

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Athos Machado Brandão
Willy Paul Barros Zulke**

**Dimensionamento de sistema de aterramento de usina
fotovoltaica de 584kWp aplicada a USP, São Carlos -
Área II**

**São Carlos
2019**

Athos Machado Brandão
Willy Paul Barros Zulke

**Dimensionamento de sistema de aterramento de usina
fotovoltaica de 584kWp aplicada a USP, São Carlos -
Área II**

Monografia apresentada ao Curso de Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Elmer P. Tito Cari

São Carlos
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E
PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B817	Brandão, Athos Machado; Zulke, Willy Paul Barros Dimensionamento de sistema de aterramento de usina fotovoltaica de 584kWp aplicada a USP, São Carlos - Área II / Athos Machado Brandão, Willy Paul Barros Zulke; orientador Elmer Pablo Tito Cari. – São Carlos, 2019. 81 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019. 1. Aterramento. 2. Proteção elétrica. 3. Energia renovável. 4. Estacionamento. 5. Sistema fotovoltaico. 6. Malha de aterramento . 7. Hastes aterramento. I. Cari, Elmer Pablo Tito. II. Título.
------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Athos Machado Brandão

Título: "Projeto de dimensionamento de sistema de aterramento de usina fotovoltaica de 503kW aplicada a USP, São Carlos - Área II"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29 / 11 / 2019,

com NOTA 8,0 (oito , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - Orientador - SEL/EESC/USP

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP

Mestre Gustavo Henrique de Paula Santos - Instituto Federal de São Paulo/Campus Itapetininga

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Willy Paul Barros Zulke

Título: "Projeto de dimensionamento de sistema de aterramento de usina fotovoltaica de 503kW aplicada a USP, São Carlos - Área II"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29 / 11 / 2019,

com NOTA 8,0 (oito , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - Orientador - SEL/EESC/USP

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - SEL/EESC/USP

Mestre Gustavo Henrique de Paula Santos - Instituto Federal de São Paulo/Campus Itapetininga

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

RESUMO

BRANDÃO, A. M.; ZULKE, W. P. B. **Dimensionamento de sistema de aterramento de usina fotovoltaica de 584kWp aplicada a USP, São Carlos - Área II.** 2019. 81p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Neste trabalho é apresentado o projeto de instalação de um sistema de aterramento para um projeto fotovoltaico no estacionamento da Universidade de São Paulo, na área 2 do campus de São Carlos. O trabalho foi realizado por uma equipe de dois estudantes, orientados e com apoio de engenheiros do setor fotovoltaico e especialistas na área. O aterramento foi elaborado tendo como base o Trabalho de Conclusão de Curso: Tanizaka, E. C. S.; Bernardo, V. P.; Zerrenner, V. PROJETO DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NA ÁREA 2 DO CAMPUS USP SÃO CARLOS – FASE 1. 2018. A partir deste, foi desenvolvido um projeto de aterramento conforme características do solo do estacionamento onde será instalado o sistema fotovoltaico. O projeto foi elaborado em várias fases, desde as medições de resistividade do solo no local, cálculo das resistividades aparentes, escolha do tipo de aterramento, cálculos de resistência de aterramento e disposição final do aterramento. As medições de resistividade do solo foram efetuadas pelo método de Wenner. Por fim, deseja-se que este trabalho sirva como material de apoio para métodos de aterramento.

Palavras-chave: Aterramento. Proteção elétrica. Energia renovável. Estacionamento. Sistemas fotovoltaicos. Malha de aterramento. Hastes aterramento.

ABSTRACT

BRANDÃO, A. M.; ZULKE, W. P. B. **Design of 584kWp photovoltaic plant grounding system applied to USP, São Carlos - Area II.** 2019. 81p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

This work presents the project of installing a grounding system for a photovoltaic project in the parking lot of the University of São Paulo, in area 2 of the São Carlos campus. The work was carried out by a team of two students, oriented and supported by photovoltaic engineers and experts in the field. The grounding was elaborated based on the Undergraduate Final Project: Tanizaka, E. C. S.; Bernardo, V.P. ; ZERrenner, V. USP CAMPUS AREA PHOTOVOLTAIC SYSTEM INSTALLATION PROJECT SÃO CARLOS - PHASE 1. 2018. From this, an adequate grounding project was developed according to the characteristics of the parking ground where the photovoltaic system will be installed. The grounding system was designed in several phases, from the ground resistivity measurements on site, calculation of apparent resistivities, choice of grounding type, grounding resistance calculations and final arrangement. The soil resistivity measurements were performed by the Wenner method. Finally, it is expected that this work will serve as support material for grounding methods.

Keywords: Grounding. Protection. Renewable energy. Parking. Photovoltaic systems. Grounding grid. Grounding rods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método de Wenner para medição de resistividade.	24
Figura 2 – Direções para medição da resistividade.	25
Figura 3 – Solo com várias camadas.	27
Figura 4 – Solo com várias camadas com os trechos ascendentes e descendentes divididos.	27
Figura 5 – Resistividade da primeira camada.	28
Figura 6 – Valor de " a_1 " escolhido aleatoriamente com seu respectivo valor de resistividade.	28
Figura 7 – Curva K para gráficos descendentes.	29
Figura 8 – Curva K para gráficos ascendentes.	29
Figura 9 – Valores de K para $\rho_1/\rho(a_1)$ igual a 0,7	30
Figura 10 – Estratificação em 2 camadas.	31
Figura 11 – Curva de resistividade aparente.	34
Figura 12 – Haste cravada no solo.	35
Figura 13 – Superfícies equipotenciais de uma haste.	36
Figura 14 – Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.	36
Figura 15 – Parâmetros das mútuas entre as hastes " h " e " m ".	38
Figura 16 – Indivíduo sujeito a tensão de toque.	40
Figura 17 – Indivíduo sujeito a tensão de passo.	41
Figura 18 – Aterramento em malha.	44
Figura 19 – Escoamento das correntes na malha.	46
Figura 20 – Estacionamento do centro de convenções no Campus II da USP São Carlos.	50
Figura 21 – Disposição das Strings no estacionamento do centro de convenções no Campus II da USP São Carlos.	51
Figura 22 – Terrômetro Megabras MDT 20KW.	52
Figura 23 – Direções das medições da resistividade no estacionamento do centro de convenções da USP São Carlos Campus II.	53
Figura 24 – Resistividade do solo do estacionamento do centro de convenções da USP São Carlos Campus II.	55
Figura 25 – Porção descendente da curva de resistividade do solo	55
Figura 26 – Gráfico de Estratificação $h \times K$	57
Figura 27 – Gráfico da parte ascendente da resistividade do solo	58
Figura 28 – Gráfico de Estratificação $h \times K$	59
Figura 29 – Solo estratificado do estacionamento do centro de convenções da USP, São Carlos - Área 2.	60

Figura 30 – Resistência de cada haste $[\Omega]$	62
Figura 31 – Local da instalação dos aterramentos em hastes paralelas.	64
Figura 32 – Diagrama elétrico do sistema.	65
Figura 33 – Local do defeito no diagrama.	66
Figura 34 – Diagrama do circuito do inversor com maior potência.	67
Figura 35 – Regiões para instalação dos aterramentos em malha.	68
Figura 36 – Resistividade superficial do asfalto, concreto e brita.	69
Figura 37 – Local do defeito no diagrama.	70
Figura 38 – Circuito simplificado.	71
Figura 39 – Circuito simplificado com os valores em pu.	74
Figura 40 – Localização das malhas e hastes no estacionamento do campus II da USP São Carlos.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipo de solo e respectiva resistividade.	23
Tabela 2 – Resistividade do solo arenoso com a variação da temperatura.	24
Tabela 3 – Resistividade lida pelo terrômetro e seus respectivos espaçamentos. . .	53
Tabela 4 – Desvio de cada medida em relação aos valores médios da tabela anterior.	54
Tabela 5 – Desvios médios anteriores em porcentagem.	54
Tabela 6 – Resistividade média do solo	54
Tabela 7 – Valores de h/a e h para um espaçamento de $2m$	56
Tabela 8 – Valores de h/a e h para um espaçamento de $4m$	56
Tabela 9 – Valores de h/a e h para um espaçamento de $6m$	58
Tabela 10 – Valores de h/a e h para um espaçamento de $12m$	59
Tabela 11 – Valores de profundidade de camada h e resistividade da camada ρ para a estratificação de solo	60
Tabela 12 – Especificações do projeto.	60
Tabela 13 – Resistência total de cada haste.	63
Tabela 14 – Resultados finais do projeto em hastes paralelas.	65
Tabela 15 – Resultados finais do dimensionamento dos condutores.	67
Tabela 16 – Resultados finais do dimensionamento da malha.	69
Tabela 17 – Especificações de potenciais de passo e toque.	70
Tabela 18 – Bases utilizadas no transformador.	72
Tabela 19 – Bases utilizadas.	72
Tabela 20 – Resultados finais do dimensionamento dos condutores.	74
Tabela 21 – Resultados finais do dimensionamento da malha.	76
Tabela 22 – Especificações de potenciais de passo e toque.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USP	Universidade de São Paulo
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
MPPT	Maximum Power Point Tracking

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Resistividade do solo
ρ_i	Resistividade da camada i após a estratificação do solo
ρ_a	Resistividade aparente
V	Diferença de potencial entre as hastes P1 e P2 do terrômetro
I	Corrente injetada em C1 e coletada em C2 no terrômetro
a	Distância entre as hastes do terrômetro na medição da resistividade do solo
b	Profundidade das hastes do terrômetro para medição da resistividade do solo
d_i	Profundidade da camada i estratificada
a_t	Profundidade do solo onde ocorre a transição de comportamento da resistividade do solo
d_i^e	Profundidade estimada da camada i estratificada
$\rho_m(a_j)$	Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j
$\rho_i(a_j)$	Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j
ρ_i^e	Valor resistividade estimada vista pela próxima camada estratificada
K	Coefficiente de reflexão
h_i	Profundidade da camada i após a estratificação
L_1	Comprimento da haste que se encontra na primeira camada da estratificação
L_2	Comprimento da haste que se encontra na segunda camada da estratificação
α	Coefficiente de penetração
r	Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado
A	Área ocupada pelo aterramento

D	Maior dimensão do aterramento
β	Coefficiente de divergência
L	Comprimento da haste
d	Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste
R_h	Resistência de uma única haste h
$R_h^{\square}$	Resistência aparente da haste " h " inserida no conjunto considerando as interferências das outras hastes
R_{hm}	Acréscimo de resistência na haste " h " devido à interferência mútua da haste " m "
e_{hm}	Espaçamento entre a haste " h " e a haste " m "
R_{eq}	Resistência equivalente com n hastes paralelas
K_r	Índice de redução, ou aproveitamento
S_{cobre}	Seção do condutor de cobre da malha de terra em mm^2
I_{falta}	Corrente de defeito em Ampères, através do condutor
$t_{defeito}$	Duração do defeito em segundos
T_a	Temperatura ambiente em °C
T_m	Temperatura máxima permissível em °C
R_{malha}	Resistência de aterramento em malha
A_{malha}	Área ocupada pela malha
h_m	Profundidade da malha
L_{total}	Comprimento total dos condutores e hastes que formam a malha
L_{cabo}	Comprimento total de condutores que formam a malha
L_{hastes}	Comprimento total das hastes no aterramento em malha
N_h	Número de hastes
N_a	Número de condutores na horizontal
N_b	Número de condutores na vertical
e_a	Espaçamento entre os condutores na vertical

e_b	Espaçamento entre os condutores na horizontal
V_{malha}	Potencial nas bordas
K_m	Constante de malha
K_h	Correção de profundidade
I_{malha}	Parcela da corrente máxima de falta que realmente escoar da malha para a terra
K_i	Coefficiente de irregularidade
V_{psm}	A maior tensão de passo superficial possível ocorre na periferia da malha
I_{choque}	Corrente suportada pelo corpo humano sem ocorrência de fibrilação ventricular
t	Tempo da duração de choque
V_{toque}	Tensão de toque
R_{ch}	Resistência do corpo humano
R_c	Resistência de contato da pessoa com o solo
$V_{\text{toque_máximo}}$	Potencial de toque máximo, considerando a máxima corrente que o corpo humano pode suportar sem fibrilação no coração
V_{passo}	Tensão de passo
$V_{\text{passo_máximo}}$	Potencial de passo máximo, considerando a máxima corrente que o corpo humano pode suportar sem fibrilação no coração
I_b	Corrente base
S_b	Potência base
V_b	Tensão base
Z_b	Impedância base
Z_{novo}	Impedância na base nova no sistema por unidade
Z_{antigo}	Impedância na base antiga no sistema por unidade
S_{novo}	Potência na base nova
S_{antigo}	Potência na base antiga

V_{novo}	Tensão na base nova
V_{antigo}	Tensão na base antiga
Z_{fpu}	Impedância de falta no sistema por unidade
I_{ccpu}	Corrente de curto-circuito no sistema por unidade
I_{cc}	Corrente de curto-circuito
Z_{lpu}	Impedância da linha no sistema por unidade
Z_{l}	Impedância da linha
I_{faltapu}	Corrente de falta no sistema por unidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	SISTEMA DE ATERRAMENTO	23
2.1	Medição da resistividade do solo	24
2.2	Estratificação do solo	26
2.2.1	Resistividade aparente	32
2.2.1.1	Resistividade aparente em aterramentos com hastes paralelas	32
2.2.1.2	Resistividade aparente em malhas de aterramento	32
2.2.1.2.1	Coeficiente de penetração	32
2.2.1.2.2	Coeficiente de divergência	33
2.2.1.2.3	Resistividade aparente para solo com duas camadas	33
2.3	Sistema de aterramento por hastes	35
2.3.1	Interligação de hastes	36
2.4	Tensão de toque e passo em sistemas de aterramento	39
2.4.1	Tensão de toque	40
2.4.2	Tensão de passo	41
2.5	Dimensionamento da malha de aterramento	42
3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DA MINI USINA FOTOVOLTAICA DE 584KWP	49
3.1	Introdução	49
3.2	Resistividade e estratificação do solo	51
3.3	Projeto de dimensionamento de aterramento usando apenas hastes paralelas	60
3.4	Projeto de dimensionamento da malha de aterramento	65
3.4.1	Resistividade aparente	65
3.4.1.1	Coeficiente de penetração	65
3.4.1.1.1	Coeficiente de divergência	65
3.4.1.2	Resistividade aparente vista pela malha	66
3.4.2	Sistema de proteção para lado CC - Caso.1	66
3.4.2.1	Dimensionamento do condutor - defeito lado CC	67
3.4.2.2	Dimensionamento da malha - defeito lado.CC.	68
3.4.2.3	Calculo tensão de passo e toque - Caso.1	69
3.4.3	Sistema de proteção para lado CA - Caso 2.	70
3.4.3.1	Cálculo da corrente de curto-circuito - Caso.2.	70
3.4.3.2	Dimensionamento do condutor - defeito lado CA	74

3.4.3.3	Dimensionamento da malha - defeito lado .CA.	75
3.4.3.4	Calculo tensão de passo e toque - Caso.2	76
4	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é uma nação com um imenso potencial solar para a geração de energia elétrica devido ao seu vasto território e localização. Contudo, todo esse potencial ainda pouco aproveitado representa apenas 1,2% da matriz de energia elétrica brasileira, com capacidade instalada de 3,48 **GW** considerando a soma da geração centralizada e a distribuída. A exemplo disso, países desenvolvidos como a Alemanha que, mesmo com baixa irradiação solar, possui capacidade instalada de 45,4 **GW**, o que representa 7,5% da sua matriz energética. ([ABSOLAR, 2019](#))

A fim de reverter esta situação, o governo tem incentivado a instalação de novas unidades fotovoltaicas através de órgãos de fomento como o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). Neste cenário, com novas instalações fotovoltaicas, faz-se necessário o correto dimensionamento de sistemas de aterramento para proteger os equipamentos, pessoas e animais das faltas advindas de situações anormais de funcionamento e descargas atmosféricas.

O objetivo deste trabalho é realizar o dimensionamento do sistema de aterramento para a mini-usina fotovoltaica de 584**kW** projetada para o estacionamento do campus II da USP São Carlos.

Este trabalho dá continuidade ao Trabalho de Conclusão de Curso: Tanizaka, E. C. S.; Bernardo, V. P.; Zerrenner, V. PROJETO DE INSTALAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NA ÁREA 2 DO CAMPUS USP SÃO CARLOS – FASE 1. 2018 ([TANIZAKA; BERNARDO; ZERRENER, 2018](#)), onde foi proposto o dimensionamento de uma mini-usina fotovoltaica (garagem solar) de 584 kWp para a área II do campus da USP São Carlos.

2 SISTEMA DE ATERRAMENTO

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

No desenvolvimento de um projeto de aterramento eficiente, deve-se conhecer as características do solo para a realização de cálculos de resistividade do solo (ρ). Ou seja, deve-se saber se o local da instalação do sistema de aterramento possui alguma jazida mineral, falhas nas camadas da terra, lençol d'água ou gás. Essa etapa do projeto é importante, pois todos esses fatores irão contribuir para o valor de resistividade do solo que é influenciada pelo tipo de solo, estratificação, diversidade do solo, teor de umidade, temperatura, compactação, pressão e composição química dos sais dissolvidos. Esses fatores podem ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1: Tipo de solo e respectiva resistividade.

Tipo de solo	Resistividade [$\Omega.m$]
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1500 a 5000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1300
Areia seca	3000 a 8000
Calcário compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Pela Tabela 1 pode-se notar que a umidade possui papel fundamental na definição da resistividade do solo. Isso ocorre devido à facilidade que os elétrons possuem para se movimentarem em meios iônicos. Dessa forma, um solo arenoso, com índice de umidade por peso de 30%, possui resistividade aproximada de 42 $\Omega.m$. Em contrapartida, o mesmo solo com índice de umidade de 2,5%, possui resistividade de 1500 $\Omega.m$ (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992).

Da mesma forma, a temperatura também tem influência na resistividade dos solo. Para temperaturas muito elevadas, pode-se facilmente observar que a umidade do solo

diminui devido a evaporação da água, aumentando assim a resistividade e para temperaturas muito baixas a resistividade também aumenta devido a contração e aglutinação da água, produzindo uma dispersão nas ligações iônicas. A Tabela 2 nos mostra essa variação da resistividade em solos arenoso para temperaturas baixas.

Tabela 2: Resistividade do solo arenoso com a variação da temperatura.

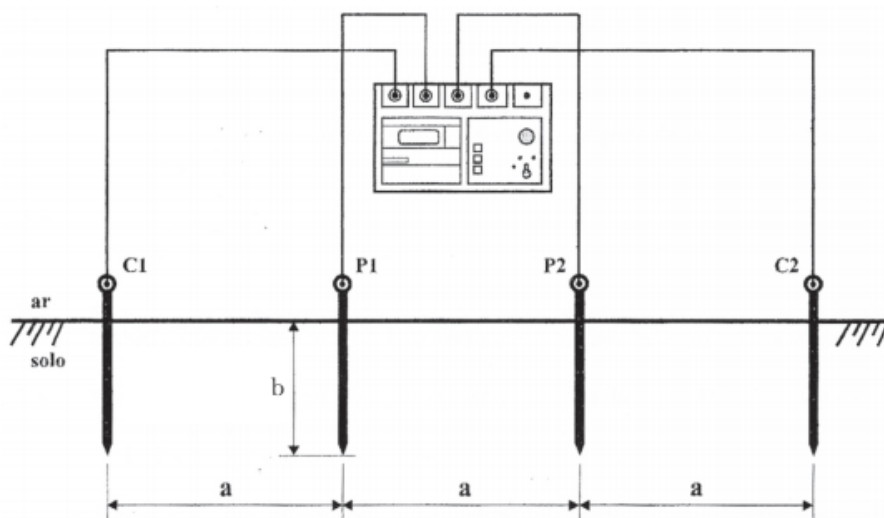
Temperatura [°C]	Resistividade [$\Omega.m$]
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3300

Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

2.1 Medição da resistividade do solo

As medições de resistividade do solo são realizadas no local da instalação do sistema de aterramento, utilizando métodos de prospecção geométricos, como o método de Wenner, por exemplo. Esse método consiste na utilização de um equipamento com 4 eletrodos (C1, P1, P2, C2) cravados no solo a pequenas profundidades (b), alinhados e espaçados igualmente (a). Uma corrente de ensaio é injetada nos eletrodos externos (C1 e C2 da Figura 1) e a diferença de potencial é medida entre os eletrodos internos (P1 e P2 da Figura 1).

Figura 1: Método de Wenner para medição de resistividade.



Fonte: (ITTMD 20KW,)

Dessa forma, conforme Kindermann, a resistividade do solo é dada pela Equação 2.1:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left(\frac{V}{I}\right)}{1 + \sqrt{\frac{2a}{a^2 + 4b^2}} - \sqrt{\frac{a}{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

Onde:

ρ : Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$].

V : É a diferença de potencial entre as hastes P1 e P2 [V].

I : Corrente injetada em C1 e coletada em C2 [A].

a : Distância entre as hastes [m].

b : Profundidade das hastes cravadas no solo [m].

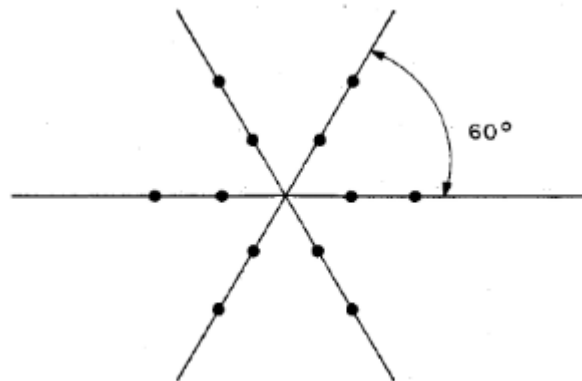
A Equação 2.1 pode ser simplificada caso o valor da profundidade "b" não excede 10% do valor do espaçamento "a", resultando a Equação 2.2.

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

No processo de medição, as hastes devem estar alinhadas, igualmente espaçadas, cravadas no solo com profundidade entre 20cm e 30cm. Além disso, as hastes precisam estar limpas, isentas de óxidos, gorduras e deve ocorrer a utilização de calçados e luvas de isolamento para efetuar medições.

Recomenda-se, além disso, para um único ponto de aterramento, medições em diferentes posições e, se possível, conforme Figura 2, onde as linhas representam as direções para medições com o terrômetro, e, os pontos, as hastes cravadas no solo.

Figura 2: Direções para medição da resistividade.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Após realizar as medidas de resistividade para cada espaçamento “ a ”, calcula-se a média aritmética dos valores conforme Equação 2.3:

$$\rho_m(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad \square \quad \begin{matrix} j=1,q \\ i=1,n \end{matrix} \quad (2.3)$$

Onde:

$\rho_m(a_j)$: Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j [$\Omega \cdot m$].

n : Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j .

$\rho_i(a_j)$: Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j [$\Omega \cdot m$].

q : Número de espaçamentos empregados.

Posteriormente é realizado o cálculo do desvio de cada medida em relação ao valor médio, conforme Equação 2.4:

$$\left| \frac{\rho_i(a_j) - \rho_m(a_j)}{\rho_m(a_j)} \times 100 \right| \quad \square \quad \begin{matrix} j=1,q \\ i=1,n \end{matrix} \quad (2.4)$$

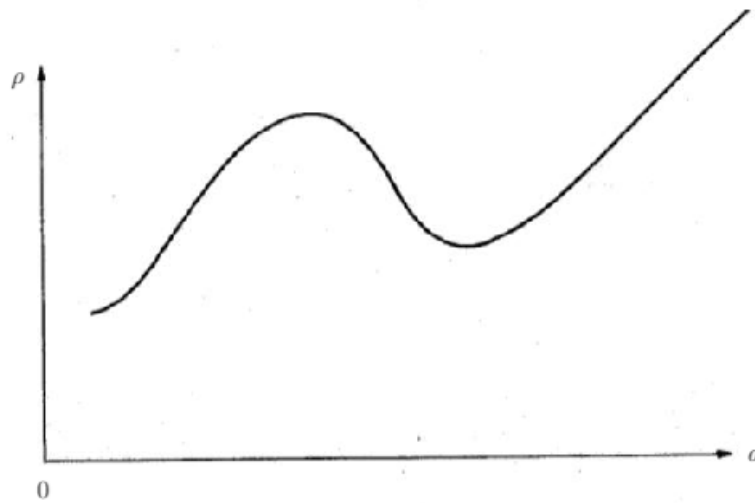
Após esse cálculo, deve-se desprezar os valores com desvio maior que 50% em relação a média, e, assim, traçar a curva de resistividade do solo por espaçamento ($\rho \times a$).

Devido a formação geológica ao longo dos anos, a resistividade do solo pode variar muito conforme a região e profundidade, e, por este motivo, existem algumas técnicas de estratificação para modelar o solo em camadas horizontais consideradas homogêneas. Neste projeto, será apresentado a modelagem do solo de duas camadas usando curvas, obtendo a resistividade da primeira e segunda camada e suas respectivas profundidades.

2.2 Estratificação do solo

Após realizar as medidas de resistividade do solo, deve-se estratificar o solo, de acordo com as necessidades do projeto. O método proposto aqui será para estratificação em várias camadas, pois a curva de resistividade do solo é muito parecida com o gráfico da Figura 3, onde pode-se observar que a curva contém trechos ascendentes e descendentes. Em casos onde a curva de resistividade é somente ascendente ou descendente, é possível utilizar métodos mais simples como estratificação de solo com duas camadas. Já em casos que não possuem apenas curvas de resistividade ascendente ou descendente, a estratificação em várias camadas é o mais adequado.

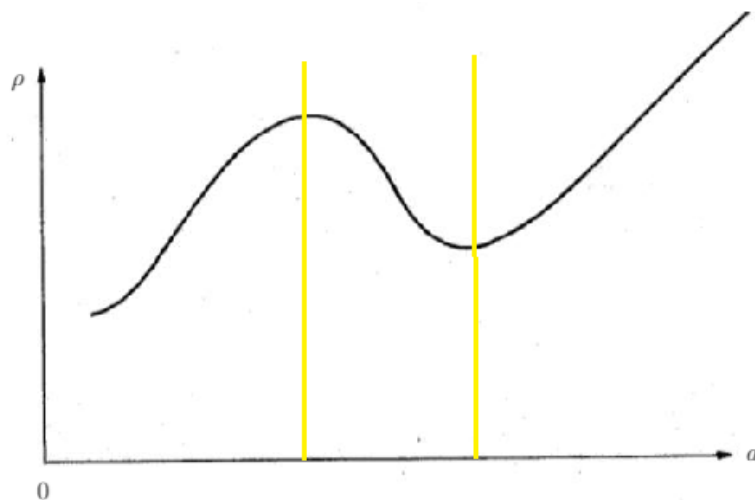
Figura 3: Solo com várias camadas.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

O primeiro passo é dividir o gráfico de resistividade do solo em partes ascendentes e descendentes, ou seja, encontrar os máximos e mínimos da curva, como na Figura 4.

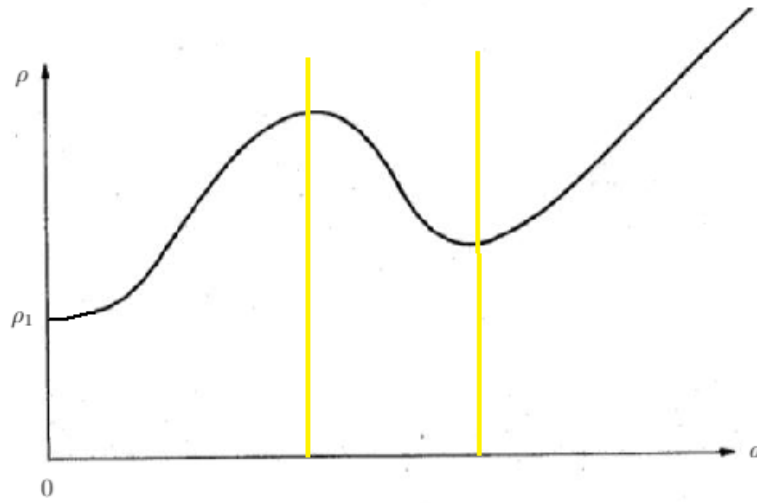
Figura 4: Solo com várias camadas com os trechos ascendentes e descendentes divididos.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Posteriormente, utilizamos a primeira parte do gráfico para obter a resistividade da primeira camada ρ_1 . Para isso, prolonga-se o gráfico obtido de resistividade do solo por espaçamento ($\rho \times a$) até o eixo das ordenadas. O valor de ρ para espaçamento 0, representa a resistividade da primeira camada ρ_1 .

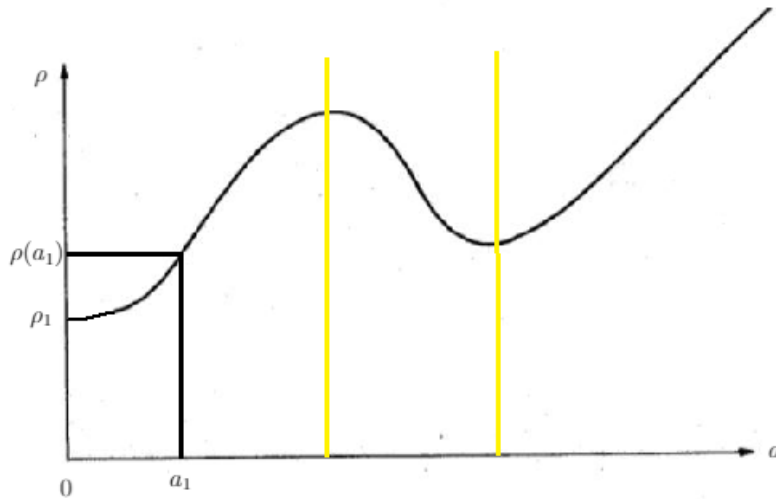
Figura 5: Resistividade da primeira camada.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Em seguida, um valor de espaçamento " a_1 " é escolhido aleatoriamente e seu correspondente $\rho(a_1)$ é obtido.

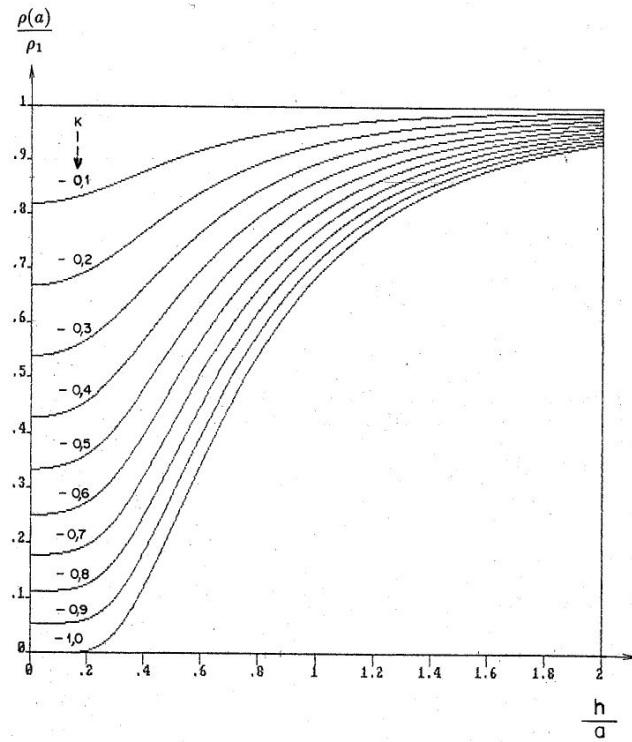
Figura 6: Valor de " a_1 " escolhido aleatoriamente com seu respectivo valor de resistividade.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

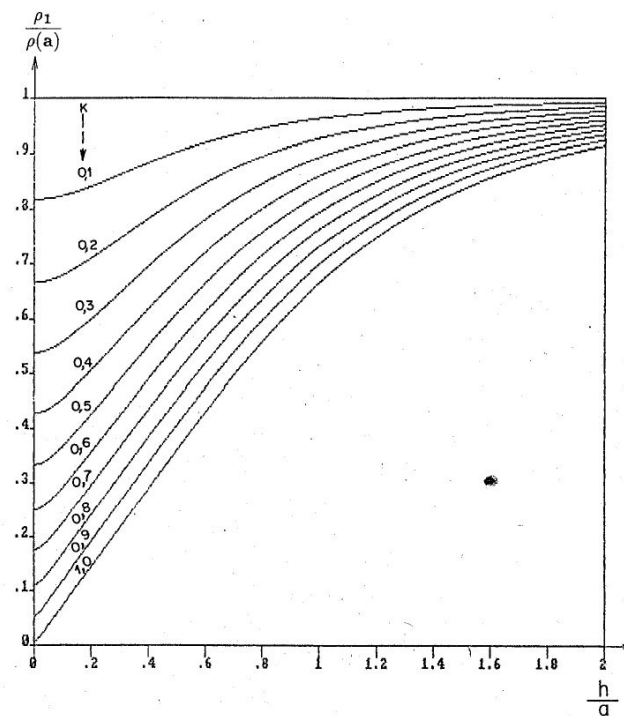
Então, deve-se analisar o gráfico de resistividade do solo para saber se o comportamento da curva é ascendente (derivada em qualquer ponto é positiva), conforme pode ser visto na Figura 8, ou descendente (derivada em qualquer ponto é negativa), como pode ser visto na Figura 7. Se o gráfico for descendente, o sinal de K é negativo e efetua-se o cálculo de $\rho(a_1)/\rho_1$. Por outro lado, se o gráfico for ascendente, o sinal de K é positivo e efetua-se o cálculo $\rho_1/\rho(a_1)$.

Figura 7: Curva K para gráficos descendentes.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

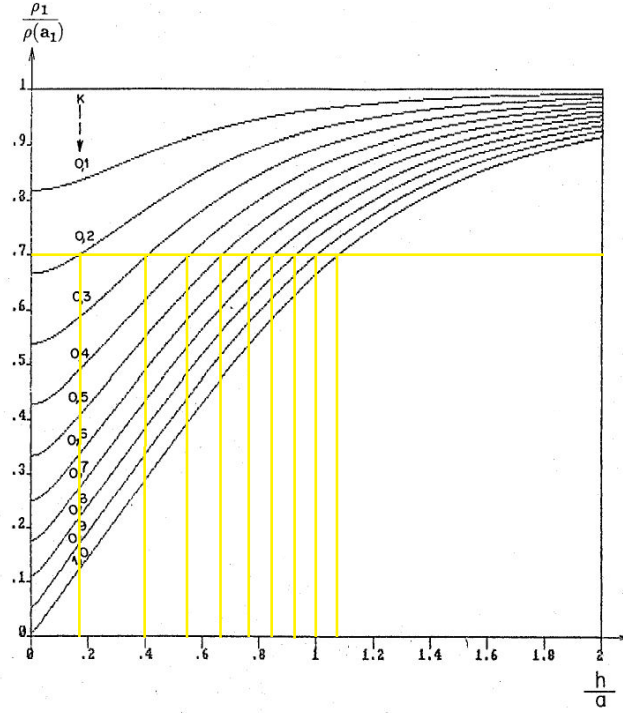
Figura 8: Curva K para gráficos ascendentes.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Com o valor de $\rho(a_1)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho(a_1)$ obtidos, traça-se uma linha paralela à abscissa da curva K , cortando curvas distintas de K , e então, obtém-se todos os valores de K e h/a , conforme reta paralela. Usando o gráfico da Figura 6 como exemplo, pode-se notar que o primeiro trecho da curva é ascendente, e supondo que $\rho_1/\rho(a_1)$ seja 0,7, tem-se então o gráfico da Figura 9.

Figura 9: Valores de K para $\rho_1/\rho(a_1)$ igual a 0,7



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

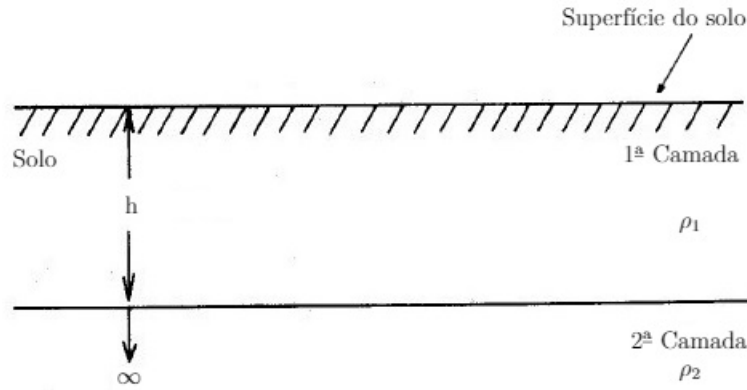
Em seguida, multiplicam-se todos os valores de h/a pelo valor de espaçamento a_1 , para então gerar valores de K , h/a , h e plota-se o gráfico de $K \times h$.

Escolhe-se outro valor de espaçamento a_2 e realiza os mesmos passos anteriores. O resultado será um gráfico de $K \times h$ com duas curvas e um ponto de intercessão entre elas. Esse ponto representa a altura da primeira camada e o valor de K . Então, basta usar a Equação 2.5 com o valor de ρ_1 e K encontrados para definir a resistividade da segunda camada.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (2.5)$$

Por fim, temos um modelo de estratificação conforme Figura 10.

Figura 10: Estratificação em 2 camadas.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Dessa forma, obtido a altura da primeira camada h_1 e a resistividade da primeira camada ρ_1 e da segunda camada ρ_2 , deve-se obter a altura e resistividade das camadas subsequentes.

Então, deve-se considerar o segundo trecho da curva de resistividade do solo. Obtém-se o ponto de transição a_t onde a curva de resistividade do solo muda sua concavidade, ou seja, sua derivada é zero e muda de crescente para decrescente, ou vice e versa. Para isso, calcula-se a resistividade equivalente vista pela terceira camada. Estima-se a profundidade da segunda camada h_2^e pelo método **Lancaster-Jones** (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992):

$$h_2^e = d_1 + d_2^e = \frac{2}{3}a_t \quad (2.6)$$

Sendo d_1 a espessura da primeira camada e d_2^e a espessura estimada da segunda camada.

Então, calcula-se a resistividade média equivalente estimada vista pela terceira camada ρ_2^e pela Equação 2.7, conhecida como fórmula de **Hummel** (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992).

$$\rho_2^e = \frac{d_1 + d_2^e}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2^e}{\rho_2}} \quad (2.7)$$

Então, o ρ_2^e apresenta-se como o ρ_1 para o processo de estratificação em duas camadas obtido anteriormente. Considerando o próximo trecho da curva, repete-se todo o processo de estratificação em duas camadas para obter a resistividade da terceira camada ρ_3 e a profundidade da terceira camada h_3 .

2.2.1 Resistividade aparente

Nesta seção serão apresentados dois modelos para cálculo de resistividade aparente, um para ser usado em aterramentos com hastes paralelas e outro para aterramentos em malha.

2.2.1.1 Resistividade aparente em aterramentos com hastes paralelas

Para aterramentos com haste cravadas no solo, a resistividade aparente é dada pela Equação 2.8, conhecida como fórmula de **Hummel**, adaptada da Equação 2.7.

$$\rho_a = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}} \quad (2.8)$$

Sendo:

ρ_a : Resistividade aparente [$\Omega \cdot m$].

L_1 : Comprimento da haste que se encontra na primeira camada da estratificação [m].

L_2 : Comprimento da haste que se encontra na segunda camada da estratificação [m].

ρ_1 : Resistividade da primeira camada da estratificação [$\Omega \cdot m$].

ρ_2 : Resistividade da segunda camada da estratificação [$\Omega \cdot m$].

Então, a corrente é dispersada conforme proporção da haste que se encontra em determinada zona estratificada de solo, com sua respectiva resistividade.

2.2.1.2 Resistividade aparente em malhas de aterramento

Nesta seção será apresentado o procedimento de cálculo da resistividade aparente vista pela malha em solos estratificado com varias camadas.

2.2.1.2.1 Coeficiente de penetração

Indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento. Dado pela seguinte fórmula:

$$\alpha = \frac{r}{h_1} \quad (2.9)$$

Onde:

$$r = \frac{A}{D} \quad (2.10)$$

Sendo:

α : Coeficiente de penetração.

r : Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado [m].

h_1 : Profundidade da primeira camada do solo estratificado [m].

A : Área ocupada pelo aterramento [m^2].

D : Maior dimensão do aterramento, no caso deste projeto, como tem um formato retangular, a maior dimensão é a diagonal [m].

2.2.1.2.2 Coeficiente de divergência

É a relação entre a resistividade da segunda camada e a resistividade da primeira camada, conforme pode ser visto na Equação 2.11.

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2.11)$$

Onde:

β : Coeficiente de divergência.

ρ_1 : Resistividade da primeira camada do solo estratificado [$\Omega \cdot m$].

ρ_2 : Resistividade da segunda camada do solo estratificado [$\Omega \cdot m$].

2.2.1.2.3 Resistividade aparente para solo com duas camadas

Para determinar a resistividade aparente vista pela malha, **Endrenyi** (KINDER-MANN; CAMPAGNOLO, 1992) desenvolveu um gráfico, Figura 11, em que (α) é o eixo das abscissas e (β) é a curva correspondente, em que se obtém um valor C_ρ , conforme demonstrado pela Equação 2.12.

$$C_\rho = \frac{\rho_a}{\rho_1} \quad (2.12)$$

Onde:

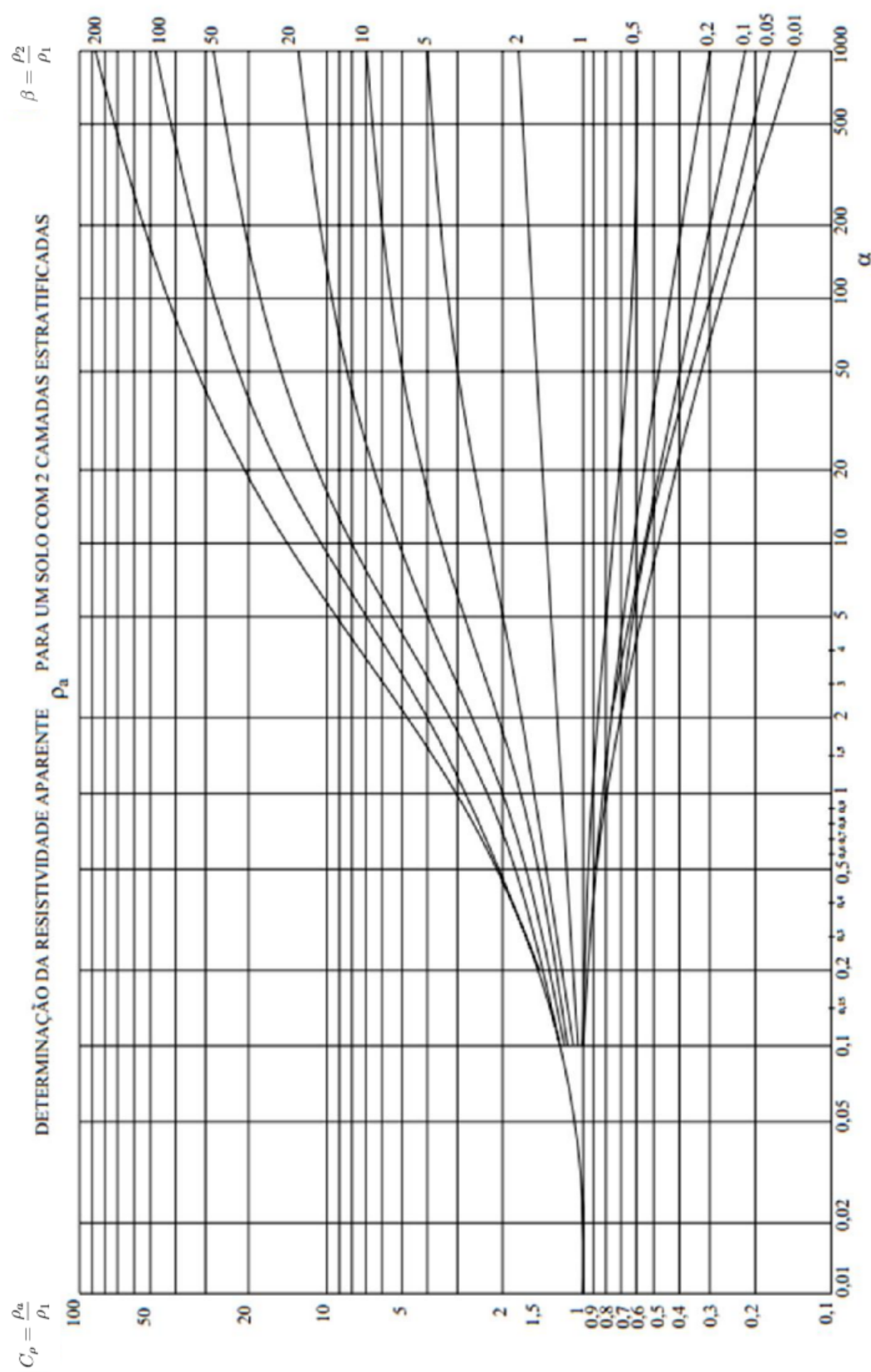
ρ_1 : É a resistividade da primeira camada [$\Omega \cdot m$].

ρ_a : Resistividade aparente vista pela malha [$\Omega \cdot m$].

Isolando ρ_a , tem-se então:

$$\rho_a = C_\rho \cdot \rho_1 \quad (2.13)$$

Figura 11: Curva de resistividade aparente.



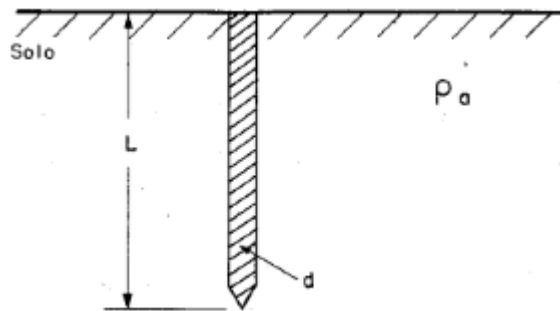
Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

2.3 Sistema de aterramento por hastes

Os sistemas de aterramento podem ser constituídos de diferentes materiais em diferentes organizações.

Um sistema de aterramento básico constituído de uma única haste é caracterizado por uma haste vertical cravada em solo, de acordo com a Figura 12:

Figura 12: Haste cravada no solo.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Onde:

L: Comprimento da haste [m].

d: Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste [m].

ρ_a : Resistividade aparente [$\Omega \cdot m$].

A resistência elétrica de aterramento de uma haste (R_h) é calculada por meio da Equação 2.14:

$$R_h = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln \left[\frac{4L}{d} \right] \quad [\Omega] \quad (2.14)$$

Observando a Equação 2.14, podemos variar alguns valores para diminuir a resistência de aterramento para uma haste como aumentar o diâmetro "d" e/ou comprimento "L" da haste, ou reduzir a resistividade aparente ρ_a por meio do tratamento químico do solo.

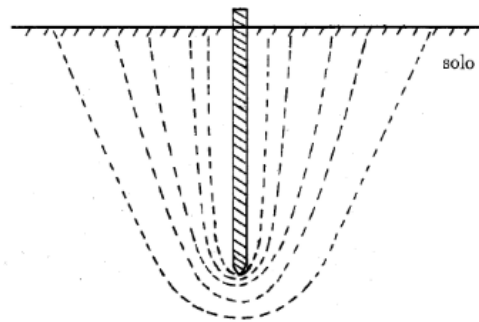
A resistência total de um equipamento é composta pela resistência da conexão do cabo de ligação com o equipamento, da impedância do cabo de ligação, da resistência da conexão do cabo de ligação com o sistema de aterramento empregado, resistência do material que forma o sistema de aterramento, da resistência do contato do material com a terra e da resistência da cavidade geométrica do sistema de aterramento com a terra. No geral, a resistência da cavidade geométrica do sistema de aterramento com a terra é a que

maior contribui para o valor da resistência de aterramento e por isso é considerada como majoritária.

2.3.1 Interligação de hastes

Visando a diminuição da resistência de aterramento, geralmente interliga-se hastes em várias formações, gerando interferências nas zonas de atuação das superfícies equipotenciais de cada haste. Na Figura 13 são apresentadas as superfícies equipotenciais de uma única haste vertical cravada no solo:

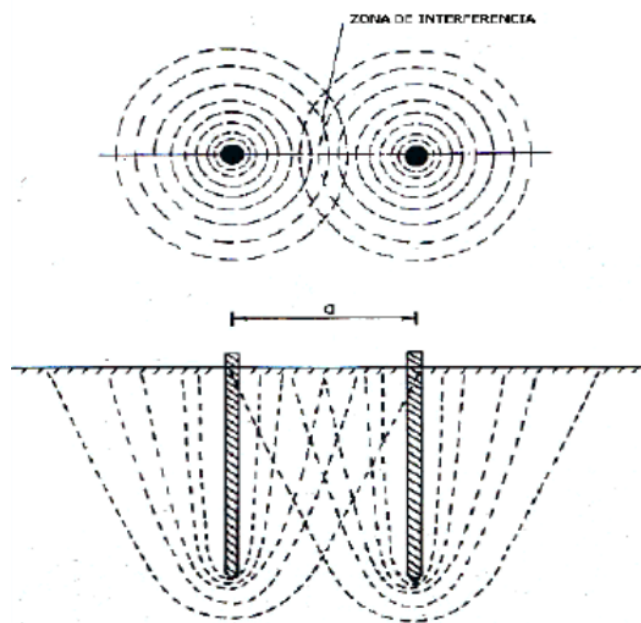
Figura 13: Superfícies equipotenciais de uma haste.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Quando houver mais hastes próximas em uma distância " a ", uma da outra, temos as seguintes zonas de interferência, conforme pode ser visto na Figura 14:

Figura 14: Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Esse paralelismo gera um bloqueio do fluxo de corrente de cada barra, resultando em uma maior resistência de terra de cada barra. Este acréscimo na resistência diminui com o aumento da distância entre as hastes, sendo nulo somente no infinito.

O cálculo de resistência total da terra, deve-se levar em conta esse bloqueio e acréscimo na resistência de aterramento.

A seguir são apresentadas as Equações de 2.15 a 2.19 para um conjunto infinito de hastes, incluindo a interferência entre elas, para o cálculo de resistência de terra geral do sistema:

$$R_h^{\infty} = R_h + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq h}}^{\infty} R_{hm} \quad (2.15)$$

Onde:

R_h^{∞} : Resistência aparente da haste "h" inserida no conjunto considerando as interferências das outras hastes $[\Omega]$.

n: Número de hastes.

R_h : Resistência individual de cada haste sem a presença de outras hastes (Equação 2.14) $[\Omega]$.

R_{hm} : Acréscimo de resistência $[\Omega]$ na haste "h" devido à interferência mútua da haste "m", dada pela Equação 2.16.

$$R_{hm} = \frac{\rho_a}{4\pi L} \ln \frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \quad (2.16)$$

Sendo:

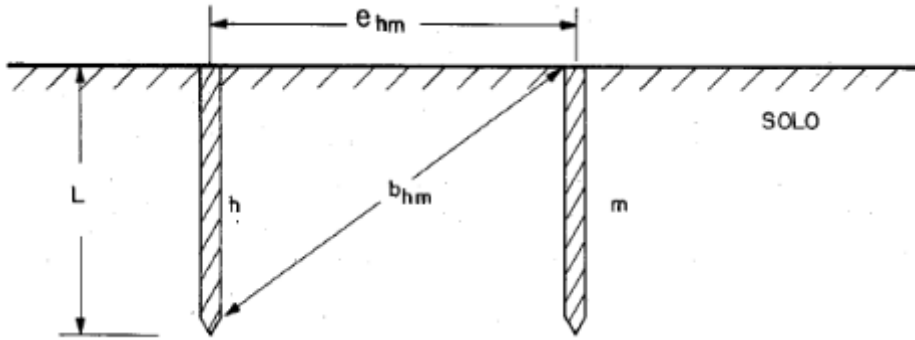
e_{hm} : Espaçamento entre a haste "h" e a haste "m" [m].

L : Comprimento da haste [m].

ρ_a : Resistividade aparente $[\Omega \cdot m]$.

O termo b_{hm} é obtido conforme representação das barras visto na Figura 15:

Figura 15: Parâmetros das mútuas entre as hastes "h" e "m".



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Onde:

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad [m] \quad (2.17)$$

Depois de obtida a resistência elétrica individual de cada haste inserida no conjunto (R_h^0), pode-se realizar os cálculos para o sistema geral. Como em sistemas de aterramento, geralmente, empregam-se hastes iguais, pode-se calcular a resistência de aterramento equivalente considerando o paralelismo entre todas as hastes.

Por fim, considera-se o paralelismo entre todas as hastes, onde a resistência equivalente entre todas as hastes conforme Equação 2.18.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1^0} + \frac{1}{R_2^0} + \frac{1}{R_3^0} + \dots + \frac{1}{R_n^0}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^0}} \quad [\Omega] \quad (2.18)$$

Sendo $R_1^0, R_2^0, R_3^0 \dots R_n^0$, resistências aparentes de cada haste inserida no conjunto obtido pela Equação 2.15.

Os cálculos anteriores podem ser facilmente automatizados e calculados através de funções matemáticas computacionais programáveis, como o Excel® ou Matlab®.

Para saber quantas vezes a resistência do sistema está reduzida em relação a resistência de uma única haste, tem-se o índice de redução K_r ou índice de aproveitamento, conforme Equação 2.19:

$$K_r = \frac{R_{eq}}{R_h} \quad (2.19)$$

2.4 Tensão de toque e passo em sistemas de aterramento

O sistema de aterramento tem como função principal proteger os aparelhos ligados ao sistema elétrico e seres humanos que podem estar na proximidade do sistema. Quando há algum tipo de surto ou corrente de falta, o sistema de aterramento é projetado para que haja uma distribuição no perfil das tensões de passo e toque abaixo dos limites de risco danosos para o ser humano.

O efeito que o choque elétrico causa no corpo humano depende de vários fatores: intensidade da corrente elétrica, percurso da corrente pelo corpo, frequência da corrente elétrica, espécie da corrente, tempo de duração do choque dentre outros. Estes efeitos se manifestam no ser humano como parada respiratória, inibição dos centros nervosos, queimaduras no tecido, alteração no sangue e fibrilação ventricular - sendo este último o mais importante a ser considerado.

A fibrilação ventricular do coração é determinada pela tremulação irregular e desritmada das paredes do ventrículo ocasionando a perda da eficiência no bombeamento de sangue. É irreversível espontaneamente, ou seja, deve ser realizado algum tipo de reanimação em cerca de até 8 minutos, caso contrário, a vítima pode sofrer parada cardíaca.

Assim, para efeitos práticos e referenciais, considera-se a fibrilação ventricular do coração o limite de segurança em sistemas de aterramento, ou seja, correntes elétricas que não causam a fibrilação ventricular do coração serão consideradas aceitas pelo projeto de aterramento.

Os efeitos do choque elétrico em humanos podem variar muito, pois dependem da constituição física de cada pessoa, porém Charles Dalziel, após pesquisa, concluiu que 99,5% das pessoas com peso superior ou igual a 50kg, suportam uma corrente, sem ocorrência de fibrilação ventricular, dada pela Equação 2.20 (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992).

$$I_{\text{choque}} = \frac{0,116}{t} \quad (2.20)$$

Onde:

I_{choque} : Corrente suportada pelo corpo humano sem ocorrência de fibrilação ventricular [A].

t : Tempo da duração de choque [s].

Como a corrente de choque suportada pelo corpo humano depende do tempo de duração, os relés possuem um papel importante como sistema de proteção, pois quanto mais rápida a atuação do relé, maior será a corrente suportada por um ser humano.

Considerando a proximidade do ser humano ao sistema de aterramento, tem-se

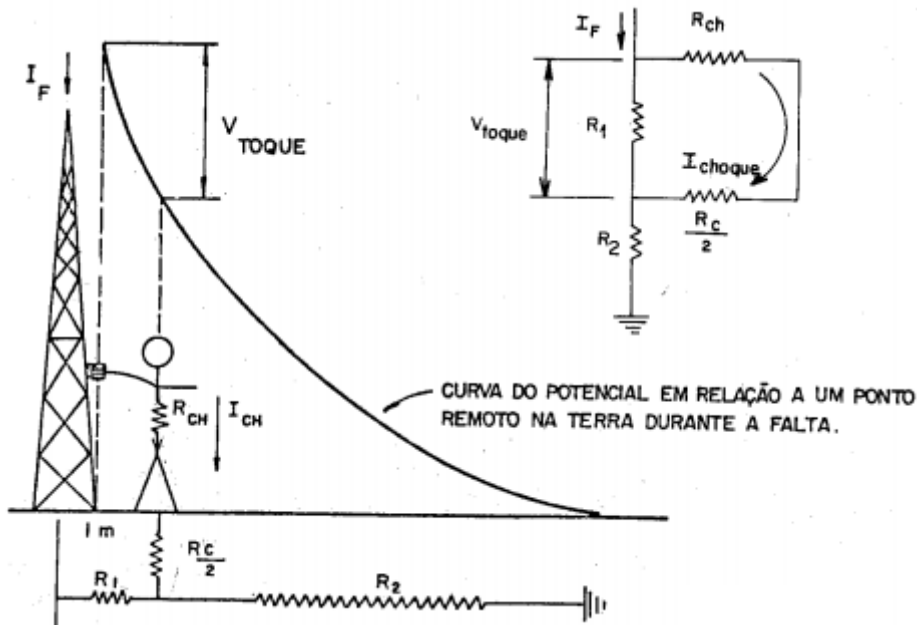
dois tipos de potenciais e situações: potencial de toque e potencial de passo.

2.4.1 Tensão de toque

Conforme a norma ABNT NBR 15749 ([ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009](#)), tensão de toque é a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Por definição, considera-se esta distância igual a 1 metro. E o potencial de passo é a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa, ou seja, 1 metro.

Conforme Figura 16, vemos a tensão de toque representada:

Figura 16: Indivíduo sujeito a tensão de toque.



Fonte: ([KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992](#))

Onde a tensão de toque é representada pela Equação 2.21:

$$V_{\text{toque}} = (R_{\text{ch}} + \frac{R_c}{2}) \cdot I_{\text{choque}} \quad [V] \quad (2.21)$$

Onde:

R_{ch} : Resistência do corpo humano $[\Omega]$ (geralmente usa-se 1000Ω).

R_c : Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3 \times \rho_s$ (resistividade superficial do solo) ([IEEE 80, 2015](#)) $[\Omega]$.

I_{choque} : Corrente de choque pelo corpo humano $[A]$.

R_1 e R_2 : Resistências dos trechos de terra considerados $[\Omega]$.

O cálculo da tensão de toque máxima, considera a máxima corrente que o corpo humano pode suportar sem fibrilação no coração, conforme a Equação 2.22:

$$V_{\text{toque_máximo}} = (1000 + 1,5\rho_s) \frac{0,166}{\sqrt{t}} \quad [V] \quad (2.22)$$

Onde:

$V_{\text{toque_máximo}}$: Tensão de toque máximo sem ocorrência de fibrilação do coração $[V]$.

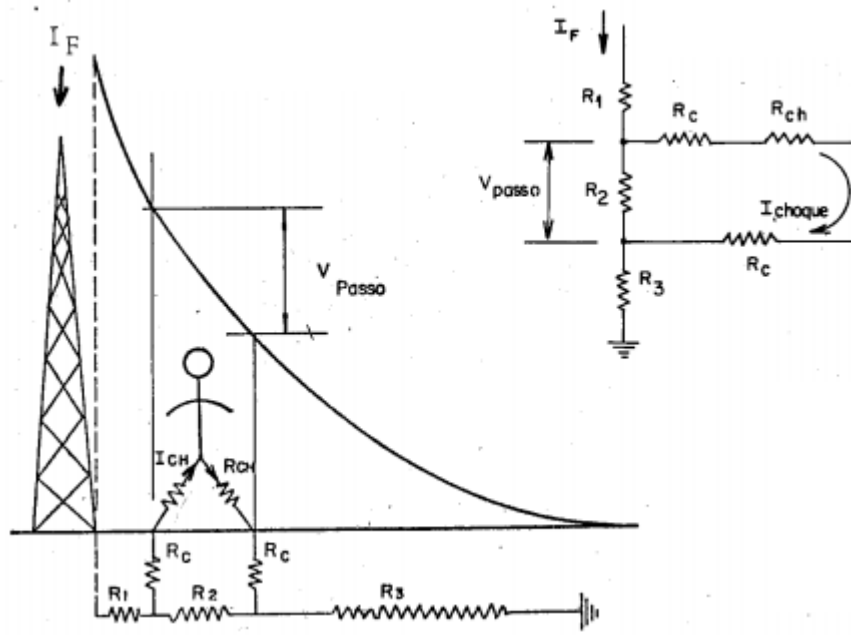
ρ_s : Resistividade da superfície $[\Omega \cdot m]$.

t : Tempo de ocorrência da falta $[s]$.

2.4.2 Tensão de passo

A tensão de passo é ilustrado conforme Figura 17:

Figura 17: Indivíduo sujeito a tensão de passo.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Temos a Equação 2.23 para a tensão de passo:

$$V_{\text{passo}} = (R_{\text{ch}} + 2R_{\text{c}}) I_{\text{choque}} \quad [V] \quad (2.23)$$

Onde:

V_{passo} : Tensão de passo [V].

R_{ch} : Resistência do corpo humano [Ω].

R_{c} : Resistência de contato [Ω].

Calculamos então a tensão de passo máxima conforme mencionado anteriormente, por meio da Equação 2.24:

$$V_{\text{passo_máximo}} = (1000 + 6\rho_s) \frac{0,116}{t} \quad [V] \quad (2.24)$$

Onde:

$V_{\text{passo_máximo}}$: Tensão de passo máximo sem ocorrência de fibrilação do coração [V].

ρ_s : Resistividade da superfície [$\Omega \cdot m$].

t : Tempo de ocorrência da falta [S].

2.5 Dimensionamento da malha de aterramento

Outro tipo de projeto de aterramento, são as configurações em malhas. Para realização deste tipo de dimensionamento é importante levar em consideração os potenciais máximos de passo e toque que uma pessoa pode suportar. O processo de dimensionamento da malha de terra, é um processo iterativo, de cálculo e dimensionamento.

Como todo projeto de aterramento, é necessário conhecer as características do solo, como a resistividade elétrica aparente, seguindo os procedimentos das Seções 2.1 e 2.2. Outros dados também são importantes para o projeto como a resistividade superficial do solo, a corrente de curto-circuito máxima entre fase e neutro e o percentual que escoar pela malha, o tempo de defeito para a corrente de curto-circuito, a área da malha pretendida e o valor máximo da resistência de terra.

A malha de aterramento são condutores aterrados que devem suportar uma corrente, geralmente de alto valor. O dimensionamento do condutor deve levar em conta o aquecimento devido a corrente. O método de cálculo de Onderdonk (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992), válida para cabos de cobre, permite a determinação da seção do condutor de aterramento conforme Equações 2.25 e 2.26:

$$I_{\text{falta}} = 226,53 S_{\text{cobre}} \frac{1}{t_{\text{falta}}} \ln \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \quad (2.25)$$

Onde:

S_{cobre} : Seção do condutor de cobre da malha de terra [mm^2].

I_{falta} : Corrente de falta através do condutor, obtida por análise de curto-circuito [A].

t_{falta} : Duração da falta (normalmente usa-se 0,5s, pois é o tempo de atuação do relé de proteção) [s].

T_a : Temperatura ambiente (normalmente usa-se 30°C) [°C].

T_m : Temperatura máxima permissível (depende do tipo de conexão) [°C].

Portanto, para encontrar a seção do condutor de cobre basta isolar S_{cobre} da Equação 2.25.

$$S_{\text{cobre}} \geq \frac{I_{\text{falta}}}{226,53 \cdot \frac{1}{t_{\text{falta}}} \ln \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1} \quad (2.26)$$

Segundo a norma ABNT NBR 16690 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) sobre sistemas fotovoltaicos,

Para cobre, a temperatura máxima é limitada pelo tipo de conexão adotada. Os tipos de conexão podem ser de conector cavilhado com juntas de bronze de conexão tradicional por aperto, cuja temperatura máxima permissível é de 250°. Também, com solda convencional feita com eletrodo revestido, em que a fusão se dá através do arco elétrico produzido pela máquina de solda e temperatura máxima permissível de 450°. Ou também, por brasagem com liga Foscooper, feita com maçarico, também conhecida como solda heterogênea, com temperatura máxima é 550°. Por fim, outra opção seria solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, na qual a conexão é realizada pela fusão obtida pela ignição e combustão de ingredientes no cadinho. A temperatura máxima para esse caso é de 850°.

Em subestações de corrente alternada, a corrente de defeito (I_{falta}) é obtida a partir da corrente de curto-circuito máximo fornecida pela concessionária. Geralmente, desprezado a corrente de operação que é muito menor do que a corrente de curto-circuito. Como a mini-usina fotovoltaica é ligada à rede, portanto a corrente de defeito deve ser calculada somando as correntes de curto-circuito (fornecida pela concessionária) somada a corrente de curto-circuito da usina fotovoltaica, conforme Equação 2.27.

$$I_{\text{falta}} = I_{\text{CC}} + I_{\text{AC}} \quad (2.27)$$

Sendo:

I_{CC} : A corrente contínua provinda da instalação fotovoltaica [A].

I_{AC} : A corrente provinda da rede elétrica da concessionária [A].

Os potenciais limítrofes de passo e toque da malha são definidos.

$$V_{\text{toque}} \leq V_{\text{toque_máximo}}$$

$$V_{\text{passo}} \leq V_{\text{passo_máximo}}$$

Onde:

$V_{\text{toque_máximo}}$: Potencial máximo de toque suportado por uma pessoa sem ocorrência de fibrilação do coração [V].

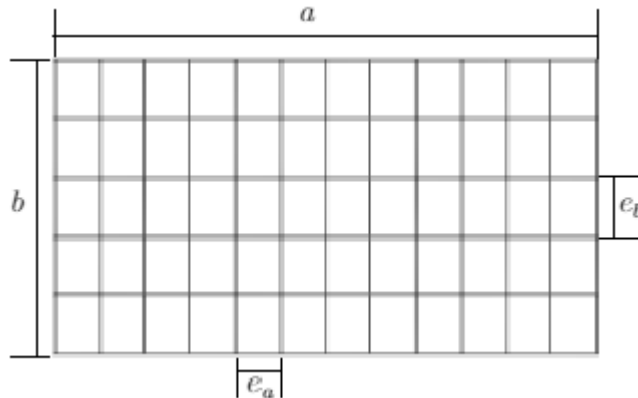
$V_{\text{passo_máximo}}$: Potencial máximo de passo suportado por uma pessoa sem ocorrência de fibrilação do coração [V].

V_{toque} : Potencial real de toque presente na malha [V].

V_{passo} : Potencial real de passo presente na malha [V].

Em um projeto inicial de malha é especificado o espaçamento entre os condutores, sendo possível utilizar hastes junto a malha. Em projetos práticos, utiliza-se de 5% a 10% do comprimento dos respectivos lados da malha. Na Figura 18, é possível ver o projeto inicial da malha onde "a" e "b" referem-se ao comprimento dos lados da malha em metros, e, "e_a" e "e_b" os espaçamentos em metros entre os condutores na vertical e horizontal respectivamente.

Figura 18: Aterramento em malha.



A resistência de aterramento pode ser obtida pelo método de cálculo de Sverak, conforme pode ser visto na Equação 2.28 a 2.33:

$$R_{\text{malha}} = \rho_a \left[\frac{1}{L_{\text{total}}} + \sqrt{\frac{1}{20A_{\text{malha}}}} \right] \left[1 + \frac{1}{1 + h_m} \frac{1}{\frac{20}{A_{\text{malha}}}} \right] \quad (2.28)$$

Onde:

ρ_a : Resistividade aparente vista pela malha $[\Omega \cdot m]$.

A_{malha} : Área ocupada pela malha $[m^2] = a \cdot b$.

h_m : Profundidade da malha $[m]$, com $0,25m \leq h \leq 2,5m$.

L_{total} : Comprimento total dos condutores e hastes que formam a malha. Neste projeto não haverá hastes na malha de aterramento $[m]$.

$$L_{\text{total}} = L_{\text{cabo}} + L_{\text{hastes}} \quad [m] \quad (2.29)$$

$$L_{\text{cabo}} = aN_b + bN_a \quad [m] \quad (2.30)$$

Sendo:

L_{cabo} : Comprimento total dos condutores da malha $[m]$.

N_a : O número de condutores na vertical da malha.

N_b : O número de condutores na horizontal da malha.

$$N_a = \frac{a}{e_a} + 1 \quad (2.31)$$

$$N_b = \frac{b}{e_b} + 1 \quad (2.32)$$

$$L_{\text{hastes}} = N_h \cdot L \quad [m] \quad (2.33)$$

Sendo:

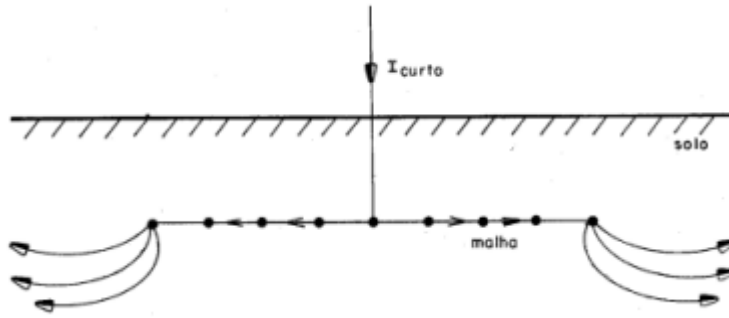
L_{hastes} : Comprimento total das hastes utilizadas no sistema de aterramento $[m]$.

N_h : O número de hastes.

L : O comprimento de cada haste $[m]$.

O potencial máximo da malha ocorre quando há máximo defeito fase-neutro (ou corrente de curto-circuito) e encontra-se nas bordas da malha, devido a facilidade de escoamento da corrente de defeito conforme Figura 19.

Figura 19: Escoamento das correntes na malha.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992)

Então, o potencial nas bordas é representado pela Equação 2.34:

$$V_{\text{malha}} = \frac{\rho_a K_m K_i I_{\text{malha}}}{L_{\text{total}}} \quad [V] \quad (2.34)$$

A constante K_m representa constante de malha sendo obtida conforme profundidade da malha, diâmetro do condutor e espaçamento entre os condutores, conforme Equação 2.35:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \quad (2.35)$$

Onde:

h : Profundidade da malha $[m]$.

e : Espaçamento entre os condutores paralelos ao longo do lado da malha $[m]$, caso $e_a \neq e_b$, usa-se o maior valor.

d : Diâmetro do condutor da malha $[m]$.

$N = \sqrt{N_a N_b}$: Número de condutores equivalentes de uma malha quadrada com N condutores paralelos em cada lado.

$K_{ii} = 1$: Para malha com hastes cravadas ao longo do perímetro, ou nos cantos da malha, ou em ambos.

$K_{ii} = \frac{1}{(2N)^{\frac{2}{N}}}$: Para malha sem hastes cravadas na malha ou com poucas hastes não localizadas nos cantos e perímetro da malha.

K_h : Correção de profundidade calculada pela Equação 2.36.

$$K_h = \frac{1}{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (2.36)$$

Onde:

$h_0 = 1m$, pois K_h é uma constante adimensional e h é dado em metros.

ρ_a : Resistividade aparente vista pela malha [$\Omega \cdot m$].

I_{malha} : Parcela da corrente máxima de falta que realmente escoar da malha para a terra [A].

L_{total} : Comprimento total dos condutores de malha [m].

Além disso, temos K_i , o coeficiente de irregularidade, e representa os efeitos da irregularidade da distribuição de corrente pela malha. Seu valor é calculado pela Equação 2.37:

$$K_i = 0,656 + 0,172N \quad (2.37)$$

De maneira análoga, calculamos o potencial de passo na malha que surge na superfície e comparamos com o máximo permitido, conforme definido anteriormente. A maior tensão de passo superficial possível ocorre na periferia da malha (V_{psm}) e é calculada conforme Equação 2.38:

$$V_{psm} = \frac{\rho_a K_p K_i I_{malha}}{L_{total}} \quad [V] \quad (2.38)$$

Onde K_p é obtido através da maior diferença de potencial obtida entre dois pontos distanciados de 1 metro, conforme Equação 2.39:

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1}{e} \right] \left[1 - 0,5^{N-2} \right] \quad (2.39)$$

Onde:

h : Profundidade da malha [m].

e : Espaçamento entre os condutores paralelos ao longo do lado da malha [m], caso $e_a \neq e_b$, usa-se o maior valor.

$N = \text{Máximo}(N_a, N_b)$: este dará o maior valor para K_p .

Caso a malha apresente hastes nos cantos e/ou perímetro, pode-se fazer uma correção nas Equações 2.34 e 2.38, ponderando-se em 15% a mais no comprimento das hastes, devido a facilidade das correntes se escoar mais profundamente no solo, resultando assim nas Equações 2.40 e 2.41 respectivamente.

$$V_{malha} = \frac{\rho_a K_m K_i I_{malha}}{L_{cabo} + 1,15 L_{hastes}} \quad [V] \quad (2.40)$$

$$V_{\text{psm}} = \frac{\rho_a K_p K_i I_{\text{malha}}}{L_{\text{cabo}} + 1,15 L_{\text{hastes}}} \quad [V] \quad (2.41)$$

Após calculado, esse valor deve ser comparado com o valor de tensão de passo máximo, conforme definido anteriormente.

O método de cálculo de V_{malha} e V_{psm} , apesar de estarem adequadas ao dimensionamento proposto por esse projeto, possui as seguintes restrições:

$$N \leq 25$$

$$d \leq 0,25h$$

$$0,25m \leq h \leq 2,5m$$

$$e \geq 2,5m$$

Então, caso as dimensões da malha de aterramento extrapolem as limitações anteriores, as equações propostas nesse trabalho não serão aceitas.

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DA MINI USINA FOTOVOLTAICA DE 584KWP

3.1 Introdução

O dimensionamento do sistema fotovoltaico de 584kWp aplicado ao estacionamento da USP campus II foi desenvolvido pelo Trabalho de Conclusão de Curso de (TANIZAKA; BERNARDO; ZERRENER, 2018). Os detalhes do projeto estão apresentados a seguir:

Ê Localização: Estacionamento do centro de convenções da Área 2 da USP – São Carlos. Coordenadas geográficas 22° 0'20.31"S, 47°55'51.37"O.

Ê Potencia instalada: 584kWp.

Ê Número de Inversores: 26 inversores.

Ê Potência total dos inversores: 503kW.

Ê Dados dos painéis fotovoltaicos: GCL-P6/72H 330

- Potência 330W
- Corrente de curto circuito (I_{sc}) 9,33A
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}) 46.2V

Ê Dados do lado CA (saída do inversor)

- Tensão de saída: 220V Trifásica

Dados da Concessionária CPFL:

Ê Unidade consumidora 38213605 (USP Área 2)

Ê Tensão nominal: 11,9 kV

Ê Trifásico simétrico/assimétrico: 5661 A / 8482 A

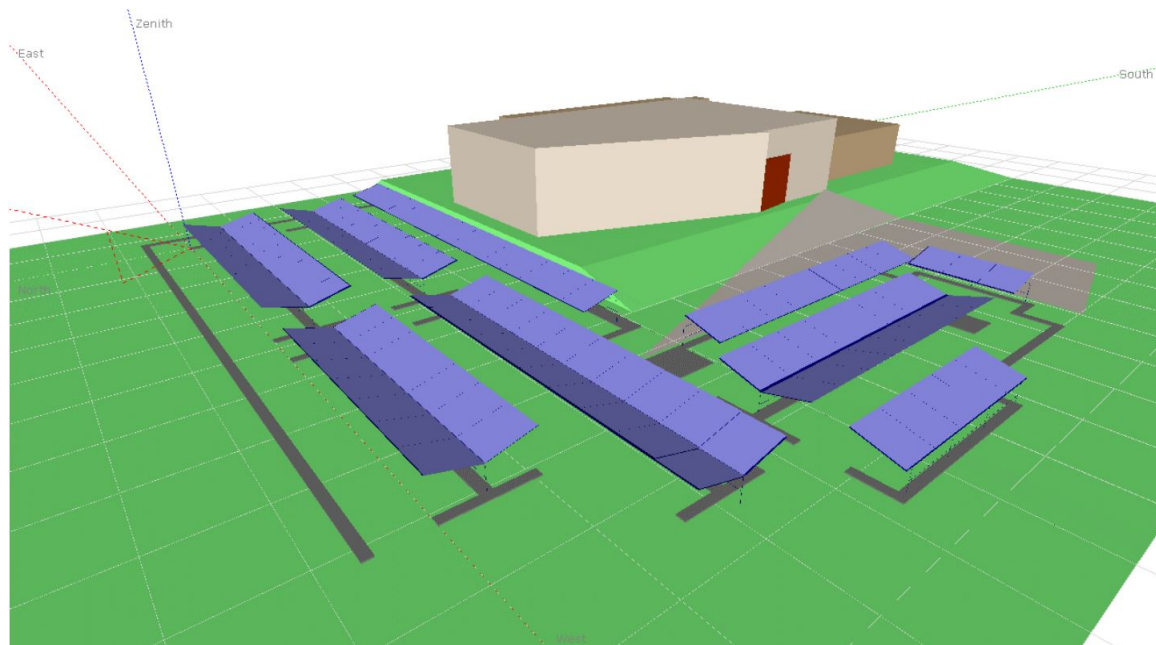
Ê Fase-fase simétrico/assimétrico: 4902 A / 7345 A

Ê Impedâncias até o ponto:

- Sequência positiva: $0,2822 + j1,1805 \text{ W}$
- Sequência zero: $0,8966 + j2,5327 \text{ W}$

Na Figura 20 é mostrado o layout da disposição dos painéis, conforme simulação no software PvSyst.

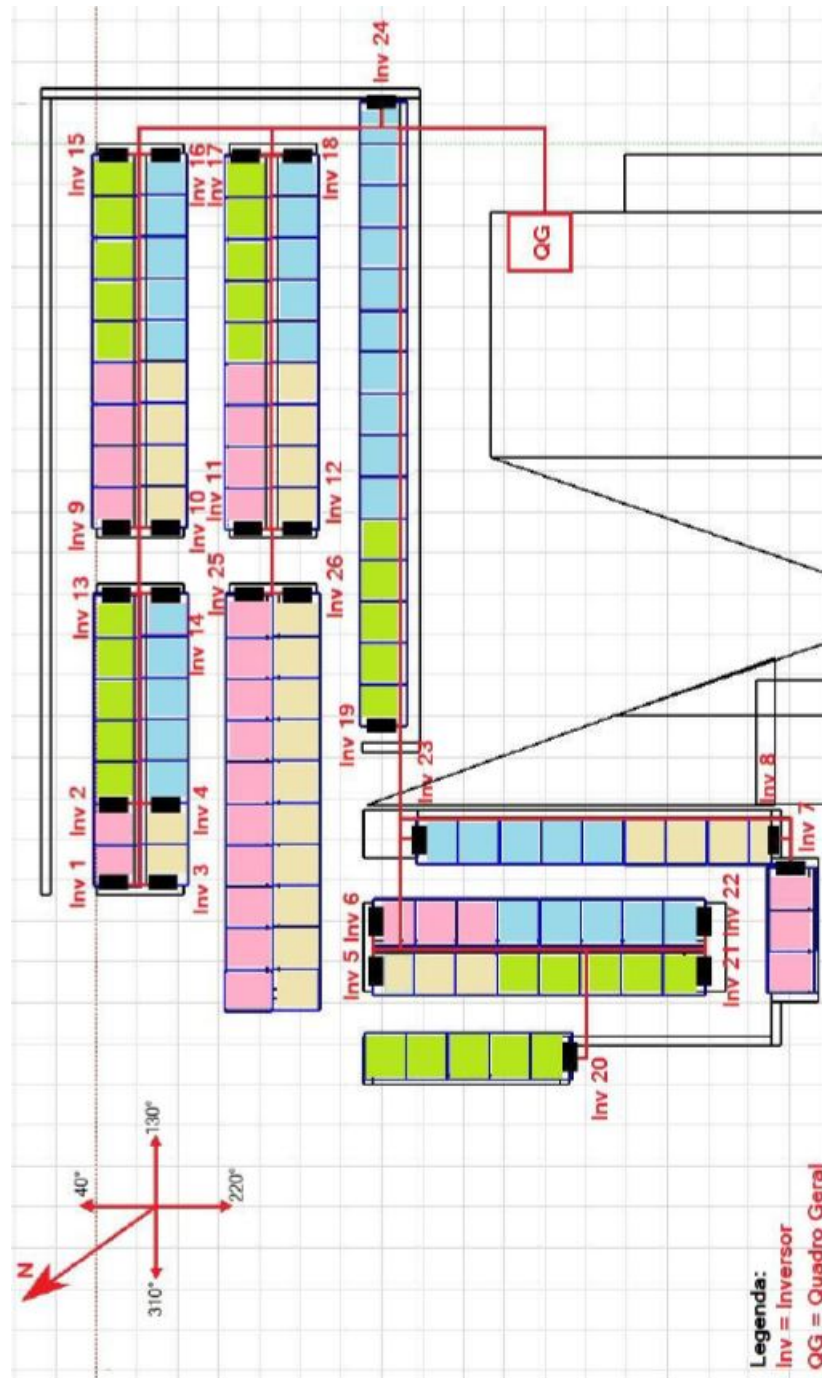
Figura 20: Estacionamento do centro de convenções no Campus II da USP São Carlos.



Fonte: (TANIZAKA; BERNARDO; ZERRENER, 2018)

A disposição das **strings** e dos inversores pode ser visualizado conforme Figura 21.

Figura 21: Disposição das **Strings** no estacionamento do centro de convenções no Campus II da USP São Carlos.



Fonte: (TANIZAKA; BERNARDO; ZERRENER, 2018)

3.2 Resistividade e estratificação do solo

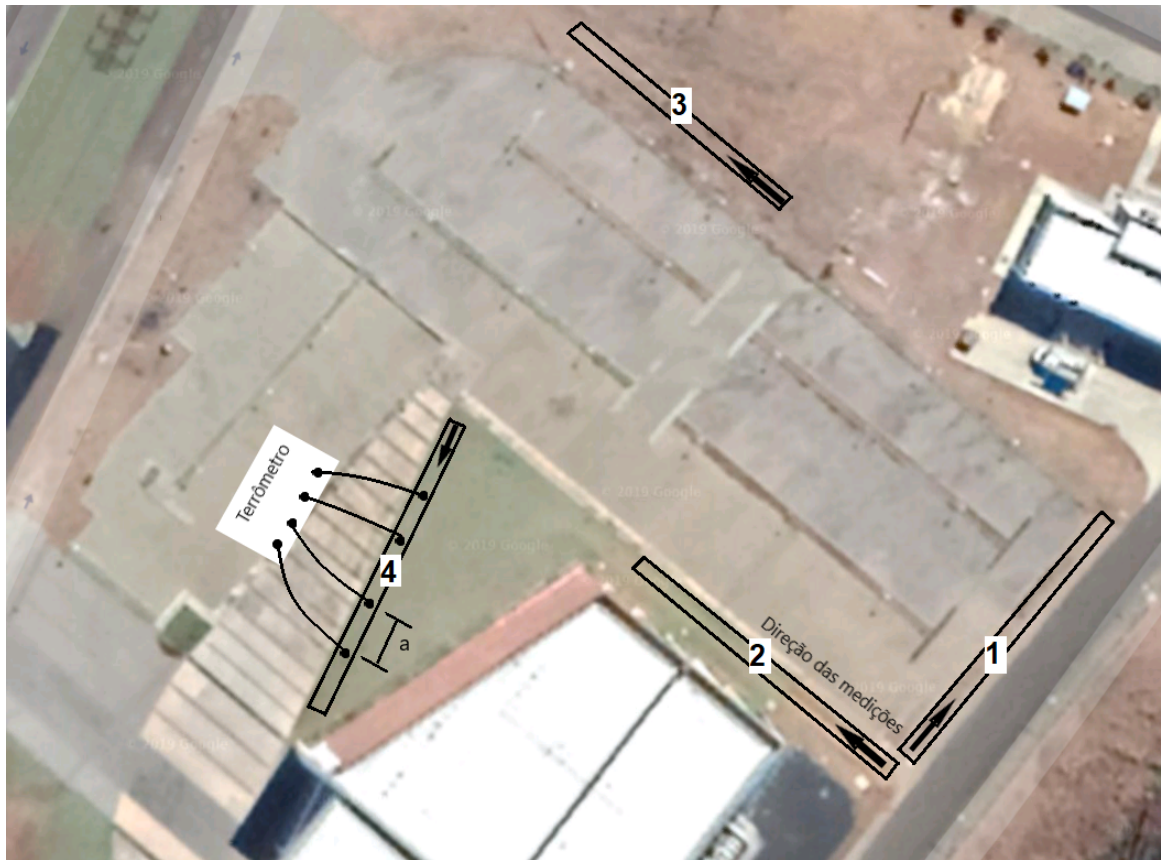
Nas medições de resistividade do solo foi utilizado o terrômetro Megabras MDT 20KW, conforme Figura 22, seguindo o método de Wenner.

Figura 22: Terrômetro Megabras MDT 20KW.



Os locais e direções onde foram realizadas as medições para o cálculo de resistividade no estacionamento da área II da USP São Carlos é mostrado na Figura 23.

Figura 23: Direções das medições da resistividade no estacionamento do centro de convenções da USP São Carlos Campus II.



Esses locais e direções foram escolhidos conforme disponibilidade do local, já que o local já está pavimentado e possui tubulações subterrâneas que poderiam afetar as medições. Então, as 4 direções escolhidas foram as possíveis, conforme disponibilidade.

A profundidade das estacas foi de 20cm e, como precaução, para garantir o contato da terra com as estacas, foi adicionado um mínimo de água junto às estacas. As medições lidas pelo torrômetro e calculadas, conforme as direções das medições, estão apresentadas na Tabela 3. Devido a irregularidades do solo e espaço disponível, não foi possível realizar todas as medições, mostrado como NM (Não Medido) nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3: Resistividade lida pelo torrômetro e seus respectivos espaçamentos.

Espaç. $a(m)$	Direção 1 $\rho(\Omega \cdot m)$	Direção 2 $\rho(\Omega \cdot m)$	Direção 3 $\rho(\Omega \cdot m)$	Direção 4 $\rho(\Omega \cdot m)$	Resist. média $\rho(\Omega \cdot m)$
0.5	487	666	NM	NM	576,5
1	562	454	532	357	476,25
2	504	482	492	363	460,25
4	376	354	500	343	393,25
8	539	298	1066	361	566,00
16	633	374	NM	NM	503,5

Então uma análise das medidas é realizada para verificação dos valores, conforme Tabela 4 de desvios médios.

Tabela 4: Desvio de cada medida em relação aos valores médios da tabela anterior.

Espaçamento $a(m)$	Desvio médio 1 $\rho(\Omega \cdot m)$	Desvio médio 2 $\rho(\Omega \cdot m)$	Desvio médio 3 $\rho(\Omega \cdot m)$	Desvio médio 4 $\rho(\Omega \cdot m)$
0,5	89,5	89,5	NM	NM
1	85,75	22,25	55,75	119,25
2	43,75	21,75	31,75	97,25
4	17,25	39,25	106,75	50,25
8	139,67	101,33	666,67	38,33
16	129,5	129,5	NM	NM

Então, os valores da Tabela 4 são lidos em porcentagem conforme Tabela 5.

Tabela 5: Desvios médios anteriores em porcentagem.

Espaçamento $a(m)$	Desvio médio 1 (%)	Desvio médio 2 (%)	Desvio médio 3 (%)	Desvio médio 4 (%)
0,5	16	16	NM	NM
1	18	5	12	25
2	10	5	7	21
4	4	10	27	13
8	35	25	167	10
16	26	26	NM	NM

Concluimos que apenas um valor de desvio médio ultrapassou o limite de 50%, valor destacado na Tabela 5, portanto esse valor foi desconsiderado.

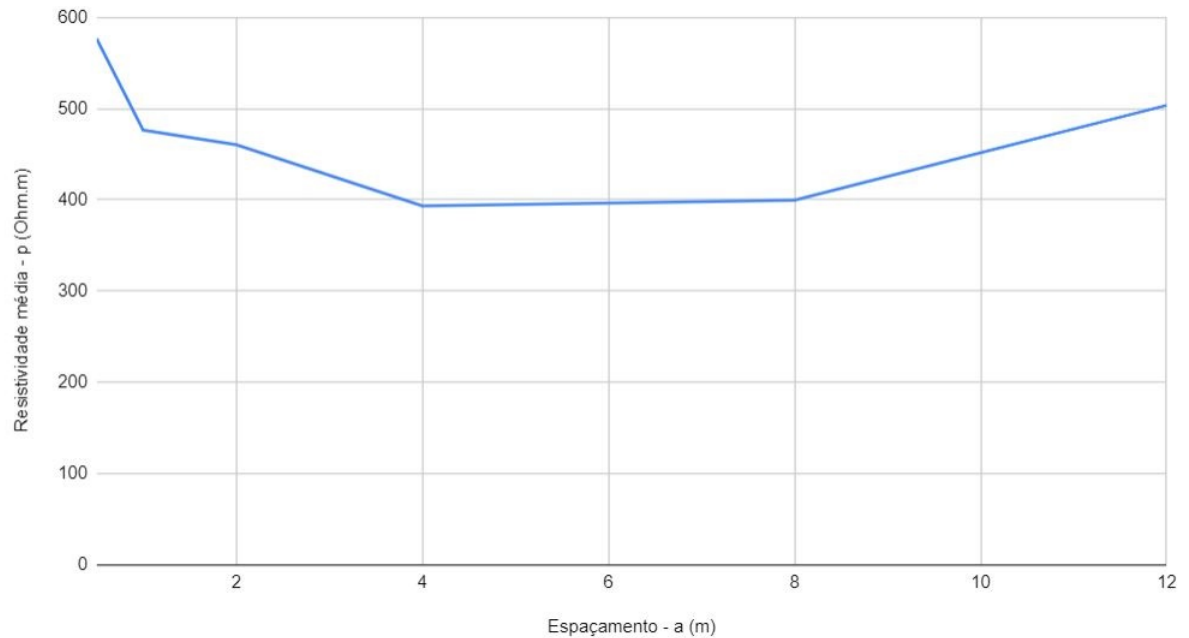
Por fim, os valores de resistividade média para o estacionamento do campus 2, somente com os valores válidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resistividade média do solo

Espaçamento $a(m)$	Resistividade $\rho(\Omega \cdot m)$
0,5	576,5
1	476,25
2	460,25
4	393,25
8	399,33
16	503,5

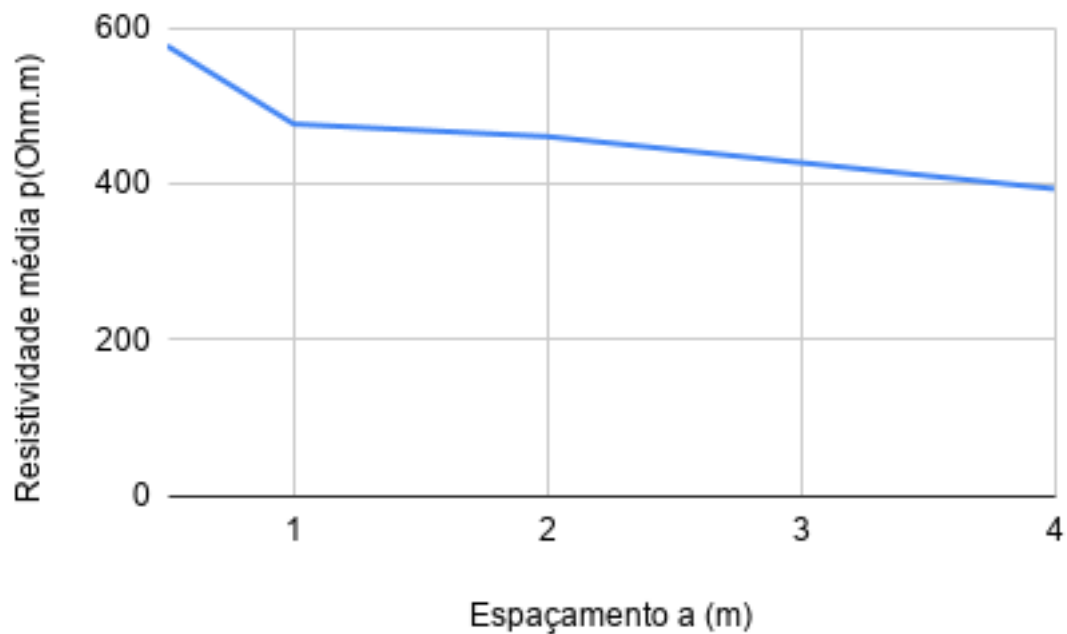
A relação de resistividade do solo pelo espaço ($\rho \times a$) está representado pela Figura

Figura 24: Resistividade do solo do estacionamento do centro de convenções da USP São Carlos Campus II.



Utilizando o método de modelagem do solo em várias camadas, divide-se a curva $\rho(a) \times a$ obtida anteriormente em 2: primeira com valores descendentes e a segunda com valores ascendentes.

Figura 25: Porção descendente da curva de resistividade do solo



Então, prolonga-se a curva $\rho(a) \times a$ até o eixo das ordenadas para obter o valor da

resistividade da primeira camada (ρ_1). Conforme o gráfico, temos o valor de ρ_1 igual a $576,5\Omega.m$.

Posteriormente, um valor aleatório de espaçamento é escolhido para obter o valor correspondente de $\rho(a_1)$. O primeiro valor escolhido de " a_1 " foi de $2m$. Então, realiza-se uma análise da constante K sobre o comportamento do gráfico, sendo (ascendente ou descendente). Para esse primeiro trecho do gráfico temos comportamento descendente, por isso, K negativo. Então, realizamos o cálculo $\rho(a_1)/\rho_1$ obtendo 0,798. Para o caso de K positivo, realizamos o cálculo $\rho_1/\rho(a_1)$.

Utilizando a curva teórica de K negativo para esse valor de $\rho(a_1)/\rho_1$, fazendo uma linha paralela ao eixo da abscissa, obtém-se os valores de h/a . Esses valores são multiplicados pelo a_1 escolhido para obter o valor de h . Então, obtém-se a tabela com os valores de K , h/a e h :

Tabela 7: Valores de h/a e h para um espaçamento de $2m$.

$\rho(a_1)/\rho_1$	h/a	h
-0,2	0,43	0,86
-0,3	0,65	1,3
-0,4	0,8	1,6
-0,5	0,9	1,8
-0,6	0,98	1,96
-0,7	1,08	2,16
-0,8	1,12	2,24
-0,9	1,19	2,38
-1,0	1,23	2,46

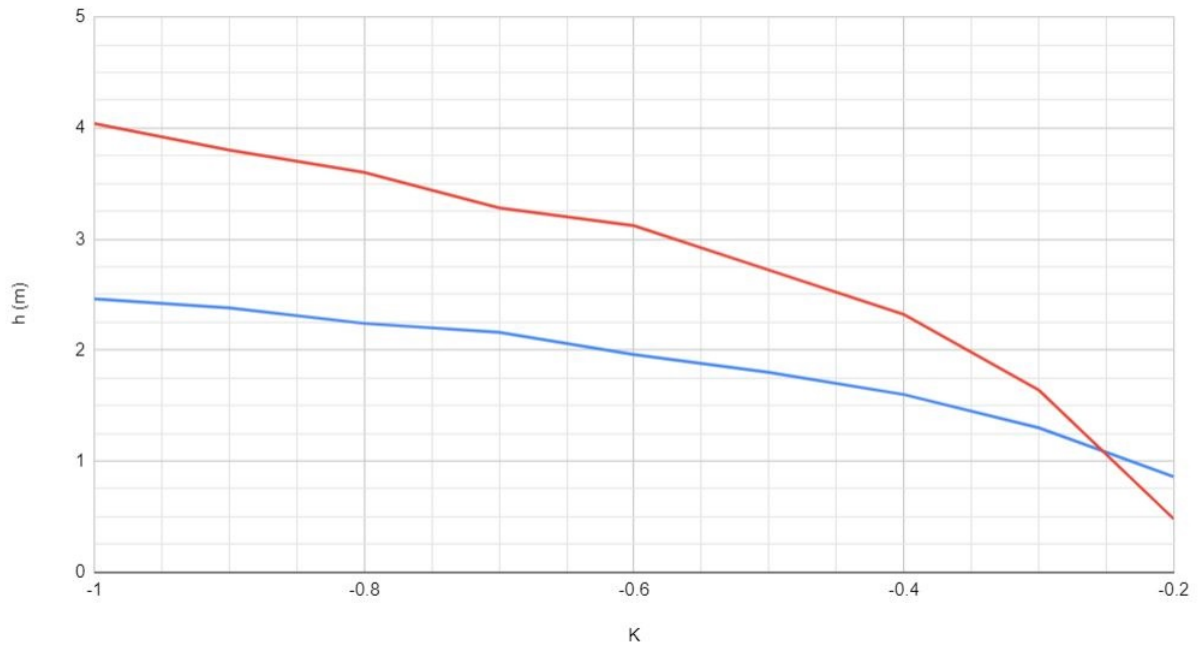
Então, repete-se o processo com o valor de espaçamento " a_2 " igual a $4m$ e obtém-se a Tabela 8:

Tabela 8: Valores de h/a e h para um espaçamento de $4m$.

$\rho(a_1)/\rho_1$	h/a	h
-0,2	0,12	0,48
-0,3	0,41	1,64
-0,4	0,58	2,32
-0,5	0,68	2,72
-0,6	0,78	3,12
-0,7	0,82	3,28
-0,8	0,9	3,6
-0,9	0,95	3,8
-1,0	1,01	4,04

Então, obtemos o gráfico de $h \times K$ com as duas curvas obtidas anteriormente, representado na Figura 26:

Figura 26: Gráfico de Estratificação $h \times K$.

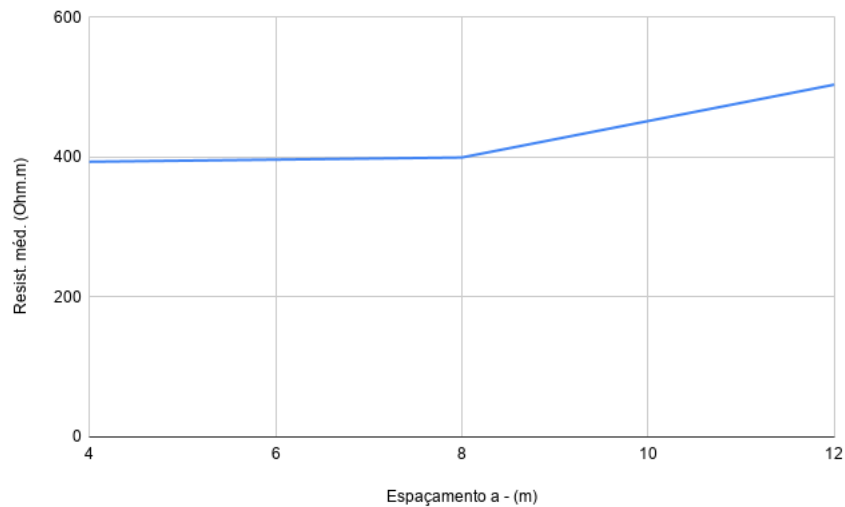


Pela Figura 26 pode-se notar que as duas curvas se tocam com $K = -0,25$ e $h = 1,1m$, sendo este a altura da primeira camada. Agora, com o valor de K , é possível encontrar a resistividade da segunda camada usando a Equação 2.5, obtendo ρ_2 de $345,9\Omega.m$.

Então, localiza-se o ponto de transição do gráfico da Figura 24, ou seja, quando a derivada da resistividade do solo deixa de ser negativa e passa a ser positiva, no espaçamento a_t de $4m$. Acha-se a resistividade equivalente vista pela terceira camada, assim estima-se a profundidade da segunda camada como h_2^e , conforme Equação 2.6. Logo, h_2^e é $2,6m$

Calcula-se a resistividade média equivalente estimada vista pela terceira camada, conforme a Equação 2.8. Logo ρ_2^e é $338,5\Omega.m$. Considera-se o ρ_2^e como a primeira camada e realiza-se todo o método novamente para nova parte ascendente do gráfico de resistividade do solo, conforme Figura 27:

Figura 27: Gráfico da parte ascendente da resistividade do solo



Escolhe-se o valor de espaçamento " a_3 " de $6m$ obtendo o valor corresponde de $\rho(a_3)$ de $396,3 \Omega.m$. Como a curva é ascendente, o valor de K é positivo e $\rho_2^e/\rho(a_3)$ é $0,854$.

Utilizando a curva teórica de K positiva para esse valor de $\rho_2^e/\rho(a_3)$, fazendo uma linha paralela ao eixo da abscissa, obtém-se os valores de h/a . Esses valores são multiplicados pelo a_3 escolhido para obter o valor de h . Então, obtém-se a tabela com os valores de K , h/a e h :

Tabela 9: Valores de h/a e h para um espaçamento de $6m$.

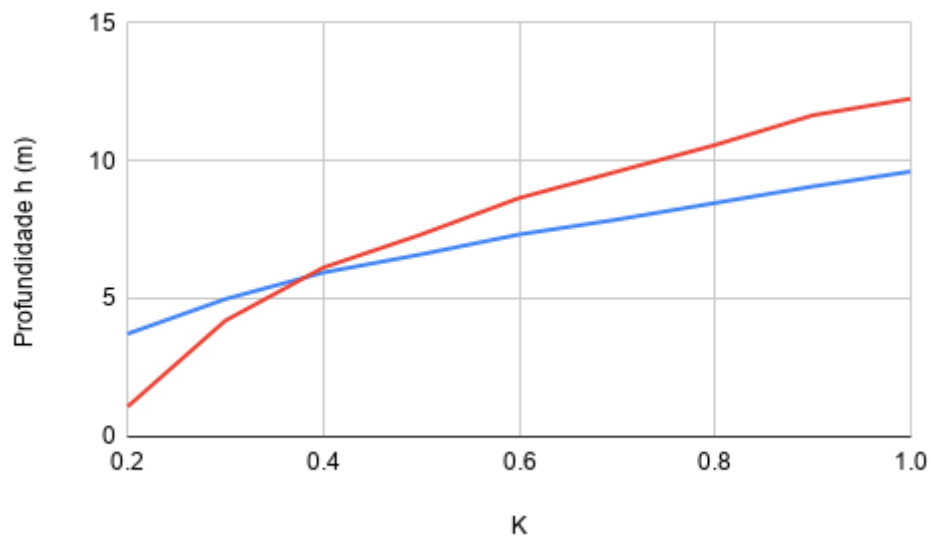
$\rho_2^1/\rho(a_3)$	h/a	h
0,1	0,26	1,56
0,2	0,62	3,72
0,3	0,83	4,98
0,4	0,99	5,94
0,5	1,1	6,6
0,6	1,22	7,32
0,7	1,31	7,86
0,8	1,41	8,46
0,9	1,51	9,06
1,0	1,6	9,6

Então, repete-se o processo com o valor de espaçamento " a_4 " igual a $12m$ e obtém-se a Tabela 10:

Tabela 10: Valores de h/a e h para um espaçamento de $12m$.

$\rho(a_4)/\rho_1$	h/a	h
0,2	0,09	1,08
0,3	0,35	4,2
0,4	0,51	6,12
0,5	0,61	7,32
0,6	0,72	8,64
0,7	0,8	9,6
0,8	0,88	10,56
0,9	0,97	11,64
1,0	1,02	12,24

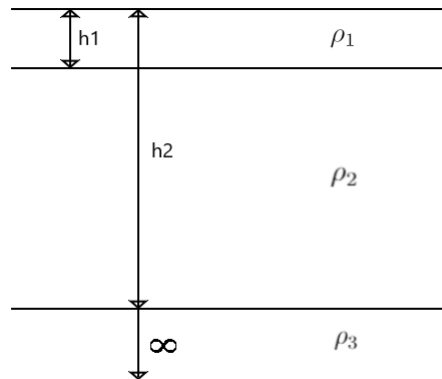
Então, obtemos o gráfico de $h \times K$ com as duas curvas obtidas anteriormente, representado na Figura 28:

Figura 28: Gráfico de Estratificação $h \times K$.

Pela Figura 28 pode-se notar que as duas curvas se interseccionam em $K = 0,28$ e $h = 5,8m$. Agora, com o valor de K , é possível encontrar a resistividade da segunda camada usando a Equação 2.5, obtendo ρ_3 de $753,6\Omega.m$.

Por fim, tem-se a seguinte estratificação do solo, conforme Figura 29:

Figura 29: Solo estratificado do estacionamento do centro de convenções da USP, São Carlos - Área 2.



A Tabela 11 resume os valores obtidos pela estratificação:

Tabela 11: Valores de profundidade de camada h e resistividade da camada ρ para a estratificação de solo

Camada	$\rho(\Omega.m)$	$h(m)$
1	576, 5	1, 1
2	345, 9	5, 8
3	753, 6	∞

3.3 Projeto de dimensionamento de aterramento usando apenas hastes paralelas

O projeto a seguir prevê a instalação de hastes de aterramento.

Após obter o diagrama com o solo estratificado em várias camadas, realiza-se o cálculo da resistividade aparente conforme Equação 2.8. Então, ρ_a é $419,78\Omega.m$.

As especificações da instalação estão mostradas na Tabela 12:

Tabela 12: Especificações do projeto.

Resistividade Aparente	$419,78 \Omega.m$
Comprimento da haste	$2,5 m$
Diâmetro da haste	$0,015 m$
Distância entre as hastes	$4 m$

Primeiramente foi calculado a resistência de aterramento para uma única haste aterrada, conforme a Tabela 12. Utilizando a Equação 2.14 tem-se $R_h = 173,77\Omega$:

Como o recomendado do valor da resistência de aterramento é 10Ω , é necessário interligar várias hastes a fim de diminuir a resistência equivalente do sistema (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

O espaçamento entre as hastes foi determinado de acordo com o espaço disponível para implementar o sistema, pois, apesar da interferência entre as hastes diminuir com o aumento da distância, o espaço disponível é limitado, reduzindo assim, o número de hastes e aumentando a resistência equivalente do aterramento.

Primeiro será apresentado um sistema com 14 hastes com um espaçamento de $4m$. Caso não seja suficiente para obter uma resistência próxima de 10Ω , este sistema será interligado a um outro com o mesmo número de hastes e as mesmas especificações (conforme a Tabela [12](#)).

Figura 30: Resistência de cada haste $[\Omega]$.

R1	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38	2,09	1,85	1,67	1,52	1,39	1,28
R2	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38	2,09	1,85	1,67	1,52	1,39
R3	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38	2,09	1,85	1,67	1,52
R4	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38	2,09	1,85	1,67
R5	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38	2,09	1,85
R6	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38	2,09
R7	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78	2,38
R8	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33	2,78
R9	2,09	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16	3,33
R10	1,85	2,09	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53	4,16
R11	1,67	1,85	2,09	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22	5,53
R12	1,52	1,67	1,85	2,09	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77	8,22
R13	1,39	1,52	1,67	1,85	2,09	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77	15,77
R14	1,28	1,39	1,52	1,67	1,85	2,09	2,38	2,78	3,33	4,16	5,53	8,22	15,77	173,77

Tabela 13: Resistência total de cada haste.

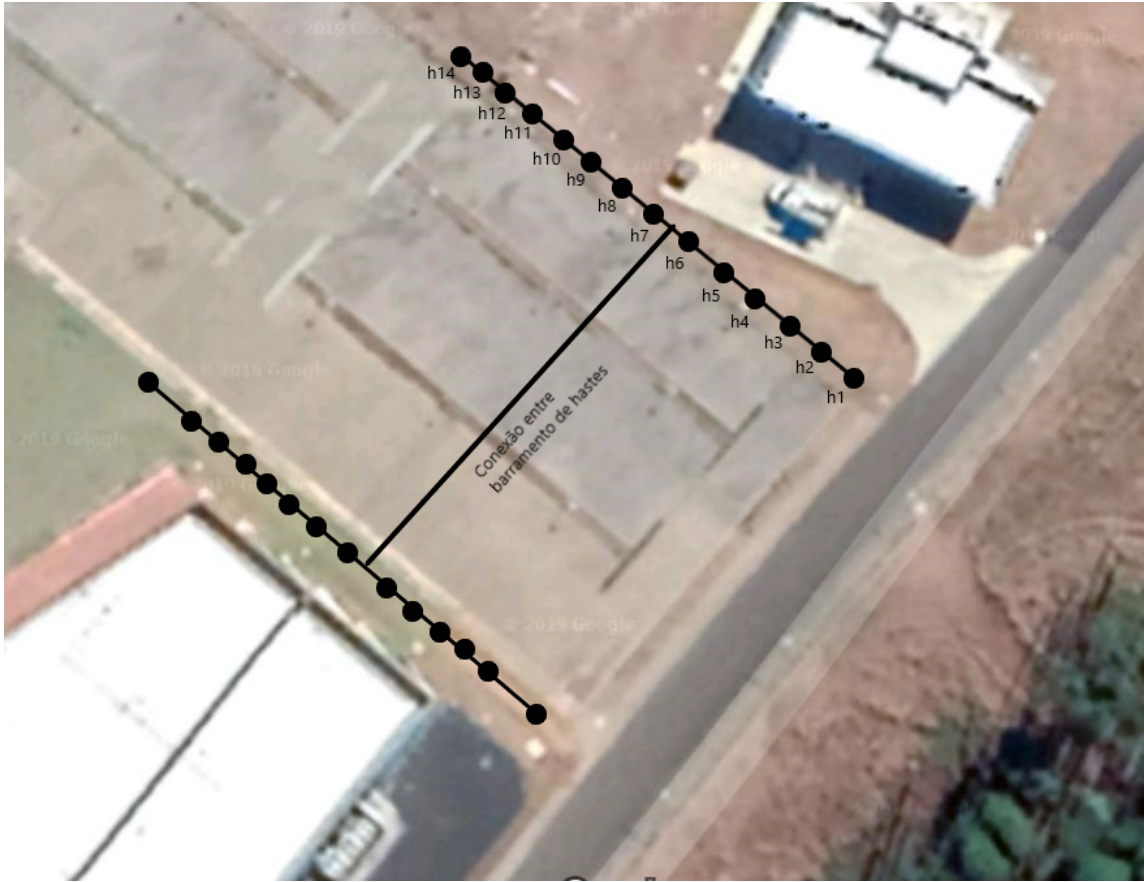
R_1	225,74 Ω
R_2	240,23 Ω
R_3	247,06 Ω
R_4	251,07 Ω
R_5	253,56 Ω
R_6	255,04 Ω
R_7	255,73 Ω
R_8	255,73 Ω
R_9	255,04 Ω
R_{10}	253,56 Ω
R_{11}	251,07 Ω
R_{12}	247,06 Ω
R_{13}	240,23 Ω
R_{14}	225,74 Ω

Na Figura 30, ao eliminar a primeira coluna, pode ser comparada a uma matriz quadrada 14×14 , sendo a posição de cada elemento, R_{ij} , o acréscimo de resistência na haste i devido a interferência da haste j . Por exemplo, $R_{12} = 15,77$ é o acréscimo na resistência da primeira barra devido a interferência da segunda barra, e para os elementos com $i = j$, tem-se a resistência de uma única barra.

Agora com a resistência de cada haste, basta utilizar a Equação 2.18 para encontrar a resistência equivalente do sistema, totalizando $R_{eq} = 17,61\Omega$.

Como a resistência ainda está acima do recomendado pela norma brasileira, NBR 14039, será necessário adicionar outro sistema de hastes paralelas, conforme Figura 31.

Figura 31: Local da instalação dos aterramentos em hastes paralelas.



A Figura 31 mostra o local em que cada sistema de hastes paralelas será instalado.

Pode-se notar pela Figura 30, que a distâncias muito grandes, o acréscimo de resistência devido a interferência das superfícies equipotenciais de cada haste é muito pequeno comparado com o valor da resistência de uma única haste ($R_h = 173,77\Omega$ e a contribuição de uma haste a $52m$ é igual a $1,28\Omega$). Por isso decidiu-se fazer uma aproximação no cálculo da resistência final deste sistema de aterramento, considerando cada circuito como se fosse um ponto e depois fazer novamente um cálculo de hastes paralelas porém com duas hastes, pois a distância mínima entre os dois sistemas de aterramento é 50 m .

Com essa aproximação, tem-se que cada sistema possui uma resistência de uma única haste de $21,33\Omega$, pois possuem as mesmas especificações segundo a Tabela 12. E utilizando a Equação 2.16 tem-se um acréscimo em cada sistema de $1,34\Omega$, resultando em uma resistência de $17,61\Omega$ em cada circuito.

Finalmente, utilizando a Equação 2.18, tem-se a seguinte resistência equivalente com o valor de $R = 9,47\Omega$.

A Tabela 14 demonstra o resultado final do dimensionamento usando hastes paralelas.

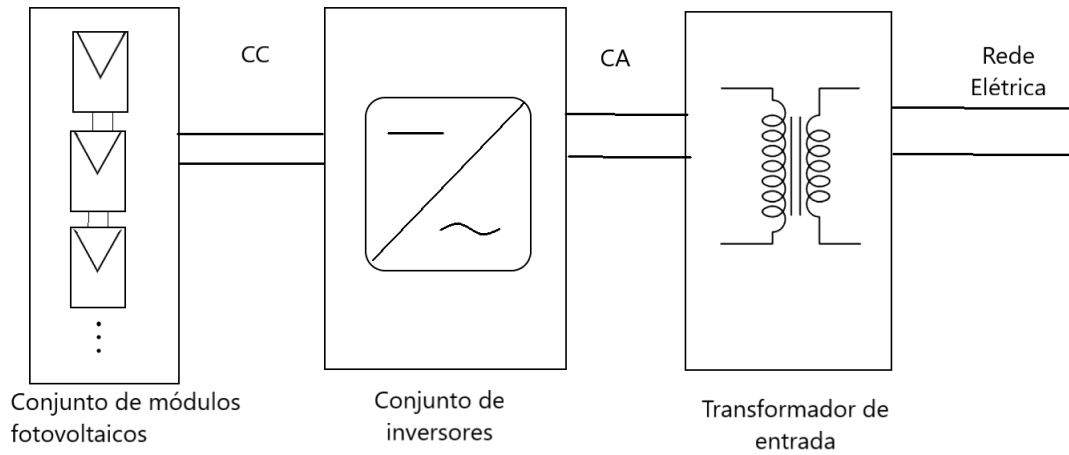
Tabela 14: Resultados finais do projeto em hastes paralelas.

Resistividade de uma haste (R_h)	17,61 $\Omega.m$
Acréscimo de resistência	1,34 Ω
Resistência final	9,47 Ω

3.4 Projeto de dimensionamento da malha de aterramento

A seguir será proposto dois projetos de malha de aterramento. O caso 1 irá proteger o sistema de alguma falta que possa ocorrer no lado de corrente contínua do circuito e o caso 2 irá proteger o sistema caso haja alguma falta no lado de corrente alternada. O diagrama da rede está representado conforme Figura 32.

Figura 32: Diagrama elétrico do sistema.



3.4.1 Resistividade aparente

3.4.1.1 Coeficiente de penetração

$$r = \frac{A}{D} = \sqrt{\frac{30 \cdot 40}{30^2 + 40^2}} = 24 \quad (3.1)$$

$$\alpha = \frac{r}{h_1} = \frac{24}{1,1} = 21,81 \quad (3.2)$$

3.4.1.1.1 Coeficiente de divergência

$$\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{345,9}{576,5} = 0,6 \quad (3.3)$$

3.4.1.2 Resistividade aparente vista pela malha

Com os valores de α e β , basta usar as curvas da Figura 11 para obter o valor de N .

Tem-se então:

$$N = 0,75 \quad (3.4)$$

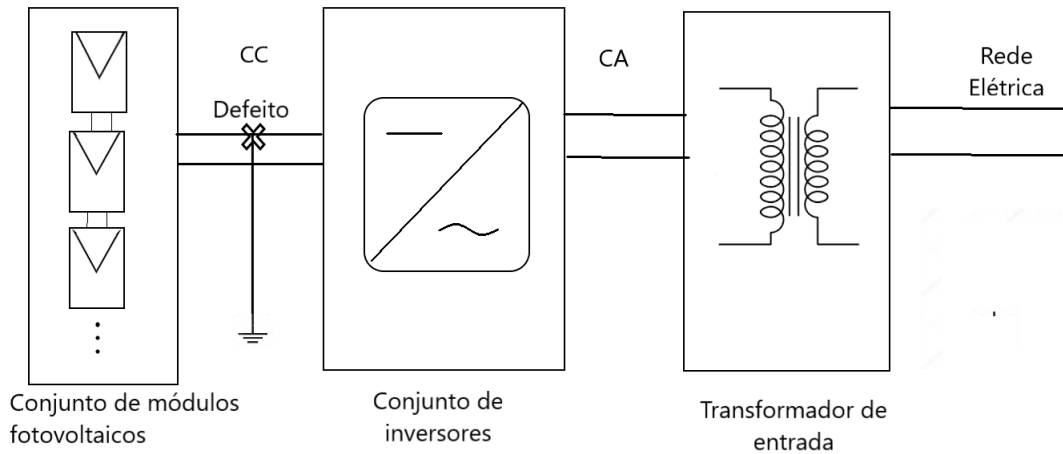
Assim, tem-se:

$$\rho_a = N \cdot \rho_1 = 0,75 \cdot 576,5 = 432,38\Omega \cdot m \quad (3.5)$$

3.4.2 Sistema de proteção para lado CC - Caso 1

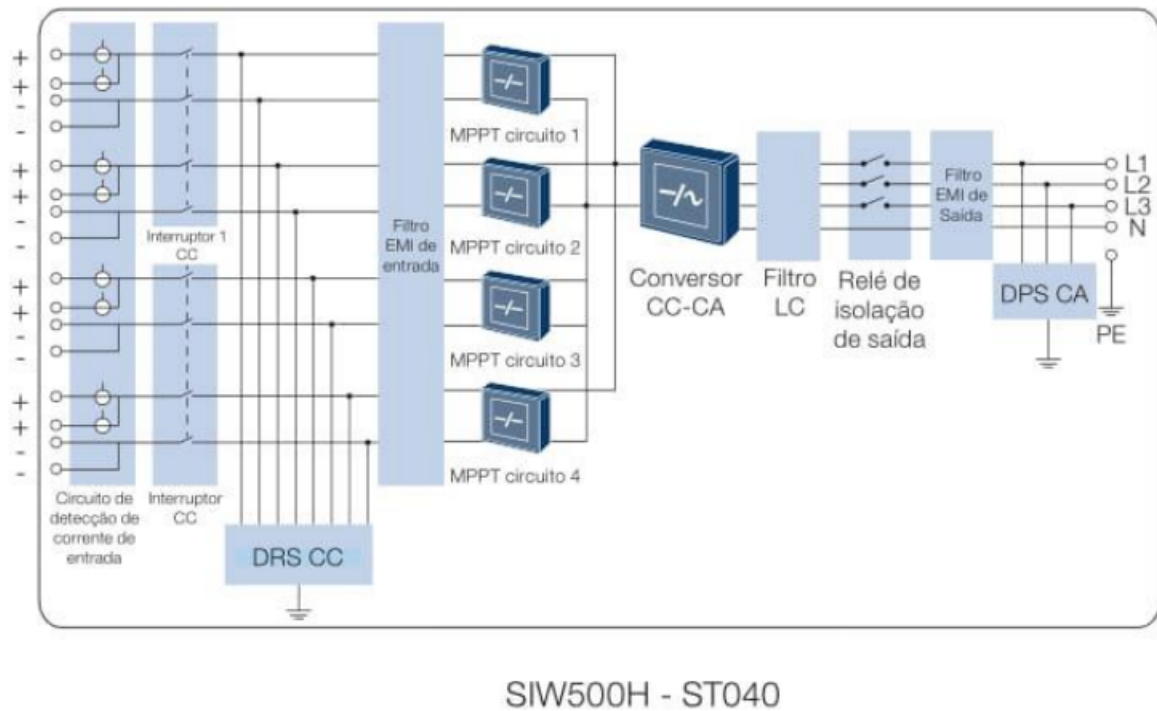
Para o caso 1 foi considerado que um defeito irá gerar curto-circuito no lado de corrente contínua do circuito, conforme representado na Figura 33. Para esse projeto, foi considerado que os inversores possuem proteção contra corrente reversa e, portanto, toda a corrente a ser drenada pelo aterramento é proveniente dos painéis fotovoltaicos e nenhuma corrente é proveniente da rede.

Figura 33: Local do defeito no diagrama.



Com os valores obtidos anteriormente, pode-se projetar um sistema de aterramento adequado e seguro para as máquinas e seres humanos. A resistividade aparente vista pela malha ρ_a é igual a $432,38\Omega \cdot m$. Para a corrente de curto circuito máxima do sistema, será considerado o defeito no inversor do sistema com o maior número de MPPT (4 MPPT, com duas entradas em paralelas em cada MPPT, que se juntam em um único ponto conforme Figura 34, resultando então em uma corrente de falta igual a 8 vezes maior que a corrente de curto circuito do painel fotovoltaico). Como a corrente de curto circuito do painel fotovoltaico é $9,36A$, tem-se então uma corrente de falta máxima de $75A$.

Figura 34: Diagrama do circuito do inversor com maior potência.



3.4.2.1 Dimensionamento do condutor - defeito lado CC

Para o dimensionamento do condutor, foi escolhido o conector cavilhado com juntas de bronze de conexão tradicional por aperto, cuja temperatura máxima permissível é de 250° . Considerando todas as outras formas de conexão, essa é a que produz o resultado com maior seção transversal do condutor.

A conexão do cabo é feita por conexão cavilhada e a dimensão do seu cabo foi calculada em $20,04\text{mm}^2$. Então, estipula-se cabo de 25mm^2 para o cabo de ligação, conforme dimensionamento mínimo para cabos de ligação.

Da mesma forma, o cabo da malha de aterramento é calculado, porém, considerando a divisão da corrente pela malha. A corrente que escoar na malha é considerada como 60% da corrente máxima de falta devido a ao escoamento da corrente pela malha.

Então, a dimensão da seção transversal do cabo da malha de aterramento foi calculado em $12,02\text{mm}^2$. Então, foi estipulado o condutor da malha de 16mm^2 .

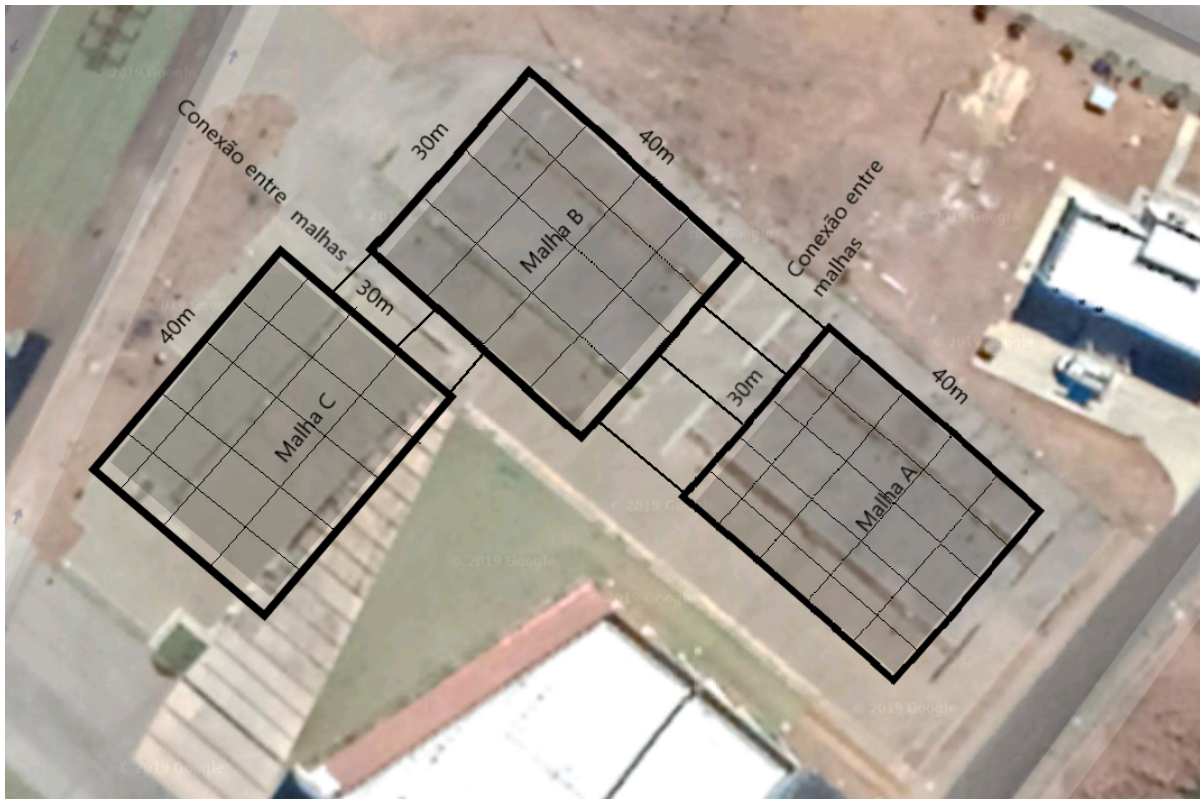
Tabela 15: Resultados finais do dimensionamento dos condutores.

Corrente de defeito (I_{falta})	75 A
Corrente escoada na malha ($I_{\text{faltaMalha}}$)	45 A
Seção cabo de conexão (S_{conexao})	25mm^2
Seção condutor da malha (S_{malha})	16mm^2

3.4.2.2 Dimensionamento da malha - defeito lado CC

Conforme dimensões do estacionamento, criou-se múltiplas malhas conforme Figura 35:

Figura 35: Regiões para instalação dos aterramentos em malha.



Os comprimentos laterais foram de $30m$ por $40m$ e o espaçamento entre os condutores da malha são de $2,5m$. A resistência de aterramento das malhas A, B e C, individualmente, é de $5,68\Omega$. Sabendo que o modelo de cálculo de aterramento só é válido para profundidade $0,25m \leq h \leq 2,5m$, escolhe-se por praticidade $h = 1m$.

Entre as malhas A e B há um encanamento de esgoto de concreto subterrâneo que impossibilita a união das malhas A e B. Logo, a conexão será aérea através dos cabos especificados na figura. As malhas A, B e C serão conectadas com o mesmo cabo da estrutura da malha, fazendo com que a resistência final da malha seja menor ainda, melhorando a eficiência do aterramento. Conforme norma ABNT NBR 5410, pede-se no máximo resistência de aterramento de 10Ω . Então, projeto está dentro da norma.

Além disso, foi considerado que resistividade superficial do solo de $20Wm$, referente aos tijolos briquetes em caso de chuva (concreto molhado), conforme Figura 36.

Figura 36: Resistividade superficial do asfalto, concreto e brita.

<i>Material</i>	<i>Resistividade ($\Omega \times m$)</i>	
	<i>Seco</i>	<i>Molhado</i>
Brita n. 1, 2 ou 3		3 000
Concreto	1.200 a 280.000	21 a 100
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10×10^3 a 6×10^6

Fonte: (O SETOR ELÉTRICO, 2011)

Tabela 16: Resultados finais do dimensionamento da malha.

Comprimento da Malha	30m
Largura da Malha	40m
Espaçamento entre condutores de 30 metros	2, 5m
Espaçamento entre condutores de 40 metros	2, 5m
Profundidade da malha	1m.
Resistência individual de cada malha	5, 68Ω.

3.4.2.3 Cálculo tensão de passo e toque - Caso 1

A seguir será apresentado os valores máximos de potencial de toque e passo que o ser humano poderia suportar sem ocorrer fibrilação no coração para o caso 1, onde a corrente de defeito é 75A e a superfície do estacionamento é de brique (concreto).

Os sistemas de proteção com relé geralmente levam cerca de 0,5s para serem acionados. Por isso, o tempo máximo que uma pessoa estará sujeita a um choque elétrico devido ao defeito, é de 0,5s. Com o tempo de defeito e utilizando a Equação 2.20, é possível calcular a corrente de choque que uma pessoa suporta sem a ocorrência de fibrilação no coração.

Considerando a resistividade superficial do solo (ρ_s) como brique (bloco de concreto) molhado igual a $20Wm$, pode-se calcular o potencial de toque máximo conforme Equação 2.22, resultando na Equação 3.6:

$$V_{\text{toqueMaximo}} = \frac{116 \sqrt[3]{0,174\rho_s}}{0,5} = 169V \quad (3.6)$$

Da mesma forma, a tensão de passo é obtida pela Equação 2.24, resultando na Equação 3.7.

$$V_{\text{PassoMaximo}} = \frac{116 \sqrt[3]{0,696\rho_s}}{0,5} = 184V \quad (3.7)$$

Utilizando a Equação 2.34, obtém-se uma tensão na periferia de malha durante o defeito de 43.97V.

Utilizando a Equação 2.38, obtém-se uma tensão de passo na periferia durante o defeito de 22,9 V.

O cálculo para o potencial de toque e de passo são calculados para a borda da malha, pois é o máximo valor possível de tensão. O máximo potencial de toque obtido quando houver uma falha é de 43,97 V e o máximo potencial de toque suportado pelo homem é de 169 V. Da mesma forma, o máximo potencial de passo obtido quando houver uma falha é de 22,9 V e o máximo potencial de passo suportado pelo homem é de 184 V.

O resumo com as tensões é apresentado na Tabela 17

Tabela 17: Especificações de potenciais de passo e toque.

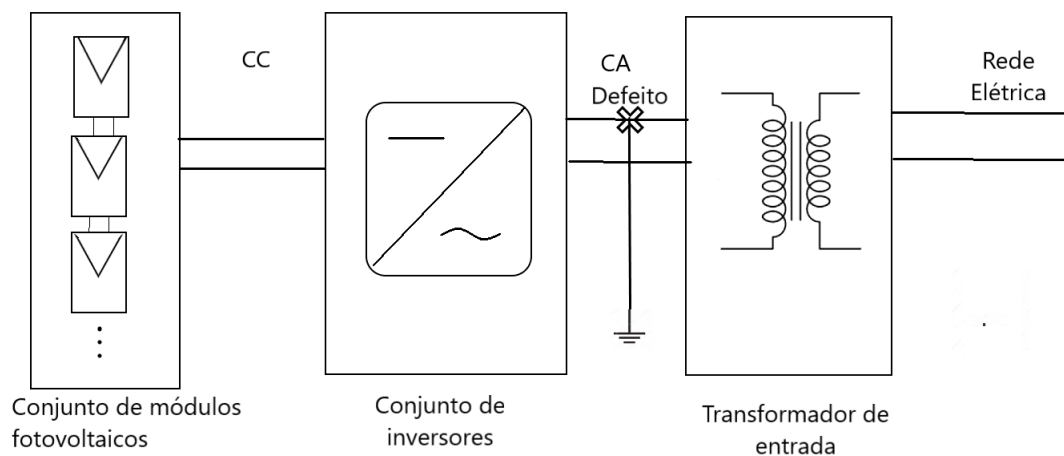
Máximo Potencial de Toque obtido na malha	43,97 V
Máximo Potencial de Toque suportado pelo homem	169 V
Máximo Potencial de Passo obtido na malha	22,9 V
Máximo Potencial de Passo suportado pelo homem	184 V

Portanto, conclui-se que o sistema de malha está adequado, mantendo o ser humano seguro em relação aos acidentes envolvendo potencial de toque e passo.

3.4.3 Sistema de proteção para lado CA - Caso 2

Para o caso 2 foi considerado um defeito que irá gerar um curto-circuito no lado de corrente alternada do circuito, conforme representado na Figura 37. Para esse projeto foi considerado que toda a corrente a ser drenada pelo aterramento é proveniente da rede elétrica e dos painéis fotovoltaicos.

Figura 37: Local do defeito no diagrama.



3.4.3.1 Cálculo da corrente de curto-circuito - Caso 2

Nesta seção serão apresentados os passos para determinar a corrente de falta, pois a corrente de curto-circuito fornecida pela concessionária está no lado de alta tensão do

transformador e a falta ocorre no lado de baixa tensão.

Ê Dados do transformador.

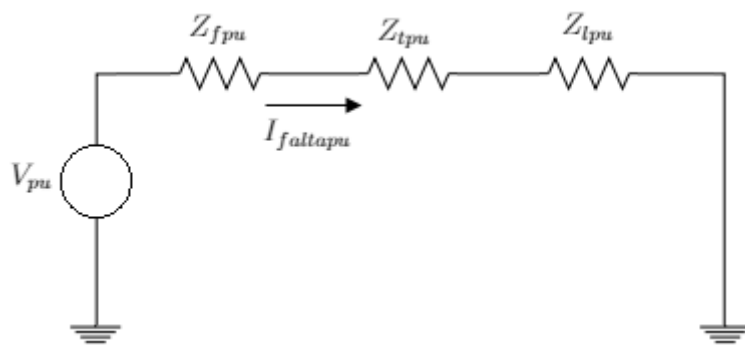
- Potência: $750kVA$
- Tensão no lado de alta: $13800V$
- Tensão no lado de baixa: $220V$
- Impedância: $4,84\%$

Ê Dados da concessionária.

- Tensão nominal: $11900V$
- Corrente de curto-circuito: $5661A$
- Impedância até o ponto: $(0,2822 + j1,1805)\Omega$
- Impedância até o ponto em módulo: $1,214\Omega$

Para facilitar os cálculos, todos os dados do transformador e da concessionária são passados para o sistema por unidade (pu), para assim poder eliminar o transformador, resultando em um circuito simplificado somente com fonte e impedâncias (impedância de linha, impedância de falta e impedância do transformador). A Figura 38 mostra o circuito após passar para o sistema por unidade.

Figura 38: Circuito simplificado.



Para determinar as bases apresentadas nas Tabelas 18 e 19, considerou-se como base primária a potência ($750kVA$ para o transformador e $100MVA$ para a rede elétrica) e a tensão nominal ($13,8kV$ para o transformador e $11,9kV$ para a rede elétrica), e, como base secundária a impedância e corrente, calculados conforme as Equações 3.9 e 3.8.

$$I_b = \sqrt{\frac{S_b}{3V_b}} \quad [A] \quad (3.8)$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad [\Omega] \quad (3.9)$$

Onde:

I_b : Corrente base $[A]$.

S_b : Potência base $[VA]$.

V_b : Tensão base $[V]$.

Z_b : Impedância base $[\Omega]$.

Tabela 18: Bases utilizadas no transformador.

V_b	13800V
S_b	750kVA
Z_b	253,92 Ω

Tabela 19: Bases utilizadas.

Rede	Alta tensão	Baixa tensão
V_b	11900V	220V
S_b	100MVA	100MVA
Z_b	1,416 Ω	4,84 $\times 10^{-4}\Omega$
I_b	4851,7A	262,4kA

Com os valores bases, os dados do transformador e os dados da concessionária, é possível calcular as impedâncias em pu mostradas na Figura 38 e assim poder determinar a corrente de falta para o caso 2.

Como as bases do transformador e da rede elétrica são diferentes, é necessário fazer mudança de base conforme a Equação 3.10.

$$Z_{\text{novo}} = Z_{\text{antigo}} \cdot \frac{S_{\text{novo}}}{S_{\text{antigo}}} \cdot \left(\frac{V_{\text{antigo}}}{V_{\text{novo}}} \right)^2 \quad (3.10)$$

Onde:

Z_{novo} : Impedância na base nova $[pu]$.

Z_{antigo} : Impedância na base antiga $[pu]$.

S_{novo} : Potência na base nova $[VA]$.

S_{antigo} : Potência na base antiga $[VA]$.

V_{novo} : Tensão na base nova $[V]$.

V_{antigo} : Tensão na base antiga $[V]$.

Utilizando 3.10, tem-se, como resultado para a impedância do transformador (Z_{tpu}), $8,679pu$.

$$Z_{\text{novo}} = Z_{\text{tpu}} = 0,0484 \cdot \frac{100}{0,75} \cdot \left(\frac{13800}{11900} \right)^2 = 8,679pu$$

A impedância de falta em pu é calculada conforme a Equação 3.11:

$$Z_{\text{fpu}} = \frac{1}{I_{\text{ccpu}}} \quad (3.11)$$

Onde:

Z_{fpu} : Impedância de falta [pu].

I_{ccpu} : Corrente de curto-circuito [pu].

A corrente de curto-circuito em pu é calculado conforme a Equação 3.12:

$$I_{\text{ccpu}} = \frac{I_{\text{cc}}}{I_{\text{b}}} = \frac{5661}{4851,7} = 1,167pu \quad (3.12)$$

Onde:

I_{ccpu} : Corrente de curto-circuito [pu].

I_{cc} : Corrente de curto-circuito [A].

I_{b} : Corrente base [A].

$$Z_{\text{fpu}} = \frac{1}{1,167} = 0,857pu \quad (3.13)$$

A impedância da linha em pu é calculado conforme a Equação 3.14:

$$Z_{\text{ipu}} = \frac{Z_{\text{l}}}{Z_{\text{b}}} = \frac{1,214}{1,416} = 0,857pu \quad (3.14)$$

Onde:

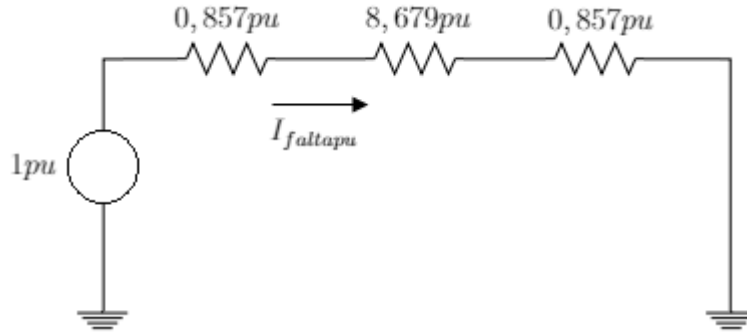
Z_{ipu} : Impedância da linha [pu].

Z_{l} : Impedância da linha [Ω].

Z_{b} : Impedância base [Ω].

A Figura 39 mostra o circuito simplificado com os valores em pu.

Figura 39: Circuito simplificado com os valores em pu.



$$I_{faltapu} = \frac{1}{0,857 + 8,679 + 0,857} = 0,096pu \quad (3.15)$$

Finalmente, para encontrar a corrente real de falta, basta multiplicar a corrente de falta em pu pela corrente base e, como a falta ocorre no lado de baixa tensão do transformador, a corrente base utilizada para determinar a corrente de falta é $262,4kA$.

$$|I_{falta}| = 0,096 \times 262,4 \times 10^3 = 25,19kA \quad (3.16)$$

3.4.3.2 Dimensionamento do condutor - defeito lado CA

Para o dimensionamento do condutor, foi escolhido o conector cavilhado com juntas de bronze de conexão tradicional por aperto, cuja temperatura máxima permissível é de 250° . Considerando todas as outras formas de conexão, essa é a que produz o resultado com maior seção transversal do condutor.

A conexão do cabo é feita por conexão cavilhada e a dimensão do seu cabo foi calculada em $63,87mm^2$. Então, estipula-se cabo de $70mm^2$ para o cabo de ligação, conforme dimensionamento mínimo para cabos de ligação.

Da mesma forma, o cabo da malha de aterramento é calculado, porém, considerando a divisão da corrente pela malha. A corrente que escoar na malha é considerada como 60% da corrente máxima de falta devido a ao escoamento da corrente pela malha.

Então, a dimensão da seção transversal do cabo da malha de aterramento foi calculado em $38,32mm^2$. Então, foi estipulado o condutor da malha de $40mm^2$.

Tabela 20: Resultados finais do dimensionamento dos condutores.

Corrente de defeito (I_{falta})	25190 A
Corrente escoada na malha ($I_{faltaMalha}$)	15114 A
Seção cabo de conexão ($S_{conexao}$)	70 mm^2
Seção condutor da malha (S_{malha})	40 mm^2

3.4.3.3 Dimensionamento da malha - defeito lado CA

Os comprimentos laterais das malhas A e B foram de $40m$ por $50m$ e o espaçamento entre os condutores da malha são de $2,5m$. Além disso, foram adicionadas 16 hastes de $2,5m$ na periferia de cada malha A e B. A resistência de aterramento das malhas A e B, individualmente, é de $4,37\Omega$. Sabendo que o modelo de cálculo de aterramento de malhas só é válido para profundidade $0,25m \leq h \leq 2,5m$, escolhe-se por praticidade $h = 1m$.

Além disso, foi criada a malha C, análoga às malhas A e B, porém com menores dimensões. Os comprimentos laterais da malha C é $40m$ por $25m$ e o espaçamento entre os condutores da malha é $2,5m$. Além disso, foram adicionadas 12 hastes de $2,5m$ na periferia das malhas. A resistência de aterramento da malha C é de $6,23\Omega$ e a profundidade da malha C também é de $h = 1m$.

As malhas A, B e C serão conectadas com o mesmo cabo condutor da estrutura da malha, fazendo com que a resistência final da malha seja menor ainda, melhorando a eficiência do aterramento. Conforme norma ABNT NBR 5410, pede-se no máximo resistência de aterramento de 10Ω . A Figura 40 mostra a configuração das malhas no estacionamento do centro de convenções da USP São Carlos Campus II.

Figura 40: Localização das malhas e hastes no estacionamento do campus II da USP São Carlos.

Por fim, o resumo das dimensões da malhas e hastes está mostrada na Tabela 21.

Tabela 21: Resultados finais do dimensionamento da malha.

Comprimento da Malha A e B	40m
Largura da Malha A e B	50m
Comprimento da Malha C	40m
Largura da Malha C	25m
Espaçamento entre condutores das malhas A,B e C	2, 5m
Profundidade das malhas A, B e C	1m.
Número de hastes das malhas A e B	16
Número de hastes da malha C	12
Profundidade das hastes das malhas A,B e C	2, 5m.
Resistência individual das malhas A e B	4, 37Ω.
Resistência individual da malha C	6, 23Ω.

3.4.3.4 Cálculo tensão de passo e toque - Caso 2

A seguir será apresentado os valores máximos de potencial de toque e passo que o ser humano poderia suportar sem ocorrer fibrilação no coração para o caso 2, onde a corrente de defeito é 21900A. Para esse caso foi considerado que o estacionamento será recoberto com uma camada de asfalto, ao invés do atual briquete (concreto). Foi decidido recobrir o estacionamento pois a resistência superficial do asfalto molhado (10000Wm) é muito maior que do concreto molhado (20Wm), conforme Figura 36.

Os sistemas de proteção com relé geralmente levam cerca de 0,2s para serem acionados. Por isso, o tempo máximo que uma pessoa estará sujeita a um choque elétrico devido ao defeito, é de 0,2s. Com o tempo de defeito e utilizando a Equação 2.20, é possível calcular a corrente de choque que uma pessoa suporta sem a ocorrência de fibrilação no coração.

Considerando a resistividade superficial do solo (ρ_s) asfalto molhado igual a 10000Wm, pode-se calcular o potencial de toque máximo suportado pelo homem conforme Equação 2.22:

$$V_{\text{toqueMaximo}} = \frac{116 \sqrt[3]{0,174\rho_s}}{0,2} = 4150V \quad (3.17)$$

Da mesma forma, a tensão de passo é obtida pela Equação 2.24.

$$V_{\text{PassoMaximo}} = \frac{116 \sqrt[3]{0,696\rho_s}}{0,2} = 15822V \quad (3.18)$$

Utilizando a Equação 2.34, obtém-se uma tensão de toque na periferia de malha durante o defeito de 4076V.

Utilizando a Equação 2.38, obtém-se uma tensão de passo na periferia durante o defeito de 3384V.

O cálculo para o potencial de toque e de passo são calculados para a borda da malha, pois é o máximo valor possível de tensão. O máximo potencial de toque obtido quando houver uma falha é de $4076V$ e o máximo potencial de toque suportado pelo homem é de $4150V$. Da mesma forma, o máximo potencial de passo obtido quando houver uma falha é de $3384V$ e o máximo potencial de passo suportado pelo homem é de $15822V$.

Tabela 22: Especificações de potenciais de passo e toque.

Máximo Potencial de Toque obtido na malha	$4076 V$
Máximo Potencial de Toque suportado pelo homem	$4150 V$
Máximo Potencial de Passo obtido na malha	$3384V V$
Máximo Potencial de Passo suportado pelo homem	$15822 V$

Portanto, conclui-se que o sistema de malha está adequado, mantendo o ser humano seguro em relação aos acidentes envolvendo potencial de toque e passo.

4 CONCLUSÃO

Conforme necessidade de proteção elétrica aos equipamentos e seres humanos, foi dimensionado duas propostas de aterramento elétrico: hastes paralelas e malha de aterramento. Então a primeira etapa para idealização do projeto foi a obtenção das características elétricas do solo para obtenção do perfil de resistividade elétrica do solo. Então, a partir do método de Wenner, 4 medições foram realizadas no local da futura instalação do Estacionamento solar e foi obtida uma resistividade condizente da literatura.

Posteriormente, foi realizado um projeto com hastes paralelas conectadas para proteção elétrica. Utilizou-se de comprimento 2,5m, diâmetro 0,015m e 18 hastes com espaçamento de 4m obtendo uma resistência equivalente de 21,33 Ω . Como esse valor de resistência estava acima da norma brasileira NBR 14039, resolveu-se adicionar um outro sistema de hastes paralelas e interligar os sistemas.

Então, adicionando mais um grupo de hastes paralelas, interligando esses as hastes e otimizando o sistema, obtemos uma resistência total equivalente de 9,47 Ω , atendendo ao limite máximo da norma brasileira de 10 Ω .

Foi proposta também outro projeto de aterramento, mais eficiente que o anterior, o aterramento em malhas. Utilizando toda a área disponível do estacionamento e observando os locais com tubulação hidráulica, foi possível dimensionar três malhas de aterramento interligadas para o local. Para o projeto foi considerado 2 casos: defeito no circuito CC ocasionando uma corrente de falta proveniente unicamente dos módulos fotovoltaicos e o caso 2, com uma falha no lado CA do circuito com corrente de falta proveniente da rede elétrica. Para o caso 1 foi proposto três malhas idênticas com dimensões de 30m de comprimento por 40m de largura. Com o resultado, foi possível obter para cada malha individual uma resistência elétrica de 5,68 Ω . Além disso, o máximo potencial de toque obtido na malha é de 43,97V e máximo potencial de toque suportado pelo homem é de 169V. Também, máximo potencial de passo obtido na malha é de 22,9V e o máximo potencial de passo suportado pelo homem é de 184V. Dessa forma, as malhas atingem o valor de resistência mínima exigido pela norma brasileira e os valores de tensão de toque e passo da malha estão dentro dos limites seguros para o ser humano, conforme Tabela 12.

Para o caso 2, foi proposto 2 malhas idênticas de 40m de comprimento por 50m de largura e uma malha de 40m de comprimento por 25m. Além disso, foram adicionadas 44 hastes de 2,5m na periferia das três malhas. Por fim, as malhas foram conectadas obtendo assim um valor de resistência elétrica mínima de 4,37 Ω . Além disso, máximo potencial de toque obtido na malha é de 4076V e máximo potencial de toque suportado pelo homem é de 4150V. Também, máximo potencial de passo obtido na malha é de 3384V e o máximo

potencial de passo suportado pelo homem é de 15822V. Dessa forma, as malhas atingem o valor de resistência mínima exigido pela norma brasileira e os valores de tensão de toque e passo da malha estão dentro dos limites seguros para o ser humano.

Por fim, analisando os projetos apresentados, nota-se a viabilidade para a instalação de ambos. Os projetos de aterramentos adequassem a norma ao atingir a resistência de 10Ω . Além disso, o projeto de aterramento assegura proteção às máquinas e aos seres humanos. Sendo assim, é evidente a aptidão dos projetos para serem aplicados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão. Rio de Janeiro, 2003. 65 p.
- _____. **NBR 15749**: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, 2009. 49 p.
- _____. **NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - requisitos de projeto. Rio de Janeiro, 2019. 65 p.
- ESPECIAL FIEE 2011. O setor elétrico, 2011. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2011/Artigos%20de%20Periodicos/modenaprojetoIII.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- INFOGRÁFICO ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2019. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: 17 out. 2019.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**: Ieee power and energy society. New York, 2015. 206 p.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. [S.l.]: Sagra-DC Luzzatto, 1992.
- MANUAL de instruções. Instrutempo instrumentos de medição LTDA. Disponível em: <http://instrutemp.provisorio.ws/2010_09/ITTMD%2020KW.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.
- TANIZAKA, E. C. S.; BERNARDO, V. P.; ZERRENER, V. **Projeto de instalação de um sistema fotovoltaico na área 2 do Campus USP São Carlos - FASE 1**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2018.