

Dimensionamento e Análise de Desempenho do Sistema de Aterramento em Complexos de Usinas Fotovoltaicas Utilizando o Software XGSLab

Erike José Ferreira Santos
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0009-0005-8701-8178

Paulo Henrique Oliveria Rezende
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0000-0001-6156-7324

Jordana Alves de Freitas
Laboratório de Qualidade da Energia
Elétrica (LabQEE)
Universidade Federal de Uberlândia
(UFU)
Uberlândia, Brasil
ORCID: 0009-0009-2513-1991

Diego Augusto de Lima Santana
Aupus Energia
Goiânia, Brasil
diego@aupusenergia.com.br

Resumo — Este artigo aborda o estudo e dimensionamento do sistema de aterramento para as usinas fotovoltaicas Santa Branca e Solar Power. O trabalho considera a caracterização do solo por meio de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), a aplicação de normas técnicas vigentes e a utilização da ferramenta computacional XGSLab, para análise do desempenho do sistema. São discutidos aspectos fundamentais como resistividade do solo, tensões de passo e toque, elevação de potencial de terra (GPR) e configurações adequadas de aterramento para garantir a segurança da instalação. A abordagem adotada busca assegurar a conformidade com os requisitos normativos e oferecer uma solução eficiente e segura para o complexo fotovoltaico.

Palavras-chave — Sistema de aterramento, usinas fotovoltaicas, Sondagem Elétrica Vertical, XGSLab.

Abstract — This paper addresses the study and design of the grounding system for the Santa Branca and Solar Power photovoltaic plants. The work considers the characterization of the soil by means of Vertical Electrical Sounding (VES), the application of current technical standards and the use of the XGSLab computational tool to analyze the system performance. Fundamental aspects such as soil resistivity, step and touch voltages, ground potential rise (GPR) and appropriate grounding configurations to ensure the safety of the installation are discussed. The adopted approach seeks to ensure compliance with regulatory requirements and to offer an efficient and safe solution for the photovoltaic complex.

Keywords — Grounding system, photovoltaic plants, Vertical Electrical Survey, XGSLab.

I. INTRODUÇÃO

A expansão da geração de energia a partir de fontes renováveis tem ganhado destaque globalmente, impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar os impactos ambientais. Dentre as fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma das mais promissoras devido à sua abundância, sustentabilidade e redução progressiva de custos [1]. No entanto, o crescimento acelerado da geração solar traz desafios

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

técnicos e operacionais que exigem soluções eficazes para garantir a segurança e a eficiência das instalações.

Um dos aspectos críticos na implantação de usinas fotovoltaicas é o projeto adequado do sistema de aterramento. Esse sistema é essencial para garantir a proteção de pessoas e equipamentos, assegurando o escoamento seguro de correntes de falta e descargas atmosféricas [2]. Um aterramento inadequado pode resultar em falhas operacionais, riscos de choque elétrico e danos irreparáveis aos componentes da planta.

A concepção de um sistema de aterramento eficiente requer uma abordagem multidisciplinar, envolvendo o estudo detalhado das condições do solo, a aplicação de normas técnicas rigorosas e a utilização de ferramentas computacionais avançadas para a modelagem e análise do desempenho do sistema [3]. Diversas normativas nacionais e internacionais, como a NBR 7117-1 e a IEEE Std 80, orientam as boas práticas para o dimensionamento de sistemas de aterramento, garantindo conformidade regulatória e operacional.

Neste contexto, este estudo tem como objetivo descrever os procedimentos e resultados de uma medição em campo de uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) no local futuro de instalação de um complexo de Usina Fotovoltaica (UFV). Será realizado uma análise detalhada dos dados coletados e análises das configurações do sistema de aterramento com o emprego de ferramenta computacional especializada, o software XGSLab, constando também a descrição das características físicas e construtivas do sistema com o objetivo de atender os requisitos dos equipamentos da usina fotovoltaica (UFV). Este trabalho se pauta pela observância de normas técnicas, recomendações e padrões nacionais e internacionais, com vistas ao projeto do sistema de aterramento adequado às exigências constantes dos manuais de fabricantes de equipamentos elétricos de potência em especial aos inversores fotovoltaicos.

II. NORMAS TÉCNICAS

O desenvolvimento de um sistema de aterramento eficaz para usinas fotovoltaicas exige conformidade com normas

técnicas reconhecidas nacional e internacionalmente. Essas normas estabelecem parâmetros essenciais para garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas, além de assegurar o desempenho adequado do sistema em diversas condições operacionais.

No contexto brasileiro, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define diretrizes fundamentais por meio de normativas específicas, como:

- NBR 7117-1:2021 – Estabelece os procedimentos para medição da resistividade do solo e modelagem geoeletrica, garantindo uma análise precisa das características do terreno [2].
- NBR 15751:2013 – Define os requisitos gerais para sistemas de aterramento de subestações, assegurando que as instalações cumpram os padrões de segurança elétrica [4].
- NBR 15749:2009 – Estabelece os procedimentos para medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento [5].
- NBR 16254:2014 – Regula os materiais empregados nos sistemas de aterramento, especificando critérios técnicos para condutores e eletrodos [6].

Além das normas nacionais, diretrizes internacionais complementam o projeto, proporcionando uma visão abrangente e consolidada da segurança em sistemas de aterramento. Dentre as principais normas internacionais, destacam-se:

- IEEE Std 80-2013 – Guia essencial para o aterramento em subestações de corrente alternada, fornecendo critérios para proteção contra tensões perigosas de passo e toque [3].
- IEEE Std 81-2012 – Fornece diretrizes para a medição precisa da resistividade do solo, impedância de aterramento e potenciais de superfície [7].
- IEEE Std 2778-2020 – Guia específico para sistemas de aterramento em usinas fotovoltaicas, abordando requisitos de segurança para proteção pessoal e confiabilidade operacional [8].

A correta aplicação dessas normas permite uma abordagem estruturada e segura na concepção dos sistemas de aterramento, garantindo conformidade regulatória e operacional. Assim, a adesão rigorosa às diretrizes estabelecidas contribui para a prevenção de falhas, proteção contra surtos elétricos e aumento da vida útil dos equipamentos.

III. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)

O local de realização da Sondagem Elétrica Vertical consiste em uma área atual de plantação de grãos, dentro da fazenda Santa Branca, localizada no município de Terezópolis de Goiás, a qual abrigará futuramente uma usina com geração fotovoltaica.

A Fig. 1, extraída do *Google Maps*, ilustra a localização do terreno disponibilizado para o projeto e o local onde foram efetuadas as medições em campo. A área está situada na zona rural, porém é bastante próxima da cidade, como pode ser verificado na imagem e pelo destaque das 3 áreas na cor azul.



Fig. 1. Localização das áreas de estudo no município de Terezópolis de Goiás, GO. (Extraído do *Google Earth*).

As áreas somam aproximadamente 20 hectares e sua coordenadas do Ponto inicial (indicado na Fig. 1) em graus, minutos e segundos é $16^{\circ}27'10.08''S$ (latitude), $49^{\circ}6'21.52''O$ (longitude) e está situada à aproximadamente 808 metros de altitude.

As medições em campo foram realizadas nos dias 15/02/2024 e 16/02/2024. Sendo que nos dois dias apresentaram condição ensolarada com temperaturas variando entre $23,5^{\circ}C$ e $31,5^{\circ}C$, umidade relativa do ar em torno de 60% a 85% e com radiação atingindo picos de aproximadamente $3126,80 \text{ KJ/m}^2$ às 14:00h. Segundo informações do INMET a última precipitação considerável no local, ocorreu em 07/02/2024 com 0,2 mm.

A. Características do equipamento para medição: Resistivímetro

Para a finalidade deste trabalho, foi empregado um Resistivímetro digital de quatro bornes, com capacidade de injeção de corrente de até 500 mA e tensão de 750Vcc, modelo **X6xtal 500** da marca **Auto Energia**. Este equipamento é indicado pelo Anexo B da norma NBR7117-1:2021 como substituição ao terrômetro convencional, devido à sua capacidade de trabalhar com corrente contínua e apresentar uma potência significativamente superior (cerca de 100 vezes maior do que o terrômetro), o que viabiliza a medição de potenciais mais elevados. Isso resulta em uma melhor relação sinal/ruído e, portanto, medições de maior precisão, especialmente em solos com resistividade mais alta ou em configurações de eletrodos de corrente mais amplas.

B. Método dos Quatros Eletrodos com arranjo de Wenner

O método de Wenner é uma técnica de prospecção geoeletrica amplamente utilizada para medir a resistividade aparente do solo. Utiliza um arranjo de quatro hastes dispostas linearmente, onde a resistividade é determinada a partir da relação entre a corrente injetada nas hastes de corrente e a tensão medida entre as hastes de potencial. A resistividade aparente, obtida pela equação de Palmer, considera o espaçamento uniforme 'a' entre os eletrodos e a profundidade 'b' dos mesmos.

Para garantir uma caracterização uniforme do solo, a norma ABNT NBR 7117-1 recomenda a realização de medições em várias linhas distribuídas na área de estudo, com espaçamentos entre eletrodos seguindo potências de 2 (1 m, 2 m, 4 m, etc.). Além disso, deve-se considerar a variação sazonal da resistividade do solo, sendo indicado realizar medições no período mais seco do ano. No entanto, por razões contratuais e financeiras, nem sempre é viável aguardar a estação ideal, mas é fundamental respeitar um intervalo mínimo de sete dias sem chuvas antes da medição para evitar distorções nos resultados. Nesse caso, foi respeitado a estiagem mínima.

C. Localização das linhas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e dados registrados durante as medições

Conforme é indicado pela ABNT NBR 7117-1, foram realizadas medições de resistividade aparente do solo em diversas direções dentro da área destinada à instalação das UFVs. Conforme o item 5.3.2.3 da norma, áreas superiores a 20.000 m² ou com diagonais superiores a 200 m devem ser subdivididas em áreas menores, permitindo a redução do número de medições em cada subárea a critério do projetista.

A Fig. 2 apresenta as direções das 20 linhas de medição realizadas, que seguiram espaçamentos progressivos de 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m e 32 m, sendo que 5 dessas linhas incluíram espaçamentos de até 64 m. As medições foram conduzidas nos dias 15 e 16 de fevereiro de 2024, e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.



Fig. 2. Direções das linhas de medições executadas.

TABELA 1. RELAÇÃO (V/I) LIDA NO RESISTIVÍMETRO, A PARTIR DO MÉTODO DE WENNER, PARA AS DIFERENTES LINHAS DE MEDIÇÕES.

RELAÇÃO (V/I) LIDA NO RESISTIVÍMETRO	ESPAÇAMENTO (M)						
	1	2	4	8	16	32	64
MEDICÃO 01	39,9	22,1	13,3	10,2	7,9	3,8	1,4
MEDICÃO 02	63,8	37,5	19,7	13,2	8,2	4,3	
MEDICÃO 03	69,9	40,3	21,0	12,6	8,7	3,7	
MEDICÃO 04	74,5	36,7	19,7	14,7	8,2	2,9	
MEDICÃO 05	54,1	32,4	20,4	14,9	8,9	3,2	
MEDICÃO 06	62,0	42,3	25,6	13,3	5,7	10,6	0,4
MEDICÃO 07	92,7	57,9	31,1	17,3	8,2	2,4	
MEDICÃO 08	91,3	56,2	12,0	16,9	7,7	2,9	
MEDICÃO 09	96,6	59,2	31,7	13,8	5,6	0,9	
MEDICÃO 10	83,7	52,8	19,8	11,8	6,0	3,0	
MEDICÃO 11	77,8	54,0	29,9	13,5	2,7	1,5	
MEDICÃO 12	68,6	43,8	25,0	14,0	6,8	2,1	0,9
MEDICÃO 13	74,3	3,4	15,2	12,4	6,91	1,9	0,9
MEDICÃO 14	74,7	41,6	21,3	14,2	10,0	4,3	
MEDICÃO 15	94,8	58,0	33,6	21,3	14,0	7,4	
MEDICÃO 16	69,4	50,2	36,3	9,2	12,3	5,4	
MEDICÃO 17	69,0	56,6	33,6	20,5	16,4	5,0	9,0
MEDICÃO 18	86,3	54,0	31,9	20,4	12,4	4,8	
MEDICÃO 19	76,0	45,1	30,3	20,5	10,2	3,9	
MEDICÃO 20	71,6	46,4	30,4	20,2	9,6	3,8	

D. Obtenção da Resistividade Aparente em cada linha de SEV

Para a obtenção dos valores de resistividade aparente em cada espaçamento de medição pelo método de Wenner, utilizou-se a Equação de Palmer, considerando uma profundidade de haste de 20 cm. Recomenda a eliminação de valores extremos (outliers) que possam comprometer a modelagem representativa do solo. Assim, os valores de resistividade aparente foram submetidos a uma filtragem estatística, na qual se calculou o logaritmo de cada valor, seguido da média aritmética e do desvio padrão. Valores situados fora do intervalo de $\pm$ dois desvios-padrão foram eliminados, e a média foi recalculada com os dados remanescentes.

A Tabela 2 apresenta os valores das resistividades aparentes obtidas após a filtragem, com os valores eliminados

destacados. A partir desses dados, foi gerada a Fig. 3, que exibe a curva média de resistividade aparente do solo até a profundidade de 64 metros, juntamente com uma linha de tendência polinomial de ordem 3, permitindo uma interpretação detalhada do perfil do solo.

TABELA II. LOGARITMOS DAS RESISTIVIDADES APARENTES PARA VERIFICAÇÃO DE VALORES EXTREMOS.

LOGARITMOS DAS RESISTIVIDADES [Ω.m]	ESPAÇAMENTO (M)						
	1	2	4	8	16	32	64
MEDIÇÃO 01	2,43	2,45	2,53	2,71	2,90	2,88	2,74
MEDIÇÃO 02	2,63	2,68	2,70	2,82	2,92	2,93	
MEDIÇÃO 03	2,67	2,71	2,73	2,80	2,94	2,87	
MEDIÇÃO 04	2,70	2,67	2,70	2,87	2,92	2,76	
MEDIÇÃO 05	2,56	2,62	2,71	2,88	2,95	2,81	
MEDIÇÃO 06	2,62	2,73	2,81	2,83	2,76	3,33	2,23
MEDIÇÃO 07	2,79	2,87	2,89	2,94	2,92	2,68	
MEDIÇÃO 08	2,79	2,86	2,48	2,93	2,89	2,76	
MEDIÇÃO 09	2,81	2,88	2,90	2,84	2,75	2,26	
MEDIÇÃO 10	2,75	2,83	2,70	2,77	2,78	2,77	
MEDIÇÃO 11	2,72	2,84	2,88	2,83	2,43	2,49	
MEDIÇÃO 12	2,66	2,75	2,80	2,85	2,84	2,62	2,55
MEDIÇÃO 13	2,70	2,69	2,58	2,80	2,84	2,59	2,56
MEDIÇÃO 14	2,70	2,73	2,73	2,85	,00	2,93	
MEDIÇÃO 15	2,80	2,87	2,93	3,03	3,15	3,17	
MEDIÇÃO 16	2,67	2,81	2,96	2,67	3,09	3,04	
MEDIÇÃO 17	2,66	2,86	2,93	3,01	3,22	3,01	
MEDIÇÃO 18	2,76	2,84	2,91	3,01	3,10	2,99	
MEDIÇÃO 19	2,71	2,76	2,88	3,01	3,01	2,89	
MEDIÇÃO 20	2,68	2,77	2,89	3,01	2,98	2,88	
MÉDIA ARITMÉTICA DOS LOG.	2,70	2,78	2,81	2,87	2,94	2,86	2,52
DESVIO PADRÃO DOS LOG.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
MÉDIA [Ω.m] (LOG. INVERSO)	505,8	598,3	649,3	746,9	880,7	732,6	331,2

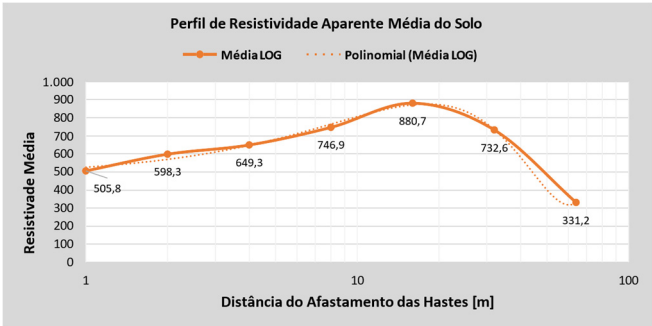


Fig. 3. Gráfico das resistividades aparentes médias (medida) e com linha de tendência.

IV. INVERSÃO DA CURVA DE RESISTIVIDADE APARENTE (ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO)

Para realizar a inversão da curva de Resistividade Aparente, utiliza-se a ferramenta computacional *IPI2win* para a Modelagem 2D do solo (estratificação do solo). Dessa forma, os dados de entrada são extraídos das primeiras e últimas linhas da Tabela 2. O solo é então, modelado em três camadas, modelo que melhor representa as resistividades medidas em campo. A Tabela 3 detalha melhor as camadas apresentadas pelo software, trazendo tanto os dados de Resistividade Aparente de cada camada quanto a espessura correspondente.

TABELA III. RESULTADO DO PROCESSO DE INVERSÃO DA CURVA (3 CAMADAS) NA MODELAGEM GEOELÉTRICA.

Nº De Camadas	Resistividade Aparente da Camada [Ω.m]	Espessura da camada [m]	Profundidade até a base da camada [m]
1	549,0	3,67	3,67
2	1101,0	23,4	27,1
3	116,0	∞	∞

A Fig. 4 apresenta graficamente a precisão da estratificação obtida com a ferramenta *IPI2win*. A curva em vermelho representa o modelo de solo estratificado em camadas ajustado aos pontos de resistividades aparentes medidas, em função do espaçamento em escala logarítmica.

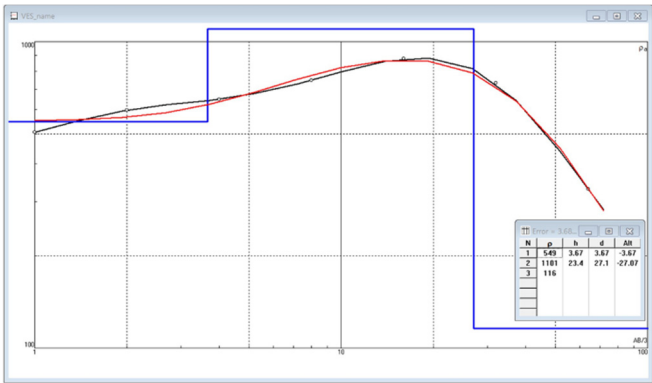


Fig. 4. Curva em vermelho obtida do modelo de solo estratificado em camadas e ajustada aos pontos referentes aos dados medidos em campo (escala log-log).

O desvio percentual é calculado em relação ao respectivo valor medido. Observa-se que o maior desvio é 3,68%, um valor bem abaixo do aceitável (<10% é considerado baixo) segundo a literatura técnica, considerando que se trata da

grandeza resistividade aparente do solo. Portanto, a inversão da curva de Resistividade Aparente (estratificação) obtida é considerada satisfatória, tendo em vista as análises que serão efetuadas neste trabalho.

V. PROJETO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DO COMPLEXO DE UFVS

Os próximos tópicos destinam-se a apresentar os detalhes geográficos e elétricos do local de implantação das Usinas Fotovoltaicas (UFVs), além das variáveis que influenciam o projeto e análise de desempenho do sistema de aterramento proposto.

A. Informações Gerais Sobre o Sistema Elétrico de Conexão das UFVs

Conforme detalhado em seções anteriores, o presente estudo tem como um dos seus objetivos o projeto do sistema de aterramento do complexo de geração fotovoltaico, composto pelas UFV Santa Branca (UFV-STB) e pela UFV Solar Power (UFV-SP). Ambas possuem capacidade de geração de até 5.000 kW e estão localizadas lado a lado, fazendo divisa entre si. A UFV-SP é cortada pela estrada rural Nicolau Lunardelli, conforme Fig. 5, dividindo a usina em duas partes com capacidade de geração menor: UFV Solar Power Oeste (UFV-SPO) com 2.500 kW e UFV Solar Power Leste (UFV-SPL) com 2.500 kW.

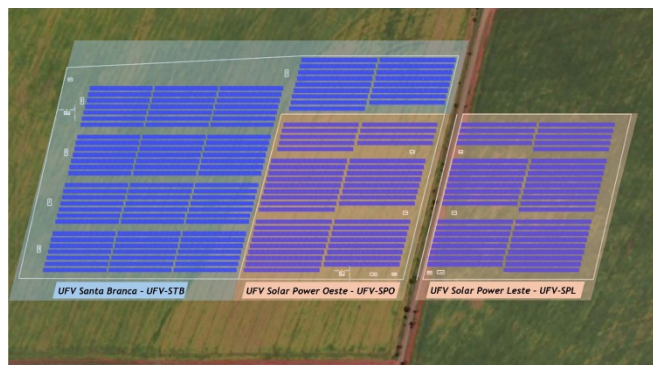


Fig. 5. Identificação do layout e delimitações físicas das UFVs.

A UFV-STB possui coordenadas geográficas 16°27'10,16"S Latitude, 49°6'32,61"O Longitude e será conectada à rede da concessionária Equatorial Goiás através do circuito 35N da subestação Nerópolis, pelo Transformador TR1 - 69/34,5 kV, com capacidade instalada de 12,5 MVA.

A UFV-SP possui coordenadas geográficas 16°27'6,32"S Latitude, 49°6'19,15"O Longitude e será conectada à rede da Equatorial Goiás através do circuito 32 da subestação Goianópolis, pelo Transformador TR1 - 34,5/13,8 kV, com capacidade instalada de 6,25 MVA. A UFV-SP terá duas cabines de medições, uma na UFV-SPO e outra na UFV-SPL, interligadas pelo mesmo alimentador.

B. Informações sobre a corrente de falta Fase-Terra (monofásica)

As falhas no sistema de corrente alternada (CA) de baixa tensão (BT) pode resultar em correntes de alta magnitude, mas sem contribuir para o aumento do potencial de terra (GPR). Caso o transformador esteja aterrado, a corrente proveniente de uma falta Fase-Terra circulará principalmente pelos caminhos metálicos locais; caso contrário, será essencialmente zero.

Para as UFVs citadas, tem-se as seguintes condições:

- Estima-se uma corrente de falta Fase-Terra de 3,0 kA, uma vez que a falta trifásica se aproxima de 6,5 kA;

- A rede de média tensão (MT) de 34,5 kV não possui cabo para-raios nem mensageiro aterrados, sendo um circuito simples, com cabo CAA 1/0 AWG. Assim, a corrente total de curto-circuito fluirá para o sistema de aterramento sem divisão (Split Factor $S_f = 1,0$).

Assim, a corrente de malha é igual à corrente total do curto-circuito monofásico:

$$IG = I_{malha} = 3.000 \text{ A}$$

C. Dimensionamento da seção mínima da cordoalha do sistema de aterramento

De acordo com a NBR 15751 e a IEEE Std 80, a seleção da seção dos eletrodos horizontais depende da corrente de curto-circuito Fase-Terra ($I = 3.000 \text{ A}$) e do material condutivo.

Para os condutores, recomenda-se o uso de cobre duro comercial com 97% de condutividade. A área mínima pelo critério térmico é calculada pela fórmula de Onderdonk, dessa forma chegamos ao valor de $S > 4,8 \text{ mm}^2$.

Contudo, o critério de esforço mecânico também deve ser atendido, estabelecendo que a seção reta não pode ser inferior a 50 mm² para cobre nu e 70 mm² para aço cobreado.

Para este projeto, seleciona-se a cordoalha de 50 mm², com 7 fios trancados conforme NBR 16254, de aço cobreado ou cobre nu, têmpera meio dura com 97% de condutividade.

As conexões dos eletrodos podem ser feitas por solda exotérmica ou conectores de compressão (SACC) com ferramenta tipo prensa hidráulica.

D. Dimensionamento dos limites de segurança

São determinados os limites de segurança para as tensões de passo (U_{stp}) e toque (U_{ssp}) máximas admissíveis ao corpo humano em condições de curto-circuito de curta duração. A análise considera os cenários mais críticos, levando em conta fatores como o tempo de eliminação da falta, o peso corporal para diferentes áreas do parque e o uso de equipamentos de proteção. Para a área interna, adota-se um peso de 70 Kg devido ao controle de acesso e uso obrigatório de EPIs, enquanto para a área externa considera-se 50 Kg, devido à possibilidade de presença de pessoas sem proteção. Além disso, considera-se a ausência de brita na planta fotovoltaica, o que impacta a dissipação da corrente elétrica.

As tensões de passo e toque são calculadas utilizando equações padronizadas, e os resultados são apresentados na Tabela 4, com os valores admissíveis para diferentes condições. As análises adotam a mesma nomenclatura do software XGSLab, utilizado para a simulação do sistema de aterramento.

TABELA IV. TENSÕES ADMISSÍVEIS PARA CORRENTES DE CURTA DURAÇÃO

	Símbolo			
	U_{stp50}	U_{ssp50}	U_{stp70}	U_{ssp70}
Resultado	482,0V	1150,0V	652,3V	1556,0V

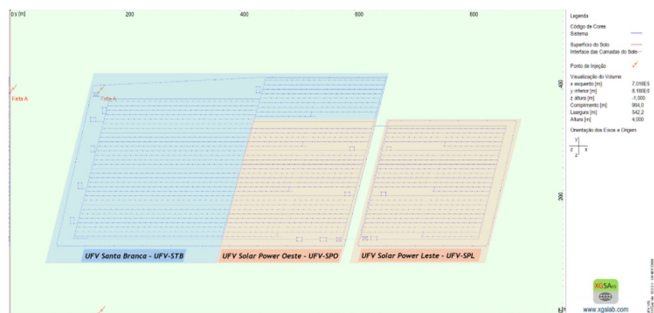
Nesta seção, detalha-se o processo de configuração final sistema de aterramento utilizando o software XGSLab, desenvolvido da EasyPower. O XGSLab é uma ferramenta desenvolvida para análise e design de sistemas de aterramento em diversas instalações, como usinas fotovoltaicas, permitindo a modelagem detalhada de terrenos e avaliação precisa de parâmetros de passo e toque. Ele atende às normas IEEE e IEC, possui interface intuitiva e recursos de otimização para soluções eficientes e econômicas. Destaca-se por considerar os efeitos dos condutores de forma não ideal, levando em conta as impedâncias próprias e mútuas, além dos “frames” dos postes e cercas.

A modelagem do sistema baseia-se nos projetos de alocação dos painéis fotovoltaicos, cabine de medição, skids e cerca perimetral, abrangendo as usinas UFV Santa Branca (UFV-STB), UFV Solar Power Oeste (UFV-SPO) e UFV Solar Power Leste (UFV-SPL), com uma área total de aproximadamente 200.000 m².

- **Condutores Enterrados:** Aço cobreado ou cobre nu de 50 mm², instalados a 0,6m de profundidade, interligando setores de 1.000 kWp e Conversion Units, com hastes de 3/4" e 2,4 m no perímetro das cabines de medição.

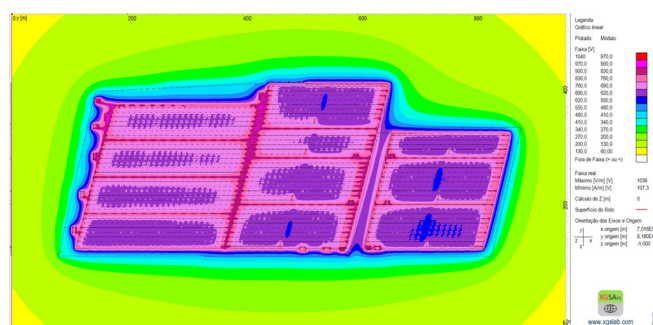
- Estruturas dos Trackers: Modeladas como tubulação metálica revestida por concreto de 30 cm de diâmetro e 1 m de comprimento.
- Interligação das Mesas de Painéis: Utilização de cabos isolados para ligação entre bases dos trackers e o anel de aterramento, com atenção à corrosão galvânica entre metais diferentes.
- Cerca Perimetral: Simulada com cabos isolados interligados a hastes de aço cobreado, desconectada do aterramento do parque e seccionada a cada 250 m.
- Corrente de Curto-Circuito: 3.000 A aplicada ao anel de proteção das cabines de medição.
- Tempo de Eliminação da Falta: 0,2 segundos.

Essas premissas garantem um sistema de aterramento seguro e eficiente, assegurando a integridade da planta fotovoltaica e a proteção de trabalhadores e equipamentos. A Fig. 6 mostra o sistema descrito, modelado no XGSLab.



Este tópico apresenta os principais resultados obtidos na análise do sistema de aterramento, incluindo a elevação de potencial de terra (GPR), impedância de aterramento, tensões de passo e toque, áreas seguras e distribuições de correntes. Essas análises são essenciais para assegurar a segurança e a eficácia do sistema, permitindo a identificação de possíveis riscos e a aplicação de medidas corretivas.

A elevação de potencial de terra (GPR) é analisada em relação ao terra-remoto, considerando o comportamento da malha de aterramento diante de uma injeção de corrente de curto-circuito fase-terra. As Figuras 7 e 8 ilustram a distribuição do GPR em visualizações 2D e 3D, respectivamente. Os resultados indicam uma impedância de aterramento de aproximadamente 0,35 ohms, típica para sistemas de grande porte, resultando em uma elevação máxima de potencial de 1063,49 V para uma corrente de curto-circuito de 3,0 kA.



B.2 Análise das Tensões de Passo

As tensões de toque e de passo, designadas pelos símbolos U_{stp} e U_{ss} no software XGSLab, foram analisadas em diversos pontos do sistema de aterramento, apresentando valores mais elevados na periferia e nos cantos. A análise, ilustrada nas Figuras 9 e 10, mostra que a tensão de passo máxima registrada foi de 83,45 V, correspondendo a 7,2% do limite permissível de 1150 V para uma pessoa de 50 kg. Embora dentro do parque solar o risco seja reduzido devido ao acesso controlado e uso obrigatório de botas isolantes, a área externa à cerca exige maior atenção, embora os resultados tenham permanecido dentro dos limites de segurança estabelecidos.

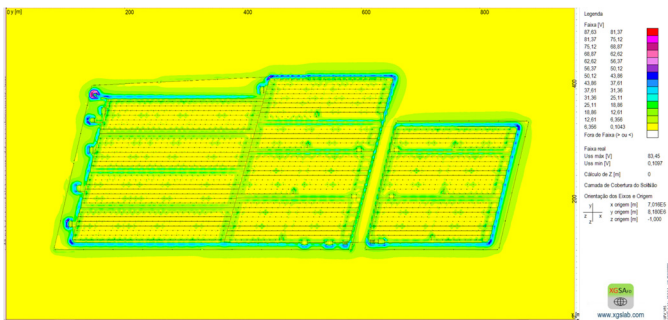


Fig. 9. Distribuição em 2D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg.

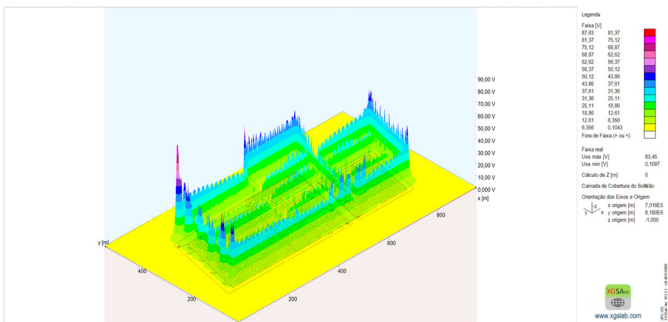


Fig. 10. Distribuição em 3D das tensões de passo no interior do parque solar e vizinhanças para uma pessoa de 50 Kg.

B.3 Análise das Tensões de Toque

A análise das tensões de toque em grandes parques solares considera o conceito de “tensão de toque de alcance”, que é definida como zero quando a distância entre o ponto de tensão na superfície do solo e o condutor mais próximo excede 1,5 metros. Esse conceito é essencial para evitar a superestimação dos valores de tensão em locais onde o contato físico com os condutores é improvável. A Figura 11 ilustra um caso em que tensões da ordem de 1.000 V foram observadas a 150 metros da cerca, valor superior ao limite admissível para uma pessoa de 50 kg.

Para garantir uma avaliação mais precisa, a tensão de toque de alcance foi ajustada considerando uma distância de até 2 metros entre a superfície do solo e qualquer estrutura energizada, como mostrado na Figura 12. Os resultados indicam que as tensões de toque permaneceram dentro dos limites permitidos para uma pessoa de 70 kg no interior do parque solar. Já a Figura 13 apresenta a análise específica da cerca perimetral, considerando uma pessoa de 50 kg, evidenciando que os limites de segurança também foram respeitados nessa área.

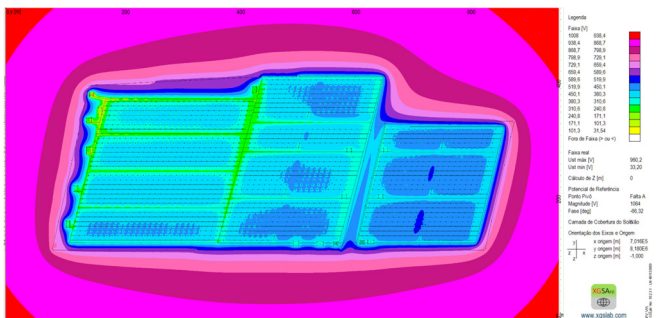


Fig. 11. Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e vizinhança, considerando o ponto da ocorrência de falta como referência.

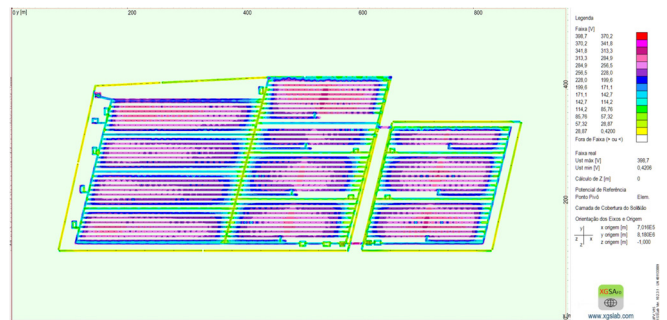


Fig. 12. Distribuição em 2D das tensões de toque no interior do parque solar e nos arredores da cerca, considerando uma distância de até 2m entre a superfície do solo e qualquer estrutura energizada como referência.

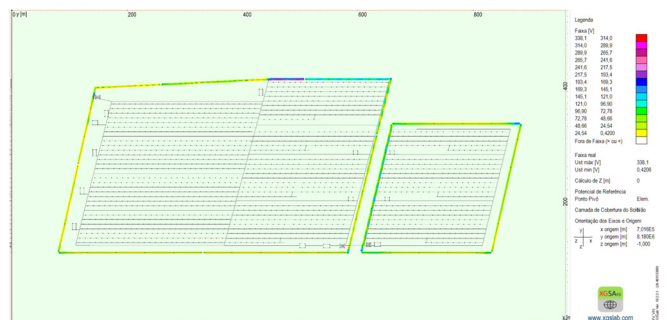


Fig. 13. Distribuição em 2D das tensões de toque nos arredores da cerca, considerando uma distância de até 2m entre a superfície do solo e a cerca como referência.

B.4 Análise das Áreas Seguras

A avaliação das áreas seguras do sistema de aterramento, ilustrada nas Figuras 14, 15 e 16, demonstra que as tensões de toque (U_{stp}) e de passo (U_{ssp}) atendem aos limites normativos em grande parte da planta fotovoltaica. A região representada em verde indica áreas seguras, onde ambas as tensões estão dentro dos valores admissíveis, enquanto a cor amarela sinaliza locais em que a tensão de toque ultrapassa o limite, mas a tensão de passo permanece segura.

A análise, considerando uma pessoa de 50 kg, mostra que as tensões de passo estão abaixo do limite de 1.115 V em toda a área externa à cerca perimetral, garantindo segurança para indivíduos não autorizados. No interior do complexo solar, representado na Figura 15 para uma pessoa de 70 kg, as tensões de toque e de passo estão dentro dos padrões aceitáveis, reforçando a segurança dos operadores em ambiente controlado. A Figura 16 detalha as condições da área externa da cerca, confirmando que as medidas de aterramento implementadas garantem a conformidade com os critérios de segurança exigidos.

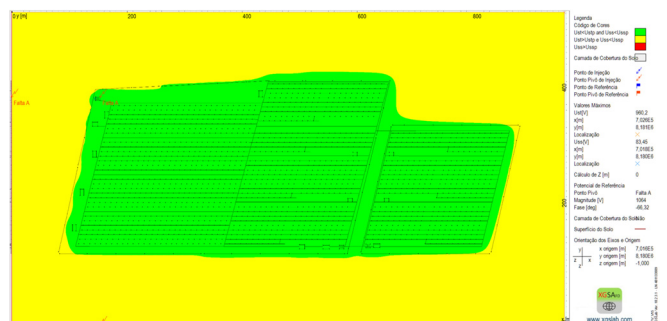


Fig. 14. Perfil de segurança humana relacionada as tensões de toque e passo no parque solar mediante uma falta como referência.

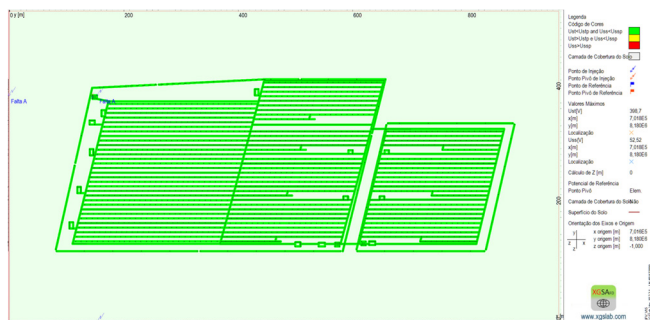


Fig. 15. Perfil de segurança humana relacionada às tensões de toque e passo no parque solar para uma distância de até 2m de qualquer superfície.

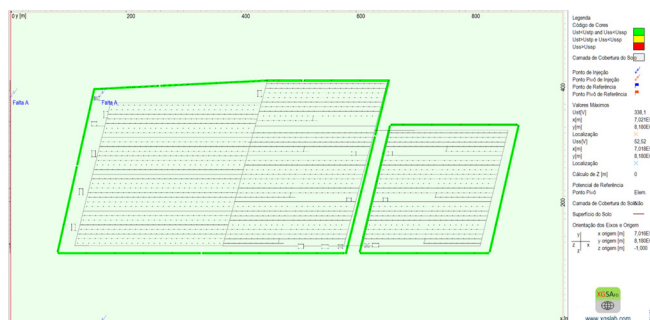


Fig. 16. Perfil de segurança humana relacionada às tensões de toque e passo para uma distância de até 2m da cerca perimetral.

B.5 Interligação do sistema de geração UFV com a concessionária

A edificação destinada ao cubículo de medição abriga os compartimentos de medição, proteção e seccionamento, que são separados por paredes incombustíveis e conectados por buchas de passagem e barramentos. A estrutura recebe cinco circuitos de média tensão (34,5 kV) provenientes dos Skids, cada um com potência instalada de 1.250 kVA, interligando-se ao sistema de distribuição da concessionária. Suas dimensões externas são de 5,50 x 4,20 metros.

A malha de aterramento do cubículo foi projetada com reticulados de 2,5 x 2,067 metros, utilizando 38,8 metros de cabo de cobre nu de 50 mm² e 12 hastes de aterramento de 3/4" x 2,4 metros. Essa configuração assegura que toda a área da instalação, incluindo as zonas de circulação, esteja protegida, garantindo a segurança dos profissionais que acessam a subestação.

VII. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma abordagem completa para o projeto do sistema de aterramento das UFVs Santa Branca e Solar Power, ambas com capacidade instalada de 5.000 kW, localizadas no município de Terezópolis de Goiás – GO. A Sondagem Elétrica Vertical foi realizada em período favorável, permitindo obter resultados conservadores das resistividades aparentes do solo, especialmente em profundidades próximas à superfície. Dessa forma, foram adotados valores admissíveis que consideram variações sazonais ao longo do ano.

A análise criteriosa revelou a necessidade de um sistema de aterramento único e interligado entre as UFVs, garantindo segurança mesmo com a presença da rodovia que as separa, permitindo interligações por cabos de cobre nu enterrados ou isolados aéreos, conforme a viabilidade. O estudo considerou condutores como não ideais, levando em conta suas

impedâncias própria e mútua para evitar subestimação do desempenho do sistema.

Os resultados demonstraram que os potenciais de tensão de passo e toque estavam abaixo dos limites normativos tanto no interior do parque quanto na área externa à cerca perimetral. O dimensionamento da seção dos condutores de aterramento foi de 50 mm² para cobre nu e 70 mm² para aço cobreado, com conexões realizadas por solda exotérmica ou conectores do tipo SACC.

Conclui-se que o sistema de aterramento projetado atende satisfatoriamente aos critérios de segurança estabelecidos, garantindo proteção eficaz contra potenciais perigosos, mesmo com uma corrente de curto-circuito de 3.000 A e solo de média resistividade. A impedância de aterramento obtida foi de 0,35 ohms, resultando em um GPR máximo inferior a 1.100 V, assegurando a integridade operacional da planta.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido à pesquisa através do fomento de bolsas de mestrado.

REFERÊNCIAS

- [1] P. G. Slade, "Electrical Grounding and Bonding," McGraw-Hill, 2013;
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoeletrica**. Rio de Janeiro. 2021;
- [3] IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Std 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York, USA. 2013;
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2013;
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro. 2009;
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16254-1: Materiais para sistemas de aterramento Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro. 2014;
- [7] IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Std 81: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System**. New York, USA. 2012;
- [8] IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Std 2778-2020: IEEE Guide for Solar Power Plant Grounding for Personal Protection**. New York, USA. 2020