

SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM USINA SOLAR FOTOVOLTAICA EM CAMPO ABERTO – ESTUDO DE CASO

Jeferson Gabriel Gustavo¹

Vilson Luiz Coelho²

Resumo: Nos últimos anos se percebeu um crescimento no número de instalações de usinas fotovoltaicas. Entretanto existem poucos estudos no Brasil que tratam dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) em usinas fotovoltaicas instaladas em campo aberto. Então, a proposta desse estudo é analisar todas as normas e diretrizes nacionais e internacionais, e propor um procedimento para o possível dimensionamento de um sistema de proteção de qualidade, que seja eficaz e seguro. Para isso, optou-se por desenvolver um estudo de caso em uma instalação típica de usina fotovoltaica em campo aberto. Foram levantadas as principais características de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em uma usina solar fotovoltaica instalada em campo aberto e a partir dos dados considerados foi desenvolvido o projeto, demonstrando-se todos os procedimentos necessários para a instalação completa de um SPDA. Por fim foram realizadas simulações por meio do software Ansys Maxwell, com resultados para valores de potenciais de toque e passo e resistência de aterramento para valores de resistividade do solo entre 100 e 1000 Ω .m.

Palavras-Chave: Usina solar fotovoltaica. SPDA. Aterramento. Potencial de toque. Potencial de passo

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), no dia 14 de janeiro de 2022, foi publicado um relatório descobrindo que a demanda global por eletricidade aumentou 6% em 2021, alimentada por um inverno mais frio e pela recuperação econômica causada pela pandemia (CNNBrasil, 2023). Novas usinas e melhorias na infraestrutura estão em constante incorporação às redes existentes (MARVEL; AGVAANLUVSAN, 2010).

Segundo a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*) (IEA, 2021), no ano de 2018, a matriz energética mundial em sua maioria, era composta por combustíveis fósseis e apenas 7,3% das fontes eram renováveis

¹ Graduando em Engenharia. Ano 2021-2. E-mail: jeferson.gabriel.gustavo@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: vilson.coelho@satc.edu.br

como solar, eólica, geotérmica e maremotriz, por exemplo. Já no Brasil a pesquisa mostrava que a predominância era da geração hidráulica (64,9%), e as fontes renováveis como solar e eólica eram responsáveis por 1% da geração, mas com um potencial crescimento.

Já em fevereiro de 2023, um aumento na produção de eletricidade através das usinas solares foi observada, chegando a 74,7% no comparativo anual, atingindo uma participação recorde de 6,0% na matriz energética brasileira (IEA, 2023).

Sistemas fotovoltaicos instalados em campo aberto, necessitam de grandes dimensões para gerarem uma alta potência de energia, e assim uma imensa área necessita ser ocupada pelas usinas. No entanto, estas grandes dimensões representam um aumento na probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas diretas nas instalações, e o Brasil, por estar em uma região tropical e de clima quente, ocupa a liderança mundial em incidência de raios, com cerca de 77,8 milhões por ano (JULIATE; LAGE, 2019).

Assim, as condições climáticas podem interferir no processo de produção de energia de forma negativa, pois as descargas atmosféricas, ao atingirem a estrutura de forma direta ou indireta, podem causar vários danos ao sistema. Conseqüentemente, nessas instalações necessita-se de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) bem projetado de forma que opere em perfeitas condições.

Atualmente, o Brasil possui duas normas técnicas específicas para proteção contra descargas atmosféricas: a ABNT NBR 5419 - 2015 “Proteção contra descargas atmosféricas” e a ABNT NBR 16690 - 2019, Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — Requisitos de projeto. Que dão diretrizes quanto a proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, porém, esses documentos são muito vagos em diversos aspectos, quanto à proteção de parques solares instalados em campo aberto.

Para um melhor entendimento do assunto, necessita-se buscar mais materiais de estudo na área, como a IEC TR 63227:2020 “Proteção contra raios e sobretensão para sistemas de alimentação fotovoltaica” e o guia alemão DEHN, *LIGHTNING PROTECTION GUIDE*, guia de proteção contra raios, e assim poder

direcionar melhor aos aspectos necessários para o desenvolvimento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

O presente estudo tem por objetivo apresentar um estudo de caso de proteção contra descargas atmosféricas de uma planta de geração solar típica instalada em campo aberto, a partir dos documentos normativos nacionais e internacionais, publicações e guias baseados nestes documentos.

Assim, será estudada a implementação de um SPDA instalado em uma usina solar em forma de simulação, desenvolvendo todos os procedimentos necessários para resultar em um sistema de proteção que garanta a segurança de pessoas e das instalações. Ao final desse processo, será realizada simulações através do software Ansys Maxwell, para recolher e analisar os dados dos potenciais de toque e de passo da usina.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS LEGAIS

As instalações elétricas devem cumprir mais de um conjunto de regulamentos, na maioria dos países, onde são gerados e emitidos por autoridades nacionais ou por órgãos privados reconhecidos. É muito importante levar em consideração essas restrições antes de iniciar o projeto (VOLUT; SCHONEK, 2008).

A incidência de raios, representam perigo para as usinas de geração solar fotovoltaica instaladas em campo aberto, devido às suas grandes dimensões, causando danos de forma direta ou indireta, estima-se que 26% aproximadamente dos danos são decorrentes de descargas atmosféricas (SANTOS, 2020). Para que seus efeitos sejam minimizados, é muito importante a presença de um SPDA corretamente implementados na usina (PINHO; GALDINO, 2014).

Apesar da existência das normas ABNT sobre o assunto, há uma lacuna, que é geralmente preenchida por meio de normas e estudos internacionais (FREIRE, 2021).

No âmbito da normatização internacional existe a norma IEC/TS 62738:2018 (IEC, 2018) *Ground-mounted photovoltaic power plants - Design guidelines and recommendations* (Usinas fotovoltaicas montadas no solo - Diretrizes

e recomendações de projeto), que aborda usina fotovoltaica de solo de grande porte, porém é omissa quanto a detalhes de um sistema SPDA.

A norma norte-americana IEEE-2778-D4 (IEEE, 2019) *Guide for Solar Power Plant Grounding for Personnel Protection* (Guia para aterramento de usinas de energia solar para proteção de pessoal), aborda bem o tema, focando em usina fotovoltaica de solo com mais de 5 MWp de potência instalada.

O *Lightning Protection Guide* (Guia de Proteção Contra Raios) (DEHN, 2014), apresenta os padrões IEC 62305 da Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*), que ilustra o estado da arte no campo da proteção contra raios, incorporado em um padrão internacional (europeu) uniforme e atualizado. Os padrões reais de proteção contra raios IEC 62305-3 (IEC, 2010a) e IEC 62305-4 (IEC, 2010b) são precedidos por duas partes gerais padrão IEC 62305-1 (IEC, 2010c) e 62305-2 (IEC, 2010d).

Temos também a norma IEC TR 63227- 2020, *lightning and surge voltage protection for photovoltaic(pv) power supply systems*, proteção contra raios e surtos de tensão para sistemas de alimentação fotovoltaica. Que atualmente é a mais completa e detalhada com relação a todo o sistema.

2.2 SISTEMA FOTOVOLTÁICO

Conforme o estudo feito pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2021), as termelétricas geraram 3,6 GW, enquanto, 3,8 GW de energia foram geradas em usinas solares de grande porte. Desde 2012, a geração centralizada solar já trouxe ao Brasil mais de R\$ 20,5 bilhões em novos investimentos e gerou mais de 114 mil empregos acumulados, além de proporcionar uma arrecadação de R\$ 6,3 bilhões aos cofres públicos.

Hoje, as usinas de grande porte, com capacidade de 100 MW ou mais, estão diretamente conectadas ao nível de média e alta tensão. Como parte integrante de um sistema de fornecimento de energia, os sistemas fotovoltaicos devem garantir um funcionamento estável da rede. Além disso, possíveis perdas de produção, afetam negativamente a taxa de desempenho anual da usina. Conseqüentemente, o volume de investimento e a vida útil mínima de 20 anos

exigem que se avalie o risco decorrente da queda de um raio e se tomem medidas de proteção (DEHN, 2014).

2.2.1 Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

Estudos realizados sobre o SPDA contribuem para o melhor entendimento dos métodos de proteção de sistemas elétricos e melhoria de desempenho contra descargas atmosféricas que ocorrem frequentemente. O SPDA pode ser considerado um dos principais métodos utilizados na proteção do sistema, principalmente com a instalação de elementos que minimizam a probabilidade de problemas causados pelas descargas atmosféricas (DA COSTA BRANDÃO et al., 2019).

Para garantir o retorno do investimento, reduzindo os riscos da incidência de raios e possíveis danos aos módulos, necessita-se de um sistema de SPDA seguro e operante. (TAVARES; GOMES; LIMA, 2020).

O SPDA é dividido em três sistemas, o sistema de captação, o sistema de distribuição (descida) de corrente e o sistema de aterramento, responsável por fluir a corrente para o solo. Cada um dos sistemas tem sua contribuição e é esse conjunto de ações que o torna eficiente (DOS SANTOS; MORBACH; TEIXEIR, 2020).

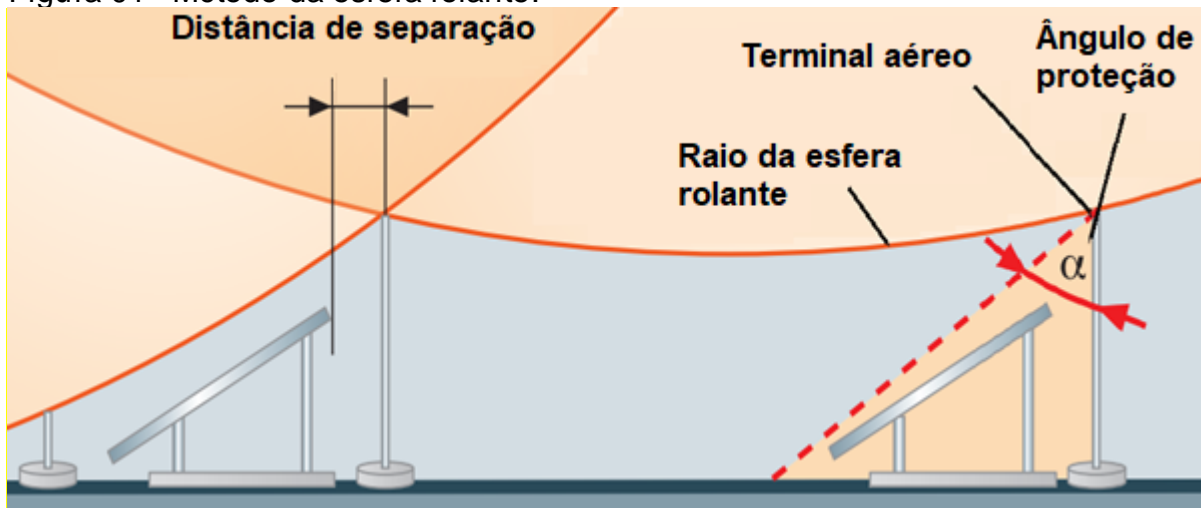
2.3 SISTEMA DE CAPTAÇÃO

Sistema responsável por fazer a captura do raio, e em conjunto com os demais sistemas, fazer a dissipação através do solo, a fim de evitar os danos aos sistemas fotovoltaicos que são causados tanto pelos efeitos destrutivos de um raio direto quanto pelo acoplamento indutivo ou capacitivo de tensões causadas pelo campo eletromagnético de relâmpagos. O sistema pode sofrer danos nos módulos fotovoltaicos, inversores, controladores de carga e seus sistemas de monitoramento e comunicação. Esses danos levam a custos econômicos na substituição e reparo, perda de rendimento e custos de uso da energia de reserva da usina. Impulsos de relâmpago também causam envelhecimento prematuro de diodos de *bypass*, semicondutores de potência e os circuitos de entrada e saída de sistemas de dados,

o que leva ao aumento dos custos de reparo. Além disso, a rede de operadores coloca requisitos na disponibilidade da energia produzida. (DEHN, 2014).

De acordo com a norma IEC 63227, é indicado que o nível de proteção contra raios (classe de NP III) seja adotado, onde o raio da esfera rolante é de 45 metros e a distância de separação (DS) entre as hastes captoras e as placas, de 0,5 m seja mantida. O ângulo de proteção através do raio da esfera rolante, podemos observar na Fig. 01. Esse método determina o volume protegido para sistemas fotovoltaicos maiores que 10 kW. O risco resultante de um raio deve ser determinado de acordo com o padrão IEC 62305-2 (IEC, 2010d) e os resultados desta análise de risco devem ser considerados no estágio de projeto.

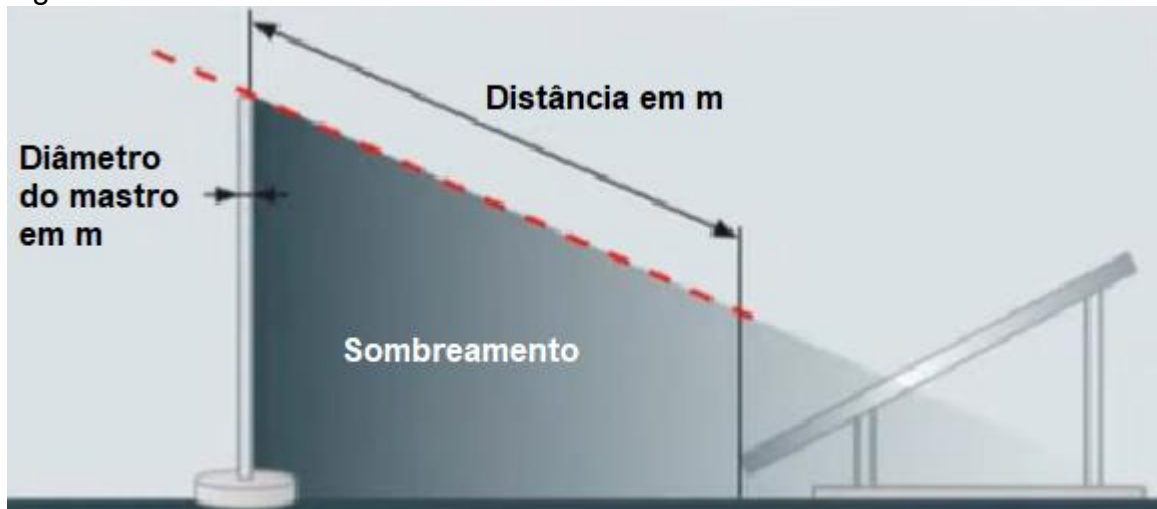
Figura 01 - Método da esfera rolante.



Fonte: (DEHN, 2014)

Conforme a IEC 62305-3 (IEC, 2010a) usando o método da esfera rolante, pode-se determinar o número de hastes captoras. A distância necessária pode ser calculada e depende do diâmetro do mastro. Por exemplo, se um mastro com um diâmetro de 10 cm projeta uma sombra sobre um módulo, esse sombreamento só irá interferir na produção de energia da placa se houver uma distância menor que 1,08 m entre o módulo e o sistema de captação. Conforme mostrado na Fig. 02.

Figura 02 - Sombreamento.



Fonte: (IEC - 63227, 2020)

Na Tab. 01, temos algumas medidas onde é possível comparar o diâmetro dos mastros com a distância necessária para a instalação, sem que o sombreamento prejudique a produção de energia.

Tabela 01 - Diâmetro do mastro x distância de separação.

Diâmetro do mastro em m	Distância do mastro até o modulo em m
0,08	0,86
0,10	1,08
0,16	1,73

Fonte: Adaptado de (IEC - 6322, 2020)

Tensões e correntes induzidas causadas por descargas atmosféricas podem acelerar o processo de degradação dos componentes, além de provocar a falha do sistema de forma parcial ou definitiva. Isso justifica o forte investimento em medidas de proteção (MPS), que vai além de instalação de DPS nos painéis. Para que as sobretensões não comprometam a viabilidade e o funcionamento da usina, é necessário que todas as medidas possíveis sejam adotadas, a fim de garantir toda a integridade do sistema (CANAL SOLAR, 2021).

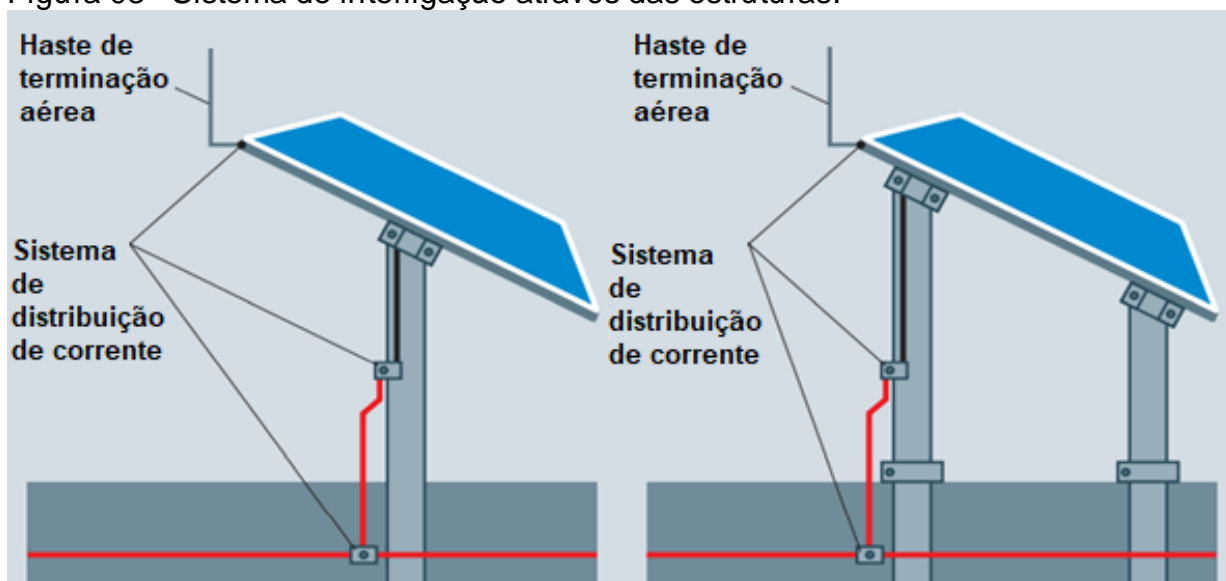
2.4 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE

É o responsável por fazer a condução da corrente da descarga entre o sistema de captação e o sistema de aterramento, e para garantir sua eficiência, é necessário um sistema de proteção contra raios com elementos perfeitamente coordenados (sistema de captação, sistema de distribuição de corrente e sistema de aterramento).

Todos os condutores descendentes do sistema captação, devem ser conectados aos terminais do sistema de aterramento. Os terminais devem ser resistentes à corrosão, em aço inoxidável, por exemplo, devido ao risco de corrosão no ponto onde eles deixam o solo ou concreto.

Os terminais em aço galvanizado devem ser protegidos por medidas adequadas. Para conservar mecanicamente o sistema de captação, eles podem ser conectados aos racks do módulo, conforme a Fig. 03 (DEHN, 2014).

Figura 03 - Sistema de interligação através das estruturas.



Fonte: (DEHN, 2014)

Outra forma seria a instalação de mastros captadores conforme a Fig. 04, quando são instalados separadamente da estrutura, mantendo a distância de separação e se preocupando com o sombreamento nos painéis, podendo eles, serem usados como condutores de descida.

Figura 04 - Sistema de interligação através de mastros.



Fonte: (CANAL SOLAR, 2021)

Esse tipo de instalação é mais recomendado, pois reduz um possível efeito magnético destrutivo devido a passagem de uma alta corrente no condutor, sendo que no aproveitamento da estrutura, a descarga acaba passando próxima ao painel, e com o mastro instalado a uma distância de no mínimo 0,5 metros, esse efeito acaba sendo imperceptível (IEC - 63227, 2020).

2.5 SISTEMA DE ATERRAMENTO

O aterramento de sistemas elétricos consiste na utilização de condutores enterrados a baixo superfície da terra, dispostos e constituídos em vários formatos possíveis, hastes metálicas em diversas configurações, placas condutoras ou cabos condutores dispostos em malha e sua principal função é a proteção das instalações contra descargas atmosféricas, dos seres humanos contra contatos com partes metálicas energizadas, dos equipamentos que utilizam energia elétrica e, além disso, a uniformização do potencial elétrico.

No desenvolvimento de um projeto de aterramento eficiente, deve-se conhecer as características do solo fazendo a estratificação, para a realização de cálculos de resistividade do solo, nessa etapa do projeto é importante, pois todos esses fatores irão contribuir para o valor de resistividade do solo que é influenciada pelo tipo de solo, diversidade do solo, teor de umidade, temperatura, compactação, pressão e demais características (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992).

2.5.1 Interligações dos racks com a malha

Os racks do módulo de metal podem ser usados como parte da malha se eles tiverem uma condutância mínima de acordo com a norma IEC 62305-3 (EN 62305-3). A norma alemã DIN EN 62305-3 recomenda que racks de metal sejam interconectados. Os padrões IEC 61936-1 devem ser particularmente observados para as conexões à terra do sistema. Os sistemas de distribuição de corrente dos geradores fotovoltaicos e aterramento das subestações, devem ser interligado por meio de uma tira plana (30 mm x 3,5 mm) de aço inoxidável , ou um fio redondo (\emptyset 10 mm²) de cobre, por exemplo (DEHN, 2014).

2.5.2 Dimensionamento da malha de aterramento

O sistema de aterramento de uma usina fotovoltaica é formado por uma malha de aterramento, usualmente de cabo de cobre nu ou de aço-cobreado de 50 mm² (CANAL SOLAR, 2021).

Conforme Tab. 02, podemos analisar algumas possibilidades para o dimensionamento dos cabos recomendados em malhas de usinas solares fotovoltaicas instaladas em campo aberto.

Tabela 02 - Tipos e bitolas de cabos para malha de aterramento.

Material	Configuração	Area transversal em (mm²)
Alumínio	Fita sólida	70
	Redondo sólido	50
	Trancado	50
Aço revestido de cobre	Redondo sólido	50
	Fita sólida	50

Fonte: Adaptado de (DEHN, 2014)

2.5.3 Tamanho da malha de aterramento

Para sistemas fotovoltaicos instalados em campo aberto, os sistemas de aterramento individuais, como subestações e racks de módulos fotovoltaicos, devem ser interligados, conforme a Fig. 05. Isso resulta em uma grande “superfície

equipotencial” que reduz consideravelmente as cargas de tensão que atuam nas linhas de conexão elétrica entre os racks dos módulos fotovoltaicos e as subestações no caso de influências de raios.

Figura 05 - Arranjo da malha de aterramento.

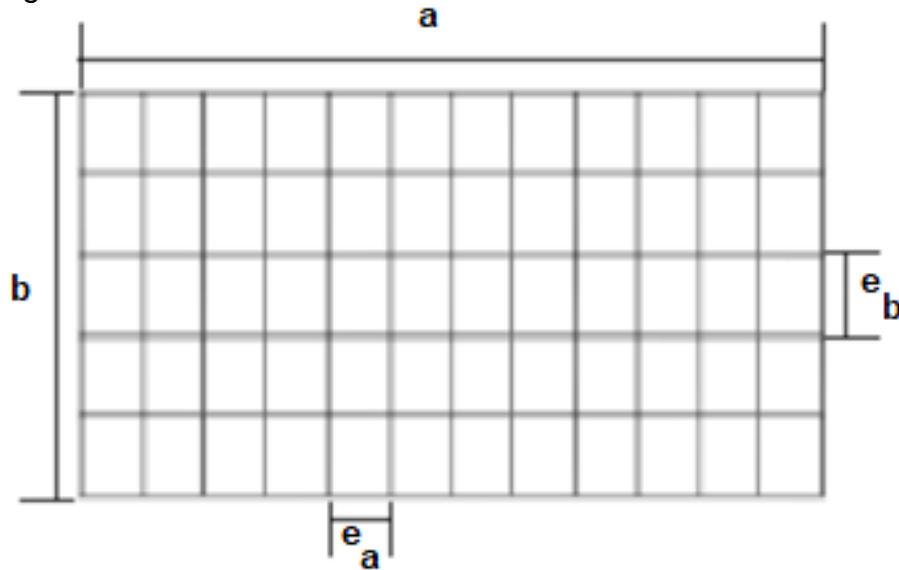


Fonte: (DEHN, 2014)

Para sistemas extensivos, um tamanho de malha de 20 m x 20 m a 40 m x 40 m provou ser eficiente.

Em projetos práticos, utiliza-se de 5% a 10% do comprimento dos respectivos lados da malha. Na Fig. 06, é possível ver um exemplo de malha onde "a" e "b" são as medidas da malha em metros, e, "ea" e "eb" os espaçamentos em metros entre os condutores na vertical e horizontal (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

Figura 06 - Aterramento em malha.



Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

2.6 POTENCIAIS

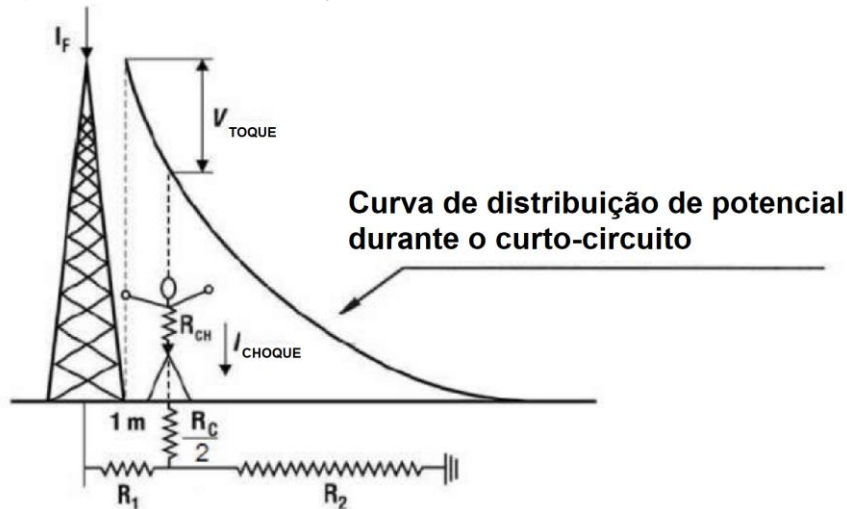
Quando o corpo humano é submetido a circulação de corrente elétrica, ele sofre efeitos relacionados à magnitude e à frequência dessa corrente. Um dos principais efeitos é a ocorrência de fibrilação ventricular, que em casos extremos pode causar a morte (TELLÓ, 2007). Considerando correntes elétricas em baixas frequências, em torno de 50 a 60 Hz, seres humanos podem sofrer danos irreversíveis e até mesmo a morte (DALZIEL, 1956). Então o estudo dos potenciais de toque e passo auxiliam em manter a confiabilidade e eficiência de uma instalação.

2.6.1 Potencial de toque

O potencial de toque é definido como sendo a tensão em que é submetido o corpo humano quando em contato com um objeto metálico energizado ou com um sistema que apresenta isolamento comprometido em algum ponto da superfície, ocasionando na circulação de corrente elétrica no corpo humano. Considera-se a distância de contato horizontal como a equivalente ao alcance do braço de uma pessoa, convencionando-se assim 1,0 m (NBR - 15749, 2009).

A Fig. 07 representa um indivíduo submetido a tensão de toque.

Figura 07 - Representação do potencial de toque.



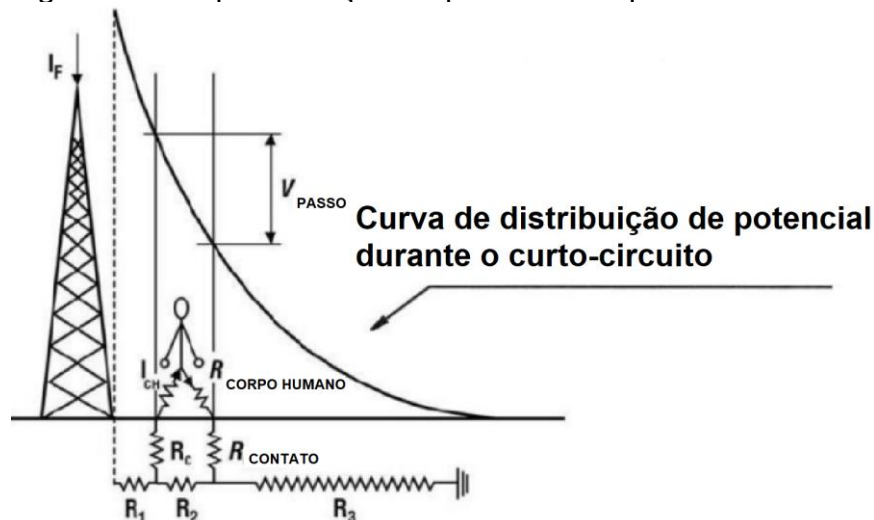
Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

2.6.2 Potencial de passo

Potencial de passo é a diferença de potencial entre dois pontos de uma pessoa ou animal, que estão distanciados a um metro (distância entre dois pés de uma pessoa) situados dentro da área de influência de uma malha de aterramento, quando a mesma está sobre escoamento de uma corrente de curto-circuito à terra (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

A Fig. 08 apresenta um indivíduo submetido a tensão de passo.

Figura 08 - Representação do potencial de passo.



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Para a realização de um projeto de proteção contra descargas atmosféricas de um sistema fotovoltaico, necessita-se aplicar uma metodologia conforme norma (IEC TR 63227, 2020), que também baseia-se na (NBR 16690, 2019).

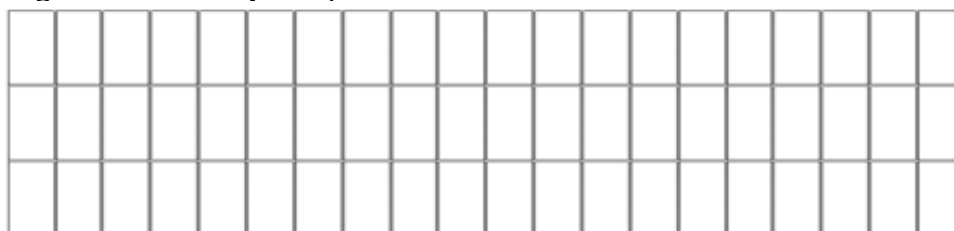
Alguns passos devem ser destacados e seguidos para que uma usina fotovoltaica instalada em campo aberto, trabalhe de forma segura e eficiente.

3.1 ESTUDO DA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA

Foi desenvolvido o estudo para o projeto de implantação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em uma usina solar fotovoltaica fictícia instalada em campo aberto, com 540 kW de potência em uma zona industrial na localidade do município de Morro Da Fumaça, estado de Santa Catarina, com área total de 22.500 m².

Optou-se em dividir a usina em dezoito grupos, onde cada placa é responsável pela geração de 500 W e cada grupo é responsável por produzir 30 kW de potência. O formato do grupo de placas e o arranjo realizado para instalação da usina pode ser visto de acordo com a Fig. 09.

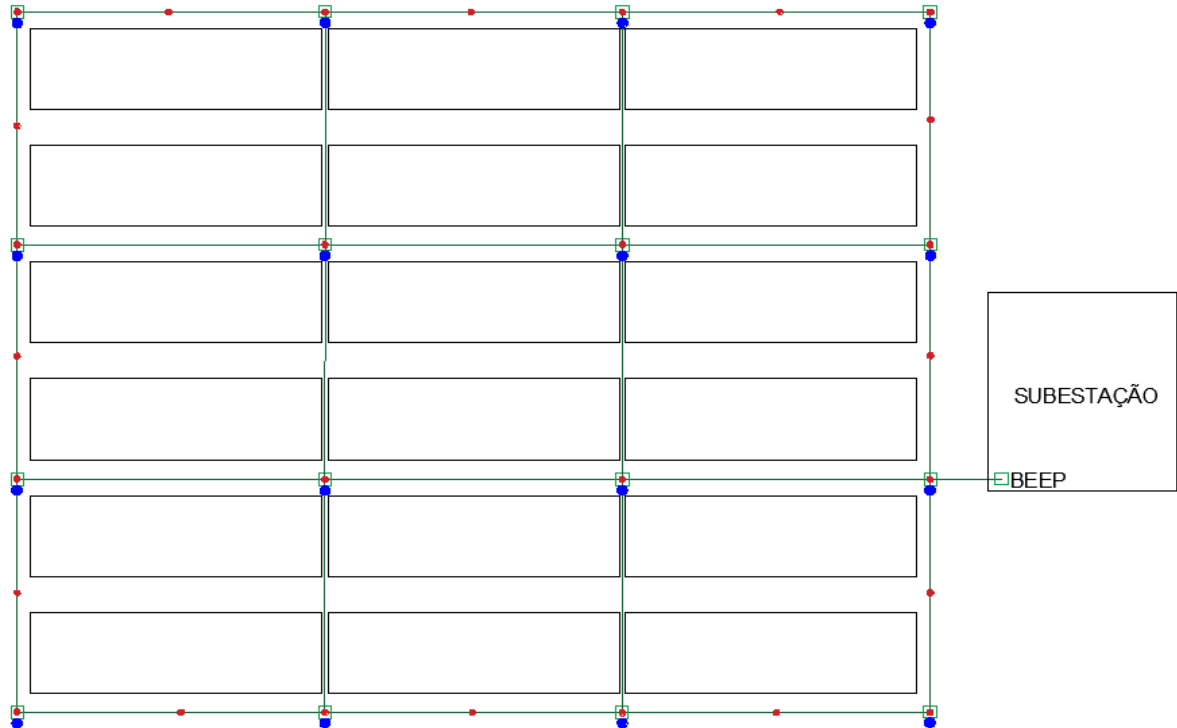
Figura 09 - Arranjo de placas da usina solar fotovoltaica em estudo.



Fonte: Do autor (2023)

As placas foram dispostas em um formato de 3 x 20, onde cada inversor suporta 3 *strings* de placas. Ao lado dos grupos de placas, estará a casa de transformação (subestação), que por sua vez conta com transformadores elevadores de 0,38/13,8 kV. A disposição total da usina podemos analisar na Fig. 10.

Figura 10 - Grupos de placas da usina solar fotovoltaica em estudo.



Fonte: Do autor (2023)

3.2 RESISTIVIDADE E ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Para o estudo da usina foi considerado uma escala de valores de resistividade aparente de 100 a 1000 $\Omega.m.$, para a posterior comparação dos valores no software e assim também sendo possível visualizar a variação dos dados através dos gráficos. O objetivo do uso desses valores é permitir que este estudo possa servir de exemplo em projetos de futuras instalações de usinas solares na região.

3.3 ESCOLHA E POSICIONAMENTO DOS MASTROS E CAPTORES

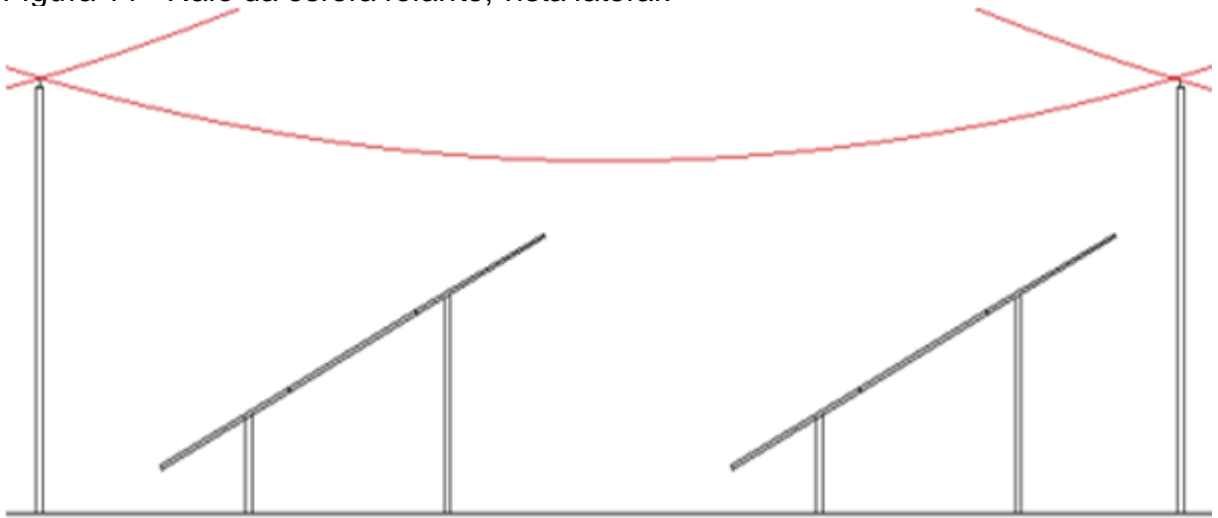
Conforme recomendação da norma (IEC 63227, 2020), utilizou-se o nível de proteção (NP III), que orienta o uso do raio da esfera rolante em 45 m, seguindo essa orientação do raio da esfera é possível o posicionamento do sistema de captação.

Para esse projeto optou-se pela utilização de mastros com captadores instalados em suas extremidades, assim reduzindo os efeitos destrutivos causados

pela indução da corrente de descarga, pois dessa forma os mastros respeitam uma distância de segurança de 0,50 m da estrutura das placas.

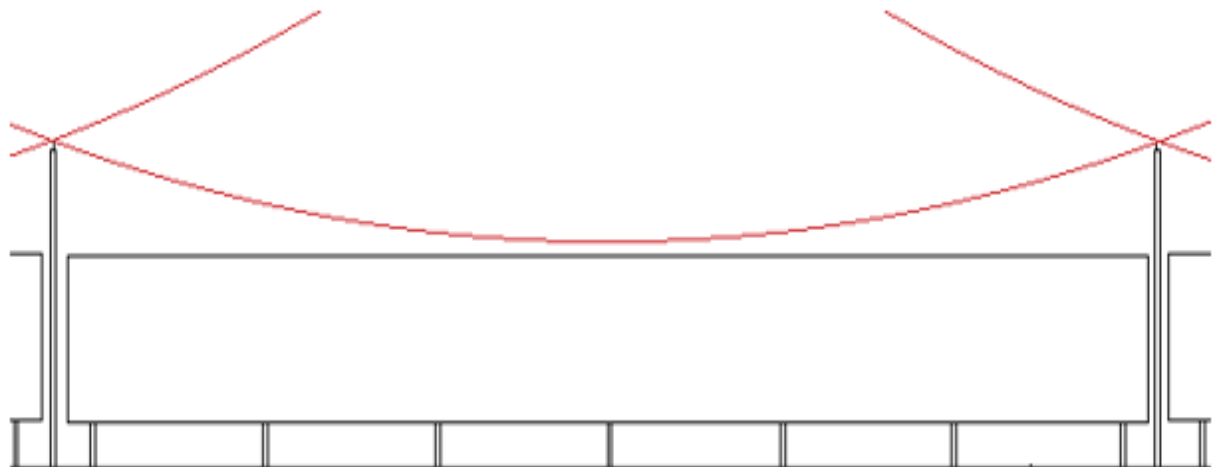
Durante o desenvolvimento do projeto, devemos analisar as distâncias entre a estrutura das placas e os mastros a fim de não comprometer a geração de energia através do sombreamento gerado pelos mesmos, os detalhes dos posicionamentos das estruturas e dos mastros podem ser vistos nas Fig. 11 e Fig. 12.

Figura 11 - Raio da esfera rolante, vista lateral.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 12 - Raio da esfera rolante, vista frontal.



Fonte: Do autor (2023)

Portanto, utilizou-se mastros de 6 m de comprimento por 0,10 m de diâmetro, onde 1,2 m ficam abaixo do solo fixados por uma base de concreto.

Chegando assim as medidas de 0,61 m da parte traseira das placas e 2,08 m, da parte frontal, mantendo a distância de sombreamento segura e garantindo o perfeito funcionamento do sistema.

3.4 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE

No sistema de distribuição de corrente de descida da descarga atmosférica, optou-se pela utilização dos próprios mastros como condutor, visando a viabilidade do sistema e seguindo a orientação da norma quanto ao tipo de metal e sua condutividade conforme a condução da corrente da descarga atmosférica.

Para as conexões entre os mastros e o sistema de aterramento foram projetados cabos de 10 mm² de cobre nu, seguindo as recomendações quanto as conexões entre os dois sistemas, como mostra a Fig. 13.

Figura 13 - Modelo de interligação do mastro com o sistema de aterramento.



Fonte: DEHN (2014)

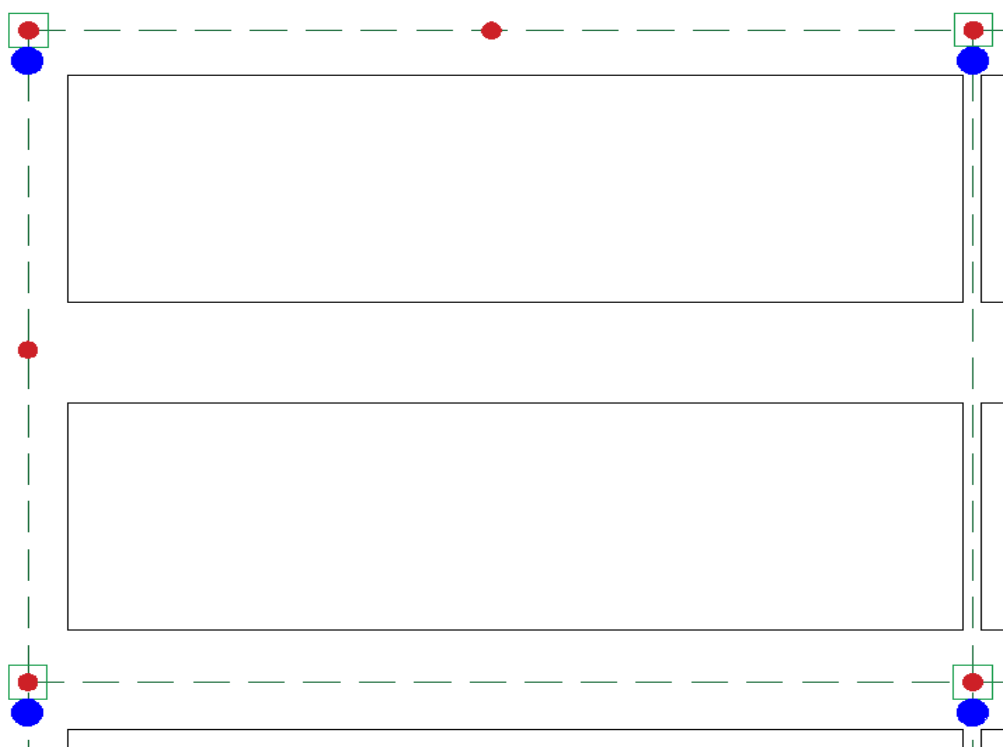
3.5 SISTEMA DE ATERRAMENTO

Todas as junções das malhas, foram projetadas com caixas de passagem de 30 x 30 cm, para a união feita entre os cabos e as hastes terras de 2,4 m, 5/8" em

alta camada. A medida da malha ficou em 19,50 x 24,50 m, dentro dos valores de medidas recomendados pela norma.

Foram inseridas hastes nos intervalos entre as caixas, somente na malha externa do sistema, a fim de reduzir os potenciais de toque e de passo. Como pode-se observar na Fig. 14, onde mostra os detalhes da formação da malha de aterramento, com hastes terra, caixas de passagem e mastros captores.

Figura 14 - Vista aérea da malha.



Fonte: Do autor (2023)

O projeto da malha de aterramento conta com cabos de cobre nu de 50 mm², conforme recomendação da norma, e enterrados a 0,50 cm do nível do solo, dessa maneira formando assim todas as malhas do sistema.

Os pontos de conexão entre as hastes terra, cabos da malha de aterramento, sistema de descida e equipotencialização das estruturas dos módulos, foram projetadas para serem feitas dentro das caixas de passagem de 30 x 30 cm, sendo realizadas em solda exotérmica.

Seguindo também a recomendação da norma IEC-63227, para as interligações entre os racks e o sistema de aterramento, utiliza-se cabo de cobre de seção 10 mm².

4 – RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para as avaliações dos níveis de potenciais na malha de aterramento optou-se pelo uso de um programa computacional que é o método mais preciso para a obtenção desses valores. O programa escolhido é o Ansys Maxwell, que é um software que aplica o método dos elementos finitos para resolução de problemas de eletromagnetismo. Este software é dedicado à análise de baixa frequência, pois adota simplificações que desacoplam os efeitos elétricos e magnéticos, (Ansys, Maxwell Help, canonsburg, 2021).

Para efetuar a modelagem adequada do sistema, inicialmente são levantados os dados do sistema de aterramento, tais como dimensões da malha e características dos materiais do solo. Conforme a Tab. 03.

Tabela 03 - Parâmetros para a modelagem.

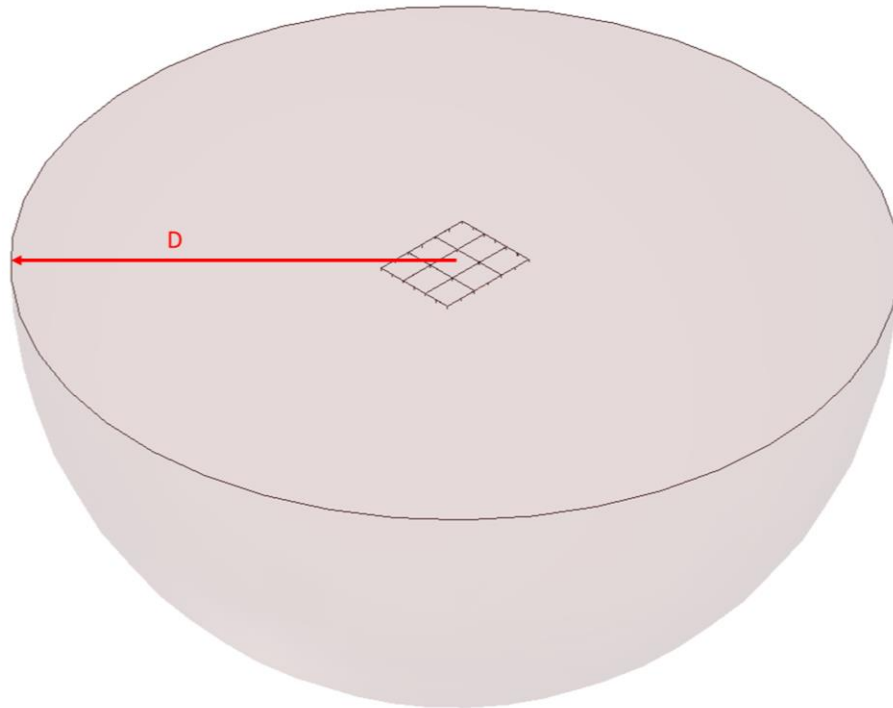
Componentes	Dados	Valores	Unidades
Malha	Comprimento LX	58,73	(m)
	Comprimento LY	71,92	(m)
	Seção	50	(mm ²)
	Condutividade	5,80E+07	(S/m)
Hastes	Comprimento	2,4	(m)
	Condutividade	2,00E+06	(S/m)
	Diagonal Malha	92,85	(m)
Solo	Raio semiesfera D	278,6	(m)
	Permissividade Elétrica	5,0	(F/m)
	Corrente injetada	1	(A)

Fonte: Do autor (2023)

O desenho da malha foi desenvolvido em CAD e exportado para o Ansys Maxwell. Para a simulação, considera-se o sistema de aterramento inserido em uma semiesfera ao nível do solo com um raio de 278,6 m (4 vezes a maior dimensão da malha) a partir do centro da usina, como mostra na Fig. 15.

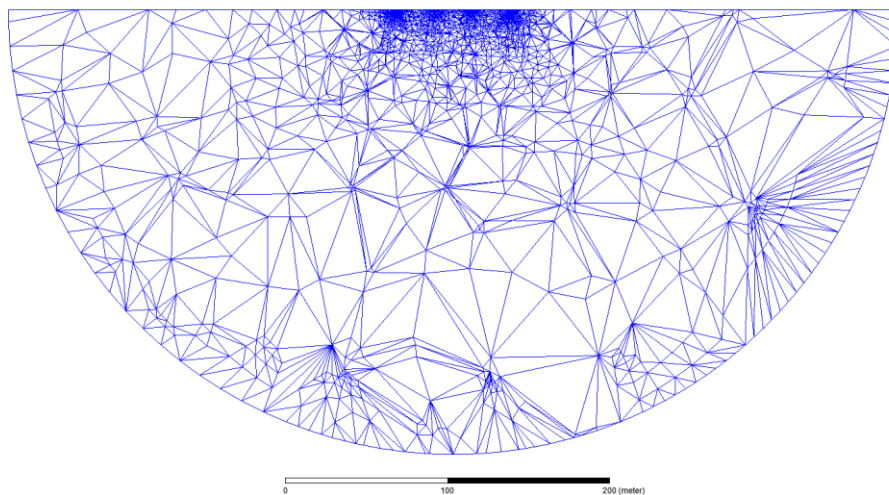
Na Fig. 16 pode-se observar a malha de elementos finitos utilizada na simulação.

Figura 15 - Vista da semiesfera gerada.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 16 - Vista da semiesfera gerada.

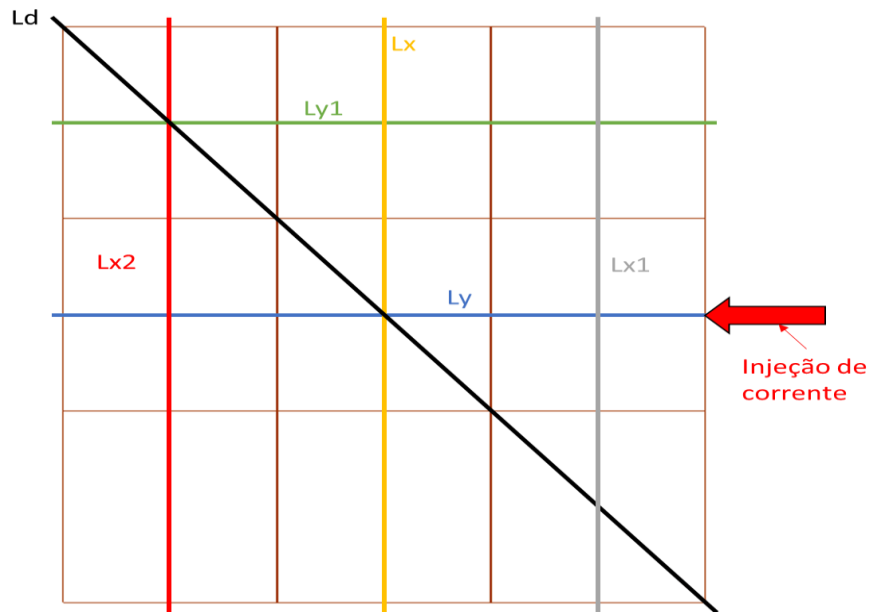


Fonte: Do autor (2023)

A simulação pode ser feita com excitação em corrente ou tensão. Para essa simulação especificamente foi feita a injeção de uma corrente de 1 A, em um

ponto da malha, a fim de analisar a dissipação da corrente no sistema, e posteriormente analisar os potenciais de toque e de passo. Então foi traçado uma linha imaginária (L_d), na diagonal da malha e sobre esta linha foram calculados os potenciais ponto a ponto. Os detalhes podem ser vistos na Fig. 17.

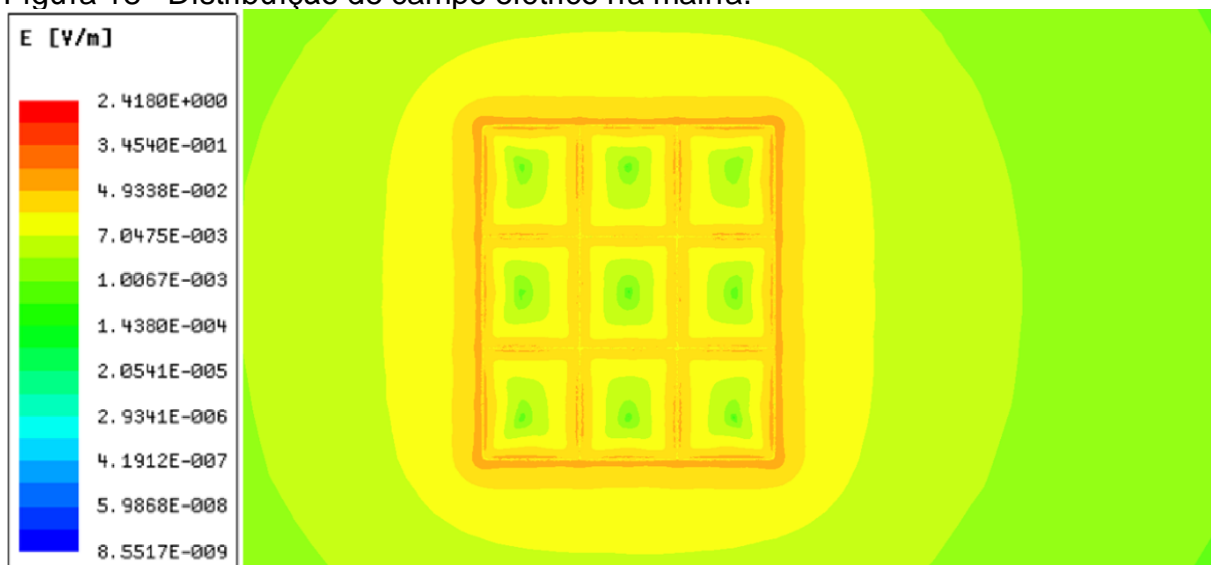
Figura 17 - Ponto da injeção da corrente e detalhe da diagonal.



Fonte: Do autor (2023)

Feito isso, o software gera uma projeção da distribuição de campo elétrico ao longo do caminho da semiesfera, como pode-se verificar na Fig. 18.

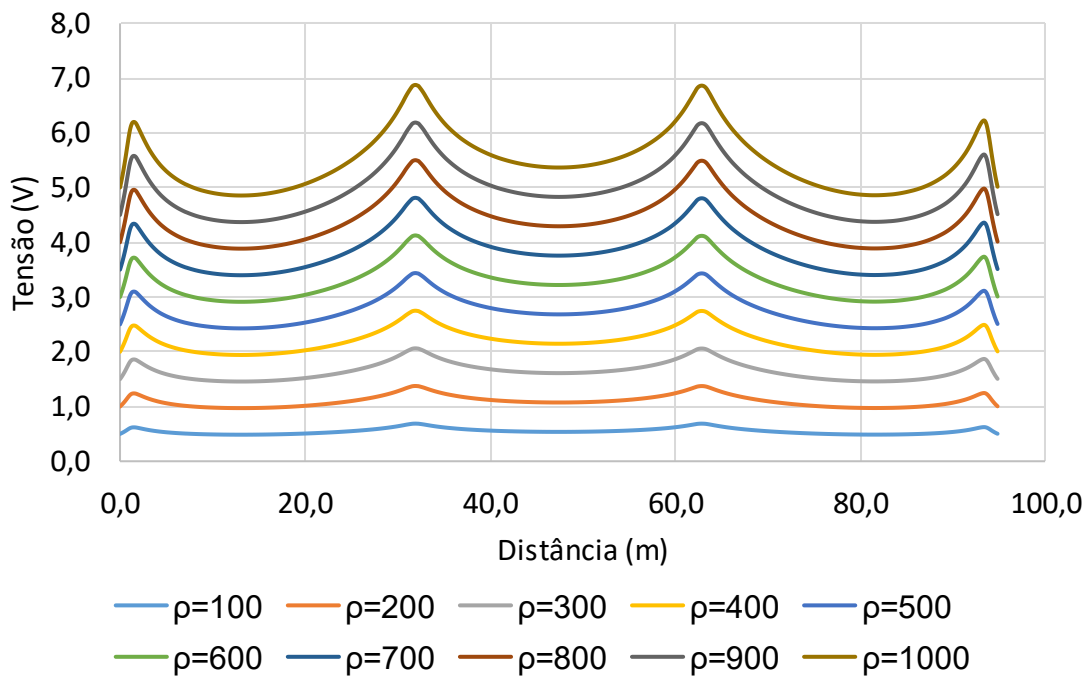
Figura 18 - Distribuição de campo elétrico na malha.



Fonte: Do autor (2023)

Com esses resultados é possível a obtenção da distribuição de potencial da malha. A Fig. 19 mostra a distribuição de potencial ao nível do solo em função dos diversos valores de resistividade.

Figura 19 - Dados obtidos de tensão ao longo da malha.



Fonte: Do autor (2023)

Na Tab. 04, estão listados os potenciais máximos de toque e passo para os diferentes valores de resistividade do solo.

Tabela 04 - Dados gerais de resistência de aterramento e potenciais obtidos.

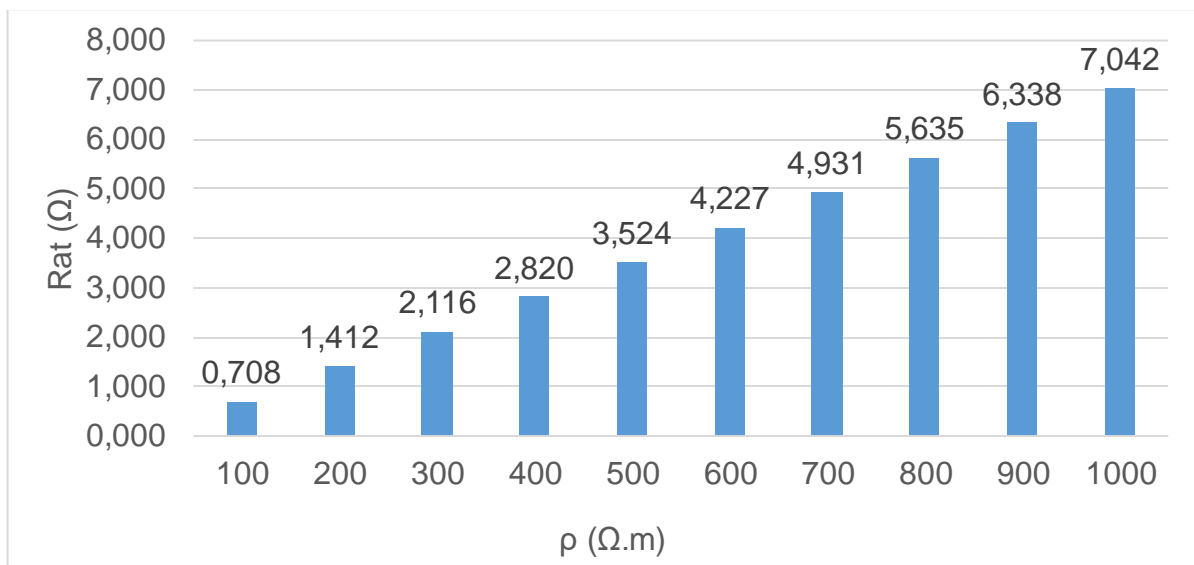
ρ ($\Omega.m$)	R_{at} (Ω)	Potencial a 1 m (V)	Potencial passo (V)	Potencial toque (V)
100	0,708	0,598	0,098	0,111
200	1,412	1,196	0,196	0,216
300	2,116	1,794	0,295	0,321
400	2,820	2,393	0,393	0,427
500	3,524	2,991	0,491	0,532
600	4,227	3,590	0,589	0,638
700	4,931	4,188	0,688	0,743
800	5,635	4,786	0,786	0,849
900	6,338	5,384	0,884	0,954
1000	7,042	5,982	0,982	1,059

Fonte: Do autor (2023)

Como pode-se observar na Fig. 19, diferenças de potencial máximas ocorrem nas extremidades externas da malha, e nestes locais cuidados adicionais devem ser tomados no que se refere à suportabilidade de pessoas.

Na Fig. 20 a seguir, pode-se verificar a variação dos níveis de resistência de aterramento de acordo com a escala proposta de resistividade aparente.

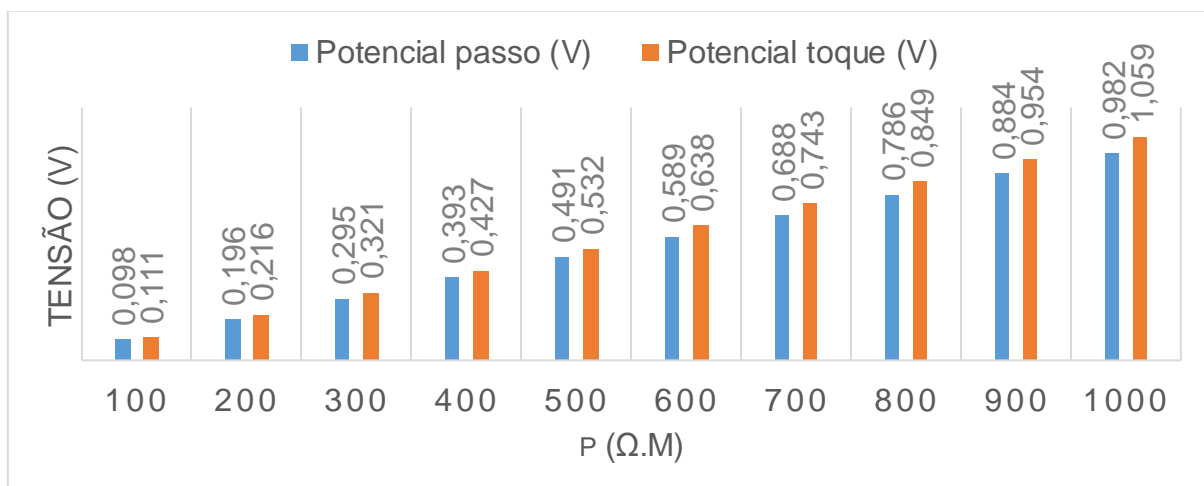
Figura 20 - Níveis de resistência de aterramento obtidos na simulação.



Fonte: Do autor (2023)

Na Fig. 21, pode-se verificar os potenciais máximos obtidos.

Figura 21 - Potenciais de toque e de passo máximos para as diferentes resistividades.



Fonte: Do autor (2023)

Potencial de passo no pior caso: Diferença do valor da tensão na extremidade da malha com relação a um ponto a 1 m da malha no nível da malha.

Potencial de toque no pior caso: Diferença entre o potencial da malha e o potencial ao nível do solo um metro de distância.

A nível de estudo, as simulações foram feitas com uma injeção de 1 A no circuito da malha. Para obtenção dos potenciais reais durante um curto-circuito no sistema ou uma injeção de corrente de descarga é necessário se conhecer o valor de corrente, o que é definido na implantação da usina.

5 – CONCLUSÃO

A instalação de um SPDA em uma usina solar fotovoltaica instalada em campo aberto é de suma importância, pois garante que as correntes oriundas de descargas atmosféricas, sejam escoadas para o solo de maneira segura e adequada, sem que prejudiquem a produção de energia da usina e nem comprometam a segurança da instalação e da vida humana. Para isso, deve-se seguir todas as normas e recomendações, para garantir a qualidade de operação do sistema de proteção.

Foram levantadas as principais características de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para uma possível implementação em uma usina solar fotovoltaica instalada em campo aberto, de forma a melhorar a compreensão dos processos e cuidados necessários para a sua correta instalação. Foram obtidos através de simulações no software Ansys Maxwell, os níveis de potenciais de toque e de passo da usina, a efeito de estudo para a possível comparação.

A partir dos dados considerados foi desenvolvido o projeto, onde foi possível demonstrar os materiais e procedimentos necessários para a instalação completa de um SPDA. O sistema de captação, que é responsável por captar a descarga, foi dimensionado pelo método da esfera rolante, tomando-se o cuidado para não comprometer a geração de energia da usina com possíveis sombreamentos. O sistema de distribuição de corrente, responsável por fazer a condução e descida da corrente, foi feito por meio de mastros, a fim de evitar os efeitos destrutivos da passagem da corrente da descarga, que podem ocorrer quando é utilizada a própria estrutura das placas. O sistema de aterramento, que é

responsável por dissipar a corrente pelo solo, contou com malhas ao redor dos grupos de placas e demais materiais que compõem esse sistema, completando o SPDA. Todos os sistemas atuam em conjunto e devem ser instalados de forma correta a fim de garantir uma boa conexão em todos os pontos, para que as correntes oriundas das descargas atmosféricas sejam escoadas e dissipadas de forma segura.

O objetivo desse trabalho foi mostrar os passos para o desenvolvimento de um SPDA para uma usina solar implantada em campo aberto. Para continuidade desse trabalho sugere-se o desenvolvimento dos cálculos e ações necessárias para dimensionamento das camadas superficiais do solo de forma a reduzir os níveis aceitáveis das correntes de choque.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5419:2001 - Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.** Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro - RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas., , 2001.

ABNT. **NBR 5419:2018 - Proteção contra descargas atmosféricas. Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura** Rio de Janeiro - RJ Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. NBR 15749: **Medição de resistências de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.** Rio de Janeiro, p. 49. 2009.

ABNT. NBR 16690;2019 - **Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos** - Requisitos de projetos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. mar. 2019.

ABSOLAR. **Dados de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.** Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/>>. Acesso em: 16 out. 2021.

CNN BRASIL. **Dados e estatísticas.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/demanda-global-crescente-por-energia-eletrica-gera-alerta-para-danos-climaticos>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

DA COSTA BRANDÃO, J. A. et al. **A proposal for an Atmospheric Discharge Protection System (ADPS)** for a Public School in the City of Manaus-AM. International Journal for Innovation Education and Research, v. 7, n. 11, p. 1030–1037, 30 nov. 2019.

Dalziel, Charles F. **Os efeitos do choque elétrico no homem.** Comissão de Energia Atômica dos EUA, Escritório de Saúde e Segurança, 1956.

DEHN. **Lightning Protection Guide.** 3rd update ed. Neumarkt - Germany: Söhne

GmbH & Co. KG, 2014.

DOS SANTOS, V. H. N.; MORBACH, M. L.; TEIXEIR, L. DE P. Fatores que afetam a resistividade do solo. **Revista Tecnológica da FATEC-PR**, v. 1, n. 11, p. 106–116, 2020.

FREIRE, P. **Sistema de aterramento de uma usina solar fotovoltaica**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/sistema-de-aterramento-de-uma-usina-solar-fotovoltaica/>>. Acesso em: 24 set. 2021.

IEA. **Data and statistics**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 08 mar. 2021.

IEA. **Data and statistics**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

IEC. **62305-1:2010 - Protection against lightning - Part 1: General principles** Geneva, Switzerland International Electrotechnical Commission, , 2010c.

IEC. **62305-2:2010 - Protection against lightning - Part 2: Risk management** Geneva, Switzerland International Electrotechnical Commission, , 2010d.

IEC. **62305-3:2010 - Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard** Geneva, Switzerland International Electrotechnical Commission, , 2010a.

IEC. **62305-4:2010 - Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures** Geneva, Switzerland International Electrotechnical Commission, , 2010b.

IEC. **TS 62738:2018 - Ground-mounted photovoltaic power plants - Design guidelines and recommendations** Geneva, Switzerland International Electrotechnical Commission, , 2018.

IEC. **63227- Lightning and surge protection for photovoltaic (PV) power supply systems**. out. 2020

IEEE. **P2778/D4 - Draft Guide for Solar Power Plant Grounding for Personnel Protection** New York, USA Institute of Electrical and Electronics Engineers, , 2019.

JULIATE, V. M. DE O.; LAGE, E. G. S. Avaliação do impacto de correntes elétricas em estruturas de concreto armado. **Technology Sciences**, v. 1, n. 2, p. 37–45, 18 nov. 2019.

KINDERMANN; CAMPAGNOLO, **Aterramento elétrico**, 2ª ed, 1992).

KINDERMANN; CAMPAGNOLO, **Aterramento elétrico**, 3ª ed, 1995.

KINDERMANN; CAMPAGNOLO, **Aterramento elétrico**, 3ª ed, 1998).

MARVEL, K.; AGVAANLUVSAN, U. Random matrix theory models of electric grid topology. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 389, n. 24, p. 5838–5851, dez. 2010.

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

SANTOS, S. R. **Proteção contra descargas atmosféricas em usinas fotovoltaicas**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/protacao-contra-descargas-atmosfericas-em-usinas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 24 set. 2021.

TAVARES, S. J. S.; GOMES, R. DE C.; LIMA, L. CARMO DE. **Proteção de sistemas de microgeração solar fotovoltaica contra descargas atmosféricas: uma abordagem técnico-científica**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. **Anais...**Fortaleza - CE: CBENS, 2020

TELLÓ ,M. **Aterramento Elétrico. Impulso, Em Baixa E Alta Frequências**, fev. 2007.

VOLUT, S.; SCHONEK, J. **Electrical installation guide: According to IEC international standards**. Les Deux-Ponts - France: Schneider Electric S.A., 2008.