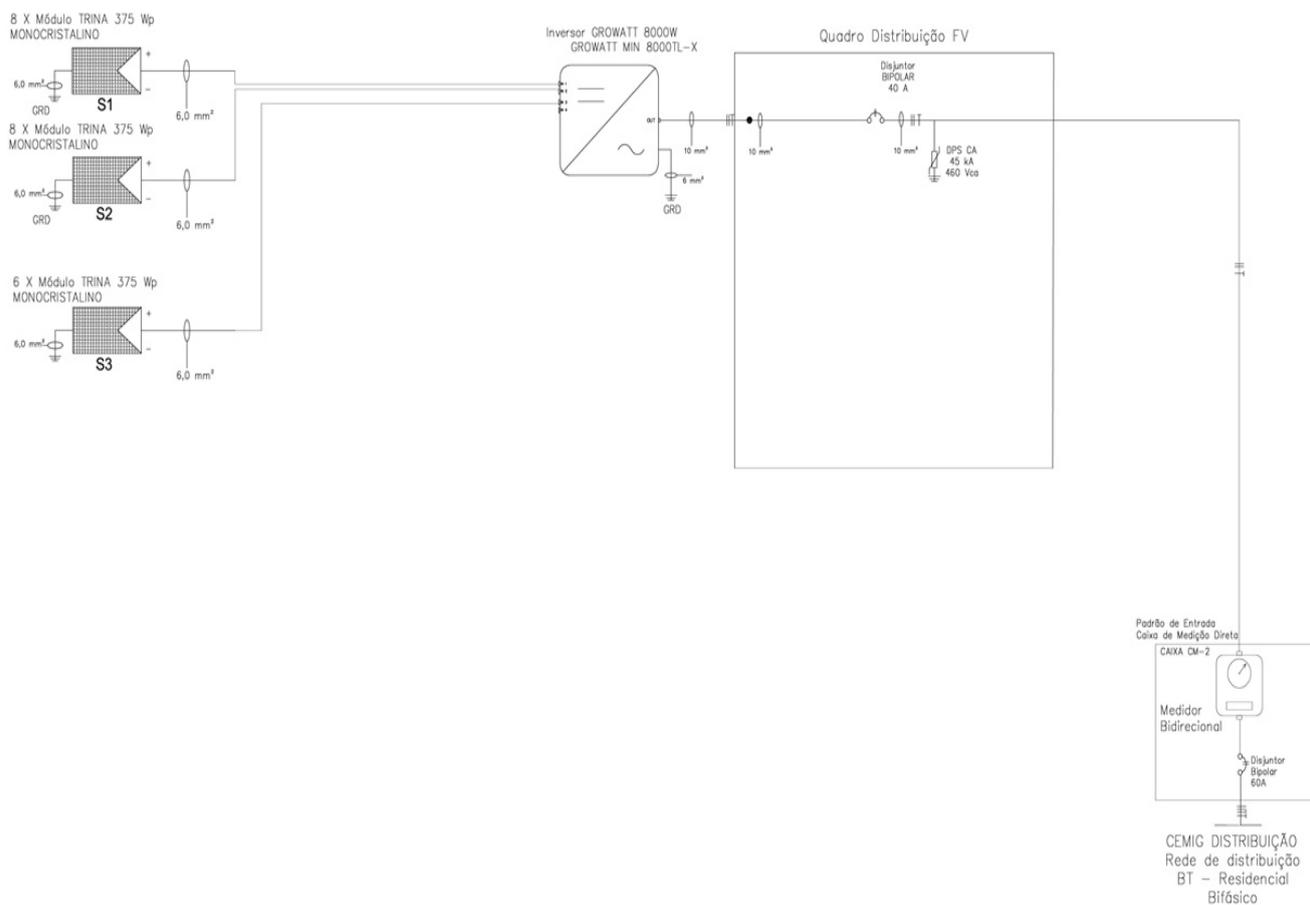
SILVA, R. M. **Energia solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília: Senado Federal, 2015.

SOUZA, A. N.; RODRIGUES, J. E.; BORELLI, R.; BARROS, B. F. **SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas: Teoria, Prática e Legislação**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2013.

TAVARES, S. J. S.; GOMES, R. C. DE LIMA, L. C. Proteção de sistemas de microgeração solar fotovoltaico contra descargas atmosféricas: uma abordagem técnico-científica. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 8. **Anais** [...]. Fortaleza, 2020.

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

## ANEXO I – Diagrama Unifilar 1



Potência dos módulos: 8,25 kWp  
Potência dos inversores: 8,0 kW

### DIAGRAMA UNIFILAR

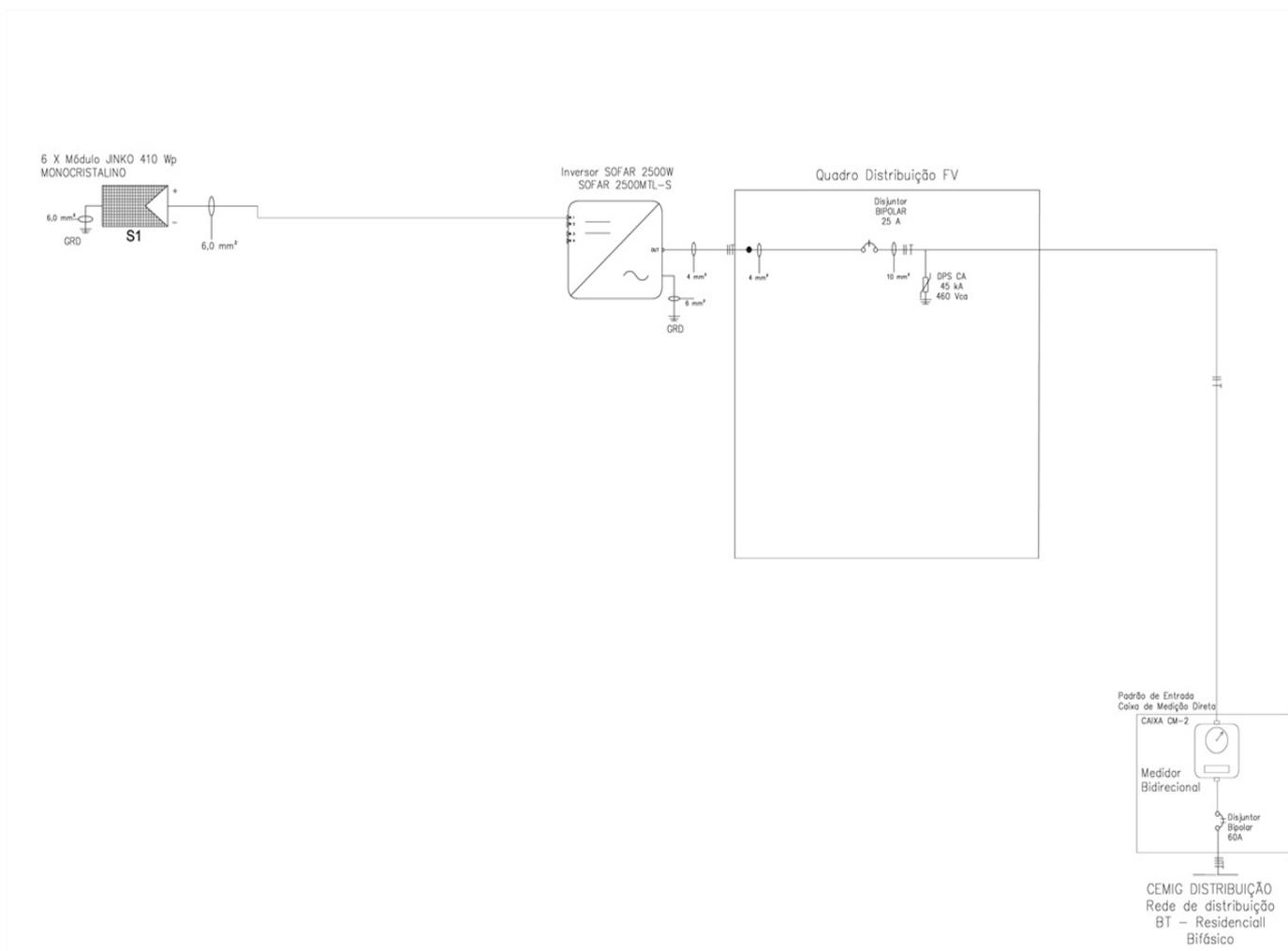
Projeto:  
LUIS CARLOS DA COSTA - 8,0 kWp

Responsável Técnico: Eletrotécnico  
LUAN TEYLOR SOUZA FERREIRA - CFT: 12284477640

TRT - Nº: BR20211298408

Escala: S/ ESCALA  
Data: 08/2021

## ANEXO II – Diagrama Unifilar 2



Potência dos módulos: 2,46 kWp  
Potência dos inversores: 2,5 kW

### DIAGRAMA UNIFILAR

Projeto:  
**MARIA APARECIDA DA SILVA - 2,46 kWp**

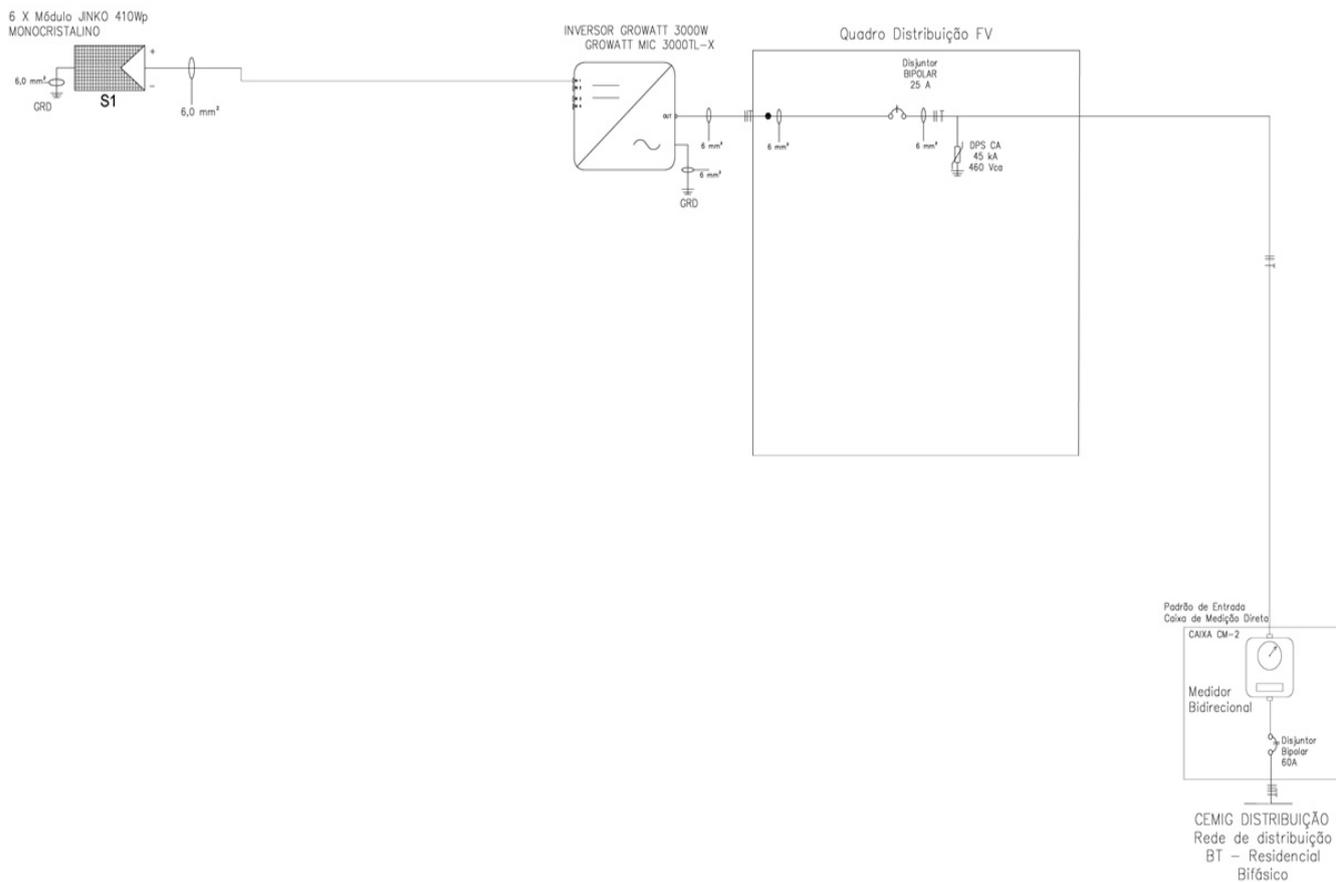
Responsável Técnico: Eletrotécnico  
**LUAN TEYLOR SOUZA FERREIRA - CFT: 12284477640**

TRT- Nº: BR20211035069

Escala:  
S/ ESCALA

Data:  
03/2021

## ANEXO III – Diagrama Unifilar 3



Potência dos módulos: 2,46 kWp  
Potência dos inversores: 3,0 kW

## DIAGRAMA UNIFILAR

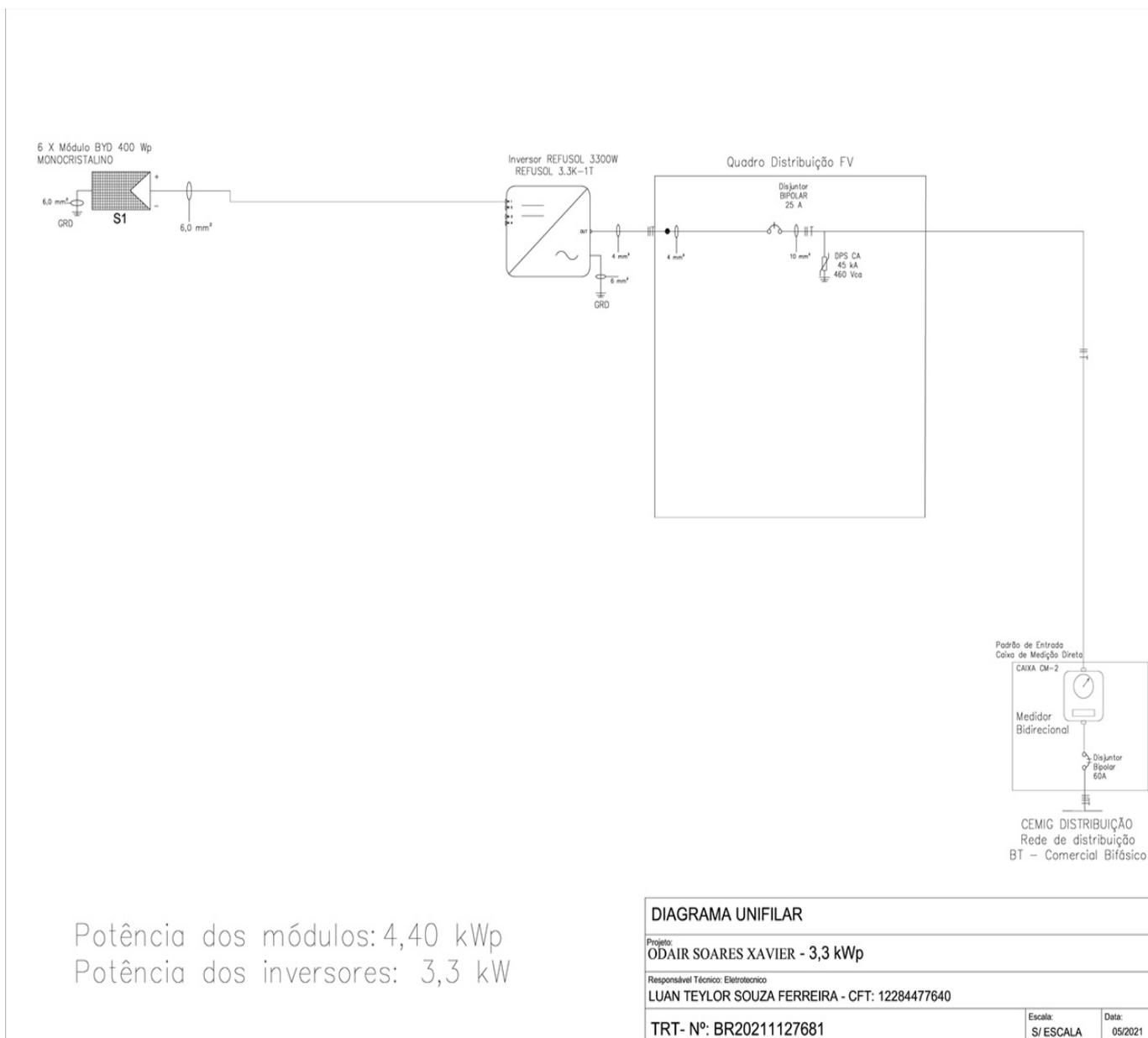
Projeto:  
REINALDO MESSIAS FLORENCIO DIAS - 2,46 kWp

Responsável Técnico: Eletrotécnico  
LUAN TEYLOR SOUZA FERREIRA - CFT: 12284477640

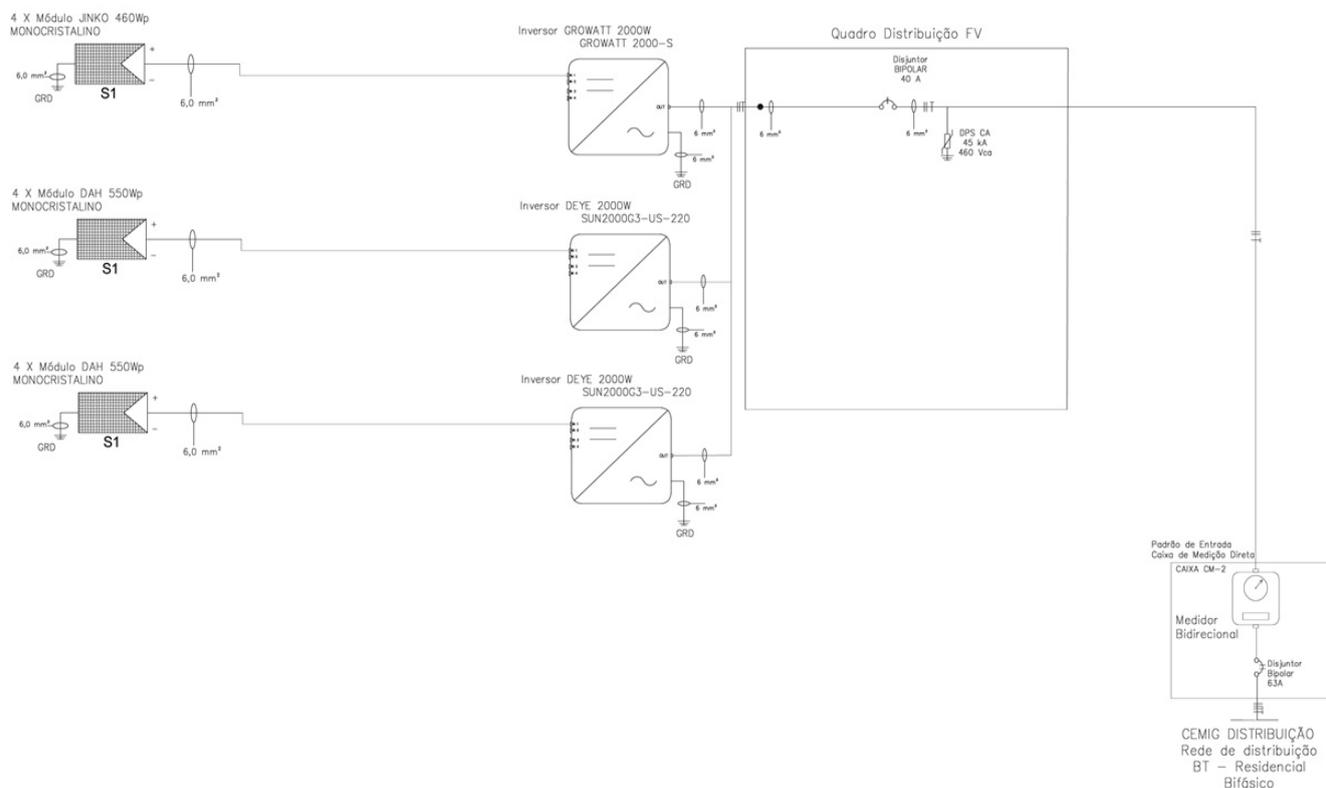
TRT- Nº: BR20211314856

Escala: S/ ESCALA  
Data: 08/2021

## ANEXO IV – Diagrama Unifilar 4



## ANEXO V – Diagrama Unifilar 5



Potência dos módulos: 6,24 kWp  
Potência dos inversores: 6,0 kW

### DIAGRAMA UNIFILAR

Projeto:  
LUIS CARLOS TERRA - 6,0 kWp

Responsável Técnico: Eletrotécnico

LUAN TEYLOR SOUZA FERREIRA - CFT: 12284477640

TRT- Nº: CFT2201852266

Escala:  
S/ ESCALA

Data:  
05/2022