

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS TRINDADE
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO EUSTÁCHIO PEREIRA
PEDRO OTÁVIO FIRMIANO DE PAULA

**ESTUDO DE CASO DE DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE
ATERRAMENTO PARA UMA USINA FOTOVOLTAICA DE
MINIGERAÇÃO EM RIOLÂNDIA/SP**

TRINDADE

2022

GUSTAVO EUSTÁCHIO PEREIRA
PEDRO OTÁVIO FIRMIANO DE PAULA

**ESTUDO DE CASO DE DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE
ATERRAMENTO PARA UMA USINA FOTOVOLTAICA DE
MINIGERAÇÃO EM RIOLÂNDIA/SP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Trindade. Sob orientação do Prof.^a Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa.

TRINDADE
2022

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

P436e Pereira, Gustavo Eustáchio
 Estudo de caso de dimensionamento de um sistema
de aterramento para uma usina fotovoltaica de
minigeração em Riolândia/SP. / Gustavo Eustáchio
Pereira; orientador Marcus Vinicius Mota Pinheiro da
Costa. -- Trindade, 2022.
 63 p.

 TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) --
Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, 2022.

 1. Minigeração. 2. Sistema de simulação. 3. Usina.
4. Tensões de toque. I. Costa, Marcus Vinicius Mota
Pinheiro da, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /


O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

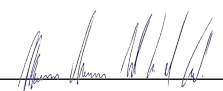
- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 GUSTAVO EUSTACHIO PEREIRA
Data: 27/02/2023 09:17:59-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Local / /
Data
Assinado de forma digital por
Pedro Otávio Firmiano de Paula
Dados: 2023.02.27 08:26:06
-03'00'

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 109/2022 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos **21** dias do mês de dezembro de 2022, às 16 horas e 00 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: **Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa** (orientador), **Cleber Asmar Ganzaroli** (membro), **Geovanne Pereira Furriel** (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “**Estudo de caso de dimensionamento de um sistema de aterramento para uma usina fotovoltaica de minigeração em Riolândia/SP**” dos estudantes **Gustavo Eustáchio Pereira**, Matrícula nº 2018108202640170, **Pedro Otávio Firmiano de Paula**, Matrícula nº 2018108202640286 do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IF Goiano – Campus Trindade. A palavra foi concedida ao(a) estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do(a) candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** dos estudantes. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)
Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa
Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)
Cleber Asmar Ganzaroli
Membro

(Assinado Eletronicamente)
Geovanne Pereira Furriel
Membro

(Assinado Eletronicamente)
Gustavo Eustáchio Pereira
Discente

(Assinado Eletronicamente)
Pedro Otávio Firmiano de Paula
Discente

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gustavo Eustáchio Pereira, 2018108202640170 - Discente**, em 31/01/2023 18:52:30.
- **Marcus Vinicius Mota Pinheiro da Costa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 26/12/2022 14:59:14.
- **Cleber Asmar Ganzaroli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/12/2022 18:37:24.
- **Pedro Otávio Firmiano de Paula, 2018108202640286 - Discente**, em 21/12/2022 17:35:51.
- **Geovanne Pereira Furriel, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 21/12/2022 17:26:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 455263

Código de Autenticação: 57ad8ac0b6



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Trindade
Av. Wilton Monteiro da Rocha. Setor Cristina II, None, None, TRINDADE / GO, CEP 75380-000
(62) 3506-8000

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pois além de me conceder saúde e capacidade intelectual a fim de conseguir concluir a graduação, me concedeu a oportunidade de estar em uma ótima instituição de ensino, próximo de grandes referências técnicas e ótimos colegas.

Agradeço a toda minha família, em especial à Renata (mãe), Joana (avó), Ilton (avô) e Ricardo (pai) por sempre confiarem em mim e me incentivarem a permanecer com foco na minha formação, e que fizeram o possível para me ajudar em tudo que eu precisava, seja financeiramente, fisicamente ou mentalmente.

Agradeço à Ana Karla por estar comigo durante esses cinco longos anos, e sempre me auxiliou em tudo que eu precisava, e por ser minha companheira de vida em todo esse período, além de ser a minha principal motivadora.

Agradeço ao grupo EnerSolar, administrado por Flávio e Thaís, que sempre confiaram no meu potencial profissional, me apoiaram e me influenciaram com ótimas orientações.

Pedro Otávio Firmiano de Paula

Agradeço a Deus pela oportunidade de me fornecer saúde, sabedoria e força de vontade para a realização de um sonho, concluir minha graduação.

Agradeço a minha mãe, Rosália Pereira por todo amor, paciência e apoio em momentos difíceis durante toda a minha caminhada de estudos.

Agradeço ao meu pai, Orlando Eustáchio por todos os ensinamentos e pelas instruções de vida dadas até hoje, além de todo o suporte durante minha jornada acadêmica.

A minha parceira Erika Regina, pela paciência de estar ao meu lado nos momentos de tensão e sempre apoiando e ajudando quando solicitada.

Destaco e agradeço a empresa Enersolar pela liberação do uso do software *Tecat plus*.

Ao professor e orientador Marcus Vinicius, pelo auxílio durante a caminhada do desenvolvimento do projeto, por aceitar o nosso convite de nos orientar e pela disponibilidade de nos atender a todo o momento na qual foi solicitado.

Gustavo Eustáchio Pereira

RESUMO

Com a necessidade da aplicação de novas fontes de energia renovável por todo mundo, a energia solar fotovoltaica surge como uma das melhores opções, em especial no Brasil. Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um estudo de caso para dimensionamento de um sistema de aterramento em uma usina fotovoltaica (UFV) de minigeração, visando detalhar todos os procedimentos para simulação e análise de resultados. O sistema será simulado com o auxílio da ferramenta computacional Tecat plus (versão 6), e terá a finalidade de manter as tensões de toque e passo admissíveis na região da UFV e com a maior redução de eletrodos possível. Os objetivos específicos são: calcular as tensões de passo e de toque admissíveis; dimensionar do cabo e tipos de materiais para conexão; configurar proposta inicialmente para a malha da UFV; realizar ajustes para configuração final certificando que todos os parâmetros adotados estarão admissíveis. Com resultados encontrados pode-se dizer que os locais em que os potenciais de toque ficaram acima do admissível não possuem nada para ser tocado. Portanto a geometria apresentada segue todos os requisitos de segurança. Com a nova geometria apresentada, através de simulação no *software* TecAt plus foi calculada a resistência de aterramento igual à $0,52\Omega$. Nos equipamentos principais: Skid, sala de controle e cabine primária, existe uma alta rotatividade de pessoas e devem ser analisados com mais cuidado.

Palavras-chave: Minigeração. Sistema de simulação. Usina. Tensões de toque.

ABSTRACT

With the need to apply new sources of renewable energy all over the world, photovoltaic solar energy emerges as one of the best options, especially in Brazil. This research aims to develop a case study for designing a grounding system in a photovoltaic plant (UFV) of minigeneration, aiming to detail all the procedures for simulation and analysis of results. The system will be simulated with the aid of the computational tool Tecat plus (version 6), and will have the purpose of maintaining the admissible touch and step voltages in the UFV region and with the greatest possible reduction of electrodes. The specific objectives are: to calculate the admissible step and touch voltages; sizing the cable and types of materials for connection; set up a proposal initially for the UFV network; make adjustments for the final configuration, making sure that all adopted parameters are admissible. With the results found, it can be said that the places where the touch potentials were above the admissible have nothing to be touched. Therefore, the presented geometry follows all safety requirements. With the new geometry presented, through simulation in the TecAt plus Software, a grounding resistance equal to 0.52Ω was calculated. In the main equipment: Skid, control room and primary cabin, there is a high turnover of people and they must be analyzed more carefully.

Keywords: Minigeneration. Simulation system. Power plant. Touch voltages.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estratificação do solo em camadas	14
Figura 2 – Esquema de implementação do método de arranjo de Wenner.....	15
Figura 3 – Tensões de toque e de passo	17
Figura 4 – Gráficos ρ_a x a padrões	21
Figura 5 – Representação gráfica da relação para definição da altura da primeira camada	23
Figura 6 – Dispersão de corrente em solo de duas camadas.....	23
Figura 7 – Conceito de tensão de toque.....	28
Figura 8 – Conceito de tensão de passo	29
Figura 9 – Arranjo geral da UFV.....	35
Figura 10 – Linhas de medição de resistividade.....	36
Figura 11 – Corda esticada para alinhamento dos eletrodos	37
Figura 12 – Cravação dos eletrodos.....	37
Figura 13 – Medição de resistividade	38
Figura 14 – Gráfico ρ_a x a das medições.....	41
Figura 15 – Resultados via software Tecat plus.....	41
Figura 16 – Solo estratificado.....	42
Figura 17 – Seção mínima do condutor.....	43
Figura 18 – Conexão das estacas metálicas no sistema de aterramento	44
Figura 19 – Resultado de valores dos potenciais de toque e passo admissíveis	44
Figura 20 – Configuração inicial.	46
Figura 21 – Linhas de corte na Usina.....	46
Figura 22 – Gráfico de potenciais resultante da figura 21.	47
Figura 23 – Linhas de corte nas edificações.	48
Figura 24 – Gráfico de potenciais resultantes da figura 23..	48
Figura 25 – Linhas de corte para análise dos potenciais de passo na usina.....	49
Figura 26 – Gráfico de potenciais resultante da Figura 25.	50
Figura 27 – Retângulo cobrindo toda área da usina 1 metro após o cercamento. ...	51
Figura 28 – Potenciais na malha e fora dela resultante da figura 27.....	51
Figura 29 – Potenciais na superfície da malha resultante da figura 27	52
Figura 30 – Configuração revisada.....	52
Figura 31 – Linhas de corte na usina nova configuração	53

Figura 32 – Gráfico de potenciais resultante da Figura 31	54
Figura 33 – Linhas de corte nas edificações para checar possível melhoria nas regiões das edificações.....	55
Figura 34 – Gráfico de potenciais resultante da Figura 33.....	55
Figura 35 – Linhas de corte final na usina.	56
Figura 36 – Gráfico de potenciais resultante da Figura 35.....	57
Figura 37 – Retângulo cobrindo toda área da usina 1 metro após o cercamento. ...	58
Figura 38 – Potenciais na malha e fora dela resultante da figura 37.....	58
Figura 39 – Potenciais dispersos na superfície da malha resultante da figura 37. ...	59
Figura 40 – Resistência do aterramento.....	59
Figura 41 – Procedimento de execução de solda exotérmica	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mo em função de ρ_1/ρ_2	22
Tabela 2 - Determinação do fator de decremento através da relação XR	25
Tabela 3 - Parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em aterramentos	27
Tabela 4 - Resistividade do material de recobrimento	30
Tabela 5 - Resultados (em Ω) dos ensaios por espaçamento	38
Tabela 6 - Resultados (em Ω) dos ensaios por espaçamento	38
Tabela 7 - Resultados (em Ω) dos ensaios por espaçamento	39
Tabela 8 - Resultados (em $\Omega.m$) dos ensaios por espaçamento	39
Tabela 9 - Resultados (em $\Omega.m$) dos ensaios por espaçamento	39
Tabela 10 - Resultados (em $\Omega.m$) dos ensaios por espaçamento	40
Tabela 11 - Resultados (em $\Omega.m$) dos ensaios por espaçamento	40
Tabela 12 - Corrente de curto circuito na UFV.....	42

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo geral	11
1.2 Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 2. AVALIAÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO	13
2.1 Resistividade do solo	13
2.2 Estratificação do Solo	14
2.2.1 Métodos de Medição da Resistividade do Solo	15
2.3 Análise de Curto-Circuito e Influências em um Sistema de Aterramento	16
2.4 Critérios de Segurança	17
CAPÍTULO 3. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	19
3.1 Determinação das linhas de medição de resistividade	19
3.2 Modelagem do solo	20
CAPÍTULO 4. ANÁLISE DE ATERRAMENTO	24
4.1 Corrente de curto-circuito injetada	24
4.2 Dimensionamento dos condutores	26
4.3 Potenciais admissíveis.....	27
CAPÍTULO 5. METODOLOGIA	31
6 RESULTADOS	34
6.1 Características da usina utilizada	34
6.2 Ensaios de medição de resistividade e estratificação do solo	35
6.3 Corrente injetada e dimensionamento do cabo	42
6.4 Dimensionamento dos potenciais admissíveis	44
6.5 Definição do sistema de aterramento	45
7 CONCLUSÃO	59
7.1 Trabalhos futuros	59
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO A – PROCEDIMENTO PARA SOLDA EXOTÉRMICA	63

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

As fontes de energia convencionais utilizam combustíveis fósseis e são formas de energias finitas. O consumo excessivo de fontes não renováveis, como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral, causou a redução destes recursos naturais e o aumento da emissão de dióxido de carbono com consequências a nível mundial, como o aquecimento global. Por outro lado, as fontes de energias renováveis são inesgotáveis e não poluentes (DIAS, 2011).

Uma fonte renovável, segundo Weil (2005), é aquela que pode ser reabastecida por processos naturais e pode ser utilizada repetidamente. As fontes renováveis têm o objetivo de suprir as necessidades de consumo de energia elétrica da população com o meio ambiente sendo prejudicado o mínimo possível.

Com a necessidade da aplicação de novas fontes de energia renovável por todo mundo, a energia solar fotovoltaica surge como uma das melhores opções, em especial no Brasil. Segundo Rosa (2016) o que torna esse tipo de energia ser cada vez mais comum no Brasil é a grande capacidade de produção da sua fonte geradora, os raios solares, principalmente quando comparado a outros países que já possuem a produção da energia fotovoltaica.

Bezerra (2021) aponta futuro promissor para a energia solar no Brasil e terá o maior incremento dentre as fontes de energia em razão da abundante irradiação solar recebida e a redução do preço dos equipamentos elétricos.

Contudo, a instalação elétrica deve ser eficiente e dimensionada corretamente, inclusive o aterramento elétrico. Para se definir o conceito de sistema elétrico fotovoltaico aterrado é necessário que um dos condutores de corrente contínua, tal como o condutor positivo ou negativo, esteja conectados a uma malha de aterramento, essa malha de aterramento deve estar fixada ao solo (ASSAIFE, 2013).

Segundo Kindermann *et al.*, (1995), o aterramento elétrico possui grande importância no sistema de energia elétrica implantado, devendo operar corretamente, sem existência de indesejadas falhas. Oliveira *et al.*, (2017) descreve que é necessário a obtenção do sistema de isolamento de forma eficaz. A corrente elétrica tende a fluir para caminhos de menor resistência, e o aterramento elétrico bem dimensionado fornecesse esse caminho, direcionando-a à terra, através de um condutor.

Para que o aterramento seja eficaz e supra as condições quando solicitado, é seguido uma sequência de passos para obtenção do sistema corretamente dimensionado. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT referente a Norma Brasileira NBR 15571:2009, os caminhos para se obter um sistema de aterramento eficaz são: modelagem do solo, estabelecimento da geometria básica de malha, dimensionamento do condutor da malha, cálculo das tensões permissíveis, cálculo de potenciais de solo e por fim o cálculo da corrente de malha.

Osorio *et al.*, (2018) aborda que existem poucas referências em relação aos estudos nacionais sobre o dimensionamento correto a respeito do sistema de aterramento em usinas solares fotovoltaicas. Logo surge a relevância do estudo de caso que defina o processo de aterramento abordando usina solar de geração fotovoltaica, respaldado pelas normas técnicas, abrangendo todo o processo de projeto e execução adequados.

Dentre esses processos, cita-se os cálculos de malhas, a simulação com auxílio computacional, o cálculo e modelagem do solo, além de verificar os resultados constatando sua eficiência e apresentando melhorias no processo.

1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver o estudo de caso para dimensionamento do sistema de aterramento da usina fotovoltaica (UFV) de minigeração situada em Rolândia, interior de São Paulo.

O sistema será simulado com o auxílio da ferramenta computacional *Tecat plus* (versão 6), que será utilizada para otimizar o sistema de aterramento, de forma a obter tensões de toque e passo admissíveis em todas as regiões da UFV, acrescentando eletrodos de maneira eficiente apenas nos locais em que apresentarem altos potenciais.

1.2 Objetivos específicos

- a) Detalhar os procedimentos para planejamento e realização das medições de resistividade do solo em função da área da usina solar fotovoltaica;

- b) Calcular as tensões de passo e de toque admissíveis;
- c) Dimensionar do cabo e tipos de materiais para conexão;
- d) Propor geometria simples para a malha da UFV;
- e) Através de simulações, realizar ajustes para configuração final certificando que todos os parâmetros adotados estarão admissíveis pela norma.

O presente trabalho é dividido de forma a apresentar a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do sistema de aterramento eficiente. No Capítulo 2, são apresentados métodos de avaliação da resistividade do solo. No Capítulo 3, são descritas ações para obtenção de dados referente ao solo, no Capítulo 4 é efetuado a análise sobre o dimensionamento de curto e materiais utilizados. No Capítulo 5, são descritos os processos utilizados para desenvolvimento do estudo e métodos aplicados para a obtenção dos resultados. Por fim os resultados são obtidos através de simulações computacionais permitindo desenvolver a conclusão do trabalho.

CAPÍTULO 2. AVALIAÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

Para a avaliação do comportamento do sistema de aterramento na ocorrência de curto-circuito em usina fotovoltaica, UFV, é necessário aplicar o dimensionamento do aterramento de forma a resistir à essa dissipação de carga potencial. Para esta avaliação, destaca-se principalmente a NBR 7117-1, que aborda de forma íntegra métodos de obtenção de parâmetros do solo para projetos de aterramento elétrico, e a NBR 15751, que trata de sistemas de aterramento de subestações, além de outras referências bibliográficas.

2.1 Resistividade do solo

A definição de resistividade do solo basicamente é dada pelo valor da resistência elétrica medida em uma determinada faixa do solo, este valor de resistência é representado pela letra grega (ρ). Vários fatores determinam se o solo é bom condutor ou não, e os principais são: tipo do solo, umidade do solo, concentração de sais dissolvidos no solo e temperatura (VISACRO FILHO, 2005). Estes fatores influenciam principalmente na quantidade de partículas de água do solo e sua capacidade de dissolução dos sais existentes. A dissolução dos sais tornará o meio mais eletrolítico, e conseqüentemente, com menor resistividade.

O solo possui misturas de diferentes proporções de sedimentos, e por isso possui estrutura heterogênea. Nesta análise, é fundamental o entendimento das características químicas e físicas do solo durante o dimensionamento do sistema de aterramento em determinado terreno. Os solos são meios com significativas variações de propriedades físicas e químicas ao longo de suas dimensões laterais e verticais, característica que impacta na determinação da resistividade (NBR 7117-1, 2020).

Com base em ampla literatura relacionada ao comportamento de aterramentos elétricos, resistividade do solo e métodos de estratificação, os conceitos essenciais para a aplicação da metodologia serão desenvolvidos neste estudo, criando fundamento conceitual para as análises de resultados e conclusões esperadas neste trabalho.

Para obter-se o aterramento de forma eficiente, é fundamental encontrar as características do solo. Com isto surge o desafio de obter valores corretos de resistividade do solo mesmo com todos os fatores citados nesta seção. Logo a

aplicação de métodos para obtenção da medida de resistividade do solo é a saída para alcançar valores coesos.

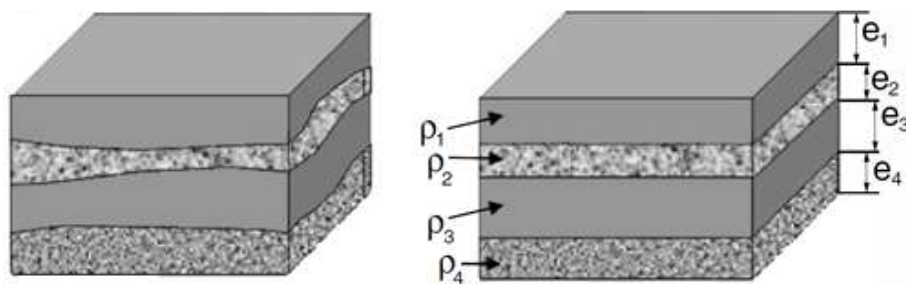
Segundo Filho (2005) existem duas formas de obter a resistividade do solo: a primeira e mais comum é dada através da fixação de eletrodos no solo aplicando sinais eletromagnéticos para assim detectar o valor da queda de tensão na faixa do solo de interesse, a segunda e menos comum é o método na qual é retirado uma amostra do solo e realizado análise laboratorial das características do mesmo.

2..2 Estratificação do Solo

Para obter dados de maneira precisa do solo, é necessário realizar a estratificação do solo, que consiste basicamente no processo de modelagem do solo em camadas. A Figura 1, adaptada de NBR7117-1, p.7 (2020), descreve o processo de caracterização do solo em faixas de valores diferentes em relação à sua altura.

A estrutura do solo é geralmente constituída de camadas aleatórias com resistividades diferentes, variando de acordo com as suas características. Essa estrutura é tratada matematicamente para resultar em camadas com espessuras bem definidas, além de resistividade equivalente.

Figura 1 - Estratificação do solo em camadas.



Fonte: Norma Brasileira NBR 7117 – 1 Parte 1, p. 7 (2020)

2.2.1 Métodos de Medição da Resistividade do Solo

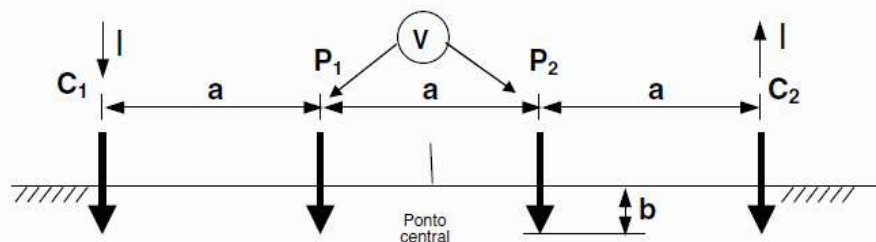
Para medição de resistividade do solo podem ser utilizados os seguintes métodos (NBR 7117, 2012):

- Amostragem física do solo;
- Método da variação de profundidade;
- Método dos dois eletrodos;
- Método dos quatro eletrodos, com os seguintes arranjos:
 - Arranjo do eletrodo central;
 - Arranjo de Lee;
 - Arranjo de Wenner;
 - Arranjo Schlumberger – Palmer.

Para as medições de resistividade elétrica de grandes volumes de terra e para o desenvolvimento desta pesquisa será utilizado o método dos quatro eletrodos a partir do arranjo de Wenner, este é o método tradicionalmente mais utilizado, conforme prescrito na (NBR 7117-1:2020).

O ensaio através do método de Arranjo de Wenner consiste em realizar uma avaliação resistiva, levando-se em conta a tensão e a corrente dissipadas por linhas de medição, a partir de pontos específicos de avaliação, levando-se em conta, além disso, os espaçamentos verticais e horizontais nesses pontos do solo. A Figura 2, adaptada de NBR 7117-1, p.10 (2020), ilustra a disposição das hastes nesse método.

Figura 2 – Esquema de implementação do método de arranjo de Wenner.



Fonte: NBR 7117-1, p.10 (2020)

Uma corrente elétrica I é injetada no ponto $C1$ pela primeira haste e coletada no ponto $C2$ pela última haste. A partir da corrente que é injetada no solo é produzido um potencial entre os pontos $P1$ e $P2$, em volts, medida pelo voltímetro, I a intensidade

da corrente injetada, em ampère, medida pelo amperímetro e a é o espaçamento entre os eletrodos (Kindermann et al., 1995).

Após a realização das medições de resistividade em campo, os resultados são analisados. Caso ocorra muita discrepância entre os dados de medições, deverão ser executadas mais linhas de medição. Se algum destes valores estiver com desvio padrão maior que 50% será descartado para a análise da resistividade e, em seguida, será realizada a estratificação do solo com objetivo de dividir o solo em camadas uniformes.

A partir destes dados, estima-se o porte de resistividade do solo, considerando as seguintes faixas:

- Solo de baixa-resistividade – $\rho < 250 \Omega\text{m}$
- Solo de média-resistividade – $250 \Omega\text{m} < \rho < 1000 \Omega\text{m}$
- Solo de alta-resistividade – $\rho > 1000 \Omega\text{m}$

2.3 Análise de Curto-Circuito e Influências em um Sistema de Aterramento

As usinas fotovoltaicas de minigeração distribuída são conectadas a redes de média ou alta tensão, e estão submetidas à ocorrência de correntes de curto-circuito. As principais causas dos curtos, segundo Kindermann (1997) são falhas na isolação, problemas mecânicos, surtos elétricos, problemas de manutenção ou de natureza externa, como ações de vandalismo e queimadas.

O curto-circuito com maior ocorrência no sistema elétrico é o fase-terra, esta anomalia gera correntes de sequência zero, as únicas que pela terra ou pelo cabo de cobertura vão de encontro à malha de terra da fonte, portanto, para dimensionamentos de sistemas de aterramento é importante destacar a importância da intensidade de curto, pois a corrente provocará elevação de potenciais no solo até o momento de atuação do sistema de proteção.

Portanto, a análise de curto-circuito é utilizada para determinar a corrente que será efetivamente injetada na malha (I_m) e, também é utilizada para dimensionar do condutor da malha (NBR 15751:2009).

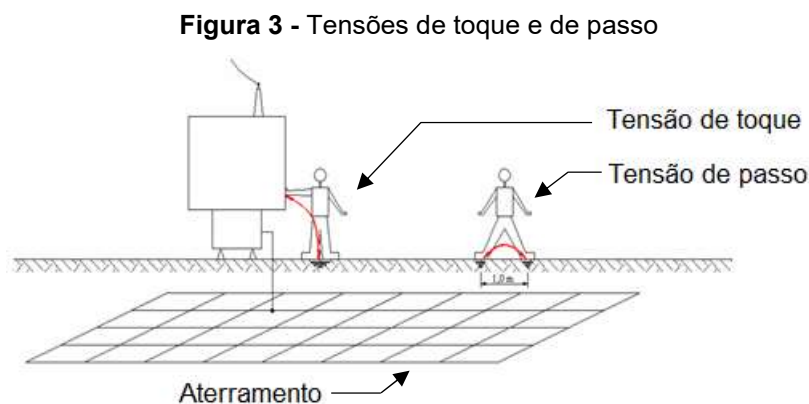
2.4 Critérios de Segurança

Os critérios de segurança possuem significativa relevância pois são capazes de reduzir ou extinguir o risco de vida na eventualidade do curto-circuito fase-terra na instalação elétrica. Para manter esta segurança o sistema de aterramento da UFV é analisado de modo a garantir que todos os potenciais dentro da área traçada estão baixos e, também que os potenciais de passo e toque estão inferiores aos potenciais admissíveis, descritos na Seção 4.2.

As tensões de toque devem ser calculadas considerando a separação padronizada de 1 metro, definida como: a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica energizada situada ao alcance da mão de uma pessoa e um ponto no chão tendo sua diferença de potencial máxima com espaçamento de aproximadamente 1 metro da base da estrutura.

As tensões de passo também consideram a separação padronizada de 1 metro, é definida como a diferença de potencial entre dois pontos de contato dos pés de uma pessoa com o chão, sendo esses pontos separados pela distância de 1 metro, também é alcançado sua diferença máxima, a Figura 3 ilustra as definições apresentadas (KINDERMANN, 1997).

As tensões de toque são mais perigosas que as de passo, pois o coração faz parte do trajeto da corrente elétrica pelo corpo, e isto faz com que os riscos de fibrilação aumentem consideravelmente, além de tudo, caso os pés estejam juntos a tensão de passo tenderá a 0V (LOUREIRO, 2015).



Fonte: NOGUEIRA (2006)

Na área delimitada pelas malhas de aterramento, existem várias tensões de toque e de passo em sua extensão, mas existem regiões na malha e fora dela onde os potenciais tendem a serem mais elevados.

A corrente de curto é dissipada pelas bordas do sistema de aterramento e isso faz com que esses locais possuam tensões mais elevadas e que devem servir para avaliação de segurança, pois se nesses locais forem definidos como seguros, o restante do sistema também estará (MA; DAWALIBI, 2010).

Com o objetivo de reduzir as elevações de potenciais de toque e passo é realizado um recobrimento do solo de brita ou concreto. Os equipamentos da UFV são alocados acima de fundações de concreto, que possuem uma resistividade variável de acordo com os materiais utilizados e tempo de cura do concreto, e com valores entre 5.000 e 60.000 ohms.m (MEDEIROS JUNIOR, 2014).

CAPÍTULO 3. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

3.1 Determinação das linhas de medição de resistividade

Para os ensaios de resistividade apresentado na Seção 2.1 será utilizado o método de Wenner, que é o método normalmente utilizado para a aplicação de projetos de aterramento elétrico, em que os eletrodos são espaçados igualmente e cravados em uma profundidade que não exceda 10% de a .

Contudo, quanto maior é o espaçamento em a mais profunda será a penetração de corrente no solo, portanto, uma linha de medição com espaçamentos em a crescentes irá fornecer amostragem de resistividade em camadas mais profundas (VIANA, 2016).

A NBR 7117-1, recomenda que as linhas de medições sejam feitas inicialmente com o espaçamento entre os eletrodos (a) igual à 1m e prossiga em potências de dois, se necessário, fazer com espaçamentos intermediários.

Para determinar a quantidade mínima de linhas de medição, é necessário realizar o dimensionamento baseado na área do terreno, usinas fotovoltaicas habitualmente possuem áreas maiores que 20.000m², nesses casos devem ser realizado subdivisões de áreas de 20.000m², em que deverá ser feito oito linhas de medições em cada subárea.

Essas linhas devem ser distribuídas uniformemente de acordo com a geometria do terreno com objetivo de obter dados de resistividade da maior parte do terreno, isto irá garantir que elementos pontuais como: rochas, cabos enterrados, entulhos ou outros materiais, mascarem os valores apresentados na medição.

A partir da definição do quantitativo de linhas de medição, plota-se sobre o layout do terreno a distribuição destas linhas, com comprimentos específicos. É importante conhecer a resistividade em locais onde ocorrerá o curto-circuito, pois principalmente nesse local o sistema de aterramento deverá dissipar a corrente de curto por isso será previsto uma linha de medição nesse local, geralmente o curto ocorre no ponto de conexão, onde a cabine primaria se localiza.

Para a determinar a resistividade a partir dos espaçamentos e a profundidade de cravação, tem-se:

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a}{1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} \right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 - p^2}} \right)} \cdot (R) \quad (1)$$

Onde:

a : é o espaçamento entre eletrodos (m);

p : é a profundidade de cravação (m);

R : é a resistência obtida da relação $\left(\frac{U}{I}\right)$, em ohms (Ω).

Caso, p seja menor que 10% de a , a equação (1) pode ser resumida em:

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

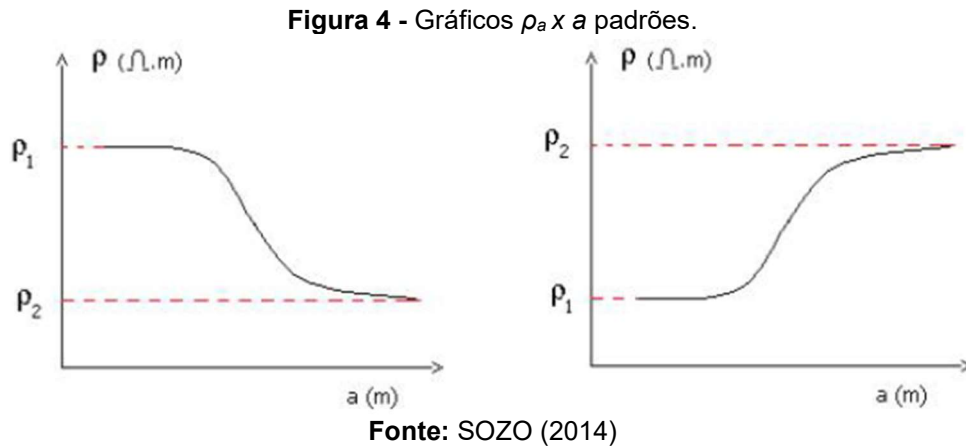
Deve-se atentar a medidas de segurança durante a medição de campo, atentando-se para as condições climáticas adversas com possíveis descargas atmosféricas, utilizar equipamento de proteção individual (EPI) compatível para o porte de amostragem e principalmente não tocar nos eletrodos e evitar aproximação de estranhos no local de teste. NBR 7117-1 (ABNT, 2020).

3.2 Modelagem do solo

De posse dos valores obtidos nos ensaios de resistividade do solo é importante que o solo seja estratificado em camadas de resistividade e alturas definidas. A quantidade de camadas é determinada pelas curvas geradas do gráfico de resistividades aparente *versus* espaçamento a . As camadas mais profundas têm uma baixa consequência sobre a resistência de aterramento e as tensões de toque/passos, portanto a estratificação para duas camadas é eficaz (GENNARI, 2017).

Para a estratificação do solo em duas camadas, as duas opções mais descomplicadas de fazer a modelagem são: método computacional ou método simplificado. Em que o método computacional consiste na utilização de *softwares* para estratificação, e a análise do projetista avaliando se os resultados são coerentes (NBR 7117, 2012).

Em relação ao método simplificado, inicialmente é analisado a curva realizada pelo gráfico resistividades aparente *versus* espaçamento a , denominado gráfico $\rho_a \times a$, em que ele terá dois formatos, similares aos da Figura 4.



A partir da definição, é feito o prolongamento da curva em seu início até o cruzamento com o eixo das ordenadas, o ponto de cruzamento é determinado como ρ_1 . E também, o final da curva será prolongado e sua assíntota é determinado como ρ_2 . A Figura 4 ilustra as assíntotas das curvas. Segundo Sozo (2014), com os valores de ρ_1 e ρ_2 , é calculado o fator K , conforme equação:

$$K = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (3)$$

Com o valor K , é utilizado a Tabela 1 da NBR 7117 de 2012 para determinação do fator de um fator adimensional e tabelado chamado cujo a sigla é M_o , e com esse fator será calculado a resistividade da primeira camada conforme equação (4).

$$\rho_m = M_o \times \rho_1 \quad (4)$$

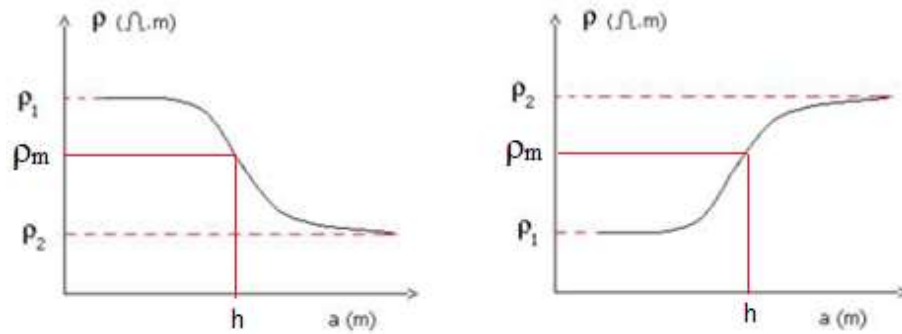
Tabela 1 - Mo em função de ρ_1/ρ_2 .

ρ_2/ρ_1	Mo	ρ_2/ρ_1	Mo	ρ_2/ρ_1	Mo
0,015	0,691	4	1,26	40	1,467
0,02	0,694	4,5	1,278	50	1,474
0,03	0,699	5	1,294	60	1,479
0,04	0,704	5,5	1,308	70	1,482
0,05	0,71	6	1,32	80	1,484
0,06	0,715	6,5	1,331	90	1,486
0,07	0,72	7	1,334	100	1,488
0,08	0,724	7,5	1,349	110	1,489
0,09	0,729	8	1,356	120	1,49
0,1	0,734	8,5	1,363	130	1,491
0,15	0,757	9	1,369	140	1,492
0,2	0,778	9,5	1,375	150	1,493
0,25	0,798	10	1,38	160	1,494
0,3	0,817	10,5	1,385	180	1,495
0,35	0,835	11	1,39	200	1,496
0,4	0,852	11,5	1,394	240	1,497
0,45	0,868	12	1,398	280	1,498
0,5	0,883	12,5	1,401	350	1,499
0,55	0,897	13	1,404	450	1,5
0,6	0,911	13,5	1,408	640	1,501
0,65	0,924	14	1,41	1000	1,501

Fonte: NBR 7117 (2012)

Com a resistividade definida, é necessário definir a altura (h) da primeira camada, e com isto, utilizando o gráfico $\rho_a \times a$, e traça-se o equivalente à ρ_m . A Figura 5 demonstra a definição da altura da primeira camada.

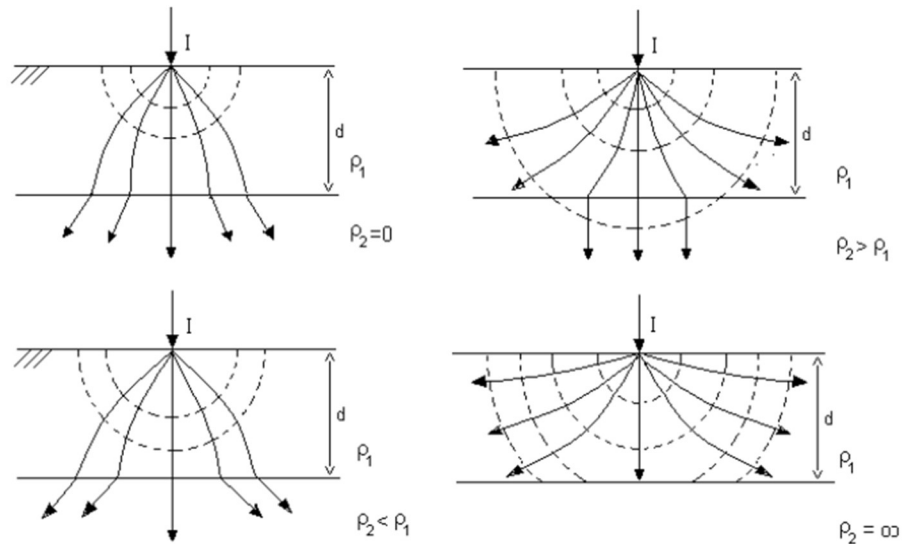
Figura 5 – Representação gráfica da relação para definição da altura da primeira camada.



Fonte: Adaptado de SOZO (2014)

Logo, a segunda camada terá resistividade igual à ρ_2 e, por definição, tem altura infinita. A divisão das camadas influenciará na dispersão da corrente injetada no solo, conforme Figura 6, nota-se que quando a resistividade na primeira camada é maior, a corrente tem dispersão menor, e escoar pouco para segunda camada, e conseqüentemente produz potenciais mais perigosos. Quando ρ_2 tende ao infinito, a dispersão tende a zero (SOZO, 2014).

Figura 6 - Dispersão de corrente em solo de duas camadas.



Fonte: Kindermann e Camagnolo (1995, p. 6).

CAPITULO 4. ANÁLISE DE ATERRAMENTO

4.1 Corrente de curto-circuito injetada

No caso de Usinas Fotovoltaicas de geração distribuída a corrente de falta, fase-terra (I_f) será igual a corrente que será injetada na malha, pois não terão subdivisão de condutores por para-raios, geralmente utilizados em linhas de transmissão, e essa corrente não superdimensionará o sistema de aterramento. Ainda segundo a NBR 15751, deveremos adicionar 3 fatores sobre esse curto, são eles: fator de decremento (D_f), fator de projeção (C_p) e fator de distribuição (S_f).

O valor de decremento permite a obtenção do valor de corrente de falta assimétrico para um determinado tempo de eliminação, portanto, esse fator é determinado principalmente por esse tempo e da relação X/R do sistema. Esse fator é determinado pela equação em (5) abaixo ou pela Tabela 2.

$$D_f = \sqrt{1 + \left(\frac{T_a}{t_f}\right) \times \left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}}\right)} \quad (5)$$

Sendo:

T_a : constante de tempo do deslocamento da componente contínua, em segundos;

t_f : duração da falta, em segundos.

Tabela 2 - Determinação do fator de decremento através da relação XR.

Duração da falta t_f		Fator de decremento D_f			
s	Ciclos a 60Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,1	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,2	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,3	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,4	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,5	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Fonte: NBR 15751 (2009)

Para um t_f maior ou igual que 0,5s, o fator de decremento pode ser considerado unitário. O fator de projeção (C_p) é determinado através de uma análise em relação ao sistema de energia elétrica da região onde será instalado o sistema, considerando que haverá expansões nas linhas de transmissão e unidades consumidoras em um determinado período de tempo, e isso terá como consequência o aumento do nível de curto-circuito no ponto de conexão da UFV. (ROSA et al., 2022).

Esse fator é impreciso pois não é possível prever quais serão as futuras instalações nas regiões próximas à UFV, mas objetiva-se que com esse crescimento que o curto não seja superado com o tempo e que malha mantenha os potenciais dentro dos admissíveis (ROSA et al., 2022). Contudo, deve-se ter um cuidado especial para não sobre dimensionar o sistema.

Por fim, o fator de distribuição (S_f) é a parcela de corrente que será efetivamente injetada na malha de aterramento. Em alguns casos, principalmente em subestações, que são conectadas em linhas de transmissão, uma parte da corrente percorre os cabos para-raios, e apenas a outra parte é inserida na malha. Contudo, a corrente será calculada através da equação abaixo:

$$I_m = C_p \cdot D_f \cdot S_f \cdot I_f \quad (6)$$

4.2 Dimensionamento dos condutores

Para determinar o condutor apto para suportar o curto-circuito e intemperes ambientais, ele será dimensionado por dois critérios: mecânico e térmico. Os condutores do sistema, devem ser instalados à uma profundidade mínima de 50 centímetros, segundo a NBR 15751 (2009). E por isso, visando que os condutores suportem esforços mecânicos, tensões de compressão e tensões de cisalhamento, a bitola mínima para cabo de cobre é 50mm², e de aço é 38mm².

Para o dimensionamento térmico é utilizado a equação de Onderdonk em (7) com o objetivo de obter a área mínima dos eletrodos horizontais, para a corrente de curto-circuito fase-terra no lado da baixa tensão (NBR 15751, 2009).

Essa corrente não provocará elevação de potencial na malha, mas percorrerá a própria malha no acontecimento de uma falta, a corrente não irá danificar o cabo (NEUHAUS, 2021).

$$S = I_f \sqrt{\frac{t * \alpha_r * \rho_t * 10^4}{T_{CAP} * \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}} \quad (7)$$

Onde:

S: seção do condutor de cobre da malha de terra, mm²;

I_f : corrente de falta, kA;

t: tempo, em segundos;

α_r : é o coeficiente térmico de resistividade do condutor, °C⁻¹;

ρ_t : resistividade do condutor de aterramento, Ω.cm;

T_{CAP} : fator de capacidade térmica, $\left(\frac{J}{cm^3 \cdot ^\circ C}\right)$;

T_a : temperatura ambiente, °C;

T_m : temperatura máxima suportável, °C;

k_0 : é o coeficiente térmico de resistividade do conduto, $\left(\frac{1}{\alpha_r}\right) - T_r$;

T_r : é a temperatura de referência das constantes do material, °C;

Os dados podem ser obtidos através da Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em aterramentos

Tipo do condutor	Condutância %	Coeficiente		Temperatura de fusão (°C)	Resistividade pr (20 °C)	TCAP J/cm².°C
		ar (0°C)	ar (20 °C)			
Cobre (macio)	100	0,00427	0,00393	1083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97	0,00413	0,00381	1084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40	0,00408	0,00378	1084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30	0,00408	0,00378	1084	5,862	3,846
Haste de aço cobreado	20	0,00408	0,00378	1084	8,62	3,846
Fio de alumínio	61	0,00439	0,00403	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	53,5	0,00380	0,00353	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	52,5	0,00373	0,00347	660	3,284	2,598
Aço-alumínio	20,3	0,00388	0,00360	660	8,48	2,670
Aço 1020	10,8	0,00165	0,00160	1 510	15,9	3,280
Haste de aço	9,8	0,00165	0,00160	1400,000	17,5	4,440
Aço zincado	8,5	0,00341	0,00320	419,000	20,1	3,931
Aço inoxidável 304	2,4	0,00134	0,00130	1400,000	72,0	4,032

Fonte: NBR 15751 (2009)

Além do cabo, nesse momento será determinado os materiais que serão utilizados para a execução do aterramento, principalmente em relação as conexões. As conexões mais utilizadas são do tipo exotérmicas ou por compressão e tem a variável T_m igual à 850°C. As conexões aparafusadas apresentam temperatura máxima de 250°C.

4.3 Potenciais admissíveis

Para analisar a proteção da malha da UFV é necessário avaliar se todos os potenciais da malha estão abaixo dos potenciais admissíveis de toque e de passo, é importante que as proteções atuem o quanto antes evitando os potenciais. Em um tempo de eliminação do curto entre 30 milissegundos e 3 segundos, ou seja, de curta duração, é calculado a corrente máxima de não-fibrilação em pessoas pela equação.

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (8)$$

Sendo:

t : é estabelecido pelo tempo máximo de eliminação da falta baseado no dispositivo de proteção, em segundos, a partir da corrente máxima, é possível determinar o potencial de toque admissível a partir da equação (9).

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot I_{chcd} \quad (9)$$

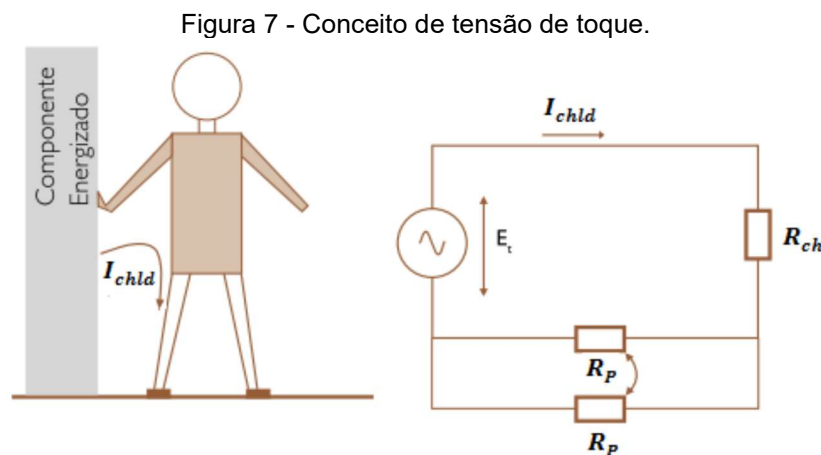
Sendo:

R_{ch} : resistência do corpo humano, adotada como sendo 1 000 Ω ;

ρ_s : resistividade do recobrimento da superfície do solo, $\Omega.m$;

C : fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, equação em (13).

O circuito equivalente para a tensão de toque é representado na Figura 7.



Fonte: ÁVILA (2019)

O potencial de passo, em comparação com o potencial toque, sempre terá um valor maior, principalmente devido ao seu trajeto conforme citado no item 2.3, e sua equação é apresentada em (10).

$$E_{tcd} = [R_{ch} + 2(R_p - R_{mp})] \cdot I_{chcd} \quad (10)$$

Sendo:

R_p : resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto, em Ω , equação em (11);

R_{mp} : resistência mútua entre dois pés, Ω , equação em (12);

As resistências própria e mútua dos pés são dadas por:

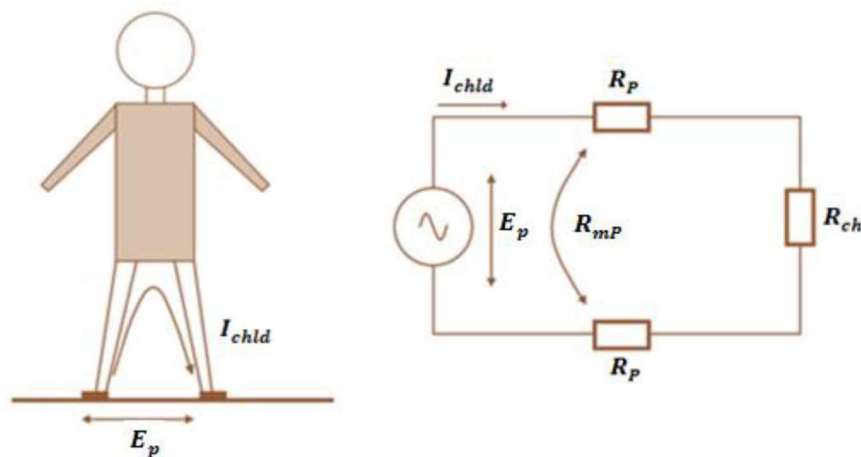
$$R_p = \frac{\rho_s}{4b} \cdot C \quad (11)$$

$$R_{mp} = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot R_p} \quad (12)$$

Sendo b é igual a 0,083 m (raio do disco metálico – modelo estabelecido para o pé humano).

O circuito equivalente para a tensão de passo é representado na Figura 8.

Figura 8 - Conceito de tensão de passo



Fonte: Ávila (2019)

O fator C , citado nas equações, é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, em UFV de minigeração, por se tratar de grandes áreas, não é comum existir recobrimentos de brita ou concreto sobre o solo, exceto em regiões específicas da UFV, como: Subestação, local de instalação dos inversores, local de instalação dos transformadores e na sala de controle. Esses locais ainda estão alocados sobre uma fundação de concreto. A equação em (13) demonstra o cálculo desse fator.

$$C = 1 - a \cdot \left(\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}}{2 \cdot h_s + a} \right) \quad (13)$$

Sendo:

a : igual a 0,106m;

ρ_1 : resistividade da 1ª camada, em $\Omega \cdot m$;

ρ_2 : resistividade do revestimento da camada superficial, em $\Omega \cdot m$, conforme

Tabela 4;

h_s : espessura da camada de revestimento superficial, m;

Tabela 4 - Resistividade do material de revestimento.

Material	Resistividade ($\Omega \times m$)	
	Seco	Molhado
Brita		3000
Concreto	1200 a 280000	21 a 100
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10^4 a 6×10^6

Como as usinas se trata de grandes áreas, para ter maior velocidade e resultados mais precisos, é importante o uso de *softwares* especializados.

CAPÍTULO 5. METODOLOGIA

Fundamentado por acervo técnico e levantamentos de campo o presente trabalho abordará o estudo das etapas de elaboração do processo de um sistema de aterramento levando em consideração uma usina de geração de energia solar.

A fim de obter boas condições de aterramento, existem várias etapas que devem ser seguidas para a elaboração de forma eficaz, é necessário o uso de equipamentos adequados, com a intenção de se obter dados precisos em relação ao estudo.

Para iniciar as análises de potenciais e aferir a segurança do aterramento, é desenvolvido uma geometria inicial para o sistema. Segundo a NBR 15751, deverá ser previsto mínimo um cabo no perímetro dos equipamentos semelhante à um anel de cabo ao redor da zona de proteção. Portanto, para dimensionamento visando a maior redução de cabos do sistema, será proposto inicialmente um anel em todo o perímetro da UFV.

Posteriormente o terreno será repartido em subáreas e traçado por linhas em pontos específicos com o objetivo de realizar a medição de resistividade do solo nesses pontos, a medição deve ser realizada utilizando o terrômetro, tal equipamento deve possuir no mínimo as seguintes características:

- Funções de medição de resistividade do solo e de resistência de aterramento quando existente;
- Permitir ler no display a 'resistência' (isto é, a relação V/I), para que seja aplicada a equação (1);
- Recursos de impressão a cada medida realizada, seja durante ou após realizadas as medições;
- A frequência de operação para a função resistividade é fixa em 270Hz.

Durante a realização das medições de resistividade do solo, alguns cuidados devem ser tomados, seja para evitar a introdução de erros nos valores coletados, seja para proteger e preservar a integridade do instrumento e seus acessórios. Os principais cuidados são:

- Para cada linha de medição, deve-se estender uma corda de 100 metros de comprimento, com o objetivo de manter os 4 eletrodos alinhados – o instrumento deve ser posicionado no centro dessa linha, e as medidas devem ser realizadas para os espaçamentos mencionados;

- As hastes de prova são aprofundadas no solo 0,30 m (30 cm);
- Nos instantes do acionamento do instrumento ativado, durante as medições da resistividade, as hastes de prova não devem ser tocadas;
- Atenção com as condições climáticas adversas com possíveis descargas atmosféricas;
- Utilização de EPI compatível para o porte de amostragem;
- Evitar aproximação de estranhos no local de teste;

Os eletrodos devem ser cravados em uma profundidade de 30 centímetros. Caso for verificado que a solução proposta inicialmente não atenderá tecnicamente, deverá ser adicionado cabos, hastes e outras soluções até chegar em um sistema que atenda todos os requisitos de segurança.

Com a medição e obtenção dos valores de resistência do solo realizaremos o cálculo a partir da equação (1) com o auxílio computacional do *software Excel*. O *Excel* neste trabalho será utilizado como ferramenta para realização dos cálculos de resistividade do solo, fixados na Tabela 8 à Tabela 11 na seção 6.2.

De posse dos valores de resistividade do solo, será efetuado uma análise dos resultados obtidos com o auxílio computacional do *software Tecat Plus 6*. É importante salientar que a ferramenta foi disponibilizada para fins de estudo pela empresa EnerSolar. O software em questão possui soluções para diversos sistemas de malha de aterramento, contemplando grande parte da normativa vigente.

Em sequência após imputar os dados de resistividade do solo no *software Tecat Plus 6*, a ferramenta ficará responsável por providenciar a representação do solo em camadas, aplicando o método da estratificação descrito na seção 2.2.

Com isso, é utilizado o documento enviado pela concessionária de energia do local da instalação da usina fotovoltaica, nele estão contidos os níveis de curto-circuito, permitindo dimensionar o condutor ideal que respeite os critérios mecânicos e térmicos.

Será executado o cálculo do potencial de toque e passo a partir das equações (9) e (10) respectivamente. Os potenciais serão simulados via *software TecAt plus*, levando em consideração uma pessoa com 70kg, corrente de curto injetada na malha e um tempo de eliminação da falta igual à 0,5 segundos, os valores obtidos estão descritos na seção 4.2.

Com isso, é dimensionado um sistema de aterramento inicial, onde será simulado no *software TecAt plus*, as tensões de toque, de passo e a resistência do aterramento elaborado. Caso a malha definida inicialmente não atenda aos requisitos de obtenção de um sistema de aterramento eficaz, será efetuado reforços em pontos específicos na qual não se obteve o resultado esperado, até concluir em uma geometria final que atenda os limites de potencial de toque e passo e possua baixa resistência na malha de aterramento.

6 RESULTADOS

6.1 Características da usina utilizada

O estudo apresenta as etapas de um dimensionamento visando obter um sistema de aterramento seguro na UFV Riolândia, localizada no município de Riolândia/SP. A usina possui uma área de aproximadamente 39.900m², em que são instalados 1.000 (mil) quilowatts (kW) de potência alternada, disposta na Figura 9, a UFV também possui 2340 módulos fotovoltaicos de 580W, totalizando uma potência instalada de 1.357 quilowatt-pico (kWp), e será conectada em uma rede de distribuição cujo a tensão é de 13,8 kV.

Os módulos são instalados em rastreadores solares, que são estruturas que se movimentam ao longo do dia para buscar uma maior radiação solar, e conseqüentemente ter um ganho energético maior (SOUZA, 2021). Além disso, na extensão a área da usina, nota-se algumas construções, que são:

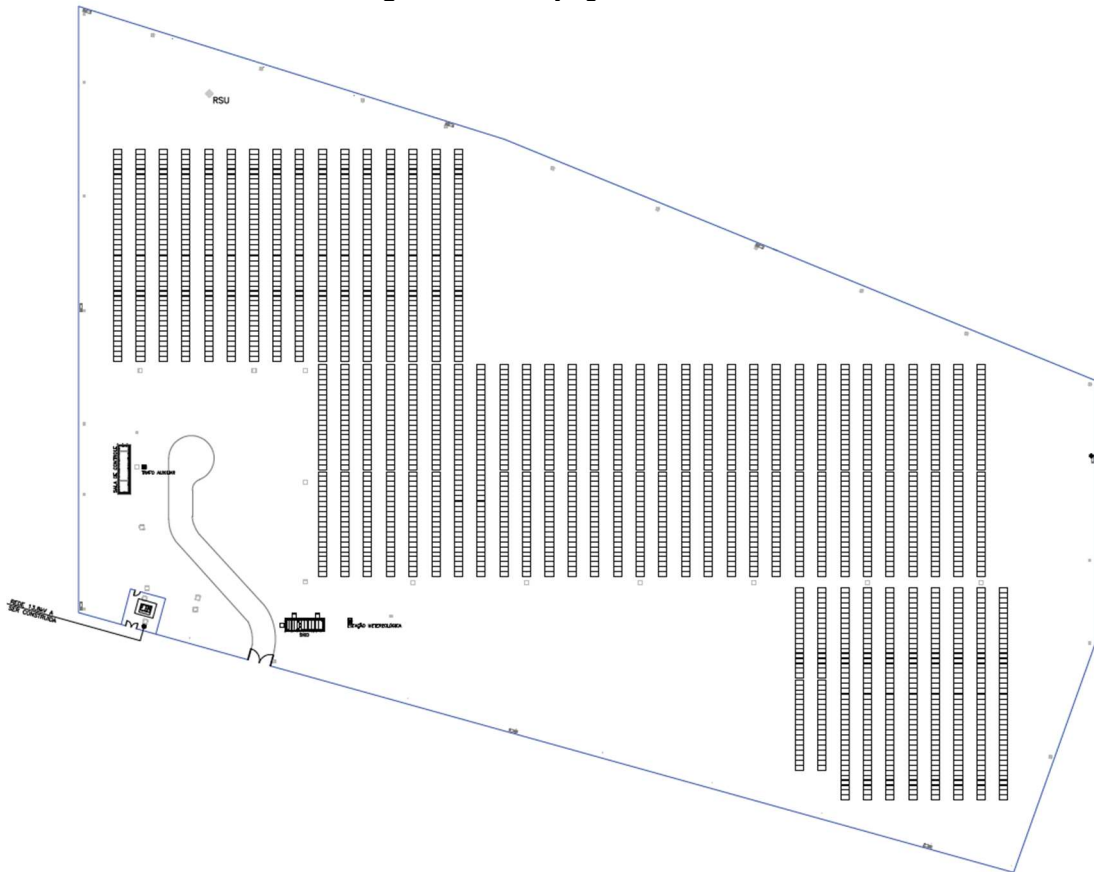
- **Cabine primária** – equipamento que conecta à rede de distribuição aos circuitos internos da UFV, além de ser o local de medição de energia gerada e de proteção geral, coordenadas por relés;
- **Sala de controle** – É uma estrutura em container que possui 3 cômodos: Banheiro, almoxarifado e um escritório, nesse escritório são monitorados todos os dados da UFV e as câmeras de CFTV;
- **Skid** – É uma estrutura metálica que aloca os inversores, transformador e o QGBT.

Além disso, alguns equipamentos para coleta de dados e serviços auxiliares, que são:

- **Estação meteorológica** – Possui equipamentos para medição de irradiação solar, velocidade do vento, temperatura, entre outros;
- **Sensor Remoto Ultrassônico (RSU)** - Equipamento que controla a movimentação dos rastreadores solares;
- **Transformador auxiliar** – Equipamento utilizado para reduzir a tensão com objetivo de alimentar as cargas auxiliares da usina (como: iluminação, RSU, estação meteorológica, entre outras);

- **Cercamento** – Proteção física para UFV com um alambrado convencional de mourões, tela e arame farpado.

Figura 9 – Arranjo geral da UFV.



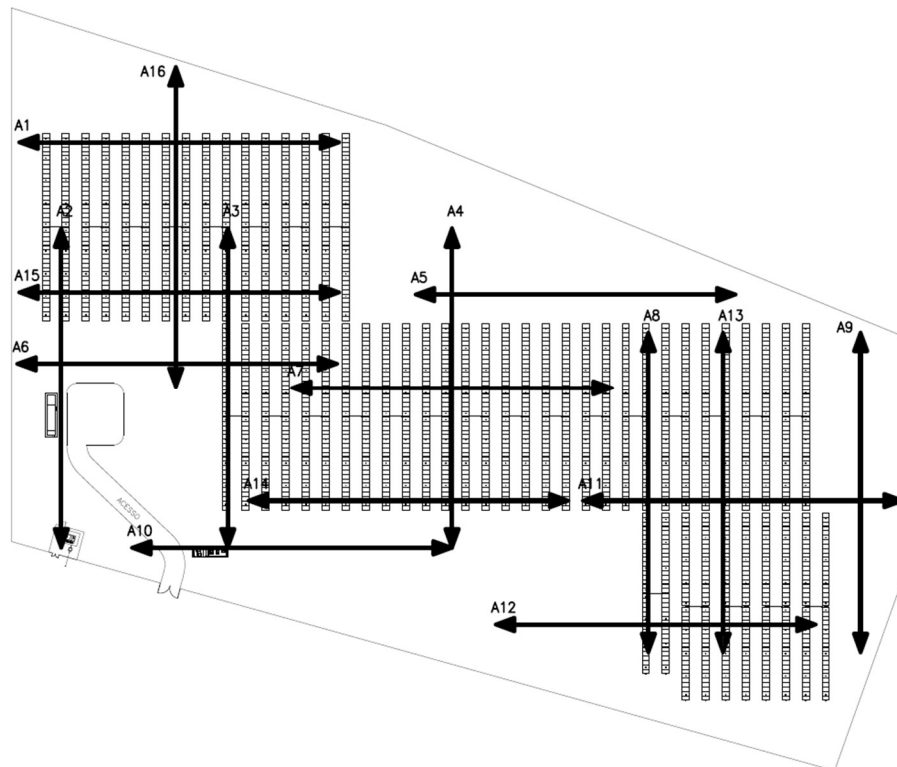
Fonte: Autor (2022)

6.2 Ensaio de medição de resistividade e estratificação do solo

Assim como destacado na Seção 3.1, foi definido a quantidade de linhas e sua alocação na planta da UFV. A área total delimitada pelo alambrado é de 39.900m², e como a cada 20.000m² deverá ser realizado oito linhas de medição, portanto foram realizadas 16 linhas de medição, com os espaçamentos em “a” iguais à 1, 2, 4, 8, 16 e 32 metros.

Foi realizada uma distribuição de linhas visando contemplar o máximo de terreno possível, e principalmente linhas próximas aos principais equipamentos para obtenção de dados nesses locais. Com isso, a Figura 10 mostra os locais onde foram realizadas as linhas de medição de resistividade.

Figura 10 - Linhas de medição de resistividade



Fonte: Autor (2022)

Com as definições onde deverão ser feitos os ensaios de resistividade, foi iniciado o planejamento para as medições em que três tópicos foram definidos: registro de chuvas, equipamento de medição e os cuidados durante os ensaios. Inicialmente, as medições foram realizadas em dois dias, após um período de sete dias sem chuva, com objetivo que as chuvas não comprometessem os resultados, e que o solo está em uma situação mais crítica (ABNT, 2020).

As Figuras 11, 12 e 13 mostram os momentos das atividades de medição de resistividade no local.

Figura 11 - Corda esticada para alinhamento dos eletrodos.



Figura 12 - Cravação dos eletrodos.



Figura 13 - Medição de resistividade.

No momento dos ensaios, foram verificadas as condições do terreno, foi certificado uma boa compactação e que o solo tinha características de solo argiloso, esse tipo de solo retém mais água e possui uma vantagem por geralmente suas resistividades são abaixo de $5.000\Omega.m$. Esse solo possui boa retenção de água superficialmente, isso condiciona que em período de chuvas a primeira camada do solo terá resistividades mais baixas (ABNT, 2020).

Contudo, os resultados dos ensaios são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 - Resultados (em Ω) dos ensaios por espaçamento.

Espaçamento <i>a</i> (m)	Linhas de medição					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	23,6	25,8	33,7	63,8	61,1	83,7
2	8,46	6,22	17,65	42,9	30,7	25,5
4	2,08	1,53	4,88	9,92	7,41	9,13
8	1,41	0,24	1,91	2,2	2,71	2,96
16	1,18	1,00	1,38	1,39	1,64	1,6
32	1,05	0,75	1,09	0,66	1,12	0,85

Tabela 6 - Resultados (em Ω) dos ensaios por espaçamento.

Espaçamento <i>a</i> (m)	Linhas de medição					
	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1	64,5	100,5	95,2	21,3	74,5	76,8
2	32,2	53,6	51,1	10,99	29,6	26,5
4	7,64	18,33	17,5	4,23	9,82	8,32
8	2,81	2,69	2,9	1,88	1,64	3,09
16	1,71	0,78	0,74	1,02	0,97	1,12
32	1,23	0,68	0,94	1,12	0,59	0,84

Tabela 7 - Resultados (*em Ω*) dos ensaios por espaçamento.

Espaçamento	Linhas de medição			
<i>a (m)</i>	A13	A14	A15	A16
1	102,74	72,98	56,33	31,24
2	54,97	32,45	17,83	12,53
4	18,81	9,17	5,89	3,37
8	2,93	2,34	2,29	1,13
16	0,80	1,41	1,46	1,25
32	0,85	0,96	1,00	0,97

É importante mencionar que não foi necessário realocar nenhuma linha em campo devido à algum possível obstáculo.

Com os resultados apresentados, foi utilizado a equação em (1) para obtenção da resistividade em cada medição, e para isso foi utilizado a ferramenta computacional EXCEL, os resultados encontrados estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Resultados (*em $\Omega.m$*) dos ensaios por espaçamento.

Espaçamento	Linhas de medição					
<i>a (m)</i>	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	153,9	168,3	219,8	416,1	398,5	545,9
2	107,3	78,9	224	544,4	389,6	323,6
4	52,4	38,5	122,9	249,9	186,7	230
8	70,9	12,1	96,1	110,7	136,3	148,9
16	118,6	100,50	138,8	139,8	164,9	160,9
32	158,3	113,1	164,4	99,5	168,9	128,2

Tabela 9 - Resultados (*em $\Omega.m$*) dos ensaios por espaçamento.

Espaçamento	Linhas de medição					
<i>a (m)</i>	A7	A8	A9	A10	A11	A12
1	420,7	655,5	620,9	138,9	485,9	500,9
2	408,6	680,1	648,4	139,5	375,6	336,3
4	192,5	461,8	440,9	106,6	247,4	209,6
8	141,3	135,3	145,9	94,6	82,5	155,4
16	171,9	78,4	74,4	102,6	97,5	112,6
32	185,5	102,5	141,8	168,9	89	126,7

Tabela 10 - Resultados (em $\Omega.m$) dos ensaios por espaçamento.

Espaçamento <i>a</i> (m)	Linhas de medição					Resistividade aparente média
	A13	A14	A15	A16	A16	<i>r</i> [W.m]
1	734,77	521,88	402,86	223,40	223,40	441,79
2	717,01	423,22	232,57	163,47	163,47	368,39
4	477,38	232,63	149,36	85,40	85,40	218,70
8	147,88	117,72	115,60	56,88	56,88	110,62
16	80,27	141,53	146,82	125,69	125,69	122,24
32	171,03	192,14	200,59	194,26	194,26	184,62

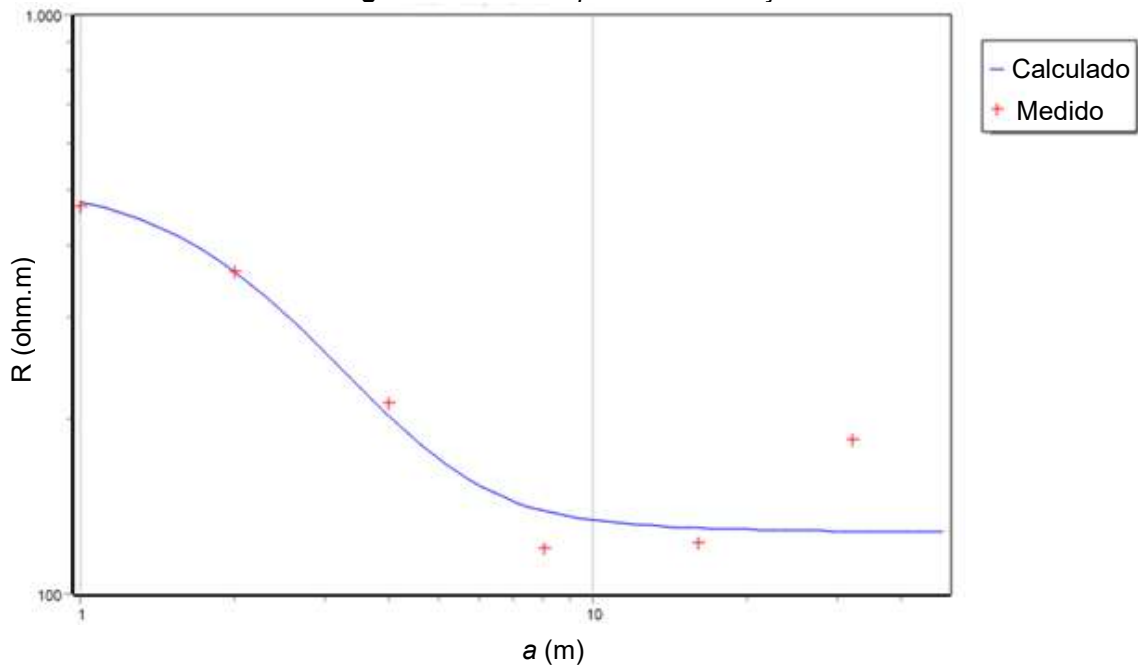
Os valores das células destacadas nas Tabelas 8, 9 e 10 apresentaram um desvio percentual superior a 50% do valor médio, e por isso foram excluídos do cálculo da resistividade aparente do solo. Com essa exclusão, as novas resistividades médias estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados (em $\Omega.m$) dos ensaios por espaçamento.

Resistividade aparente média
ρ [$\Omega.m$]
468,25
359,90
213,74
120,13
122,24
184,62

Com auxílio do *software Tecat plus* (versão 6.3), foi gerado o gráfico $\rho_a \times a$, com as resistividades aparentes resultantes, representado na Figura 14.

Figura 14 – Gráfico $\rho_a \times a$ das medições.



Fonte: Simulação no *software* Tecat Plus (versão 6.3)

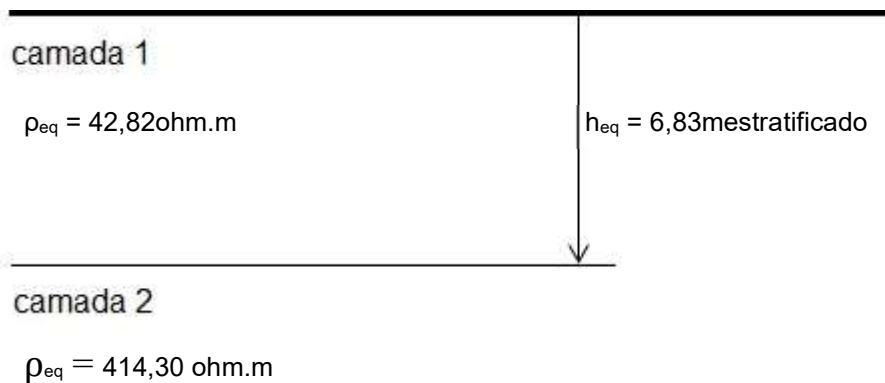
Conforme citado no item 3.2, por obter o auxílio do *software* TecAt, existe a opção de fazer a estratificação com o método computacional. Portanto, para estratificação e para simulação do sistema será utilizado a estratificação via *software*. O resultado da estratificação via *software*, é apresentado na Figura 15 e sua representação na Figura 16.

Figura 15 – Resultados via *software* Tecat plus.

```
Resultado:
N° de camadas: 2
camada #1: 514,07 [Ohm.m] x 1,58 [m]
camada #2: 127,84 [Ohm.m] x
```

Fonte: Simulação no *software* Tecat Plus (versão 6.3)

Figura 16 – Solo estratificado.



6.3 Corrente injetada e dimensionamento do cabo

A partir de dados da instalação da unidade consumidora e de informações sobre níveis de curto-circuito obtidas após solicitação formal à Distribuidora de Energia Elétrica ENEL Goiás, foi possível efetuar os cálculos das correntes de curto-circuito em diferentes pontos da instalação, considerando a usina solar fotovoltaica e seu transformador de 1.000kVA. A Tabela 12 mostra as intensidades das correntes relevantes para o dimensionamento da malha de aterramento.

Tabela 12 - Corrente de curto circuito na UFV.

Curto-circuito monofásico na barra de 13,8kV	Curto-circuito monofásico na barra de 800V
1,530 kA	9,87 kA

Para dimensionamento da corrente injetada (I_m) é necessário indicar os coeficientes da equação em (6), serão definidos da seguinte forma:

- S_f – A corrente de curto não irá subdividir, portanto o fator será unitário e toda a corrente será injetada na malha;
- C_p – A usina será instalada em uma zona rural, com baixa projeção de instalações industriais e residenciais em um futuro próximo. Contudo, foi adotado um fator de decremento de 1,1, estimando que a corrente de curto irá aumentar 10%;
- D_f – A relação X/R da UFV é de 5,71, e conforme a NBR 15751, o fator D_f aumenta com o aumento da relação X/R, com isso, utilizaremos o fator de

1,026 equivalente ao $X/R = 10$ e também o tempo de eliminação da falta em 0,5 segundos;

Por fim, I_f será igual à 1,53kA, conforme estudos de curto da Usina. Com isso, resultaremos na equação em (14) e o resultado final da corrente injetada na malha é apresentada em (15).

$$I_m = 1 \cdot 1,1 \cdot 1,026 \cdot 1,53 \quad (14)$$

$$I_m = 1,727 \text{ kA} \quad (15)$$

Por fim, foi selecionado os materiais para execução da UFV. Os materiais selecionados para os eletrodos horizontais da malha é o cabo de cobre nu e para conexão, será utilizada a solda exotérmica.

Segundo a Tabela 12, a intensidade da corrente elétrica é de 9,87kA. Com isso, foi utilizado o *software TecAt* para simulação da equação (7), e utilizando o material descrito, tempo de eliminação da falta em 0,5 segundos e a corrente injetada na malha, o cabo ideal teria a seção de 26,69mm², a Figura 17 mostra o relatório gerado pelo *TecAt*.

Figura 17 – Seção mínima do condutor.

```
Material:  cobre meio-duro
Corrente [kA]: 9,87
Tempo [s]: 0,5
t max [°C]: 850
t amb [°C]: 40
t ref [°C]: 20
alfa 0: 0,004132
alfa ref: 0,00381
Resistividade: 1,7774
TCAP: 3,42
```

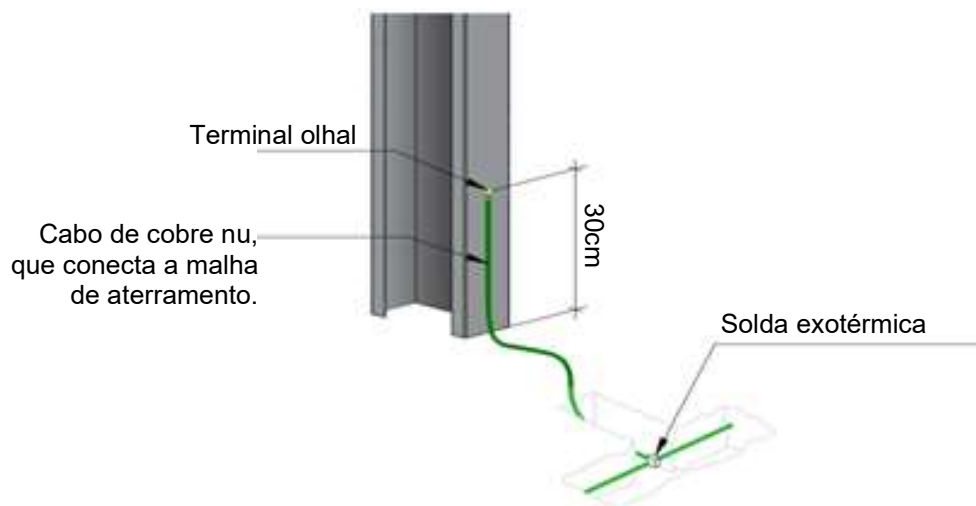
Seção mínima do condutor na conexão: 26,69 mm²

Contudo, para o dimensionamento mecânico, conforme indicado no item 3.4, para o cabo de cobre a bitola mínima do condutor de cobre é de 50mm², e por isso esse será o condutor utilizado por atender os critérios mecânicos e térmicos. Na impossibilidade de utilizar soldas exotérmica para a conexão entre cabos e

equipamentos serão realizadas conexões parafusadas com conector olhal. Em que deverão ser utilizadas na usina apenas em conexões para equipotencialização de partes metálicas ao sistema de aterramento.

Todas as estruturas metálicas dos rastreadores solares serão conectadas na malha de aterramento, conforme Figura 18, com terminais estanhados com aplicação de tinta de galvanização após torqueamento com objetivo de reduzir a corrosão ao longo dos anos. As conexões são realizadas para manter a equipotencialização das partes metálicas de toda a usina.

Figura 18 – Conexão das estacas metálicas no sistema de aterramento.



6.4 Dimensionamento dos potenciais admissíveis

As equações mencionadas na Seção 4.3 serão simuladas via *software TecAt plus*, considerando uma pessoa de 70kg, a corrente de curto injetada na malha e um tempo de eliminação da falta igual à 0,5 segundos, os resultados são apresentados na Figura 19.

Figura 19 – Resultado de valores dos potenciais de toque e passo admissíveis.

		without rock:
Potencial de Toque admissível [V]:	2623,11	393,24
Potencial de Passo admissível [V]:	9826,34	906,87

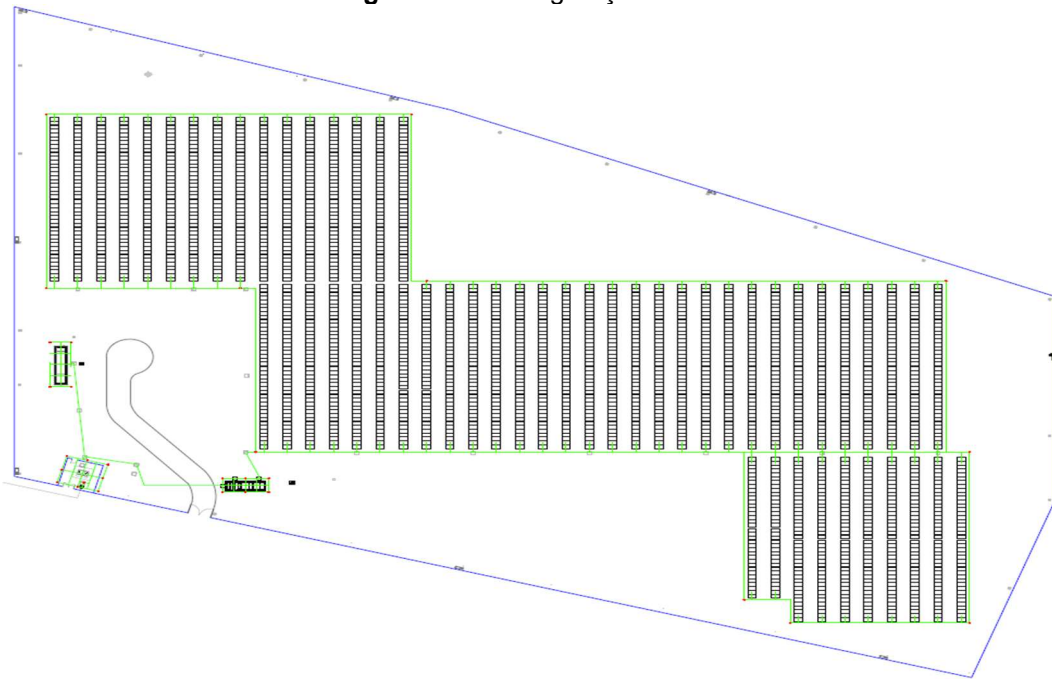
Na Figura 19, nota-se dois valores para cada potencial admissível. Foram simulados com dois cenários: o primeiro com uma camada de recobrimento de concreto e outra sem nenhuma camada de recobrimento denominada “*without rock*”. Os equipamentos principais ficarão alocados em uma fundação com 30 centímetros de altura, e no momento de análise referente à esses equipamentos, serão considerados os resultados com a camada de recobrimento.

Segundo a Tabela 4, a faixa de resistividade do concreto é grande, portanto, para determinar o valor da resistividade utilizada no fator ρ_2 da equação (13) foi analisado o estudo realizado pelo Ronaldo Junior (MEDEIROS JUNIOR, 2014). Conforme apresentado no item 2.4, as resistividades do concreto seco variam aproximadamente entre 5.000 e 60.000 ohms.m, e com objetivo de ter um resultado mais conservador foi utilizado o valor igual à 8.000 ohms.m.

6.5 Definição do sistema de aterramento

Inicialmente foi elaborado uma geometria simples para o sistema de aterramento será simulado no *software TecAt* as tensões de toque, de passo e a resistência do aterramento elaborado. Os resultados servirão como tomadas de decisões para reforçar mais o grid e incluir hastes de aterramento, até que todos os potenciais dentro da UFV estejam dentro dos potenciais admissíveis calculados, e com isso, chegar em uma malha de aterramento eficiente e segura.

A geometria básica inicial é apresentada na Figura 20, em que as linhas verdes representam os cabos de cobre nú de 50mm² e os círculos vermelhos representam as hastes de aço cobreado de 2,4 metros por 5/8”.

Figura 20 – Configuração inicial.

Foram traçadas linhas de corte para análise dos potenciais de toque na UFV, e são mostradas na Figura 21, para as linhas de corte efetuadas no sistema de aterramento, os potenciais de toque verificadas no interior da malha têm seu gráfico ilustrado na Figura 22, sendo que a reta horizontal vermelha com a maior cota é a tensão de toque admissível (393,24V).

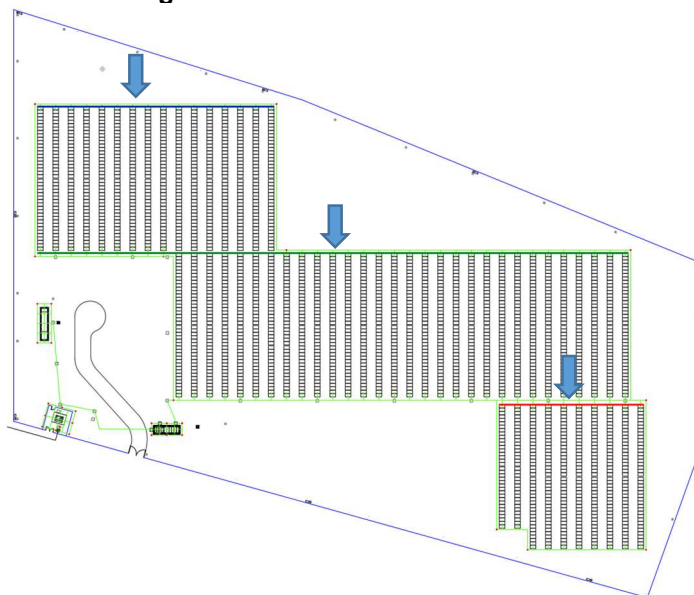
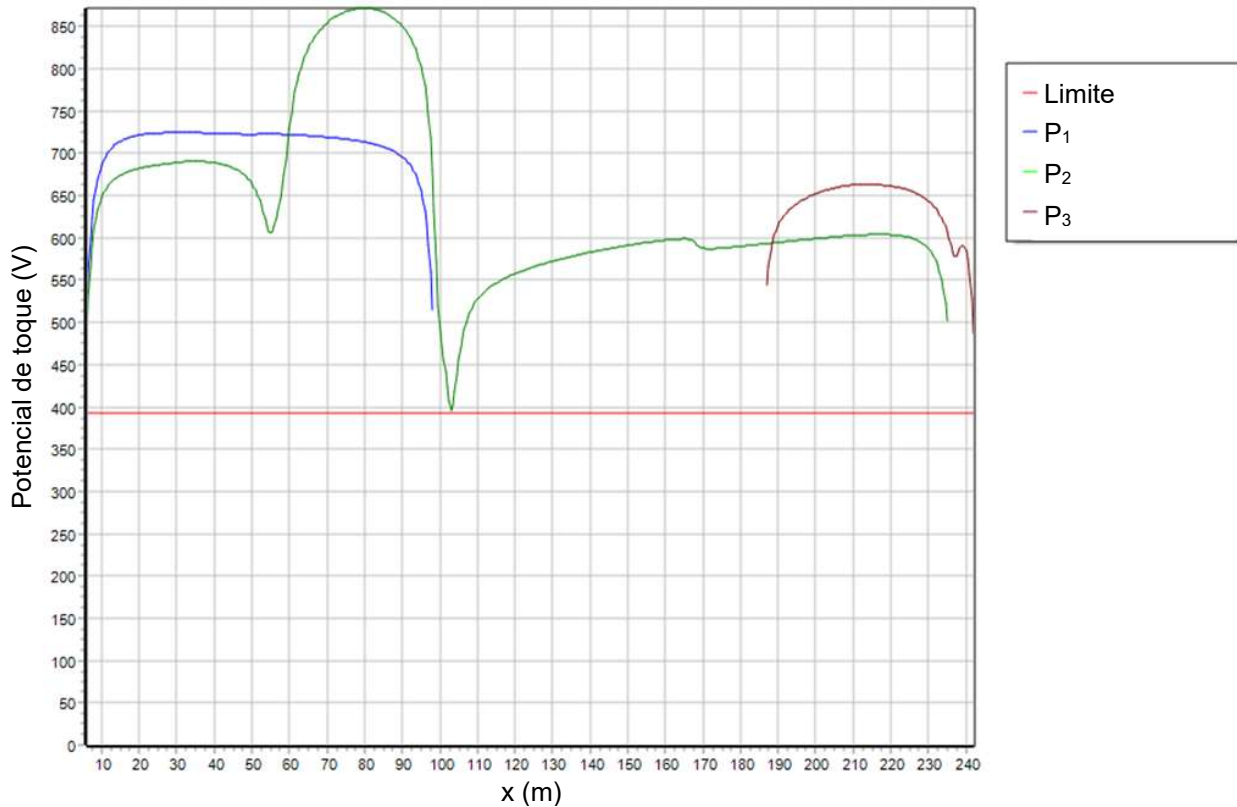
Figura 21 – Linhas de corte na usina.

Figura 22 – Gráfico de potenciais resultante da figura 21.



Na Figura 22 nota-se que todos os potenciais de toque ficaram acima do admissível calculado para a UFV, o que já torna a geometria inicial inválida, contudo será feita todas as análises nessa geometria para comparação com as próximas. Nesta usina teremos 3 edificações onde teremos que ter uma maior atenção com a tensão de toque: Skid, eletrocentro e cabine primária pois nessas edificações poderá ter uma maior rotatividade de pessoas, e por isso devemos analisar de forma mais criteriosa.

Foram traçadas linhas de corte (locais indicados por setas), conforme Figura 23, visando analisar as tensões de toque com maior precisão nos locais onde poderá haver habitação de pessoas, gráfico dos cortes é mostrado na Figura 24, nessas edificações foi utilizado os potenciais admissíveis considerando uma camada de 30 centímetros de concreto, sendo representada na Figura 24 pela reta horizontal vermelha com a maior cota de tensão de toque admissível (2.623,11V).

Figura 23 – Linhas de corte nas edificações.

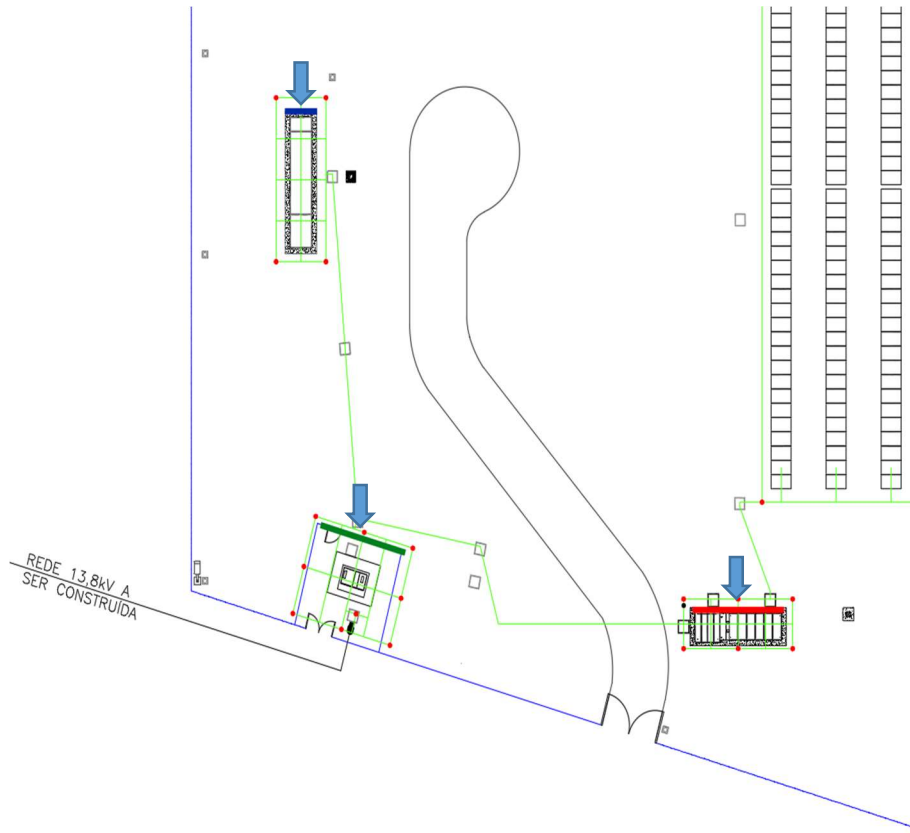
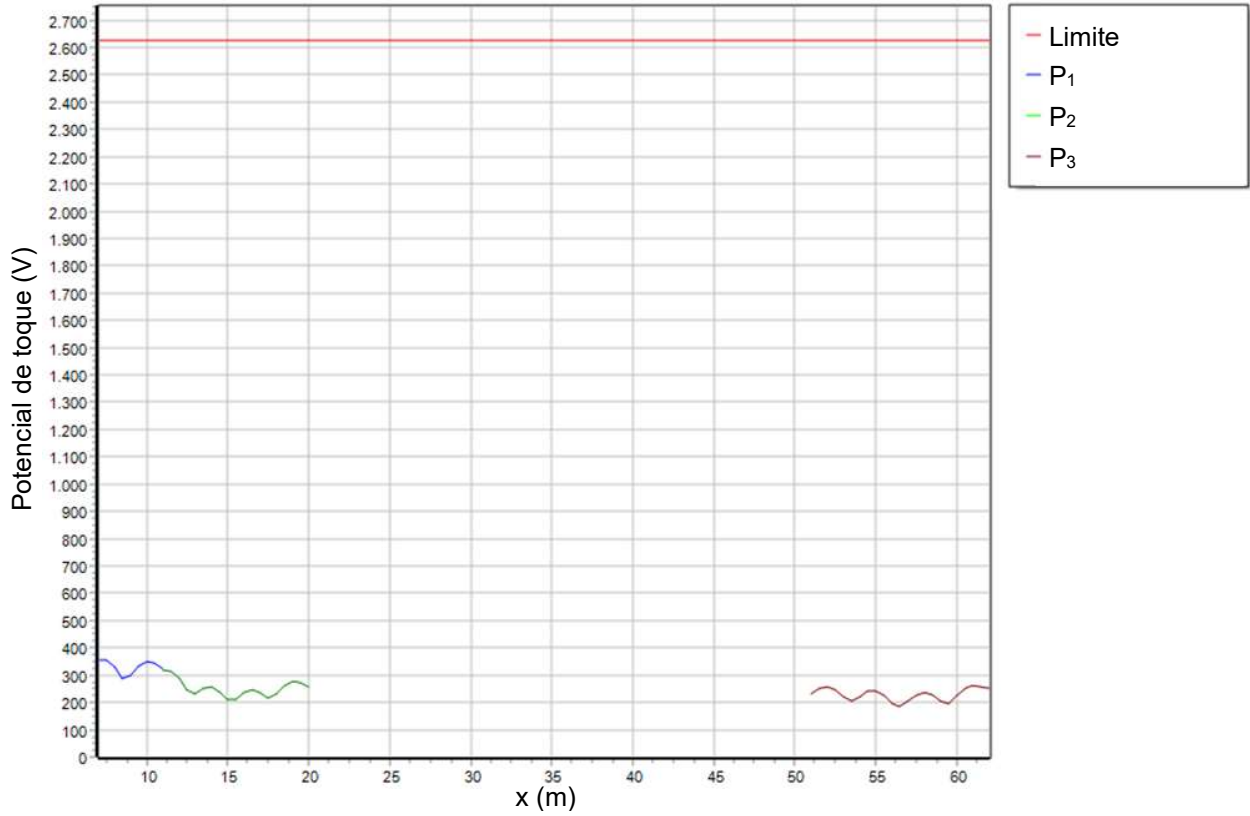


Figura 24 – Gráfico de potenciais resultantes da figura 23.



Na Figura 24 nota-se que todos os potenciais de toque ficaram abaixo do admissível calculado para a UFV, isso significa que podemos manter a geometria apresentada ou reduzi-la. Mas, se tratando de locais com uma maior circulação de pessoas, iremos manter a geometria inicial pois a quantidade de cabos reduzidos seria insignificante comparados a quantidade total para a UFV.

Na Figura 25, foram traçadas linhas de corte para análise dos potenciais de passo na UFV, para as linhas de corte efetuadas no sistema de aterramento, os potenciais de passo verificadas no exterior da malha têm seu gráfico ilustrado na Figura 26, sendo que a reta horizontal vermelha com a maior cota é a tensão de toque admissível (9.826,34V).

Figura 25 – Linhas de corte para análise dos potenciais de passo na usina.

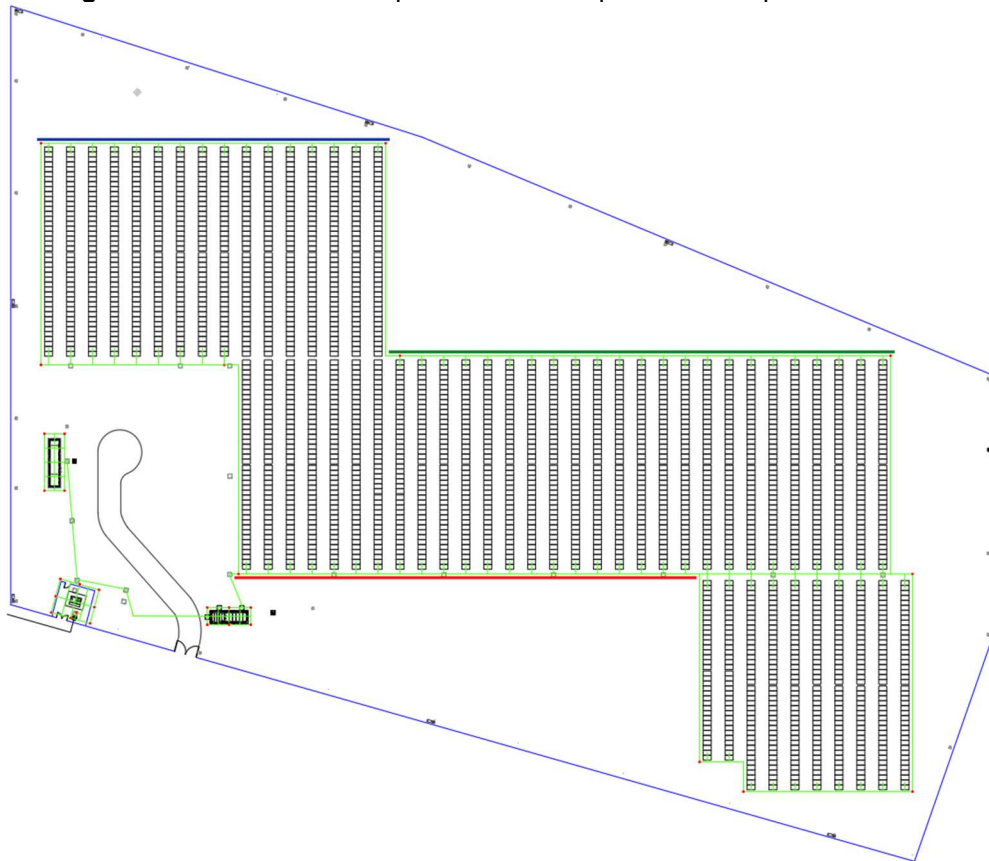
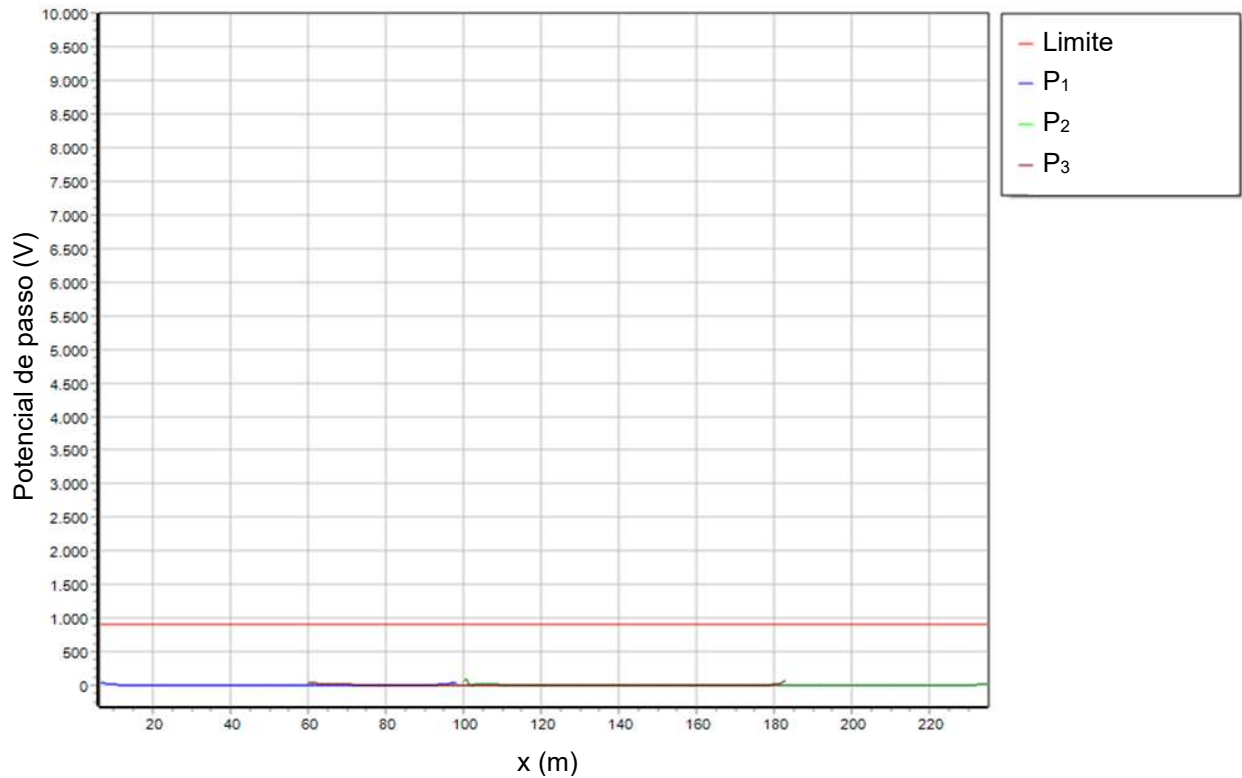


Figura 26 – Gráfico de potenciais resultante da figura 25.



Na Figura 26 nota-se que todos os potenciais de passo ficaram abaixo do admissível calculado para a UFV, isso significa que podemos manter a geometria apresentada ou reduzi-la. Entretanto, como os potenciais de toque não foram atendidos, possivelmente os potenciais de passo ficarão ainda melhores pois deverá ser feito um reforço no sistema de aterramento.

Com objetivo de analisar a elevação de potencial em todos os pontos do sistema de aterramento, foi estabelecido um retângulo dentro do qual se situa a malha. Os gráficos ilustrados nas Figuras 28 e 29 foram obtidos circunscrevendo todo perímetro do cercamento da usina, extrapolando a borda da cerca perimetral a uma distância de 1 metro, conforme Figura 27.

Figura 27 – Retângulo cobrindo toda área da usina 1 metro após o cercamento.

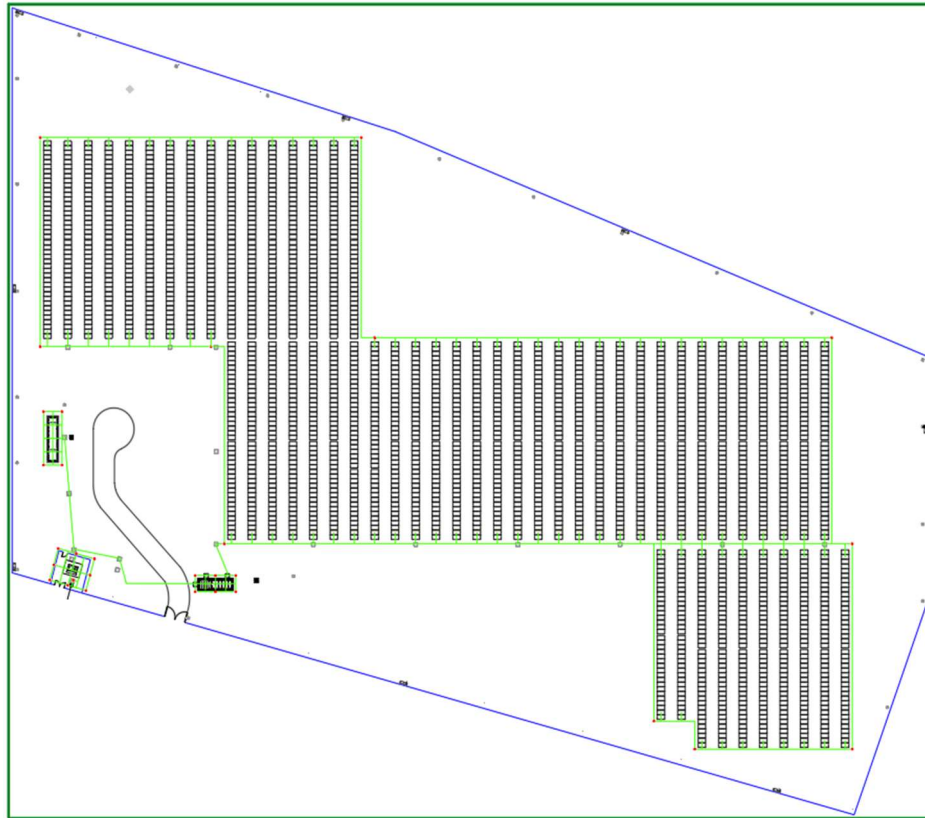


Figura 28 – Potenciais na malha e fora dela resultante da figura 27.

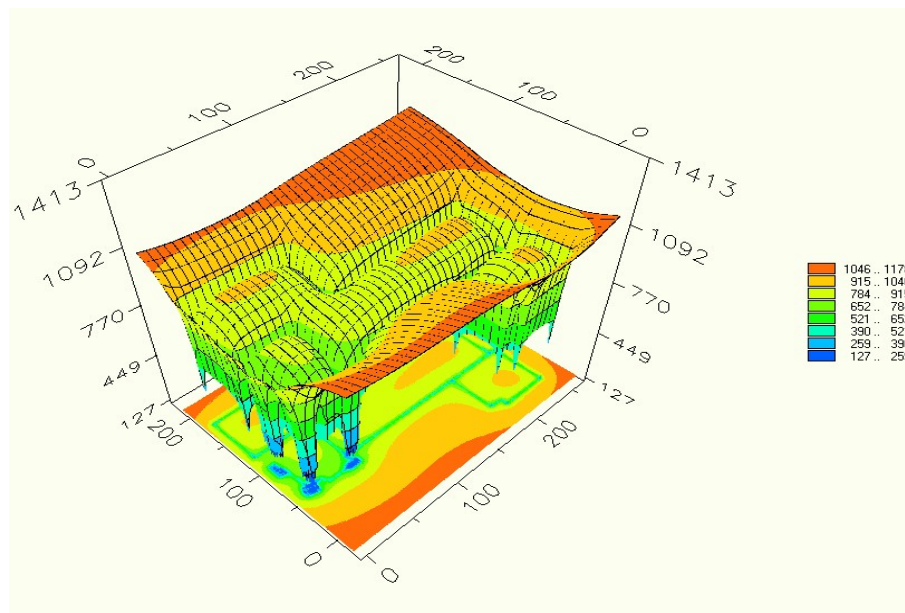
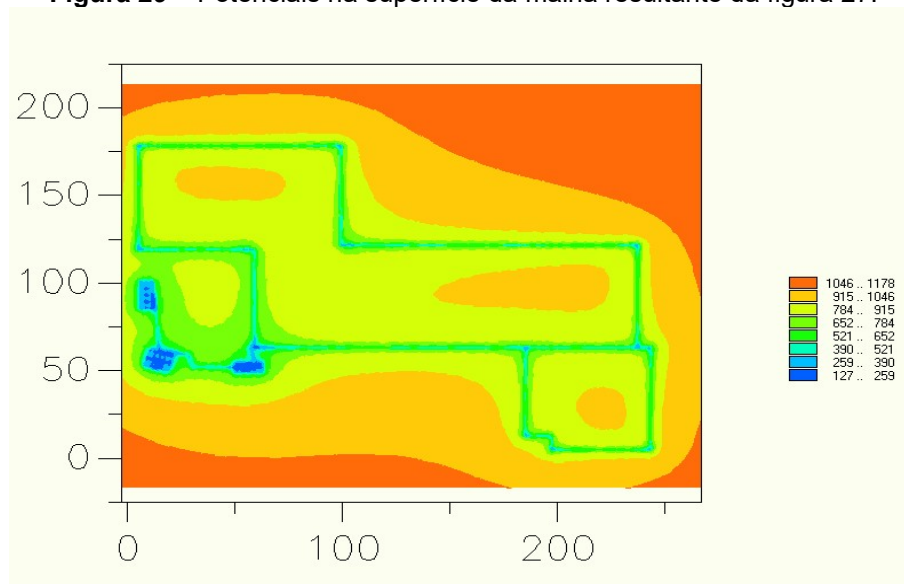


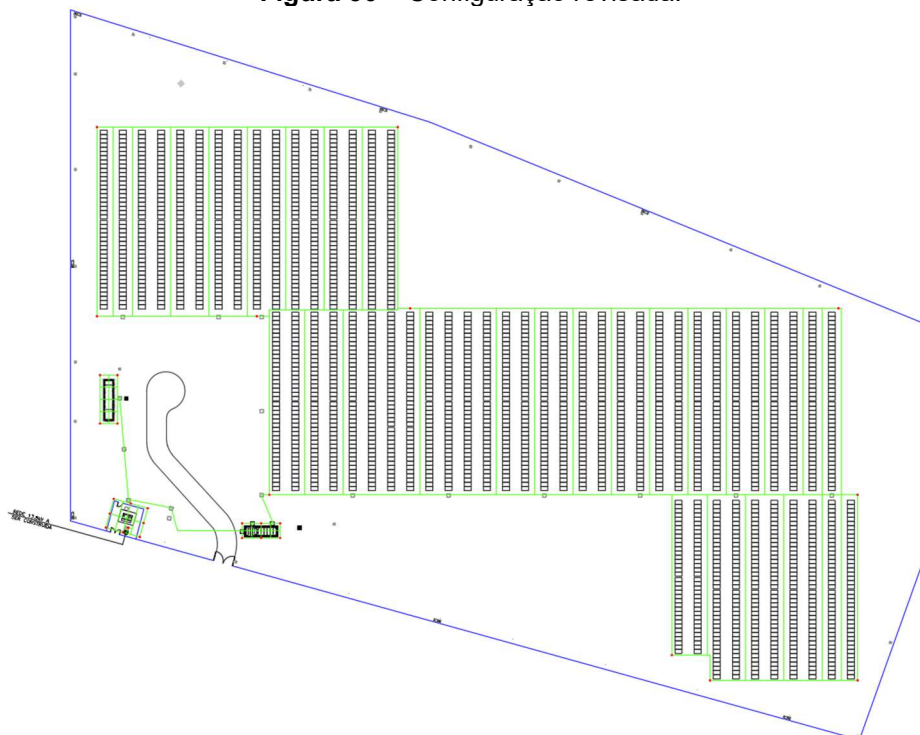
Figura 29 – Potenciais na superfície da malha resultante da figura 27.



Nas Figuras 28 e 29 nota-se que todos os potenciais de toque ficaram acima do admissível calculado para a UFV em diversos locais. Visando corrigir todos os problemas apresentados, foi proposta uma nova geometria para o sistema de aterramento.

Com as informações obtidas através dos gráficos apresentados, nota-se que é necessário um reforço de eletrodos no centro da usina, e com isso foram adicionados eletrodos no sentido Norte-Sul. O sistema proposto é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Configuração revisada.



Para a nova configuração, novamente foram traçadas linhas de corte para análise dos potenciais de toque na UFV, e são mostradas na Figura 31, para as linhas de corte efetuadas no sistema de aterramento, os potenciais de toque verificadas no interior da malha têm seu gráfico ilustrado na Figura 32, sendo que a reta horizontal vermelha com a maior cota é a tensão de toque admissível (393,24V).

Figura 31 – Linhas de corte na usina com a nova configuração.

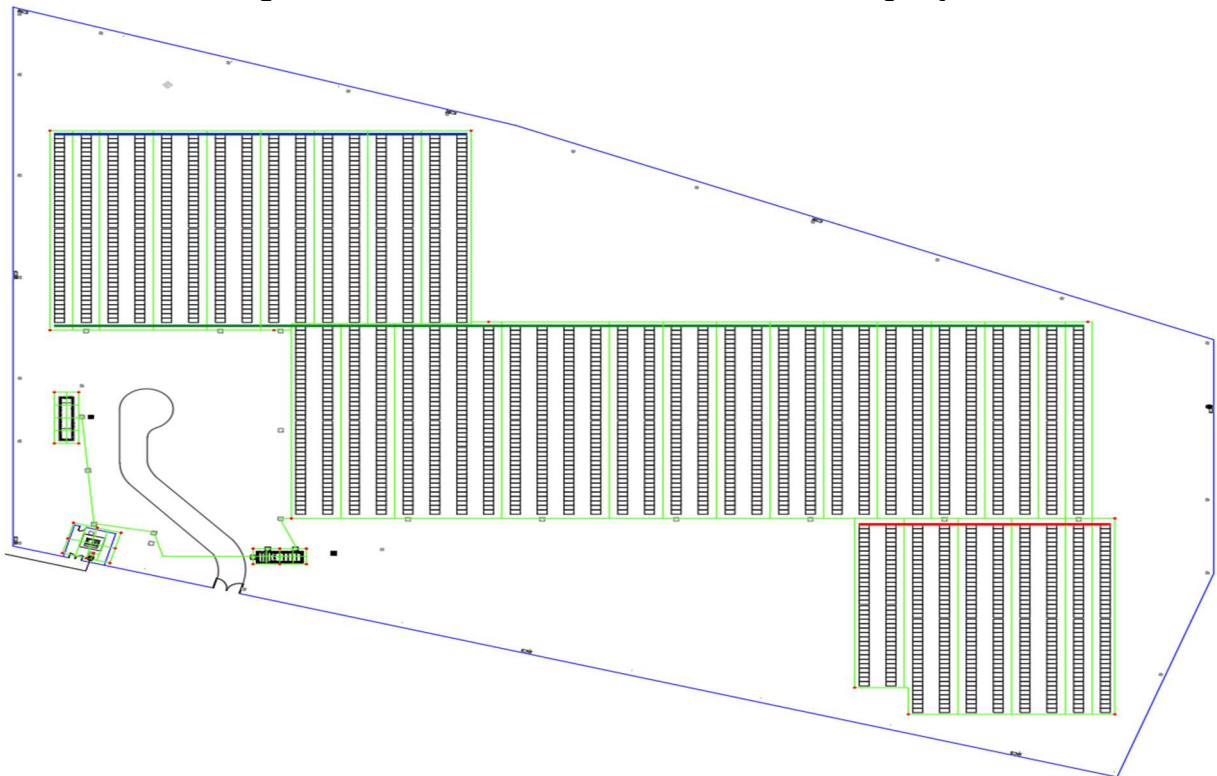
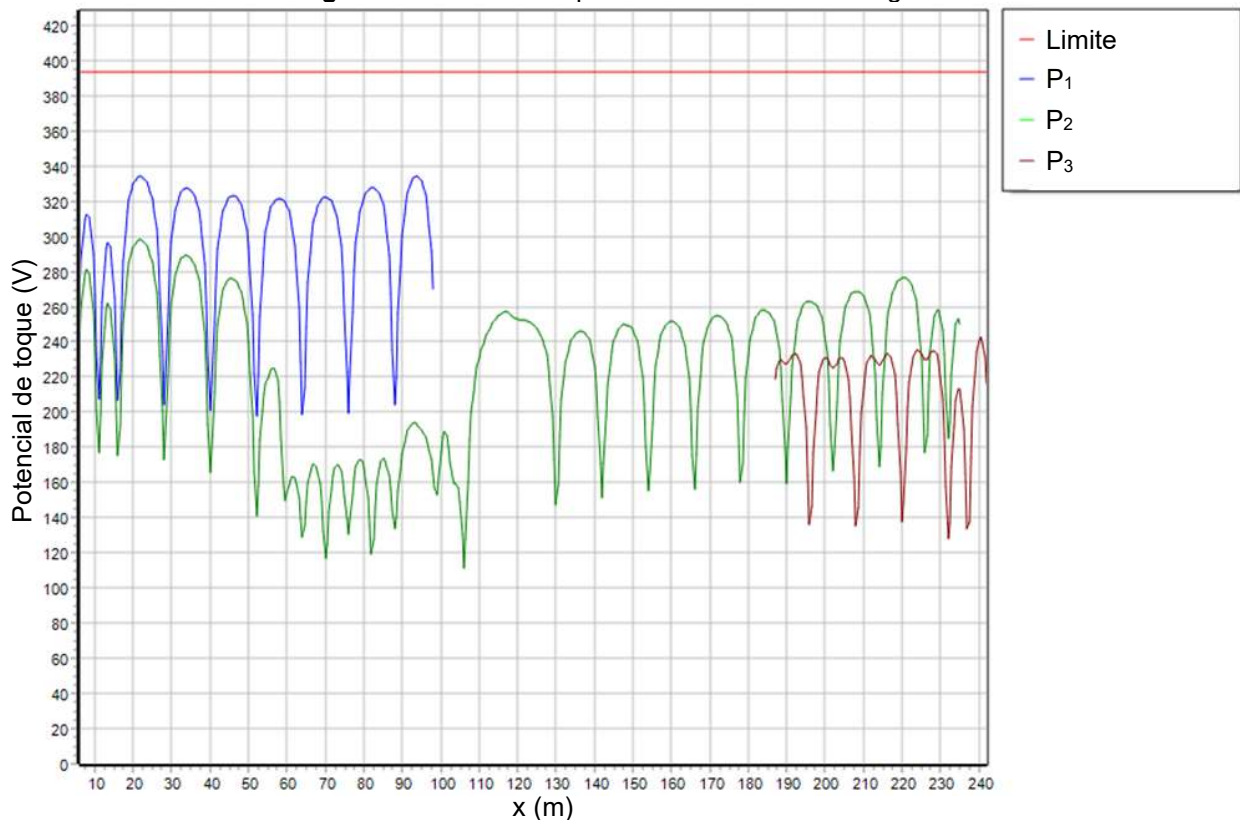


Figura 32 – Gráfico de potenciais resultante da Figura 31.



Com o reforço feito no sistema, todos os potenciais de toque ficaram abaixo do admissível calculado para a UFV, validando então a solução apresentada para os potenciais de toque na região dos módulos fotovoltaicos. Conforme Figura 26, os potenciais de toque nas edificações estavam dentro do admissível, contudo com o reforço no sistema, foram traçadas linhas de corte (locais indicados por setas) novamente para observar se ocorreu melhora nessas regiões, portanto visando analisar as tensões de toque com maior precisão nos locais onde poderá haver habitação de pessoas, gráfico dos cortes é mostrado na Figura 34, nessas edificações foi utilizado os potenciais admissíveis considerando uma camada de 30 centímetros de concreto, sendo representada na Figura 34 pela reta horizontal vermelha com a maior cota de tensão de toque admissível (2.623,11V).

Figura 33 – Linhas de corte nas edificações para checar possível melhoria dos potenciais nas regiões das edificações.

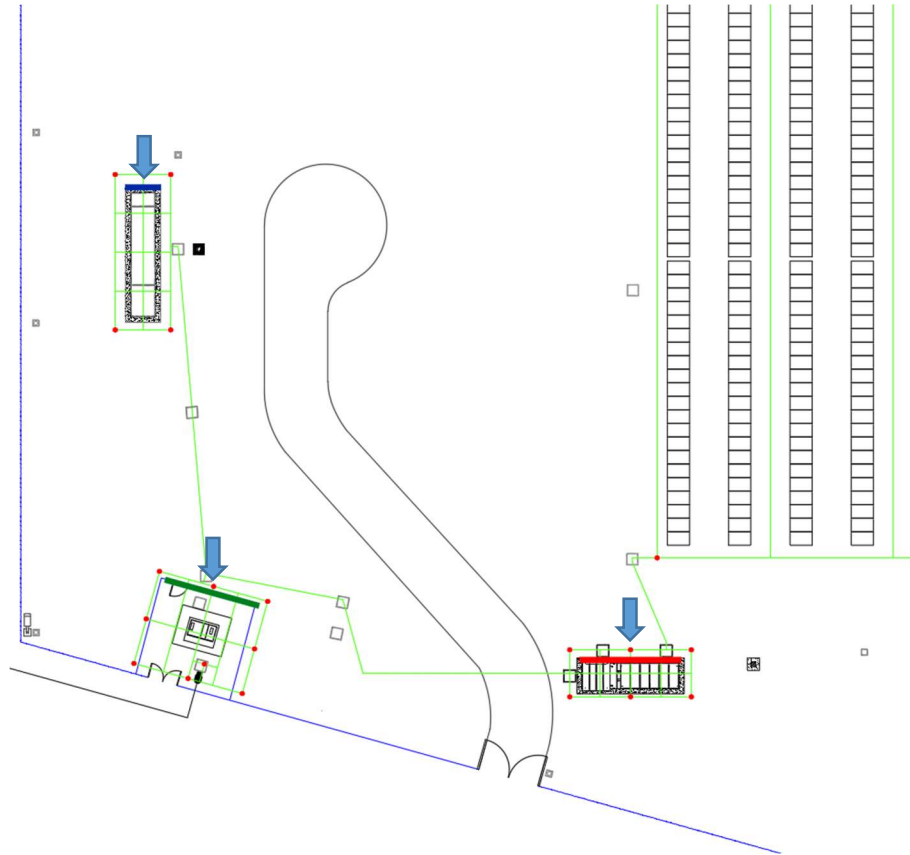
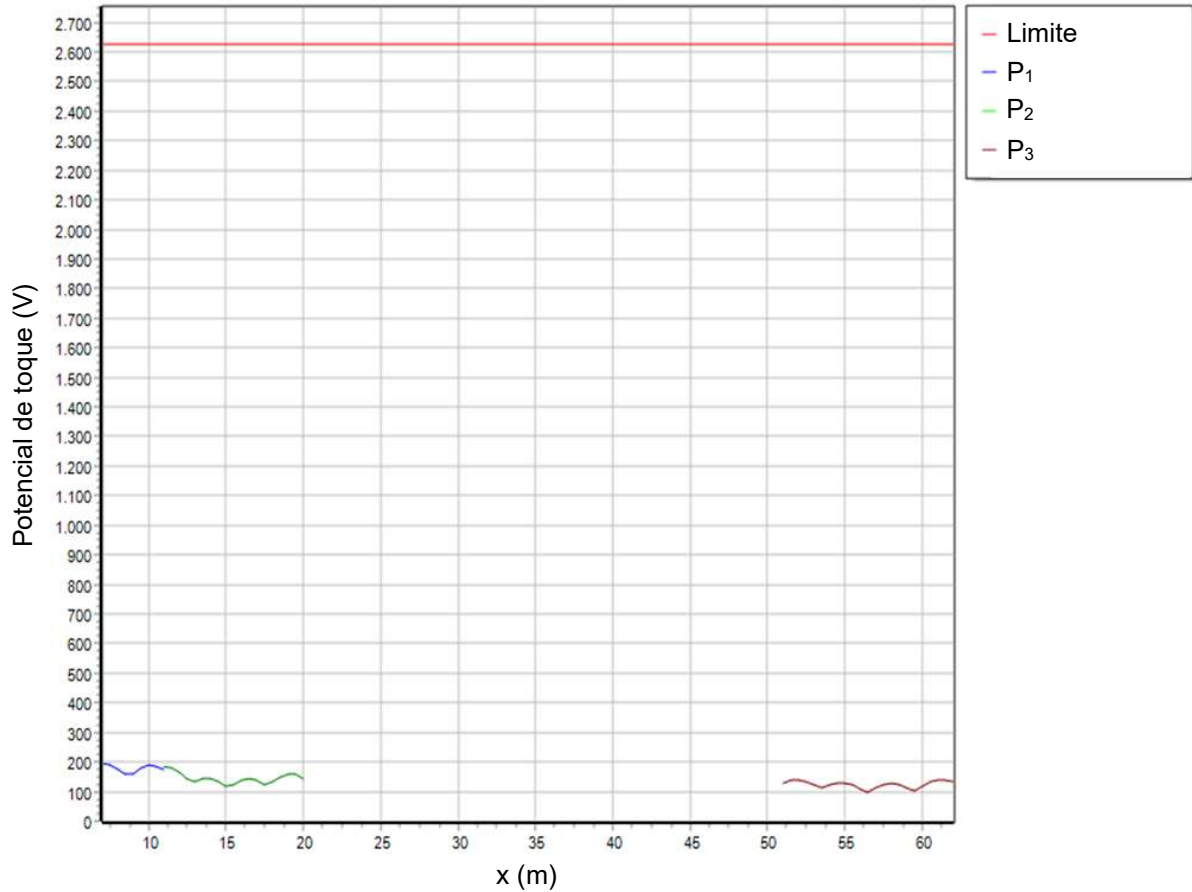


Figura 34 – Gráfico de potenciais resultante da Figura 33.



Conforme mostrado na Figura 34, em comparação com a Figura 24, houve uma redução dos potenciais. Ou seja, o reforço no sistema na região dos módulos melhorou também a região dos equipamentos. Assim como nas edificações, os potenciais de passo da usina também ficaram abaixo do admissível, contudo, será analisado o efeito do reforço feito no centro da usina.

Na Figura 35, foram traçadas linhas de corte para análise dos potenciais de passo na UFV, para as linhas de corte efetuadas no sistema de aterramento, os potenciais de passo verificadas no exterior da malha têm seu gráfico ilustrado na Figura 36, sendo que a reta horizontal vermelha com a maior cota é a tensão de toque admissível (9.826,34V).

Figura 35 – Linhas de corte final na usina.

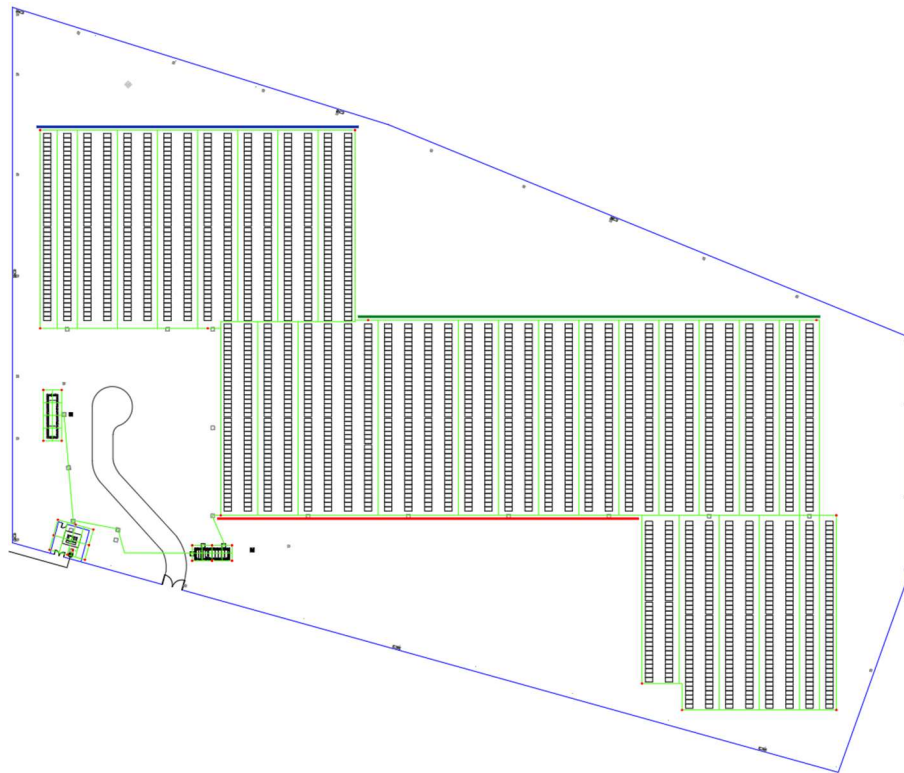
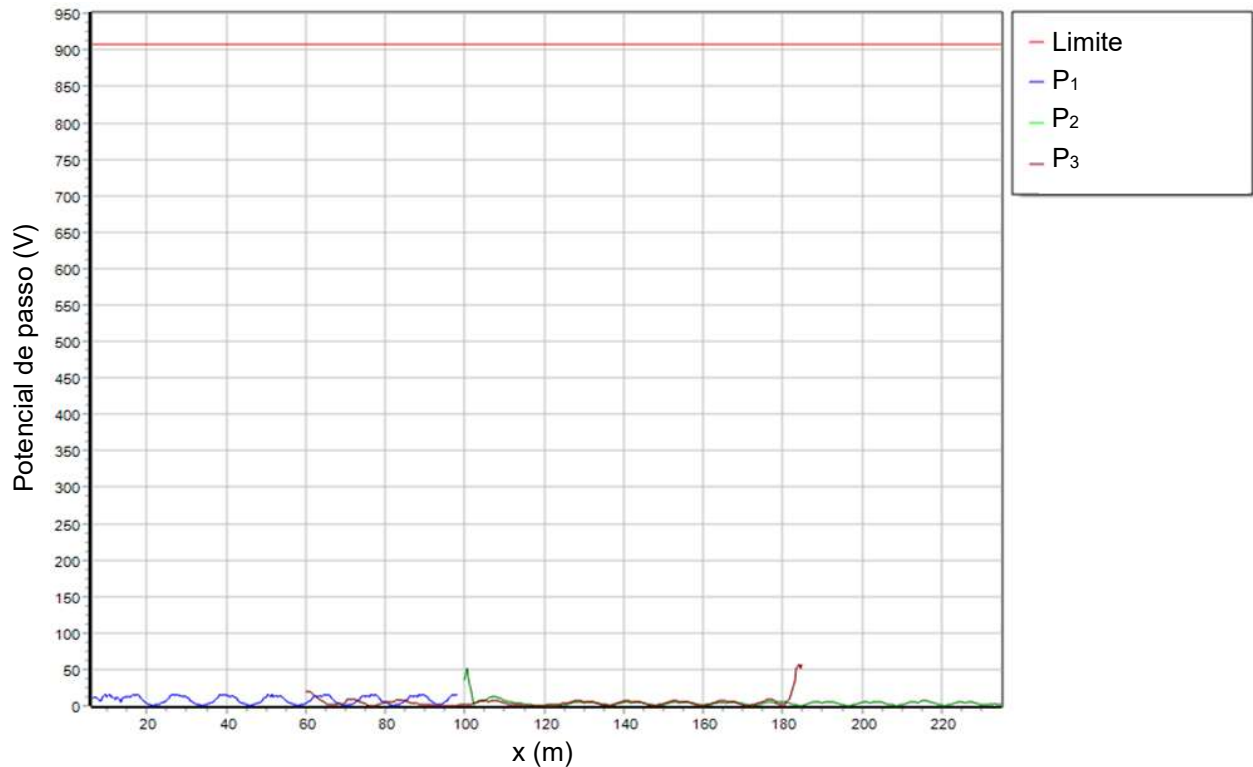


Figura 36 – Gráfico dos potenciais resultantes da Figura 35.

Conforme mostrado na Figura 36, em comparação com a Figura 26, houve uma redução dos potenciais, assim como nas regiões dos equipamentos, o reforço na malha de aterramento visando a redução dos potenciais de toque, melhorou os potenciais de passo.

Por fim, com objetivo de verificar se todos os potenciais na usina ficaram dentro do admissível, novamente foi estabelecido um retângulo dentro do qual se situa a malha. Os gráficos ilustrados nas Figuras 38 e 39 foram obtidos circunscrevendo todo perímetro do cercamento da usina, extrapolando a borda da cerca perimetral a uma distância de 1 metro, conforme Figura 37.

Figura 37 – Retângulo cobrindo toda área da usina 1 metro após o cercamento na nova configuração.

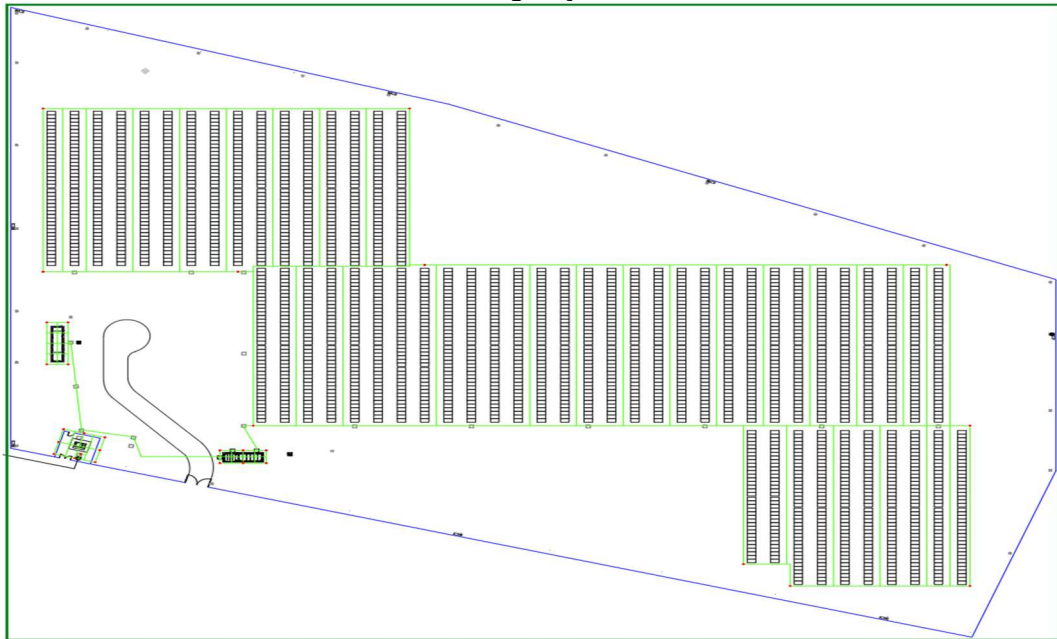


Figura 38 – Potenciais na malha e fora dela resultante da figura 37.

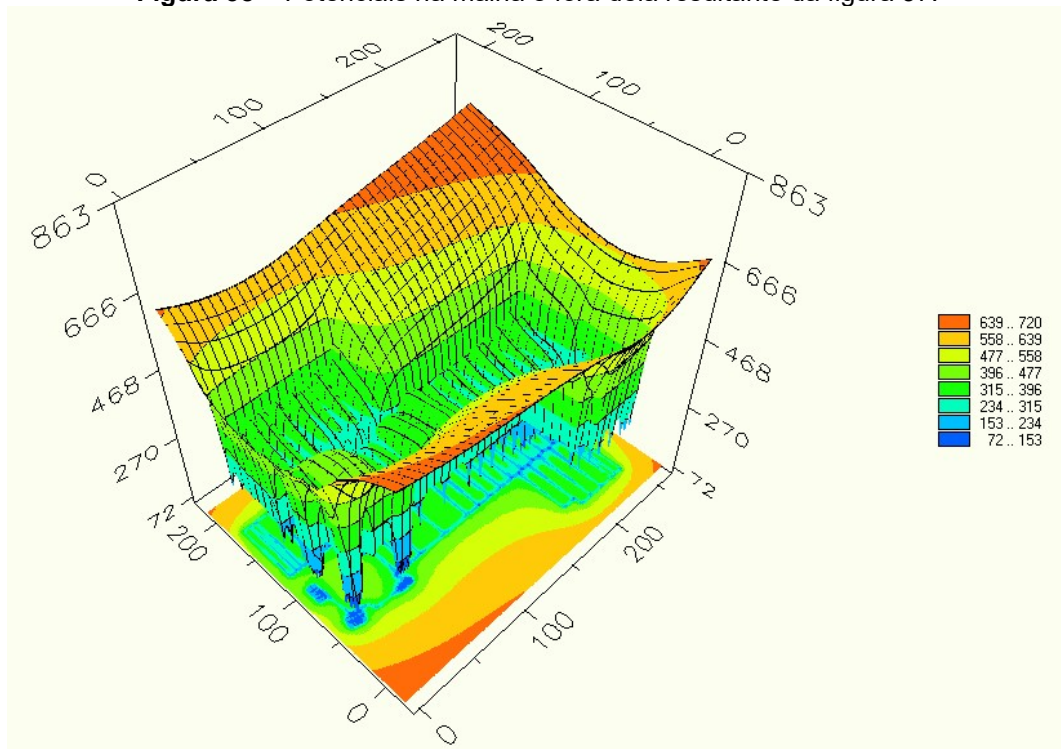
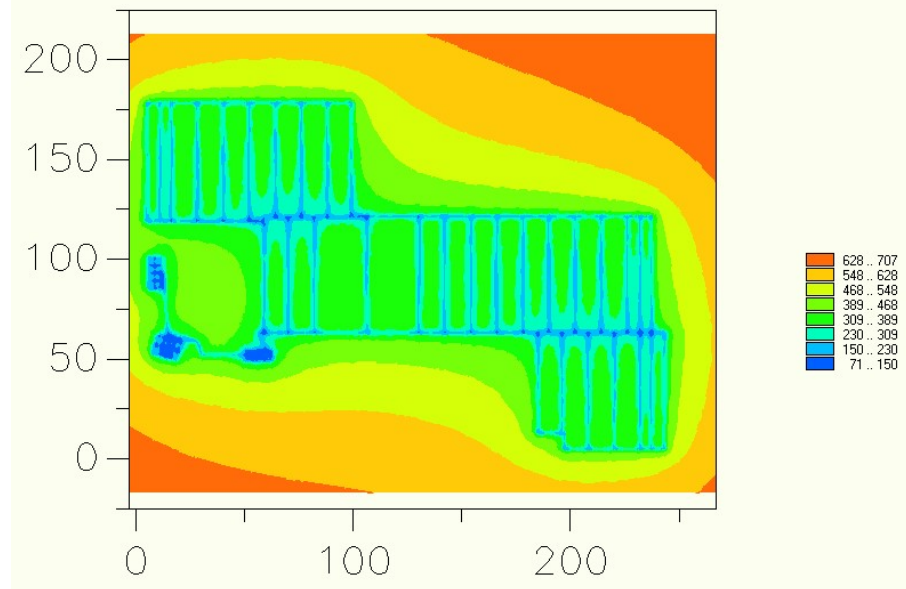


Figura 39 – Potenciais dispersos na superfície da malha resultante da figura 37.



Na Figura 39 todos os locais do sistema ficaram com a faixa de cores entre azul escuro e verde escuro, esses potenciais estão dentro do admissível de toque que segundo a imagem está limitada em 468V. Quanto aos potenciais de passo, nenhum local dentro do perímetro da usina oferece perigo quanto a elevação de potenciais.

Os locais em que os potenciais de toque ficaram acima do admissível não possuem nada para ser tocado. Portanto a geometria apresentada segue todos os requisitos de segurança. Com a nova geometria apresentada, através de simulação no *software TecAt plus* foi calculada a resistência de aterramento igual à $0,52\Omega$, a Figura 40 mostra o relatório apresentado pelo *software*.

Figura 40 – Resistência do aterramento.

```

Dados do Projeto:
Projeto:   RIOLANDIA
Cliente:
Data:     11/09/2022
Local:

N° de camadas: 2
  camada #1: 514,07 [Ohm.m] x 1,58 [m]
  camada #2: 127,84 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,002 s
Resistência da Malha [Ohm] =    0,52
Máximo potencial da Malha [V] = 904,88
  
```

7 CONCLUSÃO

Para o sistema em consideração foram encontradas resistividades com escala entre baixas e médias, sendo as baixas predominantes nas linhas de medições apresentadas, isso possibilitou um sistema de aterramento com baixa resistência.

Em contrapartida, o curto circuito foi alto para um sistema elétrico de 1MVA, e isso dificultou o desenvolvimento de um sistema com todos os potenciais dentro do admissível. Na tentativa de uma redução de eletrodos e deixar um sistema seguro foi proposto um sistema com o mínimo exigido pelas normativas vigentes.

Contudo, esse sistema não correspondeu em todos os parâmetros, e a partir da observação de todos os locais em que os potenciais estavam elevados, foi simulado um novo sistema de aterramento, prevendo eletrodos nos pontos mais críticos, e nesse sistema, todos os locais na extensão do sistema ficaram dentro do tolerável dimensionado.

É importante notar que o dimensionamento dos potenciais de passo considera uma pessoa sem calçados, ou seja, a utilização de botinas isolantes irá aumentar os potenciais admissíveis durante o acontecimento de um curto. Assim como a utilização de luvas também reduz os potenciais de toque realizados pela mão.

Entretanto o resultado foi o esperado, foi efetuado todo o levantamento de dados do terreno, efetuado simulações com auxílio computacional e de instrumentos. Pode-se observar que todos os potenciais de contato excederam a tolerância em uma definição inicial da geométrica da malha de aterramento, visando obter o sistema ideal foram realizados artifícios para alcançar melhores resultados para o sistema de aterramento da usina em questão.

7.1 Trabalhos futuros

Como sugestão para próximos estudos é importante considerar os rastreadores solares (*trackers*) como parte do sistema de aterramento pois toda a estrutura é metálica e suas estacas de fixação no solo são enterradas. Nesse estudo não foi possível essa consideração pois o software não tem a capacidade de simulação com a quantidade de eletrodos equivalente à de estacas. Essa consideração em softwares de maior precisão e variedade de materiais reduzirá a quantidade de eletrodos necessária para o mesmo sistema comprovando a segurança.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Dalmacio. **Técnica de soldagem exotérmica em conexões de cabos e hastes nas montagens de sistemas de aterramento e de proteção contra descargas elétricas atmosféricas**. 2014.

ASSAIFE, B. M. **Aterramento e Proteção de Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, UFRJ, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15571**: Sistemas de aterramento de subestações. Rio de Janeiro. p. 4 - 14. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7117-1. Parâmetros do Solo para projetos de aterramentos elétricos. **Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geométrica**. 2020.

ÁVILA, V. A. S. **Avaliação do risco de choque elétrico em descidas de aterramento em redes de distribuição por meio da medição dos potenciais de toque e passo**. 2019.

BEZERRA, F. D. **Energia solar**. Fortaleza, Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.174. jul. 2021. (Caderno Setorial Etene).

DIAS, R. **Gestão Ambiental: Responsabilidade Social e Sustentabilidade**. São Paulo. 2011.

GENNARI, R. **Malha de aterramento de subestações**. 2017.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto Circuito**. 2º ed., Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997

KINDERMANN, Geraldo. **Aterramento Elétrico**. 3º ed., Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1995.

LOUREIRO, R. G. **Riscos de Choque Elétrico nos Atendimentos de Ocorrências pelo Corpo de Bombeiros Militar de Roraima**. 2015.

MA, J.; DAWALIBI, F. P. **Grounding analysis of a solar power generation facility**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE. 2010. p. 1-4.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. et al. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, v. 4, n. 2, p. 116-132, 2014.

NEUHAUS, M. C. **Projeto de uma planta de geração fotovoltaica de alta potência conectada em tensão primária de distribuição**. 2021.

NOGUEIRA, R. L. S. **Análise de sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas: Otimização e critérios de segurança em aterramentos de estruturas de linhas de transmissão**. Tese de Doutorado, Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ. 2006

OLIVEIRA, A. M. C.; ROCHA, E. P. **Estudo de aterramento da usina fotovoltaica da UFERSA.** (Universidade federal rural do semiárido - UFERSA, curso de engenharia de energia, trabalho de conclusão de curso. 2017

OSORIO, E. A. A.; PAN, A. C. **Dimensionamento de um sistema de aterramento em uma usina solar.** Congresso brasileiro de energia solar, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física Curso de especialização em Energias Renováveis. p. (1-10). 2018.

ROSA, A. **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil.** Revista brasileira de energia solar, Volume VII Número 2. p. 140 -147. Dezembro, 2016.

ROSA, W. et al. **Metodologia para avaliação das consequências da expansão dos sistemas elétricos nos sistemas de aterramento das subestações.** Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2022.

SOUZA, RAFAEL SOARES et al. **Rastreadores Solares: Uma Revisão Bibliográfica.** XLIV Internacional Sodebras Congress, 2021.

SOZO, I. **Desenvolvimento de ferramenta didática para cálculo de malha de aterramento.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

VIANA, F. M. et al. **Interpretação da resistividade aparente do solo e estratificação com arranjo de Schlumberger.** 2016.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos.** 1ª. ed. São Paulo, Artliber. 2005.

WEIL, D. N. **“Economic Growth”.** Pearson Education, Inc., 1st Ed.. Estados Unidos. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 7117:** Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro. 2012.

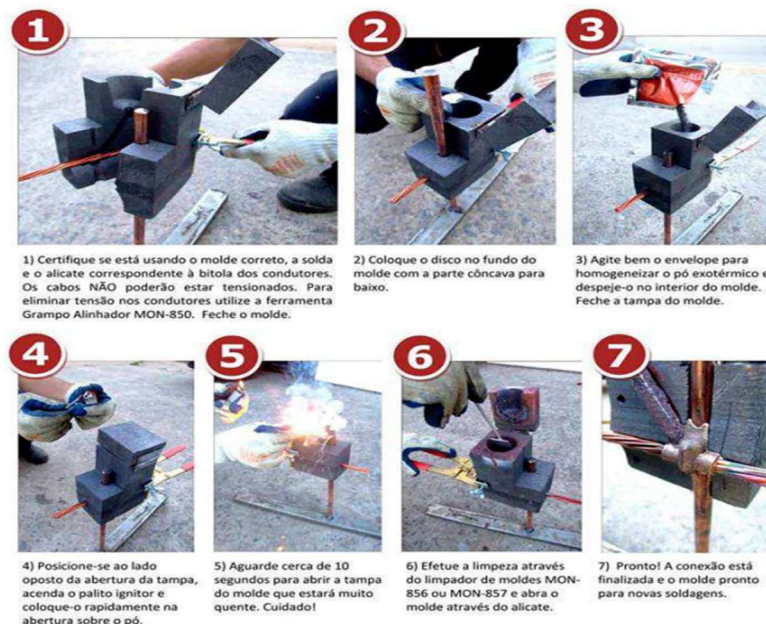
GENNARI, RODRIGO. **Malha de aterramento de subestações.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista – Guaratinguetá, 2017.

ANEXO A – PROCEDIMENTO PARA SOLDA EXOTÉRMICA

O procedimento para realizar a solda exotérmica é passível de riscos à saúde física do operador, portanto devem ser adotados procedimentos com objetivo de garantir a segurança e realizar uma solda em perfeito estado.

Para garantir a segurança, o operador deve estar com os equipamentos de proteção individual adequados, são eles: botinas, luvas de raspa, óculos e capacete. Para executar uma solda com uma ótima qualidade, é importante seguir os passos da Figura 41 (ALMEIDA, 2014).

Figura 41 - Procedimento de execução de solda exotérmica.



Fonte: Almeida (2014)