



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO DIEGO VARELO DE OLIVEIRA

**PROJETO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO E SPDA PARA ESTRUTURA
EDIFICADA: UM RETROFIT APLICADO A UMA EDIFICAÇÃO
ADMINISTRATIVA DA UFERSA**

MOSSORÓ – RN
2018

PAULO DIEGO VARELO DE OLIVEIRA

**PROJETO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO E SPDA PARA ESTRUTURA
EDIFICADA: UM RETROFIT APLICADO A UMA EDIFICAÇÃO
ADMINISTRATIVA DA UFERSA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade.

**MOSSORÓ – RN
2018**

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48i Oliveira, Paulo Diego Varelo de.

PROJETO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO E SPDA PARA
ESTRUTURAS EDIFICADAS: UM RETROFIT APLICADO EM UMA
EDIFICAÇÃO DA UFERSA, CAMPUS LESTE / Paulo Diego
Varelo de Oliveira. - 2018.

117 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.
Monografia (graduação) - Universidade Federal

Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2018.

1. Aterramento. 2. SPDA. 3. Proteção. 4.
Prédios públicos. I. Andrade, Humberto, orient.
II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PAULO DIEGO VARELO DE OLIVEIRA

**PROJETO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO E SPDA PARA ESTRUTURA
EDIFICADA: UM RETROFIT APLICADO A UMA EDIFICAÇÃO
ADMINISTRATIVA DA UFRSA**

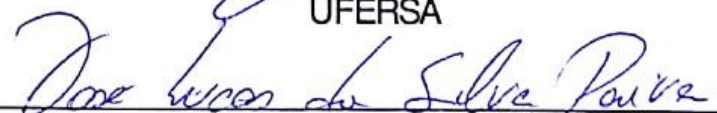
Monografia apresentada a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

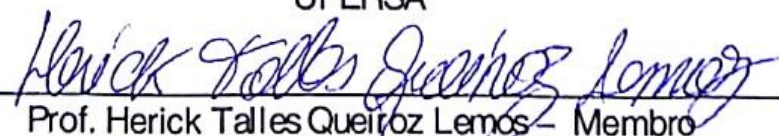
APROVADA EM:

BANCA EXAMINADORA

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.



Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade – Presidente
UFRSA

Prof. Dr. José Lucas da Silva Paiva – Membro
UFRSA

Prof. Herick Talles Queiroz Lemos – Membro
UFRSA

Mossoró, 12 de setembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais-avós, Françuar Gomes (*in memorian*) e Francisca Maria (Dona Mica), por sempre apoiarem as minhas escolhas e por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim desde sempre;

Aos meus pais, Paulo e Lucicleide, por todo incentivo e torcida que sempre tiveram por mim;

Aos meus irmãos Françuar Neto e Rita por tudo que vivemos juntos;

Às minhas tias Francisca Batista e Paula Érica, como também a todos os meus tios, pois os tenho como espelhos em minha vida;

Ao meu orientador Professor Dr. Humberto Dionísio de Andrade, por todo embasamento e incentivo para a realização deste presente trabalho. Também ressalto meu agradecer por toda paciência e amizade durante essa jornada, sem contar as cobranças que foram de muita importância;

Aos meus irmãos de outras mães Kaio César e Camilo de Lelis pelo apoio mútuo que é mantido;

A todos meus professores, familiares e amigos, pois todos foram de grande incentivo para minha formação;

Um agradecimento a UFERSA por disponibilizar estrutura e ferramentas essenciais para o aprendizado.

EPÍGRAFE

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim”

(Nikola Tesla)

RESUMO

Esta monografia teve como objetivo geral proporcionar um retrofit na edificação Pedro Fernandes Pereira, através da realização dos projetos de aterramento e Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Edificação esta pertencente a Universidade Federal Rural do Semi Árido, Campus Central, Mossoró, Rio Grande do Norte. Para o desenvolvimento do trabalho foi feita uma análise da estrutura da edificação mencionada com finalidade de verificar suas dimensões para dar início ao estudo. Também foi realizada medições da resistividade do solo a fim se realizar a estratificação e com isso fazer o estudo de aterramento. Os resultados obtidos são importantes para a realização dos projetos, logo esses que são imprescindíveis para qualquer edificação de grande porte.

Palavras-Chave: Aterramento, SPDA, Resistividade, Proteção, Descargas Atmosféricas, Prédios públicos.

ABSTRACT

This monograph had as general objective to provide a retrofit in the Pedro Fernandes Pereira building, through the realization of the grounding projects and the System of Protection against Atmospheric Discharges. Edification belongs to Federal Rural University of Semi Arid, Central Campus, Mossoró, Rio Grande do Norte. For the development of the work, an analysis was made of the structure of the mentioned building with the purpose of verifying its dimensions to start the study. Soil resistivity measurements were also carried out in order to carry out the stratification and to do the grounding study. The results obtained are important for the accomplishment of the projects, soon those that are essential for any large building.

Keywords: Grounding, SPDA, Resistivity, Protection, Atmospheric Discharge, Public buildings.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Variação da resistividade em diferentes solos.....	22
Tabela 2- Espaçamento entre os Condutores de Descida.....	53
Tabela 3- Risco Tolerável	59
Tabela 4- Raio da esfera rolante em função ao nível de proteção	61
Tabela 5- Afastamento dos condutores da malha.....	62
Tabela 6- Lista de equipamentos SPDA.....	83
Tabela 7- Medição de Resistências	68
Tabela 8- Resistividades Medidas	68
Tabela 9- Média das Resistividades	69
Tabela 10- Valores para a_1	71
Tabela 11- Valores para a_1'	72
Tabela 13- Modelos de Hastes de Cobre	76
Tabela 14- Lista de Equipamentos para o Aterramento	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxo de dispersão de correntes em solo heterogêneo.....	23
Figura 2 - Esquema TN-S.....	25
Figura 3- Esquema TT.....	25
Figura 4- Linhas de corrente.....	27
Figura 5- Linhas de corrente e imagem.....	28
Figura 6- Esquema de ligação das quatro hastes.....	29
Figura 7- Método das imagens aplicado nas hastes.....	29
Figura 8- Método de Driven Hod.....	31
Figura 9- Solo dividido em camadas.....	32
Figura 10- Solo em duas camadas.....	32
Figura 11- Comportamento das curvas para K negativo.....	35
Figura 12- Comportamento das curvas para K positivo.....	35
Figura 13- Curvas para o solo de duas camadas.....	37
Figura 14- Método simplificado para a estratificação em duas camadas.....	38
Figura 15- Curva $M(a=h)$ versus K.....	39
Figura 16- Curva de solo com várias camadas.....	39
Figura 17- Haste em posição vertical cravada no solo.....	41
Figura 18- Zona de interferência das linhas equipotenciais.....	42
Figura 19- Superfícies equipotenciais em duas hastes paralelas.....	42
Figura 20- Parâmetros entre as hastes h e m.....	43
Figura 21- Hastes em paralelo.....	44
Figura 22- Hastes em triângulo.....	45
Figura 23- Sistema real de uma malha em triângulo.....	46
Figura 24- Curvas de Kxe.....	46
Figura 25- Sistema de uma malha em quadrado.....	47
Figura 26- Curvas de Kxe.....	47
Figura 27- Sistema de uma malha em quadrado cheio.....	48
Figura 28- Curvas de Kxe.....	49
Figura 29- Hastes em circunferência.....	49
Figura 30- Curvas de Kxe.....	50
Figura 31- Captor do Tipo Franklin.....	52
Figura 32- Descida não natural.....	53

Figura 33- Cabo de Proteção de Borda.....	54
Figura 34- Conectores e fixadores.....	55
Figura 35- Dispositivo de Proteção contra Surtos	56
Figura 36- Relação do ângulo de proteção em função da altura do captor	60
Figura 37- Imagem de Satélite.....	63
Figura 38- Terrômetro Minipa MTR-1520D.....	64
Figura 39- Seções dos condutores SPDA	66
Figura 40- Esquema da posição dos DPS's.....	82
Figura 41- Tabela de escolha do DPS	66
Figura 42- Esquema de ligação dos DPS's	66
Figura 43- Detalhe da Descida	67
Figura 44- Curva resistividade por espaçamento	70
Figura 45- Curva tocando no eixo das ordenadas.....	70
Figura 46- Curva para K positivo	71
Figura 47- Ponto de intersecção	73
Figura 48- Curva para K negativo	74
Figura 49- Solo Estratificado.....	75

APÊNDICES

APÊNDICE A- Memorial de Cálculo para Análise de Risco

APÊNDICE B- Folha 01/05

APÊNDICE C- Folha 02/05

APÊNDICE D- Folha 03/05

APÊNDICE E- Folha 04/05

APÊNDICE F- Folha 05/05

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos

ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

NBR – Norma Brasileira

RN – Rio Grande do Norte

SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi Árido

LISTA DE SÍMBOLOS

DR Densidade de raios por quilômetro quadrado anualmente

r Raio da esfera fictícia em metros (m)

H Altura da estrutura a ser protegida em metros (m)

h Altura do captor em relação a cobertura da estrutura (m)

R Raio do cone de proteção em metros (m)

α Ângulo de proteção em graus (°)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS	18
1.2. OBJETIVOS	19
1.2.1. Objetivo Geral	19
1.2.2. Objetivos Específicos.....	19
1.3. JUSTIFICATIVA	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. O ATERRAMENTO ELÉTRICO	21
2.2. RESISTIVIDADE DO SOLO	21
2.3. A INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO	23
2.4. SISTEMAS DE ATERRAMENTO.....	24
2.5. CLASSIFICAÇÃO DOS ESQUEMAS DE ATERRAMENTO EM BAIXA TENSÃO.....	24
2.6. PROJETO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO	26
2.7. MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO	26
2.7.1. Medições no local.....	27
2.7.2. Potencial em um ponto sob a superfície de um solo homogêneo	27
2.8. MÉTODO DE WENNER.....	28
2.9. MÉTODO DE DRIVEN ROD	30
2.10. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	31
2.10.1. Modelagem do solo de duas camadas	32
2.10.2. Aplicando a configuração de Wenner.....	33
2.11. MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DE DUAS CAMADAS USANDO CURVAS	34
2.12. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM DUAS CAMADAS USANDO MÉTODO SIMPLIFICADO	36
2.13. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO PELO MÉTODO DE PIRSON.....	39
2.14. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO	40
2.14.1. Dimensionamento de um Sistema de Aterramento de uma haste vertical	40
2.14.2. Interligação de hastes em paralelo	41

2.14.3.	Resistência equivalente de hastes paralelas	42
2.14.4.	Dimensionamento de um sistema de hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas.....	44
2.14.5.	Dimensionamento de um Sistema com Hastes em Triângulo.....	45
2.14.6.	Dimensionamento de um Sistema de Hastes em Quadrado Vazio.....	47
2.14.7.	Dimensionamento de um Sistema de Hastes em Quadrado Cheio	48
2.14.8.	Dimensionamento de Sistema de Hastes em Circunferência.....	49
2.15.	O SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESGARGAS ATMOSFÉRICAS	50
2.16.	OS TIPOS DE SPDA.....	51
2.17.	ELEMENTOS QUE FORMAM UM SPDA	51
2.17.1.	Subsistema de captadores	52
2.17.2.	Subsistema de descidas.....	52
2.17.3.	Anel de equipotencialização.....	54
2.17.4.	Fixação e conexão de condutores do SPDA.....	55
2.17.5.	Subsistema de aterramento.....	55
2.17.6.	Dispositivo de proteção contra surtos (DPS).....	56
2.18.	VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE UM SPDA	56
2.18.1.	Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas na estrutura	57
2.18.2.	Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto da estrutura	58
2.18.3.	Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas a uma linha conectada à estrutura	58
2.18.4.	Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura.....	58
2.18.5.	Risco Tolerável.....	59
2.19.	MÉTODOS E POSICIONAMENTOS DA CAPTAÇÃO DE UM SPDA.....	59
2.19.1.	Método do Ângulo de Proteção ou método de Franklin	60
2.19.2.	Método da esfera fictícia ou modelo eletrogeométrico	60

2.19.3. Método das malhas ou método da gaiola de Faraday	61
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	63
3.2. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	64
3.3. FUNCIONAMENTO DO TERRÔMETRO.....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1. DIMENSIONAMENTO DO SPDA.....	65
4.2. PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO	67
4.2.1. Medição da Resistividade do Solo	67
4.2.2. Estratificação do solo em duas camadas	69
4.2.3. Dimensionamento dos Sistema de Aterramento	75
5. CONCLUSÃO	86
6. REFERÊNCIAS	87
APÊNDICES	89
APÊNDICE A – Memorial de Cálculo para análise de Risco da edificação	90
1.1. RISCO DE VIDA DE PERDA HUMANA (R1).....	90
1.2. RISCO DE PERDAS DE SERVIÇO AO PÚBLICO (R2)	97
1.3. RISCO DE PERDAS DE PATRIMÔNIO CULTURAL	106
1.4. RISCO DE PERDA DE VALORES ECONÔMICOS (R4).....	109
1.5. AVALIAÇÃO FINAL DO RISCO	109
R1: risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes).....	110
R2: risco de perdas de serviço ao público.....	110
R3: risco de perdas de patrimônio cultural.....	110
1.6. SELEÇÃO DAS MEDIDAS DE PROTEÇÃO.....	110
R1: risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes).....	112
R2: risco de perdas de serviço ao público.....	112
APÊNDICE B- Folha 01/05	113
APÊNDICE C- Folha 02/05	114
APÊNDICE D- Folha 03/05	115

1. INTRODUÇÃO

É perceptível nos últimos anos, juntamente com desenvolvimento tecnológico, que a energia elétrica tem se tornado um recurso indispensável no dia-a-dia, seja nos setores comerciais, industriais, empresariais e também médios e pequenos consumidores, onde necessitam de energia para realização de suas atividades.

Devido à grande aglomeração proporcionada pelo desenvolvimento constante dos centros urbanos, a implementação de um sistema de aterramento e SPDA é de caráter imprescindível para habitação humana, sendo os mesmos responsáveis pela segurança e preservação de edificações assim como bens materiais e danos físicos a terceiros.

Os sistemas de aterramento possuem o objetivo de proteger pessoas, materiais e animais contra falhas provenientes do sistema elétrico. Falhas essas que normalmente podem vir a ocorrer em uma instalação, sejam elas pequenas fugas de corrente ou até mesmo arcos elétricos que podem ser gerados devido a fatores externos, onde podem vir a colocar em risco a vida de pessoas e equipamentos de valor que podem estar presentes na edificação.

É fundamental que o sistema de aterramento mereça um cuidado especial, pois é ele que irá garantir os limites dos níveis de segurança pessoal, como também garantir a continuidade e a correta operação de um Sistema de Energia Elétrica (KINDERMANN, 2002).

Com o passar dos anos, a ciência passou a compreender tais fenômenos atmosféricos e a desenvolver formas de se proteger dos seus efeitos destrutivos, dando o surgimento ao seguimento de estudos voltados a sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). A implantação de um SPDA está diretamente relacionado a níveis de proteção, pois edificações específicas necessitam de um nível de proteção específico.

Existem diferentes tipologias de SPDA e sistemas de aterramento elétrico, cada um proporcionando um nível de proteção adequado para a situação ou projeto que se queira desenvolver, logo será realizado neste trabalho, um projeto de um sistema de aterramento de hastes em quadrado vazio, juntamente com o projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, ambos inerentes a estrutura física do edifício Pedro Fernandes Pereira da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Leste, Mossoró- RN.

1.1. DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS

O Brasil é o país líder mundial na incidência de raios, registrando-se cerca de 50 milhões de descargas por ano de acordo com o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), que é ligado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estudos do Inpe (2016) mostram que raios

provocam aproximadamente 130 mortes e mais de 200 feridos por ano no nosso país e a cada 50 mortes por raio no mundo, uma é no Brasil. Todas essas frequentes incidências de descargas atmosféricas provocam prejuízos anuais da ordem de um bilhão de reais para o país. (INPE, 2016).

Este trabalho vem mostrar a grande importância de um Sistema de Aterramento e SPDA, pois eles são os grandes responsáveis por manter a segurança das pessoas e dos equipamentos em áreas energizadas.

Dessa forma, afim de garantir a segurança aplicada a estruturas públicas, este trabalho terá como interesse a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) do campus Leste em Mossoró, ao qual possui um amplo porte de edificações envolvendo pessoas e materiais de valor.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho propõe projetar um Sistema de Aterramento e um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas para o Edifício Pedro Fernandes Pereira, localizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus leste.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar medições de resistividade do solo;
- Realizar a estratificação do solo;
- Dimensionar os condutores de aterramento;
- Dimensionar os condutores do SPDA;
- Adequar o edifício aos padrões normativos, visando a proteção de suas instalações, equipamentos e pessoas.

1.3. JUSTIFICATIVA

É fato que faltas no sistema elétrico como também descargas atmosféricas podem gerar diversos danos, como também risco a equipamentos, patrimônio material ou até mesmo a vida de pessoas. Um prédio residencial, por exemplo, pode sofrer danos sérios se for atingido por uma descarga atmosférica ou surtos de tensão devido a faltas, inclusive com risco de incêndio, ou em menor dano, com a danificação de equipamentos. Para evitar esses riscos o caminho é adotar medidas adequadas de proteção e inspeção periódica.

A UFERSA, atualmente, possui o edifício Pedro Fernandes Pereira, onde não apresenta sistema de aterramento e nem SPDA em sua estrutura. Devido ao grande porte do mesmo e a existência de um grande fluxo de alunos e funcionários da instituição, tanto dentro do edifício quanto nos seus arredores, se faz necessária a realização dos projetos, como forma garantir a proteção de equipamentos, pessoas e até do próprio edifício.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O ATERRAMENTO ELÉTRICO

É certo que hoje a eletricidade se tornou indispensável, e através desse fenômeno surgem novas possibilidades e inovações que se tornam essenciais à vida humana. Porém a eletricidade pode vir a ser fonte de inúmeros acidentes, logo pode ser fatal quando em contato com seres humanos e animais. Para isso, instalações elétricas devem ser aterradas, garantindo o bom funcionamento dos equipamentos elétricos e a segurança pessoas e animais. Um bom sistema de aterramento é fundamental para solucionar problemas de instalação elétrica quanto aos equipamentos e demais dispositivos elétricos, assim evitando descargas acidentais e as dissipando no solo.

O aterramento é uma ligação intencional de parte eletricamente condutiva ao solo, através de um condutor elétrico. O que representa a eficácia ligação é o valor da resistência de aterramento, ou seja, quanto menor a resistência, melhor o aterramento (LEITE, 1996).

O ato de aterrar, junto com todo o processo e componentes envolvidos constituem o Sistema de Aterramento, ou seja, conjunto de todos os eletrodos e condutores, que podem estar interligados ou não, assim como suas partes metálicas que atuam diretamente na função de aterramento (para-raios, cabos, tubulações e outros) (ABNT NBR15751, 2009).

O sistema de aterramento está diretamente relacionado com a proteção das instalações elétricas contra descargas atmosféricas, proteção dos indivíduos contra contato acidental com as partes metálicas energizada das instalações e equalização do potencial em toda a área do projeto. Logo protegendo tanto as instalações como as pessoas de acidentes e lesões que possam acontecer durante uma falta fase-terra. Conjuntamente os sistemas de aterramento visam as menores resistências durante as correntes de falta, manter os potenciais das correntes de falta dentro dos limites de segurança estabelecidos e tornar os equipamentos de proteção sensíveis às falhas e que sejam capazes de isolá-las rapidamente (MAMEDE, 2013).

Segundo Flandoli (2017), outra importante medida para manter a segurança é a realização manutenção periódica do aterramento ou inspeção do mesmo evitando danos em equipamento conectado nesta malha garantindo o funcionamento da instalação elétrica.

2.2. RESISTIVIDADE DO SOLO

São vários fatores que podem influenciar diretamente a resistividade do solo. Entre eles podem ressaltar: tipo de solo, mistura de diversos tipos de solos, solos constituídos por camadas

estratificadas com profundidades e materiais distintos, teor de umidade, temperatura, compactação e pressão, composição dos sais contidos na água retida nos solos e concentração de sais dissolvidos na água retida (KINDERMANN, 2002).

Logo as combinações de diferentes características resultam em solos caracteristicamente diversos, resultando assim em valores de resistividade distintos. Assim solos que possam apresentar semelhanças, ou seja, aparentemente iguais possuem resistividades totalmente diferentes. A Tabela 1 mostra a variação da resistividade para solos de naturezas distintas.

Tabela 1- Variação da resistividade em diferentes solos

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 50% umidade	330
Areia molhada	1300
Areia seca	3000 a 8000
Calcário compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

Fonte: Kindermann, 2002 p. 03.

De acordo com Kindermann (2002), a resistividade varia acentuadamente com a umidade do solo, essa variação ocorre devido a condução iônica das cargas elétricas no solo. Com uma maior umidade uma maior dissolução de sais presentes no solo é provocada, logo formando-se assim um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente.

Dessa forma pode-se concluir que a resistividade do solo varia em períodos do ano que são os períodos de seca no verão e os períodos de chuva no inverno. Assim os aterramentos melhoram sua condução nos períodos de chuva e pioram no período de seca.

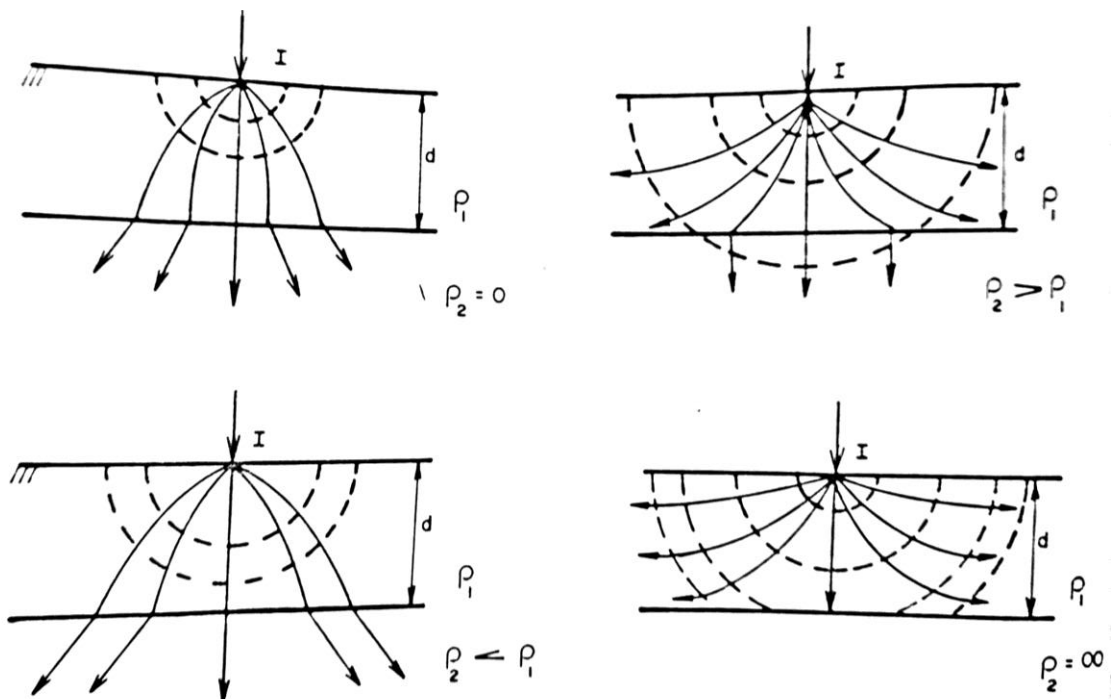
2.3. A INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO

Os solos, na sua maioria, não são homogêneos e sim formados por diversas camadas com resistividades e profundidades diferentes. Assim o modelo de solo de camadas horizontais é adequado para representar o modelo físico de um solo não conhecido, pois devido a formação geológica as camadas, em sua maioria, são paralelas e horizontais com a superfície do solo (WENNER, 1916).

Segundo Kindermann (2002), devido a falhas geológicas, existem casos em que as camadas se apresentam inclinadas e até verticais. Porém devido a esses casos serem menos típicos, estudos apresentados para pesquisa do perfil do solo as consideram aproximadamente horizontais.

A Figura 1 apresenta o comportamento do fluxo de dispersão de correntes em um solo em duas camadas.

Figura 1- Fluxo de dispersão de correntes em solo heterogêneo



Fonte: Kindermann, 2002 p. 06

De acordo com a variação das diferentes resistividades das camadas do solo, tem-se à variação na dispersão da corrente como pode ser visto na Figura 1. As linhas pontilhadas são as superfícies equipotenciais e as linhas cheias são as correntes elétricas.

2.4. SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Os diferentes tipos de configuração de aterramento possuem uma só finalidade que é a de garantir a melhor ligação com a terra (KINDERMANN, 2002).

As principais configurações existentes são:

- Haste simples cravada no solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulo;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculos;
- Placas condutoras enterradas no solo;
- Fios ou cabos enterrados no solo, formando diversos arranjos, tais como:
 - i. estendido em vala;
 - ii. em cruz;
 - iii. em estrela;
 - iv. quadriculados, formando uma malha de terra.

2.5. CLASSIFICAÇÃO DOS ESQUEMAS DE ATERRAMENTO EM BAIXA TENSÃO

De acordo com a ABNT NBR5410 (2004) a classificação é feita por letras, como segue:

A primeira letra especifica a situação da alimentação em relação à terra. Onde são elas:

- **T**- A alimentação (lado fonte) tem um ponto diretamente aterrado;
- **N**- Isolação de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento através de uma impedância.

A segunda letra especifica a situação das massas ou carcaças das cargas ou dos equipamentos em relação à terra. Onde são elas:

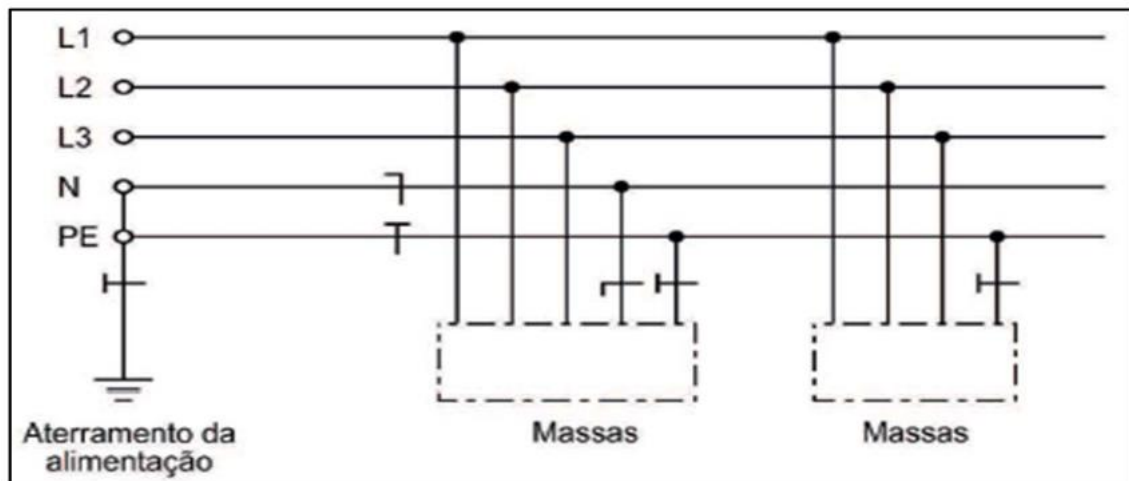
- **T**- Massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual da fonte de alimentação;
- **N**- Massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado (em corrente alternada normalmente é o ponto neutro);
- **I**- Massa isolada, isto é, não aterrado.

A terceira letra relaciona a forma de ligação do aterramento da massa do equipamento, usando o sistema de aterramento da fonte. Onde são:

- S- Separado, ou seja, o aterramento da massa é feito com um fio (PE) separado do neutro;
- C- Comum, ou seja, o aterramento da massa do equipamento é feito usando o fio neutro (PEN).

O sistema TN-S é aquele no qual o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos, como é mostrado na Figura 2.

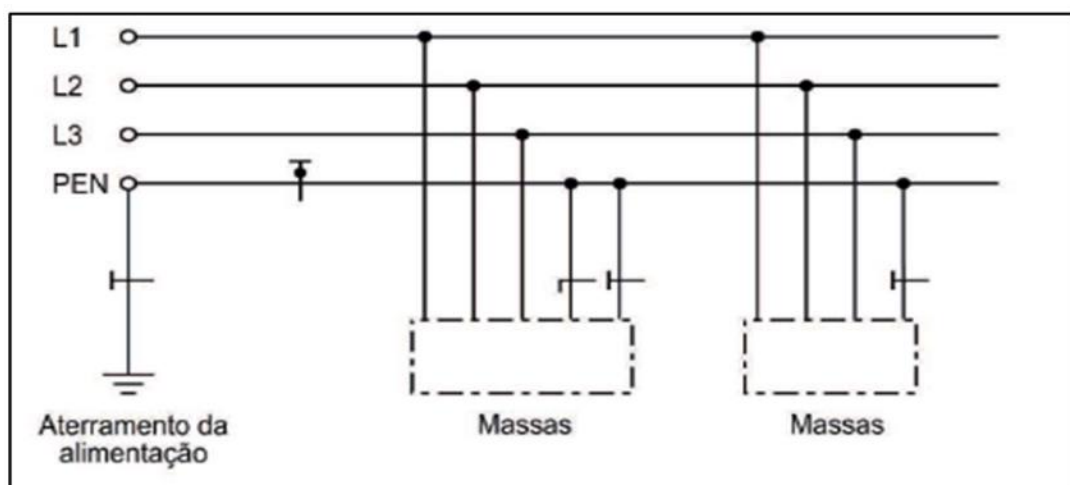
Figura 2 - Esquema TN-S



Fonte: ABNT NBR5410, 2004.

A Figura 3 mostra o esquema TT, onde o mesmo possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodos de aterramento, eletricamente distinto do eletrodo de aterramento da alimentação.

Figura 3- Esquema TT



Fonte: ABNT NBR5410, 2004.

2.6. PROJETO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO

Para se obter um bom projeto de um sistema de aterramento é preciso levar em consideração diversos fatores. Pois somente com confiável sistema de aterramento é possível conectar as massas dos equipamentos junto às estruturas de proteção ao sistema e realmente prover um caminho seguro para as correntes provenientes de faltas.

De acordo com Pinheiro (2013), para projetar adequadamente o sistema de aterramento devem-se seguir as seguintes etapas:

- a. Definir o local de aterramento;
- b. Providenciar várias medições no local (umidade e resistividade do solo);
- c. Fazer a estratificação do solo nas suas respectivas camadas;
- d. Definir o tipo de sistema de aterramento desejado;
- e. Calcular a resistividade aparente do solo para o sistema de aterramento definido;
- f. Dimensionar o sistema de aterramento, levando em conta a sensibilidade dos equipamentos de proteção e os limites de segurança pessoal.

O correto dimensionamento do sistema de aterramento promove, ainda sim, outras finalidades muito importantes e utilizadas, tais como:

- Provimento do neutro (ponto de referência) de transformadores trifásicos e de redes de distribuição;
- Proteção contra interferência eletromagnética;
- Caminho alternativo e seguro das descargas atmosféricas para a terra.

2.7. MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

A posição dos equipamentos elétricos mais importantes que estão conectados ao sistema elétrico definem a localização do sistema de aterramento. Na distribuição de energia elétrica, os aterramentos estão localizados nos locais da instalação dos equipamentos tais como: religador, seccionador, transformador, chaves e regulador de tensão. Assim o sistema de aterramento é condicionado ao sistema de energia elétrica ou aos elementos importantes do sistema (KINDERMANN, 2002).

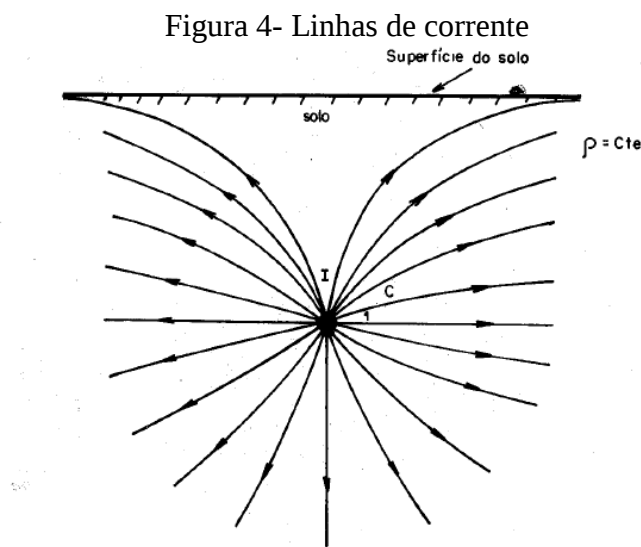
2.7.1. Medições no local

Após a definição do local da instalação do sistema de aterramento, devem-se ser realizadas as medições para se obter as informações necessárias para elaboração do projeto. A resistividade do solo depende do tamanho do sistema de aterramento, ou seja, quanto maior a área envolvida pelo aterramento, as correntes elétricas atingem camadas mais profundas.

Logo deve-se conhecer a resistividade aparente que o solo apresenta para assim efetuar o projeto do sistema de aterramento. Desta forma a resistividade do solo, como também suas características são dados fundamentais para os estudos de aterramento. Através das medições em campo é feito o levantamento dos valores da resistividade, onde utiliza-se métodos de prospecção geoeletricos, onde o mais utilizado é o método de Wenner.

2.7.2. Potencial em um ponto sob a superfície de um solo homogêneo

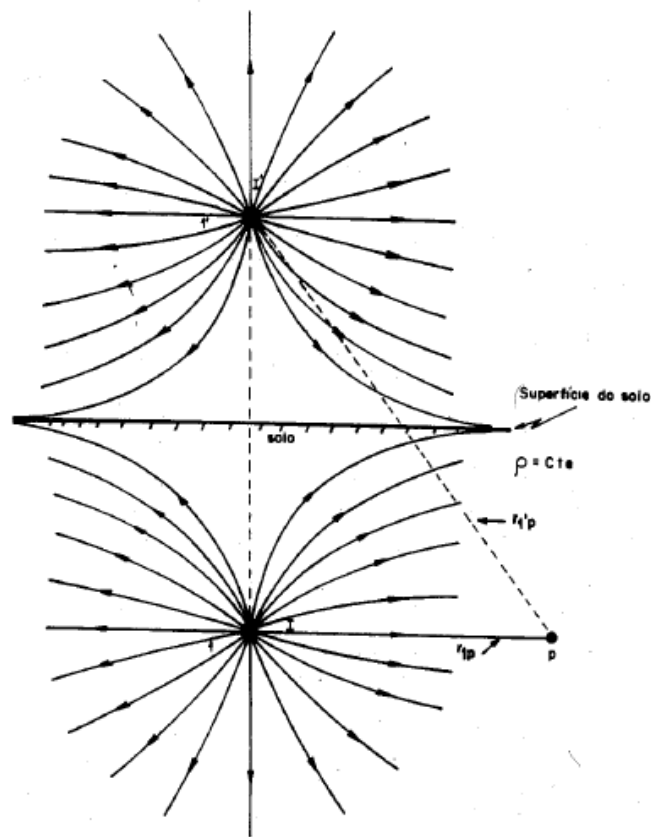
Por Kindermann (2002), tendo-se um ponto “c” sob a superfície de um solo homogêneo, onde produz uma corrente elétrica I , produz um fluxo de corrente como mostrado Figura 4.



Fonte: Kindermann, 2002 p. 16.

Logo o comportamento das linhas de corrente se comportam como se existisse uma fonte simétrica em relação a superfície do solo, como mostra a Figura 5.

Figura 5- Linhas de corrente e imagem



Fonte: Kindermann, 2002 p. 17.

Portanto para achar o potencial de um ponto em relação ao infinito, utiliza-se a superposição do efeito de cada fonte da corrente individualmente, considerando que o solo seja homogêneo, inclusive o da sua imagem. Logo a Equação 1, calcula o potencial em um ponto P.

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r_{1P}} + \frac{\rho I'}{4\pi r'_{1P}} \quad (1)$$

Como, acha-se a Equação 2:

$$I' = I$$

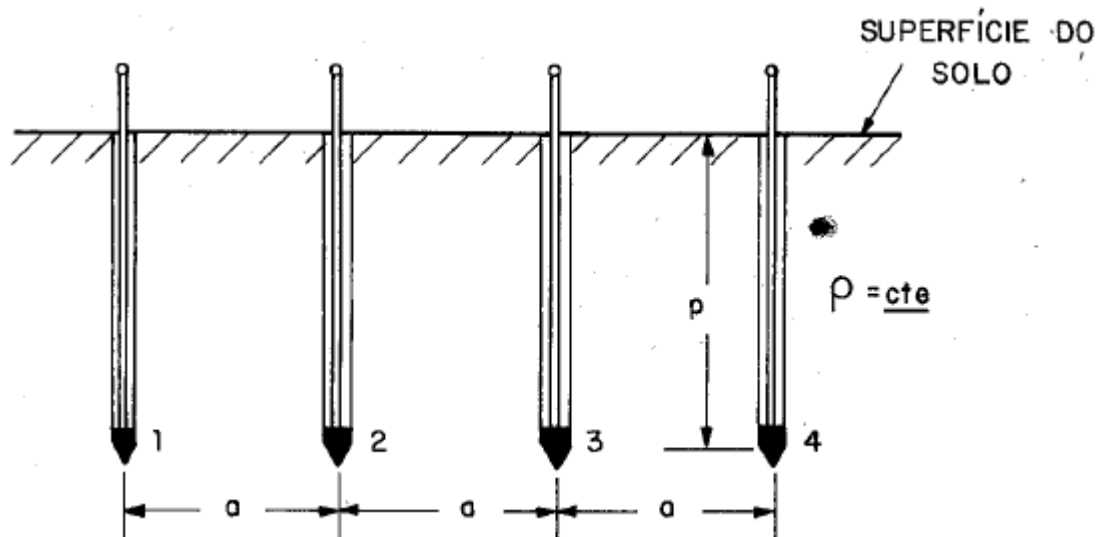
$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r'_{1p}} \right) \quad (2)$$

2.8. MÉTODO DE WENNER

Para a realização do método utiliza-se um Megger ou Terrômetro. Este instrumento de medição de resistência possui quatro terminais, sendo dois destinados para a corrente e dois

para potencial elétrico. Os quatro eletrodos devem ser alinhados e cravados com a mesma profundidade, mostrado na Figura 6.

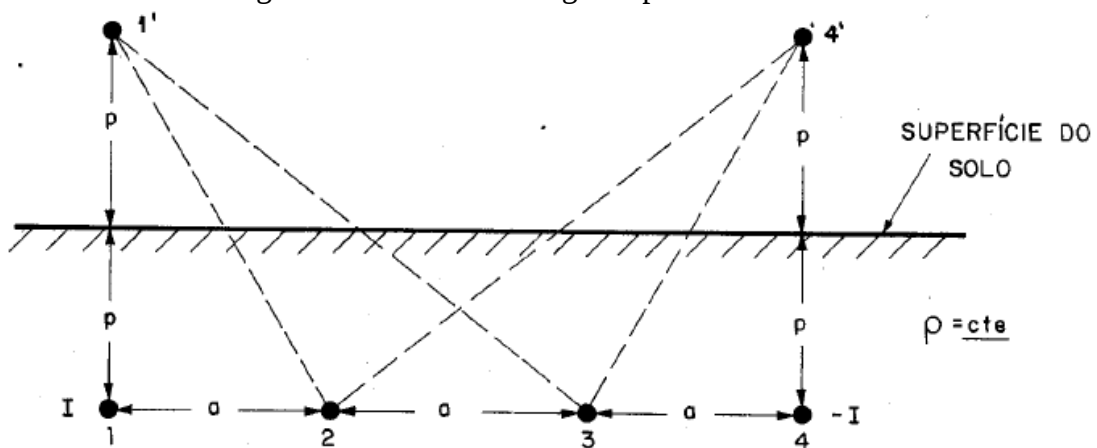
Figura 6- Esquema de ligação das quatro hastes



Fonte: Kindermann, 2002 p. 18.

A corrente elétrica é emitida pela primeira haste (ponto 1) e coletada no ponto 4 ou na quarta haste. Logo a corrente que passa entre os pontos 1 e 2, produz um potencial nas hastes 2 e 3. Usando o método das imagens, visto na Figura 7 (KINDERMANN, 2002).

Figura 7- Método das imagens aplicado nas hastes



Fonte: Kindermann, 2002 p. 19.

Onde,

R - Leitura da resistência em Ω no Megger;

a - Espaçamento entre as hastes cravadas;

p - Profundidade das hastes cravadas no solo.

O potencial na segunda haste é:

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3)$$

O potencial na terceira haste é:

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (4)$$

Desta forma, a diferença de potencial entre os pontos 2 e 3, é dado pela diferença entres eles:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (5)$$

O valor da resistência elétrica R do solo é dado pela divisão da diferença de potencial V₂₃ pela corrente I, para uma profundidade de penetração da corrente elétrica. Logo R é dado por:

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (6)$$

Então a resistividade do solo é dada por:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega.m] \quad (7)$$

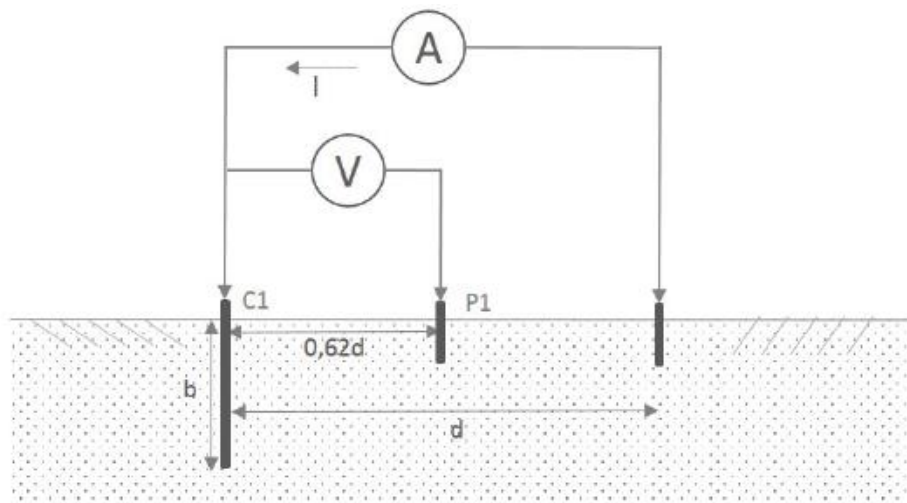
Para um grande afastamento entre as hastes, para $a > 20p$, a fórmula se reduz.

$$\rho = 2\pi a R \quad [\Omega.m] \quad (8)$$

2.9. MÉTODO DE DRIVEN ROD

O método Driven Rod, consiste em utilizar o método da queda de potencial para determinar a resistividade do solo a partir da medição da resistência de terra de uma haste vertical cravada, como pode ser vista na Figura 8.

Figura 8- Método de Driven Rod



Fonte: Flores, 2014 p. 21.

Este método tem como objetivo medir a resistência de terra em uma haste cravada e para isso é aplicada uma corrente alternada entre esse mesmo eletrodo e um eletrodo de referência colocado a uma determinada distância (FLORES, 2014).

Variando as distâncias se obtém valores de resistividades distintas. A resistividade do solo pode então ser calculada através da Equação 9.

$$\rho = \frac{(2\pi bR)}{\ln\left(\frac{2b}{d}\right)} \quad (9)$$

Onde:

ρ - resistividade do solo ($\Omega.m$);

R- Resistência de terra medida no eletrodo (m);

b- Comprimento do eletrodo em contato com o solo (m);

d- espaçamentos entre os eletrodos de corrente (m).

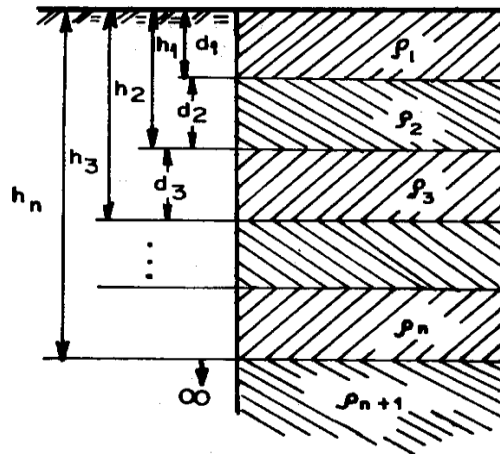
2.10. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Devido as características geológicas dos solos adquiriram ao longo dos anos, a forma de modelagem em camadas estratificadas, ou melhor, camadas na posição horizontal, tem produzido ótimos resultados comprovados na prática (PINHEIRO, 2013).

Para o cálculo das resistividades em distintas camadas, na prática o solo é estratificado em no máximo duas camadas. A explicação para esse fato se deve a limitação dos equipamentos

de medição, depois da segunda camada as medições já apresentam erros. A Figura 9 mostra um modelo de um solo dividido em camadas.

Figura 9- Solo dividido em camadas



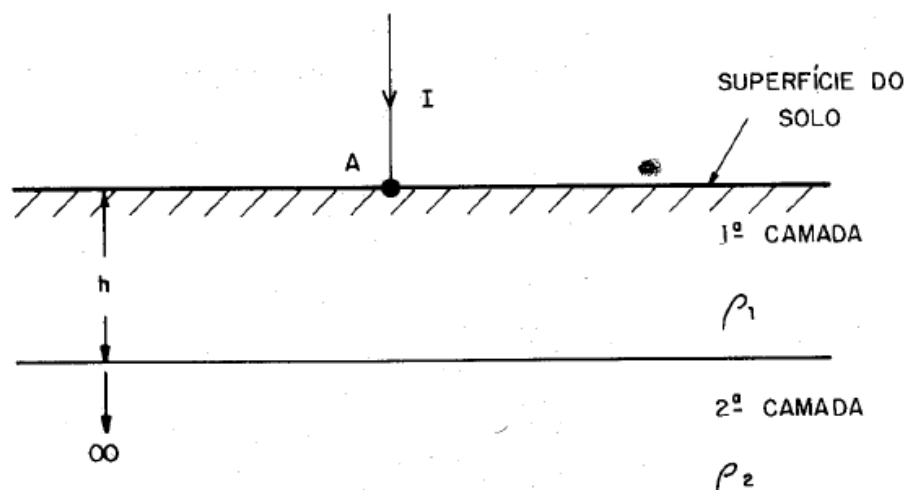
Fonte: Pinheiro, 2013.

2.10.1. Modelagem do solo de duas camadas

Segundo Pinheiro (2013), em um solo com duas camadas horizontais e aplicando as teorias do eletromagnetismo, pode-se obter uma modelagem matemática e juntamente com as medições obtidas pelo Método de Wenner, possibilita encontrar as resistividades da primeira e segunda camada, como também suas respectivas profundidades.

Mostrado na Figura 10 um solo de duas camadas onde através do ponto A entra a corrente elétrica I e gera potenciais na primeira camada que deve satisfazer a Equação 9.

Figura 10- Solo em duas camadas



Fonte: Kindermann, 2002 p. 28.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (10)$$

Onde, V é o potencial na primeira camada do solo. Logo desenvolvendo a equação de Laplace para o potencial em qualquer ponto da primeira camada do solo, com uma distância r do ponto A, ou ponto da entrada da corrente, encontra-se a Equação 11.

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (11)$$

Onde,

V_p = Potencial de um ponto p na primeira camada do solo;

ρ_1 = resistividade pertencente a primeira camada;

h = Profundidade da primeira camada;

r = Distância do ponto p à fonte de corrente A;

K = Coeficiente de reflexão;

O coeficiente de reflexão K é definido pela Equação 12.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (12)$$

Onde ρ_2 representa a resistividade da segunda camada. Desta forma é perceptível pela Equação 12 que o coeficiente de reflexão é limitado entre -1 e +1.

2.10.2. Aplicando a configuração de Wenner

Para a configuração de Wenner, a corrente I entra no solo pelo ponto A e retorna ao Megger pelo ponto D. E os eletrodos B e C possuem potenciais devido a superposição da contribuição da corrente elétrica que circula entre os eletrodos A e B. Logo o potencial no ponto B é dado pela Equação 13.

$$V_B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (13)$$

Desta forma através da mesma consideração, o potencial pertinente ao ponto **C** é dada pela Equação 14.

$$V_C = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (14)$$

Aplicando a diferença de potencial entre B e C obtém a Equação 15 e Equação 16.

$$V_{BC} = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right] \quad (15)$$

$$2\pi a \frac{V_{BC}}{I} = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right] \quad (16)$$

Logo com a relação da razão entre V_{BC} e I representa o valor da resistência R lida pelo terrômetro.

$$2\pi a R = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right] \quad (17)$$

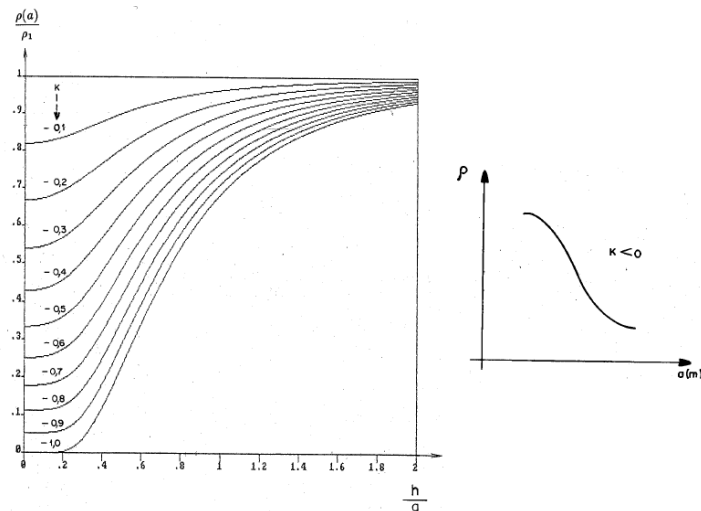
Sabendo que a resistividade do solo varia o espaçamento **a**, logo $\rho(a) = 2\pi a R$. Substituindo se obtém a expressão, fundamental para a utilização em estratificações de solos em duas camadas.

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right] \quad (18)$$

2.11. MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM DUAS CAMADAS USANDO CURVAS

Como existe uma faixa de variação entre -1 e +1 do coeficiente de reflexão K, logo é possível traçar uma família de curvas de $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$ em função de $\frac{h}{a}$ dentro da variação de K. Para K variando na faixa negativa as curvas possuem comportamento descendente, mostrado na Figura 11.

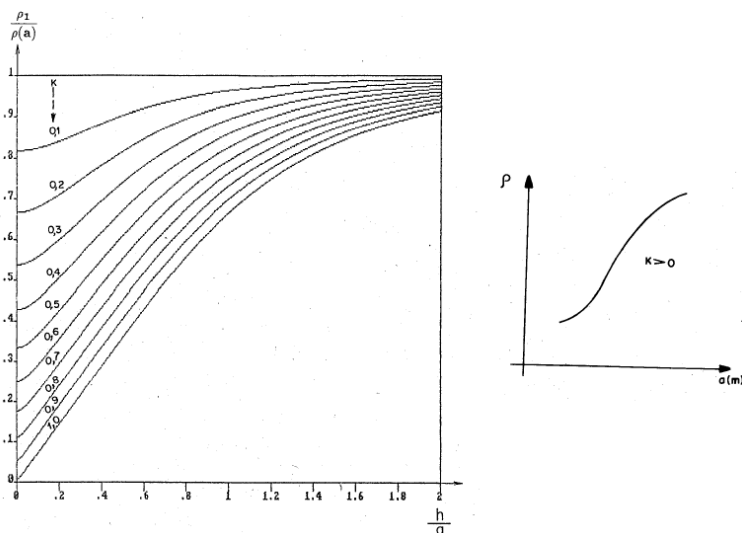
Figura 11- Comportamento das curvas para K negativo



Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002.

Já as curvas ascendentes são quando K varia na faixa positiva, o comportamento das curvas pode ser visto na Figura 12.

Figura 12- Comportamento das curvas para K positivo



Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002.

Utilizando a família de curvas de K é possível estabelecer um método de associação da curva $\rho(a)$ x a , obtida pelo método de Wenner, com uma segunda curva que é formada pelos

valores de ρ_1 , K e h . Logo a estratificação é obtida através desses valores encontrados. Para a execução deste método utiliza-se um procedimento, mostrado por Kindermann (2002), para a realização da estratificação em duas camadas através de curvas.

Para o primeiro passo, deve-se traçar a curva $\rho(a) \times a$ com os valores obtidos pelo método de Wenner. Posteriormente o segundo passo é de prolongar a curva $\rho(a) \times a$ até cortar o eixo das ordenadas do gráfico. Logo neste ponto será obtido o valor de ρ_1 , que na qual é a resistividade da primeira camada. Para um melhor resultado deste passo, é necessário fazer medições com o Megger para pequenos espaçamentos. Pois com menores espaçamentos a penetração da corrente se predomina na primeira camada.

O terceiro passo consiste em escolher um valor de espaçamento a_1 arbitrariamente, e com ele na curva, obter-se o valor correspondente de $\rho_1(a_1)$. No quarto passo, através do comportamento da curva $\rho(a) \times a$, identifica-se o sinal de K . Para curva descendente, K é negativo e tem-se o cálculo de $\rho(a_1)/\rho_1$. Para curva ascendente, K é positivo e tem-se o cálculo de $\rho_1/\rho(a_1)$.

Assim com o valor de $\rho(a_1)/\rho_1$ ou $\rho_1/\rho(a_1)$, nas curvas teóricas correspondentes, traça-se uma linha paralela ao eixo da abscissa. Onde está reta corta curvas distintas de K . Realiza-se a leitura de todos os K específicos e os h/a correspondentes aos mesmos, onde assim é o quinto passo. Para o sexto passo, tendo os todos os valores de h/a , multiplicasse os mesmos por a_1 do terceiro passo. Em seguida constrói-se uma tabela com os valores correspondentes de K , h/a e h .

No passo sete, traça-se a curva $K \times h$ com os valores adquiridos da tabela gerada no sexto passo. Posteriormente no passo 8, escolhesse um valor de espaçamento $a_2 \neq a_1$, e repete o processo, onde se irá resultar em uma nova curva $K \times h$.

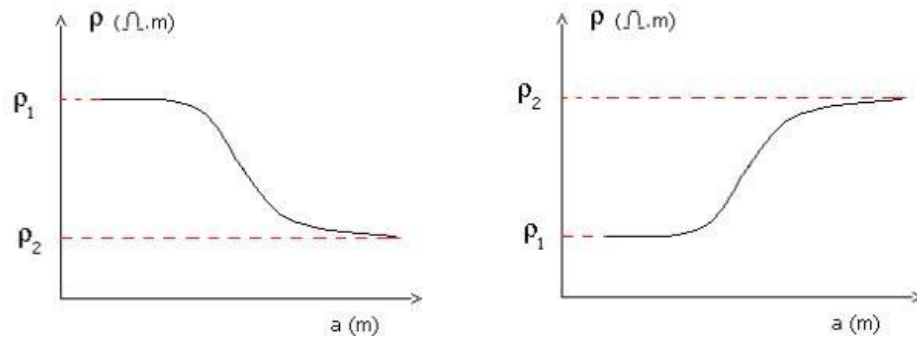
Plota-se esta nova curva $K \times h$ para o nono passo. Desta forma, a interseção das duas curvas $K \times h$ se resultará nos reais valores de K e h , assim definindo a estratificação e concluindo o décimo passo.

2.12. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM DUAS CAMADAS USANDO MÉTODO SIMPLIFICADO

Este método apresenta melhores resultados para quando o solo é considerado estratificável em apenas duas camadas e o a curva $\rho(a) \times a$ possuir tendência de saturação assintótica em seus extremos, como também ser paralela ao eixo das abscissas, mostrado na Figura 13. A assíntota referente aos pequenos espaçamentos tem relação direta com a primeira

camada. Para maiores espaçamentos as correntes concentram-se na segunda camada, então sua assíntota representa um solo distinto (SOZO, 2014).

Figura 13- Curvas para o solo de duas camadas

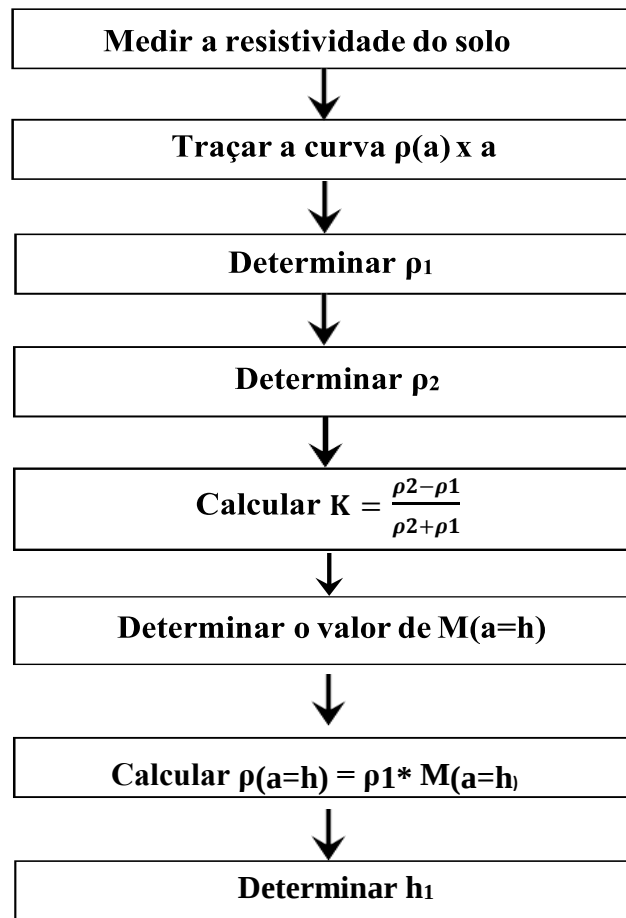


Fonte: Kindermann, 2002 p. 42.

Observando as curvas da Figura 13, percebe-se que os prolongamentos das assíntotas determinam os valores de ρ_1 e ρ_2 de cada camada do solo. Para a realização deste método é baseado em deslocar as hastes de medição para que a distância entre as hastes seja igual a profundidade da primeira camada (h), logo $a = h$. Aplicando o valor de $\rho(a=h)$ na curva de $\rho(a) \times a$ se obtém o valor da profundidade da primeira camada (KINDERMANN, 2002).

Após traçar a curva de resistividade do solo, para a realização da estratificação é necessário seguir os seguintes passos do fluxograma mostrado na Figura 14.

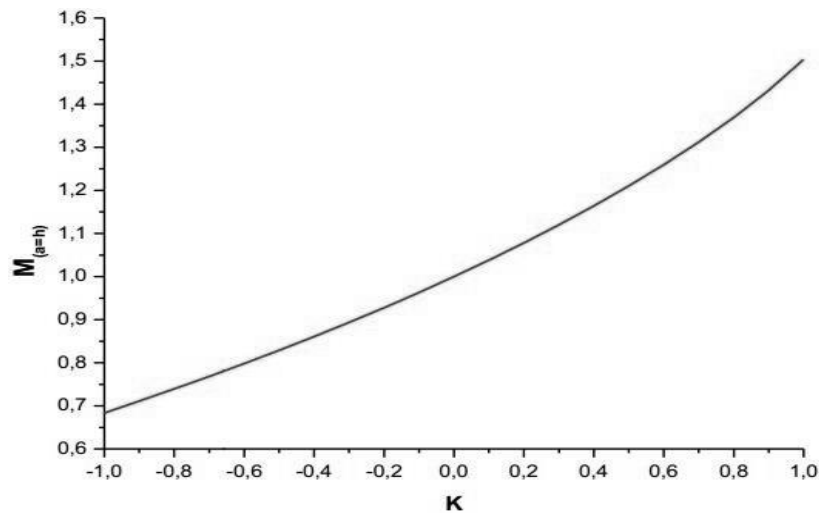
Figura 14- Método simplificado para a estratificação em duas camadas



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com as medições da resistividade do solo e traçando a curva $\rho(a) \times a$, é determinada a resistividade de primeira camada do solo prolongando-se a curva até cortar o eixo das ordenadas. Já para a determinação da resistividade do solo da segunda camada, é necessário prolongar a assíntota do final da curva até o eixo das ordenadas.

A partir do valor de K calculado no sexto passo do fluxograma, determina-se, a partir da Figura 15, o valor de $M(a=h)$, e assim calcula-se o valor de $\rho(a=h)$. Com o cálculo de $\rho(a=h)$, aplica-se o mesmo na curva de resistividade $\rho(a) \times a$, e assim se consegue definir a profundidade h da primeira camada do solo.

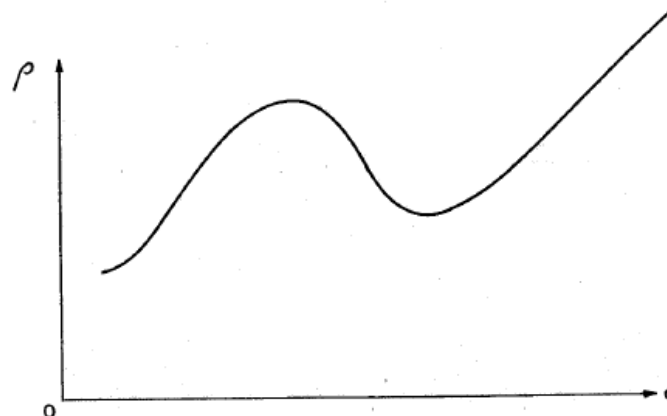
Figura 15- Curva $M(a=h)$ versus K 

Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002.

2.13. ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO PELO MÉTODO DE PIRSON

O método de Pirson tem um funcionamento similar ao método de duas camadas, podendo assim denomina-lo como uma extensão do mesmo. Apropriado para curvas $\rho(a)$ x a que possuem trechos ascendentes e descendentes, onde representam solos com mais de duas camadas, como mostrado na Figura 16.

Figura 16- Curva de solo com várias camadas



Fonte: Kindermann, 2002 p.47.

Segundo Kindermann (2002), neste método divide-se a curva em trechos ascendentes e descendentes através do ponto de maior inclinação. Posteriormente considera o primeiro trecho em um solo de duas camadas onde se obtém ρ_1 , ρ_2 e h_1 pelo método duas camadas usando

curvas. Para analisar o segundo trecho deve-se determinar uma resistividade equivalente, que será vista pela terceira camada. Desta forma estima-se a profundidade da segunda camada (h_2'), isto é mostrado na Equação 19.

$$h_{2'} = d_1 + d_{2'} = \frac{2}{3} a_t \quad (19)$$

Onde

$d_1 = h_1$ = espessura da primeira camada;

$d_{2'}$ = espessura estimada da segunda camada;

$h_{2'}$ = profundidade estimada da segunda camada;

a_t = espaçamento onde apresenta o ponto de maior inclinação que divide os trechos.

Logo calcula-se a resistividade média estimada $\rho_{2'}$ que é vista pela terceira camada, utilizando a Equação 20.

$$\rho_{2'} = \frac{d_1 + d_{2'}}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_{2'}}{\rho_2}} \quad (20)$$

Para o trecho descendente utiliza novamente o método de estratificação de duas camadas usando curvas, para a resistividade $\rho_{2'}$ como sendo a primeira camada e assim encontrar ρ_3 e h_2 através da curva K.

2.14. DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

É através da resistividade aparente que é a resistividade vista pelo sistema de aterramento conectado no solo, que ocorre o escoamento da corrente elétrica emanada ou absorvida pelo sistema, considerando a profundidade atingida pelo escoamento destas correntes. Portanto, inicialmente, os sistemas de aterramento serão analisados com relação a uma resistividade aparente (PINHEIRO, 2013).

2.14.1. Dimensionamento de um Sistema de Aterramento de uma haste vertical

Uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo, de acordo com a Figura 17, a mesma possui uma resistência elétrica que pode ser determinada pela Equação 21.

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) [\Omega] \quad (21)$$

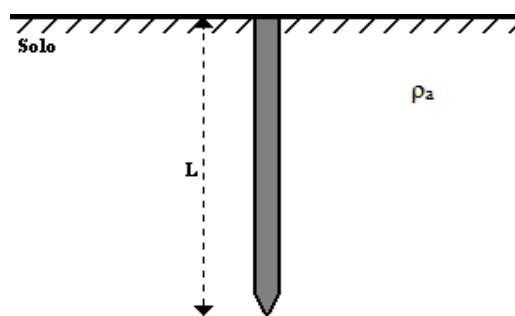
Onde:

$\rho_a \rightarrow$ Resistividade aparente do solo [$\Omega.m$];

$L \rightarrow$ Comprimento da haste [m];

$d \rightarrow$ Diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da haste [m].

Figura 17- Haste em posição vertical cravada no solo



Fonte: PINHEIRO, 2013.

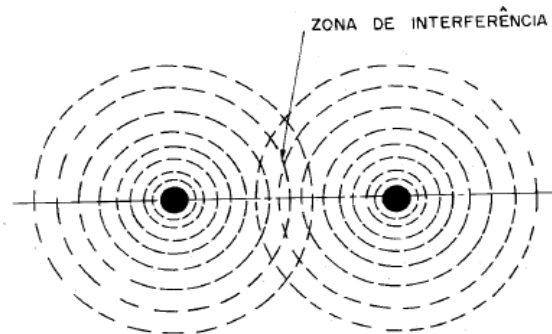
Segundo Kindermann (2002), pode ser que o aterramento com uma única haste não forneça o valor da resistência desejada. Logo certos parâmetros influenciam na redução do valor da resistência elétrica. São eles:

- Aumento do diâmetro da haste;
- Conjunto de hastes paralelas;
- Aumento do comprimento da haste;
- Redução da resistividade aparente ρ_a utilizando tratamento químico no solo.

2.14.2. Interligação de hastes em paralelo

É certo que a interligação de hastes em paralelo diminui o valor da resistência de aterramento. Porém o cálculo da resistência de hastes em paralelo não possui nenhuma relação o paralelismo de resistências elétricas. Logo isso ocorre devido as interferências nas zonas das superfícies equipotenciais, assim denominada zona de interferência, mostrado na Figura 18 (KINDERMANN, 2002).

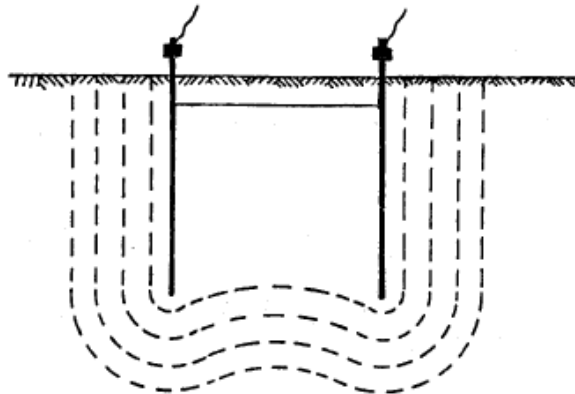
Figura 18- Zona de interferência das linhas equipotenciais



Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002.

A zona de interferência das linhas equipotenciais causa área de bloqueio para o fluxo das correntes que podem penetrar as hastes, mostrado na Figura 19. Assim resultando uma maior resistência de terra individualmente em cada haste, pois com uma área de dispersão menor para dispersar a corrente, a resistência de cada haste aumenta.

Figura 19- Superfícies equipotenciais em duas hastes paralelas



Fonte: Kindermann, 2002 p. 68

Entretanto um grande aumento no espaçamento entre as hastes não é economicamente viável para um projeto. Por convenção, aconselha-se um espaçamento que seja aproximadamente igual ao comprimento da haste. Na prática, 3 metros é um espaçamento bastante utilizado.

2.14.3. Resistência equivalente de hastes paralelas

Devido o acréscimo de resistência ocasionado pela interferência entre as hastes paralelas, logo para o cálculo da resistência equivalente deve-se levar em conta este acréscimo. A Equação

22 mostra a resistência elétrica de cada haste individualmente juntamente com o valor de resistência devido à interferência entre elas (PINHEIRO, 2013).

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm} \quad (22)$$

Onde:

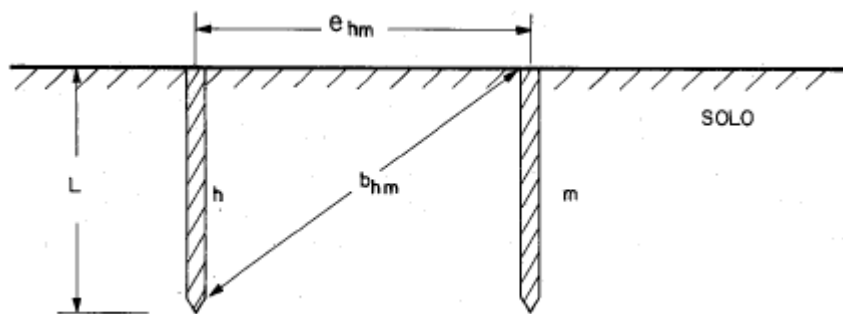
- $R_h \rightarrow$ Resistência da haste h inserida no conjunto levando em conta as interferências das outras hastes;
- $n \rightarrow$ Número de hastes paralelas;
- $R_{hh} \rightarrow$ Resistência de cada haste individualmente;
- $R_{hm} \rightarrow$ Acréscimo de resistência na haste h devido à interferência mútua com a haste m, calculada pela expressão:

$$R_{hm} = \frac{\rho_a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (23)$$

- $e_{hm} \rightarrow$ Espaçamento entre a haste h e a haste m (em metros);
- $L \rightarrow$ Comprimento da haste [m].

A Figura 20 mostra a representação de b_{hm} , o seu valor é obtido pela Equação 24.

Figura 20- Parâmetros entre as hastes h e m



Fonte: PINHEIRO, 2013.

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (24)$$

Após a determinação da resistência individual para cada haste do conjunto, incluindo os acréscimos ocasionados pelas interferências, a resistência equivalente das hastes interligadas será a resultante do paralelismo das mesmas.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (25)$$

O índice de aproveitamento ou índice de redução (**k**), é definido como a resistência equivalente R_{eq} e a resistência própria de cada haste sem o acréscimo de interferência.

$$k = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}}$$

Isolando R_{eq} , se obtém:

$$R_{eq} = kR_{1haste} \quad (26)$$

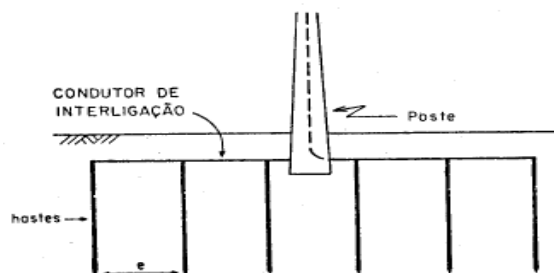
A expressão mostra que a resistência equivalente R_{eq} do conjunto de hastes em paralelo está sendo reduzida a um fator de **k** vezes o valor da resistência de uma só haste isoladamente. Os valores de **k** são, geralmente, tabelados ou obtidos por meio de curvas.

2.14.4. Dimensionamento de um sistema de hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas

Um sistema de aterramento de hastes em paralelo é mostrado na

Figura 21.

Figura 21- Hastes em paralelo



Fonte: Kindermann, 2002 p. 71.

Este é um sistema simples e muito empregado na área de sistemas de distribuição de energia e também no aterramento de equipamentos isolados. Na área urbana, o aterramento é feito ao longo do meio fio da calçada, logo se tornando mais econômico e não prejudica o trânsito (PINHEIRO, 2013).

Para realizar o cálculo da resistência equivalente para este arranjo é preciso levar em consideração a interferência de cada haste, duas a duas. Logo para um sistema de três hastes, tem-se:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33}$$

Admitindo-se que as hastes tenham o mesmo formato, então:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left[\frac{4L}{d} \right] \quad (27)$$

As resistências referentes as interferências mútuas são obtidas usando a Equação 28 e Equação 29.

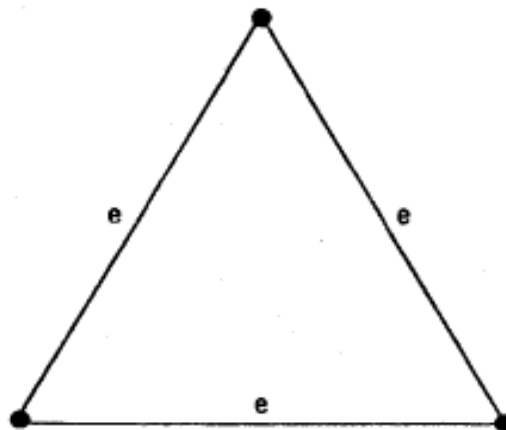
$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left[\frac{(b_{12} + L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12} - L)^2} \right] \quad (28)$$

$$R_{13} = R_{31} = \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left[\frac{(b_{13} + L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13} - L)^2} \right] \quad (29)$$

2.14.5. Dimensionamento de um Sistema com Hastes em Triângulo

Neste sistema de aterramento, as hastes são cravadas em um formato triangular, especificamente no formato de um triângulo equilátero, visto na Figura 22.

Figura 22- Hastes em triângulo



Fonte: Kindermann, 2002 p. 76.

Um sistema real formado por três hastes de aterramento com dois metros de espaçamento entre elas e interligadas por um fio de cobre nu, pode ser observado na Figura 23.

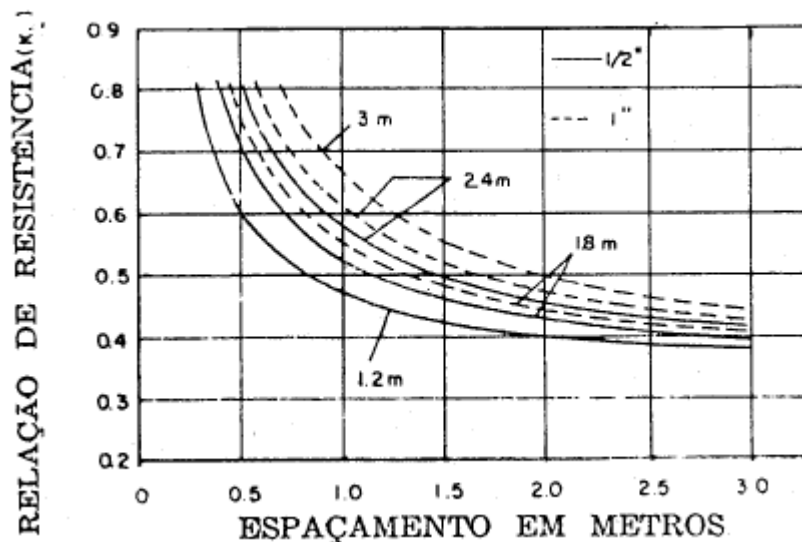
Figura 23- Sistema real de uma malha em triângulo



Fonte: PINHEIRO, 2013.

O dimensionamento do sistema em triângulo tem relação direta com a definição do índice de redução k , visto na Figura 24 (PINHEIRO, 2013).

Figura 24- Curvas de Kxe



Fonte: Kindermann, 2002 p. 77.

$$R_{eq\Delta} = k \cdot R_{1haste} \quad (30)$$

Onde:

R_{1haste} → Resistência elétrica de uma única haste cravada no solo;

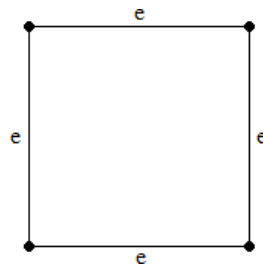
k → Índice de redução do sistema de aterramento;

$R_{eq\Delta}$ → Resistência equivalente do sistema de aterramento em triângulo.

2.14.6. Dimensionamento de um Sistema de Hastes em Quadrado Vazio

Para o sistema de aterramento com o formato de quadrado vazio, as hastes são cravadas na periferia a uma distância e das hastes adjacentes, pode ser visto na Figura 25.

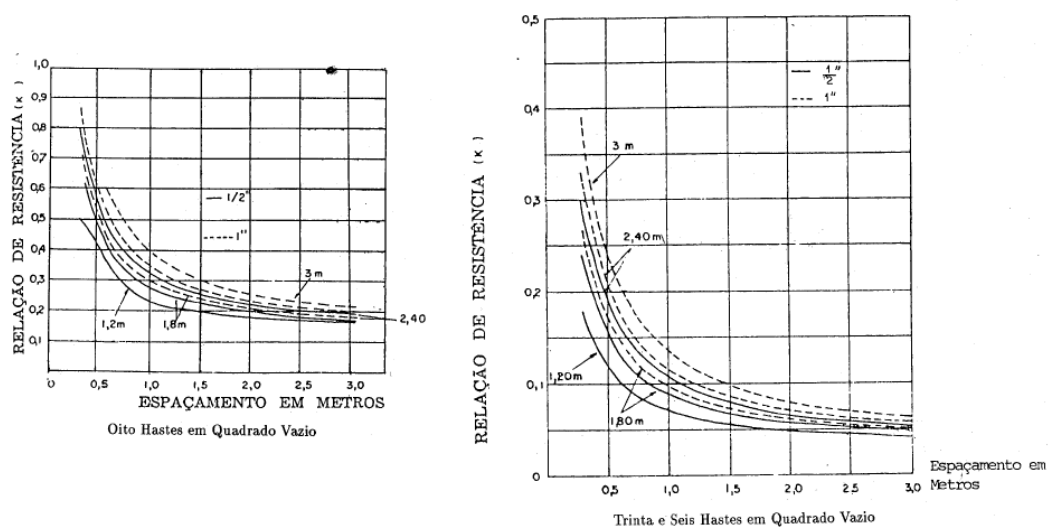
Figura 25- Sistema de uma malha em quadrado



Fonte: Kindermann, 2002 p. 78.

O dimensionamento do sistema em quadrado vazio tem relação direta com a definição do índice de redução k , visto na Figura 26 (PINHEIRO, 2013).

Figura 26- Curvas de Kxe



Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002.

$$R_{eq} = k \cdot R_{1haste} \quad (31)$$

Onde:

R_{1haste} → Resistência elétrica de uma única haste cravada no solo;

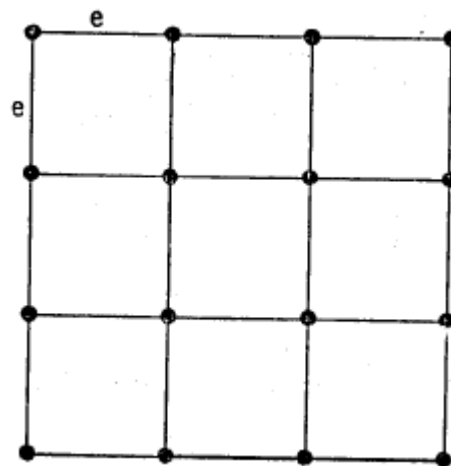
k → Índice de redução do sistema de aterramento;

R_{eq} → Resistência equivalente do sistema de aterramento em quadrado vazio.

2.14.7. Dimensionamento de um Sistema de Hastes em Quadrado Cheio

Para o sistema de aterramento com o formato de quadrado cheio, as hastes são cravadas a uma distância e das hastes adjacentes, pode ser visto na Figura 27.

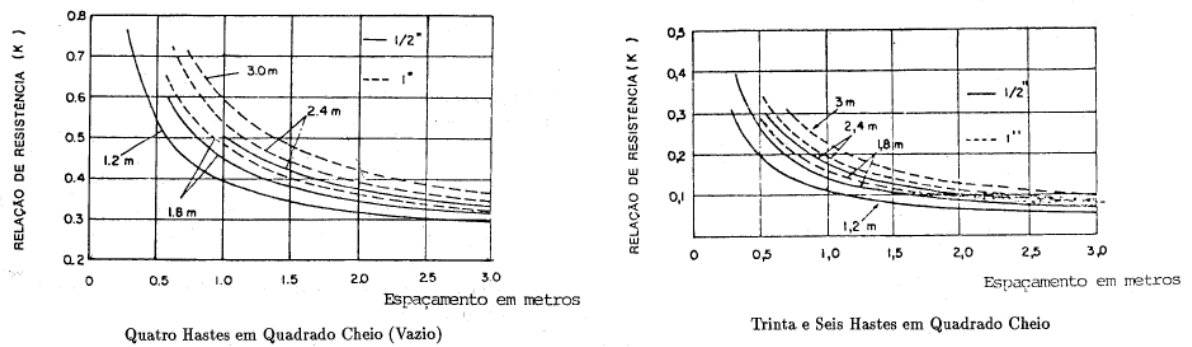
Figura 27- Sistema de uma malha em quadrado cheio



Fonte: Kindermann, 2002 p. 80.

O dimensionamento do sistema em quadrado cheio tem relação direta com a definição do índice de redução k , visto na Figura 28 (KINDERMANN, 2002).

Figura 28- Curvas de Kxe



Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002.

$$R_{eq} = K \cdot R_{1haste} \quad (32)$$

Onde:

R_{1haste} → Resistência elétrica de uma única haste cravada no solo;

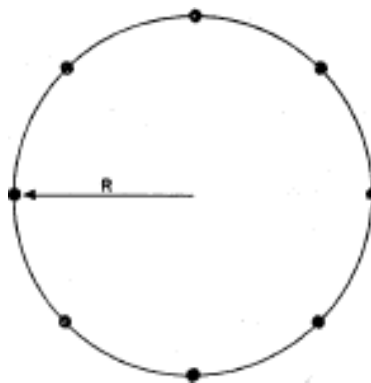
k → Índice de redução do sistema de aterramento;

R_{eq} → Resistência equivalente do sistema de aterramento em quadrado cheio.

2.14.8. Dimensionamento de Sistema de Hastes em Circunferência

Para o sistema de aterramento com o formato de circunferência, as hastes são cravadas e igualmente espaçadas da circunferência de raio R, visto na Figura 29.

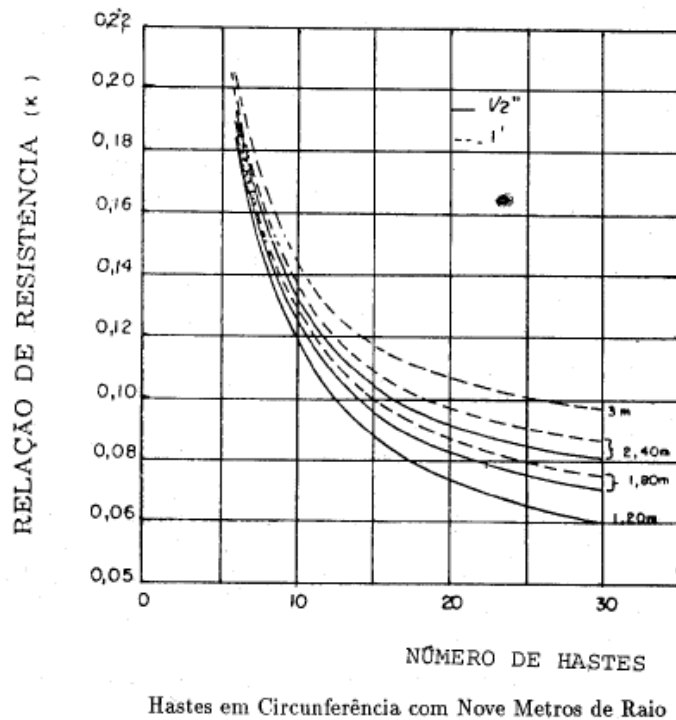
Figura 29- Hastes em circunferência



Fonte: Kindermann, 2002 p. 82.

O dimensionamento do sistema em circunferência tem relação direta com a definição do índice de redução **k**, visto na Figura 30 (KINDERMANN, 2002).

Figura 30- Curvas de Kxe



Fonte: Adaptado de Kindermann, 2002

$$R_{eq} = k \cdot R_{1haste} \quad (33)$$

Onde:

R_{1haste} → Resistência elétrica de uma única haste cravada no solo;

k → Índice de redução do sistema de aterramento;

R_{eq} → Resistência equivalente do sistema de aterramento em circunferência.

2.15. O SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESGARGAS ATMOSFÉRICAS

Os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas têm por função proteger as edificações, equipamentos, instalações elétricas e de telecomunicações, como também atua na redução dos danos às estruturas. Esses sistemas captam e direcionam a corrente elétrica proveniente da queda de raios para sistemas de aterramento.

Para Souza (2014) o SPDA não influencia na atração de raios, e sim oferece à descarga atmosférica um caminho preferencial, de baixa impedância, reduzindo assim os riscos que decorrem devido sua incidência.

A norma que assegura a implementação da proteção de estruturas contra descargas atmosféricas para proteger as edificações e estruturas contra a incidência de raios é a ABNT NBR5419 (2015). A proteção de pessoas e equipamentos que se encontrem no interior e próximas das estruturas e edificações também é abrangida pela norma.

2.16. OS TIPOS DE SPDA

Segundo Mamede (2013), no que se refere ao SPDA, podem ser, de forma geral, determinados por dois tipos distintos, o estrutural e o não estrutural ou externo.

O SPDA estrutural composto por estruturas que utilizam os condutores que compõem a mesma. Logo usando esses condutores com a função de captação dos raios, como a descida das correntes de descarga e também como aterramento para a dissipação das correntes. Estes condutores podem ser as armações de aço interligadas das estruturas de concreto e das fundações e as coberturas metálicas presentes na estrutura.

Já o SPDA externo é composto por elementos condutores especialmente utilizados na função de captação dos raios, descidas das correntes de descargas e aterramento para a dissipação das mesmas correntes. Os captos tipo Franklin, cabos de cobre e hastes de aterramento são exemplos.

2.17. ELEMENTOS QUE FORMAM UM SPDA

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, de acordo com Mamede (2013), é composto em três partes bem definidas, sendo eles:

- Subsistema de captação;
- Subsistema de descidas;
- Subsistema de aterramento.

Cada subsistema possui elementos próprios e essenciais que desempenham funções distintas.

O subsistema de captação é formado pelo captor e o cabo de proteção de borda. O condutor de descida e os eletrodos de aterramento pertencem ao subsistema de descidas e subsistema de aterramento respectivamente.

2.17.1. Subsistema de capttores

É através do captor que o raio é interceptado no SPDA, logo o mesmo é conduzido com segurança para o subsistema de aterramento. Desta forma não atingindo assim as áreas dentro do volume de proteção. Os capttores são divididos em capttores naturais e capttores não naturais.

Segundo Mamede (2013), os capttores naturais são de elementos condutores já integrantes da edificação a ser protegida. Logo, os capttores não naturais, são aqueles constituídos de elementos condutores propositalmente expostos, onde seu principal objetivo é estabelecer o contato direto com as descargas atmosféricas. São instalados sobre a cobertura e a lateral das edificações. Cabos de cobre nu expostos em forma de malha, hastes e os capttores do tipo Franklin são exemplos de capttores não naturais, este último pode ser observado na Figura 31.

Figura 31- Captor do Tipo Franklin



Fonte: Autoria própria, 2018.

Coberturas metálicas ou demais condutores metálicos que estejam sobre a cobertura podem ser determinados de capttores naturais. A seguir será apresentado o subsistema de descidas, que são partes integrantes do SPDA.

2.17.2. Subsistema de descidas

As descidas possuem a função de conduzir a corrente elétrica do subsistema de captação até o subsistema de aterramento. O condutor de descida pode ser natural ou não natural.

Os condutores de descida naturais são elementos que já estão integradas na edificação, logo permitem o escoamento das correntes elétricas, oriunda dos raios, para o subsistema de aterramento. Podem ser postes, torres metálicas ou armaduras de aço dos pilares das estruturas. Condutores de descidas não naturais possuem a função proposital de conduzir ao subsistema de aterramento da edificação as correntes elétricas dos raios. Cabos de cobre nu ou de alumínio instalados sobre as laterais das edificações, como mostra a Figura 32, são muito utilizados (MAMEDE, 2013).

Figura 32- Descida não natural



Fonte: Autoria própria, 2018.

O espaçamento entre os condutores de descida depende do nível de proteção adotado para a edificação e é descrito pela norma NBR5419 (2015). Os espaçamentos são especificados na Tabela 2.

Tabela 2- Espaçamento entre os Condutores de Descida

Nível de proteção	Distâncias (m)
I	10
II	10
III	15

Fonte: Adaptado de ABNT NBR5419-3 (2015, p. 15).

É aconselhável ser instalado um condutor de descida, preferencialmente, em cada canto saliente da estrutura, além dos demais condutores impostos pela distância de segurança calculada. Ainda por norma é aceitável que os espaçamentos dos condutores de descida tenham até 20% além das distâncias especificadas pela norma.

2.17.3. Anel de equipotencialização

De acordo com a ABNT NBR5419 (2015), anéis de equipotencialização devem ser instalados no perímetro de uma estrutura ou edificação a ser protegida, dependendo de sua altura.

Todas as descidas e hastes de aterramento que estão ao redor da edificação precisam ser interligadas por um anel. Por norma, o anel tem que ser enterrado em uma profundidade de no mínimo 0,5 m e ficar à uma distância aproximada de 1 m ao redor das paredes externas (ABNT NBR5419, 2015).

Segundo Mamede (2013) é indicado a utilização de cabos de proteção de borda ao redor de todo perímetro da edificação. O cabo interliga os captores e as descidas existentes. Desta forma, o cabo de proteção de borda possui a função de um anel de equipotencialização onde irá distribuir a corrente da descarga atmosférica através das descidas até o subsistema de aterramento, onde pode ser visto na

Figura 33.

Figura 33- Cabo de Proteção de Borda



Fonte: Autoria própria, 2018.

2.17.4. Fixação e conexão de condutores do SPDA

De acordo com a ABNT NBR5419 (2015), devido as forças eletrodinâmicas que ocasionam expansão térmica nos cabos ou forças mecânicas acidentais, os elementos capttores e condutores de descidas devem ser firmemente fixados para que não causem folga ou quebra de condutores, a Figura 34 mostra cabos fixados por conectores e fixadores.

Figura 34- Conectores e fixadores



Fonte: Autoria própria, 2018.

As conexões devem ser feitas por meio de solda exotérmica ou elétrica, conexões mecânicas de pressão também podem e são bastante utilizadas. Nos condutores de descida não é permitido o uso de emendas. O conector para ensaios de aterramento é a única emenda possível nas descidas, geralmente a 1,5 m a partir do piso, de modo a facilitar o acesso para realização de ensaios.

2.17.5. Subsistema de aterramento

Segundo Mamede (2013), os subsistemas de aterramento naturais são formados por elementos condutores já existentes da própria edificação, ou seja, condutores presentes nas fundações de concreto armado da estrutura a ser protegida.

Para os subsistemas de aterramento não naturais os elementos condutores são enterrados horizontal ou verticalmente, onde possuem a função de dispersar as correntes elétricas no solo. Podem ser formados por malhas aterradas ou por anel de equipotencialização onde, quando necessário, eletrodos adicionais, tipo haste por exemplo, podem ser conectados no anel e devem

estar localizados o mais próximo possível dos pontos onde os condutores de descida estiverem conectados (ABNT NBR5419, 2015).

2.17.6. Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)

O DPS é um equipamento de proteção contra surtos de tensão causados por descargas atmosféricas quando atingem edificações. Logo, o equipamento direciona as descargas indiretas para a terra. O DPS, mostrado na Figura 35, deve estar localizado o mais próximo possível do ponto de entrada de energia (CAVALIN, 2013).

Figura 35- Dispositivo de Proteção contra Surtos



Fonte: Autoria própria, 2018.

2.18. VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE UM SPDA

Através da norma ABNT NBR5419 (2015), para saber a necessidade, projeto e instalação de um SPDA, deve ser feita uma avaliação com o objetivo de reduzir as perdas de valor social L1, L2 e L3. Onde:

- L1: perda de vida humana e incluindo-se danos permanentes;
- L2: perda de serviço ao público;
- L3: perda de patrimônio cultural;

- L4: perda de valor econômico (estrutura e seu conteúdo, assim como interrupções de atividades).

As perdas dos tipos L1, L2 e L3 são consideradas perdas de valor social e perdas do tipo L4 podem ser consideradas como perdas puramente econômicas.

Deve ser feita uma avaliação do risco de acordo com os procedimentos contidos na própria norma, para se avaliar quando uma proteção contra descargas atmosféricas é necessária ou não, através da consideração dos riscos R1, R2 e R3. Na qual:

- R1: risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;
- R2: risco de perdas de serviços ao público;
- R3: risco de perdas do patrimônio cultural.

Para avaliar os riscos, R, os relevantes componentes de risco (riscos parciais) devem ser definidos e calculados. Cada risco, R, é representado pela soma dos seus componentes de risco.

2.18.1. Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas na estrutura

São subdivididos nos componentes de risco **RA**, **RB** e **RC**. Onde (ABNT NBR5419-2, 2015, p. 16) :

RA: componente relativo a ferimentos aos seres vivos dentro ou fora da estrutura nas zonas até 3m causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo ao redor dos condutores de descidas. Logo as perdas do tipo L1 estão presentes juntamente com perdas do tipo L4, no caso de estruturas que contenham animais vivos;

RB: componente relativo a danos físicos como incêndio ou explosão causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura, onde pode comprometer o meio ambiente. Todos os tipos de perdas L1, L2, L3 e L4 podem aumentar;

RC: componente relativo a falhas de sistemas internos causados por raios. Perdas do tipo L2 e L4 podem ser ocasionadas juntamente com os do tipo L1, para estruturas com risco de explosão, e hospitais onde falhas de sistemas internos colocam em perigo a vida humana.

2.18.2. Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto da estrutura

Para a avaliação é levado em consideração que todas as pessoas estejam dentro da estrutura, logo apenas o componente RM está presente. Onde (ABNT NBR5419-2, 2015, p. 16):

RM: componente relativo a falhas de sistemas internos causados por raios. Perdas do tipo L2 e L4 podem ser ocasionadas juntamente com os do tipo L1, para estruturas com risco de explosão, e hospitais onde falhas de sistemas internos colocam em perigo a vida humana.

2.18.3. Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas a uma linha conectada à estrutura

Somente as linhas que entram na estrutura são consideradas. Logo são subdivididas nas componentes RU, RV e RW. Onde (ABNT NBR5419-2, 2015, p. 16):

RU: componente relativo a ferimentos aos seres vivos dentro da estrutura causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo. Logo as perdas do tipo L1 estão presentes juntamente com perdas do tipo L4, no caso de estruturas contendo animais vivos;

RV: componente relativo a danos físicos, que podem ser incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ou ao longo das linhas. Todos os tipos de perdas (L1, L2, L3 e L4) podem ocorrer;

RW: as sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura podem ocasionar este componente de risco, que é relativo a falhas de sistemas internos. Perdas do tipo L2 e L4 podem ser ocasionadas juntamente com os do tipo L1, para estruturas com risco de explosão, e hospitais onde falhas de sistemas internos colocam em perigo a vida humana.

2.18.4. Componentes de risco para uma estrutura devido às descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura

Somente o componente RZ está presente. Onde (ABNT NBR5419-2, 2015, p. 17):

RZ: componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas na linha que entram na estrutura. Perdas do tipo L2 e L4 podem ser ocasionadas juntamente com os do tipo L1, para estruturas com risco de explosão, e hospitais onde falhas de sistemas internos colocam em perigo a vida humana.

2.18.5. Risco Tolerável

Quando o risco R ($R1$ a $R3$) for maior que o risco tolerável RT , a proteção contra descargas atmosféricas será necessária.

$$R > RT \quad (34)$$

Na Tabela 3, mostra valores representativos de risco tolerável RT , onde envolvem perdas de vida humana ou perda de valores sociais ou culturais.

Tabela 3- Risco Tolerável		
Tipo de perda		$RT \text{ (y}^{-1}\text{)}$
L1	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
L2	Perda de serviço ao público	10^{-3}
L3	Perda de patrimônio cultural	10^{-4}

Fonte: ABNT NBR5419-2 (2015, p. 20)

Com isso devem ser adotadas medidas de proteção de modo a reduzir o risco R ($R1$ a $R3$) ao nível tolerável RT :

$$R \leq RT \quad (35)$$

2.19. MÉTODOS E POSICIONAMENTOS DA CAPTAÇÃO DE UM SPDA

Existem três métodos usadas no subsistema de captação de um SPDA e cada um deles possuem uma forma particular de proteção. Que são eles (ABNT NBR5419, 2015):

- Método do Ângulo de Proteção ou método de Franklin;
- Método da esfera fictícia ou modelo eletrogeométrico;
- Método das malhas ou método da gaiola de Faraday.

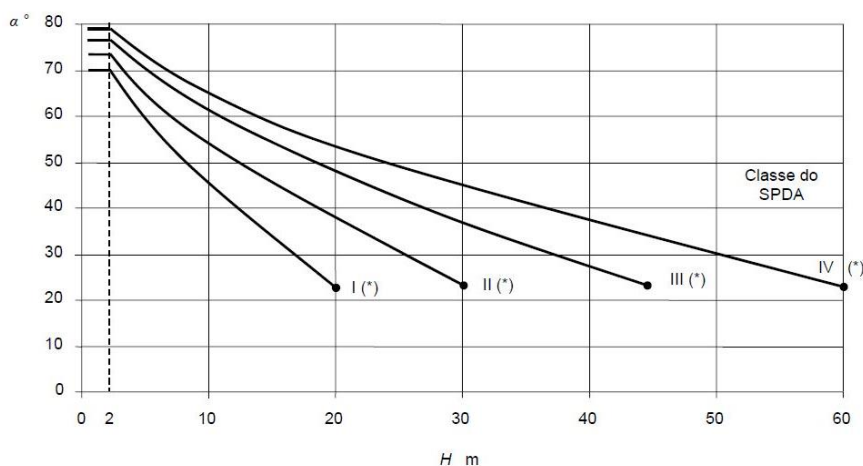
Os métodos das malhas e da esfera rolante são adequados para todas as edificações. Já método do ângulo de proteção possui limites quanto à altura dos captores.

2.19.1. Método do Ângulo de Proteção ou método de Franklin

Vastamente utilizado em edificações de formato simples e não tão altas, este método é geralmente o mais utilizado. Neste método são utilizados captadores em formato de hastes ou captadores do tipo Franklin que são estruturas formadas por mais de uma haste. De acordo com a altura do captor e o nível de proteção estabelecido, se determina um ângulo de proteção, formando um cone ao redor da estrutura, e assim criando um volume de proteção.

Na Figura 36, mostra a relação do ângulo α com o nível de proteção e a altura do captor em relação ao solo, obtidos através de curvas traçadas.

Figura 36- Relação do ângulo de proteção em função da altura do captor



Fonte: ABNT NBR5419-3, 2015, p. 11.

2.19.2. Método da esfera fictícia ou modelo eletrogeométrico

O método das esferas consiste em imaginar uma esfera de raio (r) rolando sobre a edificação em questão. Os pontos onde são tocados pela esfera fictícia representam um ponto exposto a incidência de uma descarga atmosférica direta.

De acordo com o nível de proteção do SPDA, o raio (r) terá um valor fixo tabelado conforme a NBR5419, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4- Raio da esfera rolante em função ao nível de proteção

Classe do SPDA	Raio da esfera rolante - r (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Fonte: ABNT NBR5419-3, 2015, p. 10.

Para estruturas com altura inferior a 60 metros a probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas laterais é desprezível. Para estruturas com altura superior a 60 metros, a maior incidência de raios ocorrerá na cobertura, principalmente nas extremidades horizontais da periferia. Uma pequena parte das descargas atingirá as laterais da estrutura. Desta forma será necessário a instalação de captação na lateral da parte superior das estruturas acima de 60 metros de altura (ABNT NBR5419-3, 2015).

2.19.3. Método das malhas ou método da gaiola de Faraday

Segundo a NBR5419, o método de captação por meio de malhas é adequado em todos os casos de edificações, assim o mesmo se torna um dos mais eficientes. Para cada nível de proteção é especificado em norma um valor de espaçamento da malha. O método é apropriado para telhados horizontais e inclinados sem curvatura, como também são utilizados para proteger superfícies laterais planas contra descargas atmosféricas laterais.

Para o correto funcionamento deste método, deve-se respeitar o limite máximo do espaçamento dos módulos da gaiola. Também é importante garantir que nenhuma parte da edificação fique fora da superfície que é formada pela Gaiola de Faraday (ABNT NBR5419-3, 2015).

Os valores máximos de afastamento dos condutores da malha são especificados na Tabela 5.

Tabela 5- Afastamento dos condutores da malha

Classe do SPDA	Máximo afastamento dos condutores da malha (m)
I	5 x 5
II	10 x 10
III	15 x 15
IV	20 x 20

Fonte: Adaptado de ABNT NBR5419-3, 2015, p. 10.

Devido à presença de corpos elevados como caixas d'água, chaminés e antenas na cobertura das edificações o método das malhas não pode ser aplicado sozinho. Assim a Gaiola de Faraday pode ser complementada por hastes ou captosres tipo Franklin, posicionados de forma a proteger esses corpos elevados (STÉFANI, 2011).

Os sistemas híbridos fornecerem um sistema de captação mais completo que os demais métodos isolados, logo os mesmos oferecem a edificação uma maior segurança. Desta forma o sistema de proteção híbrido oferece mais opções para a captação do raio, durante uma descarga, e assim conduzi-lo em segurança ao subsistema de aterramento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Mossoró é um município brasileiro do estado do Rio Grande do Norte, localizado na mesorregião do Oeste Potiguar. Em 2017 sua população era estimada em 295.619 habitantes segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus central é o local de interesse para o desenvolvimento dessa pesquisa. Suas edificações possuem um mescla de antigos e novos edifícios, já estes são os principais alvos de estudo para a realização de retrofit's em suas estruturas. A edificação Pedro Fernandes Pereira, uma da mais antigas do campus, foi selecionada para a realização deste presente trabalho.

A Figura 37 apresenta uma imagem de satélite do campus central leste e a referida edificação selecionada para este projeto.

Figura 37- Imagem de Satélite



Fonte: Adaptado de Google Maps, 2018.

3.2. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Primeiramente foi necessário a realização de uma análise de risco da estrutura com objetivo de obter o nível de proteção ou a classe do SPDA que será instalado na edificação, e com isso dimensionar todos os elementos e espaçamentos corretos impostos em norma. Posteriormente, para o dimensionamento do sistema de aterramento, foram realizadas medições da resistência do solo por meio de um terrômetro, e através destes valores realizar a estratificação do solo em duas camadas, para assim determinar a resistividade do mesmo e assim dimensionar os condutores do sistema de aterramento.

3.3. FUNCIONAMENTO DO TERRÔMETRO

Terrômetro ou Megger, são dispositivos utilizados para realizar medições de resistência de aterramento. Muito utilizados para medições em indústrias, edifícios, residências, para-raios, antenas e subestações, com a finalidade de examinar a qualidade do sistema de aterramento. Para os ensaios do presente trabalho foi utilizado o terrômetro da marca Minipa, modelo MTR-1520D, mostrado na Figura 38.

Figura 38- Terrômetro Minipa MTR-1520D



Fonte: Manual do aparelho, p. 1.

Para realizar medições é necessário fixar as estacas P e C na terra de forma alinhada, deixando uma distância entre os pontos de teste. O cabo de teste verde deve ser conectado no

terminal do instrumento, o cabo de teste amarelo no terminal P e o cabo vermelho no terminal C.

Antes de dar início a medição é preciso selecionar a chave para a posição ACV e verificar se a tensão lida é maior que 10V, caso apresente um valor superior a 10V a medição da resistência não terá precisão. Logo em seguida seleciona-se a chave para a posição “ Ω ” e a chave das resistências para “20 Ω ”. Pressiona-se o botão “Push On” simultaneamente com o botão “Timer On” e assim efetua-se a medição da resistência. Vendo que a leitura indique fundo de escala, logo varia-se a faixa de resistências dependendo da situação.

3.4. DIMENSIONAMENTO DO SPDA

A análise de risco da edificação se encontra no APÊNDICE A. Para o projeto, devido as características estruturais do edifício, foi optado para o subsistema de captação a utilização do método das malhas ou método da gaiola de Faraday, onde o mesmo é ideal para superfícies planas. Pela norma, para a classe III de proteção, o espaçamento é de 15x15 (m). Em seguida no subsistema de descidas, possui um espaçamento de 15 m, ainda por norma é aceitável que os espaçamentos dos condutores de descida tenham até 20% além das distâncias especificadas pela norma, para cada saliência da estrutura deverá possuir uma descida, como é aconselhado pela norma.

Quanto ao número de descidas o mesmo é calculado através do perímetro da estrutura, onde por meio da razão com o valor do espaçamento se obtém o número de descidas. Visto na Equação 36. O perímetro superior da estrutura deve contar com os anéis de equipotencialização, como também existe a ligação equipotencial do perímetro inferior para interligar o sistema de aterramento, este a uma distância de 1 metros do edifício.

$$N_{DESCIDAS} = \frac{L_{PERÍMETRO}}{L_{DESCIDAS}} = \frac{192,4}{15} = 12,8267 \cong 12 \quad (36)$$

Devido a tolerância de 20% para o espaçamento entre as descidas, logo 12 descidas é aceitável. Os condutores utilizados para captação e descidas são fios encordoados de cobre com área da seção mínima de 35 mm², como é indicado na Figura 39.

Figura 39- Seções dos condutores SPDA

Material	Configuração	Área da seção mínima mm ²	Comentários ^d
Cobre	Fita maciça	35	Espessura 1,75 mm
	Arredondado maciço ^d	35	Diâmetro 6 mm
	Encordoadado	35	Diâmetro de cada fio da cordoalha 2,5 mm
	Arredondado maciço ^b	200	Diâmetro 16 mm
Alumínio	Fita maciça	70	Espessura 3 mm
	Arredondado maciço	70	Diâmetro 9,5 mm
	Encordoadado	70	Diâmetro de cada fio da cordoalha 3,5 mm
	Arredondado maciço ^b	200	Diâmetro 16 mm

Fonte: NBR5419-3, 2015, p. 21.

Para atender o nível de proteção III, foi escolhido o DPS contendo componente centelhador para correntes atmosféricas de 100kA, como pode ser visto na Figura 40.

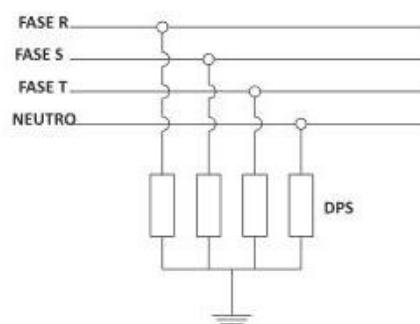
Figura 40- DPS's

Componente	Problema principal	Parâmetros das descargas atmosféricas					Notas
DPS contendo centelhador	Efeitos combinados (térmicos, mecânicos e de arco)	NP	I [kA]	Q_{surta} [C]	W/R [kJ/S]	di/dt [kA/μs]	Aplicar I , Q_{surta} e W/R em um pulso único (duração $T < 2$ ms); aplicar di/dt em um pulso separado
		I	200	100	10 000	200	
		II	150	75	5 600	150	
		III - IV	100	50	2 500	100	
DPS contendo blocos de resistores de óxido metálico	Efeitos de energia (sobrecarga)	NP	Q_{surta} [C]				Ambos os aspectos necessitam ser verificados Ensaio separados podem ser considerados
		I	100				
		II	75				
	Efeitos dielétricos (descargas disruptivas/trincas)	NP	I [kA]	T			
		I	200	< 2 ms			
		II	150				
		III - IV	100	(aplicar I em um único pulso)			

Fonte: NBR 5419-1, p. 44

O sistema possui 4 DPS, e estes devem estar conectados a cada fase e ao condutor neutro, onde irão ser conectados ao aterramento. O esquema de ligação é mostrado na Figura 41.

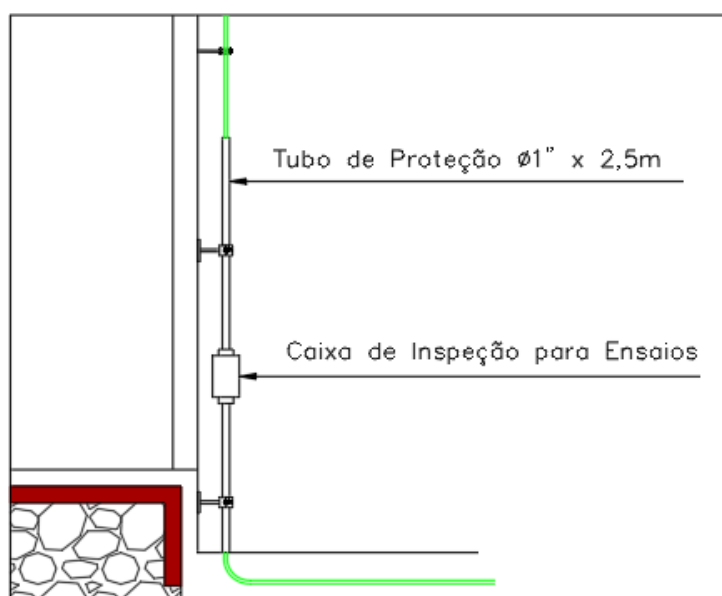
Figura 41- Esquema de ligação dos DPS's



Fonte: Autoria própria, 2018.

Quanto aos isoladores e fixadores, foram escolhidos isoladores de 200mm onde serão usados na cobertura do edifício, com objetivo de fixar as malhas captoras e o anel equipotencial. Também foram escolhidos isoladores de 100mm, já estes serão utilizados nas laterais do prédio onde sustentarão as descidas até o tubo de proteção. Os eletrodutos de proteção das descidas possuem diâmetro de uma polegada, 2,5 metros de comprimento e uma caixa de inspeção para ensaios localizada a 1,5 metros acima do nível do solo, mostrados na Figura 42.

Figura 42- Detalhe da Descida



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.5. PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

3.5.1. Medição da Resistividade do Solo

Antes de dar início ao projeto do Sistema de Aterramento, foram realizadas medições quanto a resistividade do solo em que será instalado o aterramento, as medições feitas in loco podem ser vistas na Figura 43. Para obtenção dos dados foi utilizado um terrômetro da marca Minipa.

Figura 43- Medições em campo



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para a disposição das hastes de medição, foi escolhido a técnica de Driven Rod ou de diferença de potencial. A Tabela 6 mostra os valores de resistências obtidos em função da variação do espaçamento das hastes de medição.

Tabela 6- Medição de Resistências

Espaçamento (m)	Resistência Elétrica (Ω)				
	1	2	3	4	5
2	8,12	8,09	8,13	10,12	8,17
3	9,33	10,44	9,12	8,89	8,46
4	10,87	9,77	9,69	11,4	9,66
6	10,12	10,21	9,78	9,43	9,62
8	10,84	13,9	10,52	11,08	10,6
16	18,7	16,56	16,8	15,71	15,94

Fonte: Autoria própria, 2018.

Logo aplicando a equivalência pelo método de Driven Rod, Equação 9, encontrasse as resistividades referente a cada medição, mostrado na Tabela 7.

Tabela 7- Resistividades Medidas

Epaçamento(m)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)
---------------	---------------------------------------

	1	2	3	4	5
2	139,860053	139,34332	140,03229	174,30834	140,72126
3	299,335850	334,948154	292,598387	285,219261	271,4235
4	899,020976	808,043692	801,427163	942,855486	798,94596
6	-683,87145	-689,95331	-660,89553	-637,24385	-650,0833
8	-319,98889	-410,31787	-310,54273	-327,0735	-312,9043
16	-234,2088	-207,4063	-210,4122	-196,7604	-199,6411

Fonte: Autoria própria, 2018.

Logo aplica-se desvio relativo para minimizar erros e calculando a média das resistividades, visto na Tabela 8.

Tabela 8- Média das Resistividades

Espaçamento (m)	Desvios Relativos (%)					Resist. Média($\Omega.m$)	Resist. Média recalc($\Omega.m$)
	1	2	3	4	5		
2	4,7619	5,1137	4,644	18,696	4,175	146,853	146,8530556
3	0,8866	12,889	1,384	3,871	8,521	296,705	296,7050315
4	5,7598	4,9425	5,720	10,917	6,013	850,059	850,0586564
6	2,929	3,8445	0,529	4,0887	2,156	664,409	664,4094957
8	4,8120	22,058	7,622	2,705	6,920	336,165	336,1654577
16	11,695	1,087	0,346	6,164	4,790	209,686	209,6857715

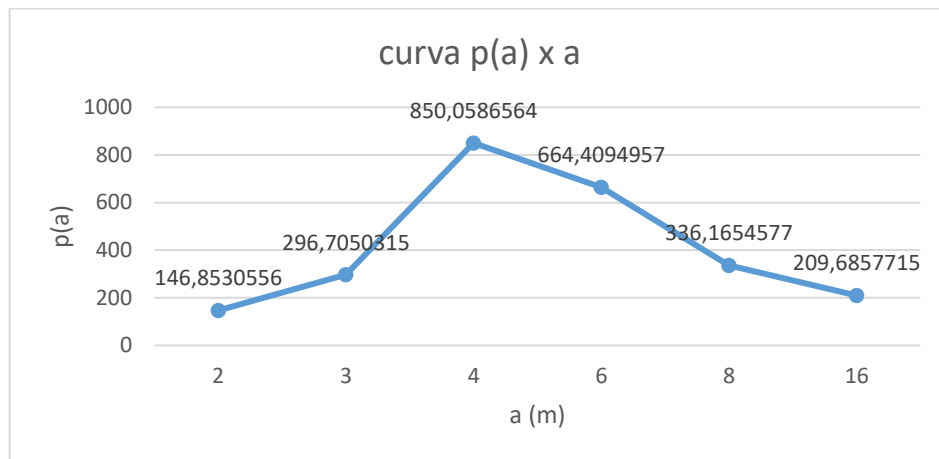
Fonte: Autoria própria, 2018.

Como não houve nenhum desvio relativo acima de 50%, logo a resistividade média recalculada não se altera.

3.5.2. Estratificação do solo em duas camadas

Com os valores de resistividades definidos para os respectivos espaçamentos é feito então o estudo da estratificação do solo em duas camadas. Existem vários métodos de estratificação. Devido ao formato da curva de resistividade por espaçamento, mostrado na Figura 44, o método de Pirson se apresenta mais preciso para realizara a estratificação.

Figura 44- Curva resistividade por espaçamento

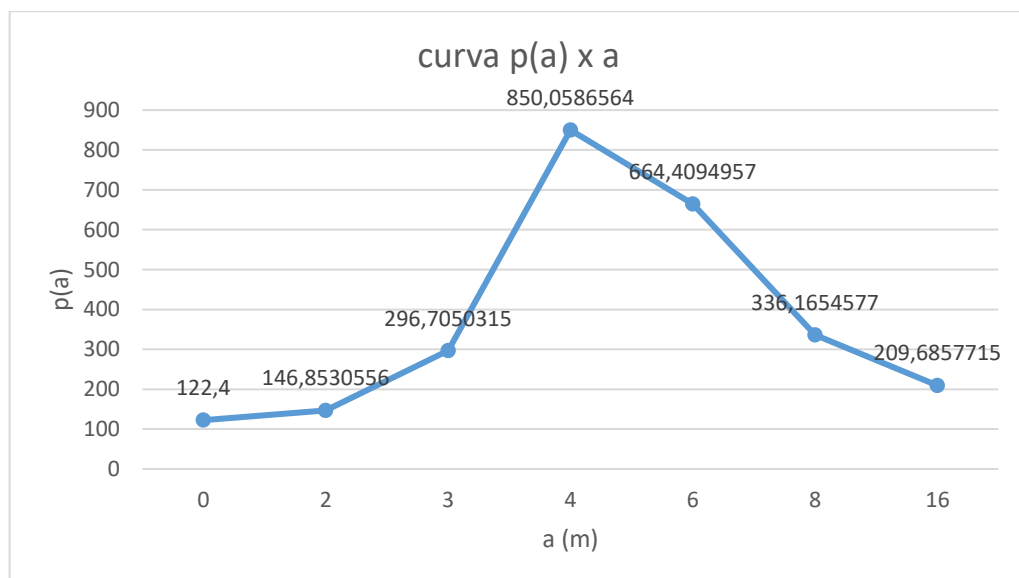


Fonte: Autoria própria, 2018.

Inicialmente é perceptível na curva dois trechos, sendo um ascendente e um descendente. A separação é feita pelo ponto de maior inclinação, no caso em 4 metros. Para isso é necessário analisá-los separadamente. Considera-se o primeiro trecho como um solo de duas camadas e obtém ρ_1 , ρ_2 e h_1 .

Prolongando a curva até o eixo das ordenadas encontra $\rho_1 = 122,4\Omega$. Mostrado na Figura 45.

Figura 45- Curva tocando no eixo das ordenadas



Fonte: Autoria própria, 2018.

Determinando:

$$a_1 = 1 \text{ m}$$

Se obtém na curva,

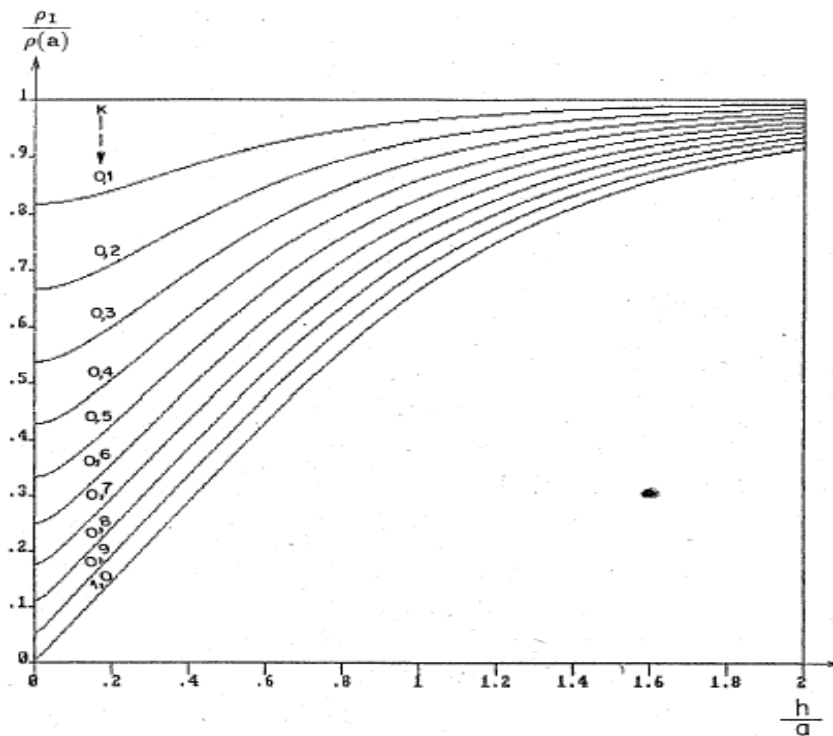
$$\rho(a_1) = 133,24 \, \Omega \cdot m$$

Por ser uma curva ascendente, logo K é positivo então:

$$\frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = \frac{122,4}{133,24} = 0,91864$$

Para um K positivo aplica-se o valor na família de curvas teóricas mostradas na Figura 46.

Figura 46- Curva para K positivo



Fonte: Kindermann, 2002 p. 34.

Assim traçando a reta $\rho_1/\rho(a_1) = 0,91864$ gera-se a Tabela 9 mostrada.

Tabela 9- Valores para a1

a1= 1 m p1/p(a1)=0,91864		
K	h/a1	h(m)
0,1	0,5873	0,5873

0,2	0,9383	0,9383
0,3	1,1748	1,1748
0,4	1,3229	1,3229
0,5	1,4742	1,4742
0,6	1,6129	1,6129
0,7	1,7389	1,7389
0,8	1,8573	1,8573
0,9	1,955	1,955
1	0	0

Fonte: Autoria própria, 2018.

Logo, determinando outro espaçamento:

$$a_1' = 2 \text{ m}$$

Se obtém na curva,

$$\rho(a_1)' = 146,85 \text{ } \Omega . m$$

Por ser uma curva ascendente, logo **K** é positivo então:

$$\frac{\rho 1}{\rho(a_1)'} = \frac{122,4}{146,85} = 0,83350$$

Para um **K** positivo aplica-se o valor na família de curvas teóricas mostradas na Figura 46. Assim traçando a reta $\rho 1/\rho(a_1) = 0,83350$ gera-se a Tabela 10 mostrada.

Tabela 10- Valores para a_1'

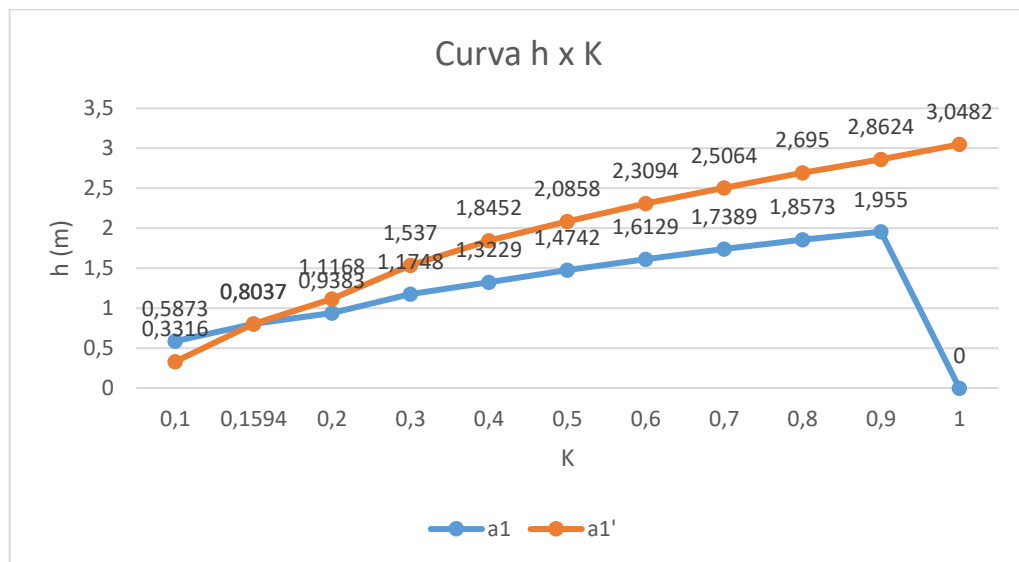
$a_1' = 2m \quad \rho 1/\rho(a_1') = 0,83350$		
K	h/a2	h(m)
0,1	0,1658	0,3316
0,2	0,5584	1,1168
0,3	0,7685	1,537
0,4	0,9226	1,8452
0,5	1,0429	2,0858

0,6	1,1547	2,3094
0,7	1,2532	2,5064
0,8	1,3475	2,695
0,9	1,4312	2,8624
1	1,5241	3,0482

Fonte: Autoria própria, 2018.

Logo a traçasse as duas curvas Kxh para cada espaçamento (a_1 e a_1') e encontra seu ponto de intersecção. Visto na Figura 47.

Figura 47- Ponto de intersecção



Fonte: Autoria própria, 2018.

Logo através da intersecção no gráfico se encontra:

$$h_1 = d_1 = 0,8037$$

$$K_1 = 0,1594$$

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{1 + K_1}{1 - K_1} = 122,4 \frac{1 + 0,1594}{1 - 0,1594} = 168,821 \Omega.m$$

Examinando o trecho decrescente da curva, conclui-se que o ponto com 4 metros de espaçamento, apresenta a maior inclinação. Portanto ponto de transição é relativo logo $a_t=4$.

Logo temos:

$$h_2' = d_1 + d_2' = \frac{2}{3} a_t = \frac{2}{3} 4 = 2,667 m$$

$$h_2' = 2,667 \text{ m}$$

$$d_2' = 2,667 - 0,8037 = 1,8633 \text{ m}$$

Calcula-se:

$$\rho_2' = \frac{d_1 + d_2'}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2'}{\rho_2}} = 151,505 \Omega.m$$

Determinando:

$$a_2 = 4 \text{ m}$$

Se obtém na curva,

$$\rho(a_2) = 850,06 \Omega.m$$

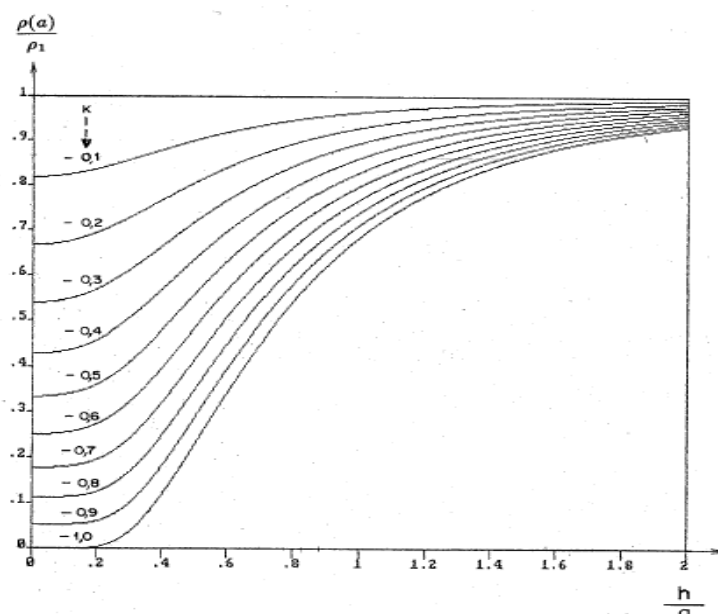
Por ser uma curva descendente, logo **K** é negativo, então:

$$\frac{\rho(a_2)}{\rho_2'} = \frac{850,06}{151,505} = 5,6107$$

Para um **K** negativo, a família de curvas teóricas são mostradas na Figura 48. Nela é perceptível que:

$$\frac{\rho(a_2)}{\rho_2'} \leq 1$$

Figura 48- Curva para K negativo

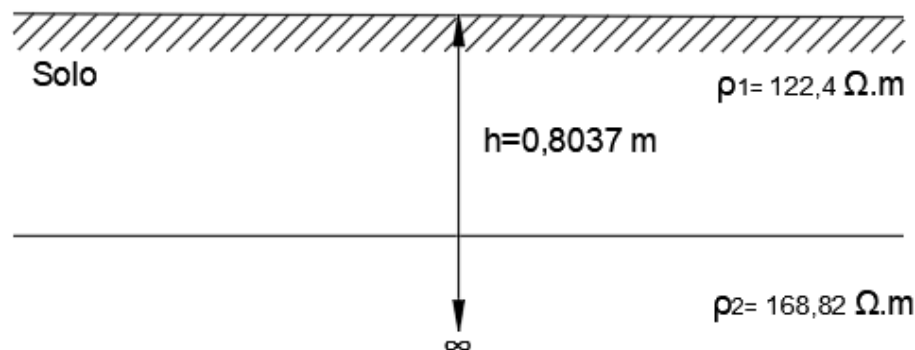


Fonte: Kindermann, 2002 p. 33.

O valor obtido de 5,1607 está fora do máximo da curva, logo impossibilitando o cálculo de h_2 , referente à altura da segunda camada e ρ_3 , referente a resistividade da terceira camada.

Para a medição em duas camadas, as hastes se apresentaram eficientes quanto aos valores obtidos. Então através do trecho ascendente da curva foi possível realizar a estratificação do solo em duas camadas. A Figura 49 mostra o resultado da estratificação. A primeira camada possui uma profundidade de 0,837 metros e resistividade igual a 122,4 ($\Omega.m$), já a segunda camada conta com resistividade igual a 168,82 ($\Omega.m$).

Figura 49- Solo Estratificado



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.5.3. Dimensionamento dos Sistema de Aterramento

O dimensionamento do sistema é feito por meio de hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas. Para o sistema foi optado por a existência de uma haste para cada descida do SPDA, assim as hastes possuem espaçamentos de 15 m. A parte frontal do edifício possui 6 descidas, logo resultando em 6 hastes paralelas. Na bibliografia utilizada (Kindermann) não há nenhuma forma de dimensionando de um sistema de aterramento de forma retangular com 15 metros de espaçamento, logo para como forma de aproximação foi dimensionado dois sistemas de hastes alinhadas em paralelo, iguais e isolados. A parte posterior do edifício possui igualmente o número de descidas, logo também conta com 6 hastes de aterramento. O dimensionamento das hastes em função da resistência é por meio iterativo de testes, como a resistividade do solo já conhecida, varia-se o modelo de haste para assim obter um valor de resistência elétrica aceitável.

Logo fazendo a análise para obter a resistência elétrica para 6 hastes paralelas. É proposto a utilização de 3 tipos hastes de cobre para a iteração dos cálculos, que são os modelos apresentados no Tabela 11.

Tabela 11- Modelos de Hastes de Cobre

Modelo	Comprimento (L)	Seção (d)
1	2,4 m	1/2"
2	2,4 m	1"
3	3 m	1"

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para o conjunto de 6 hastes paralelas, utilizando a haste modelo 1, temos:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36}$$

$$R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56}$$

$$R_6 = R_{61} + R_{62} + R_{63} + R_{64} + R_{65} + R_{66}$$

Como as hastes são iguais:

$$\begin{aligned} R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = R_{55} = R_{66} &= \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left[\frac{4L}{d} \right] = \frac{\rho a}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left[\frac{4 \cdot 2,4}{1,27 \cdot 10^{-2}} \right] \\ &= 0,439\rho a \end{aligned}$$

$$e_{12} = 15m \quad b_{12} = \sqrt{L^2 + e_{12}^2} = 15,19m$$

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = R_{45} = R_{54} = R_{56} = R_{65}$$

$$= \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{12} + L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12} - L)^2} \right] = 0,01056\rho a$$

$$e_{13} = 30m \quad b_{13} = \sqrt{L^2 + e_{13}^2} = 30,096m$$

$$R_{13} = R_{31} = R_{42} = R_{24} = R_{53} = R_{35} = R_{64} = R_{46} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{13} + L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13} - L)^2} \right]$$

$$= 0,00529968\rho a$$

$$e_{14} = 45 \text{ m} \quad b_{14} = \sqrt{L^2 + e_{14}^2} = 45,0639 \text{ m}$$

$$R_{14} = R_{41} = R_{25} = R_{52} = R_{36} = R_{63} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{14} + L)^2 - e_{14}^2}{e_{14}^2 - (b_{14} - L)^2} \right] = 0,00353521\rho a$$

$$e_{15} = 60 \text{ m} \quad b_{15} = \sqrt{L^2 + e_{15}^2} = 60,04798 \text{ m}$$

$$R_{15} = R_{51} = R_{26} = R_{62} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{15} + L)^2 - e_{15}^2}{e_{15}^2 - (b_{15} - L)^2} \right] = 0,002652\rho a$$

$$e_{16} = 75 \text{ m} \quad b_{16} = \sqrt{L^2 + e_{16}^2} = 75,038 \text{ m}$$

$$R_{16} = R_{61} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{16} + L)^2 - e_{16}^2}{e_{16}^2 - (b_{16} - L)^2} \right] = 0,0021218\rho a$$

Logo calcula-se:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} = 0,4637\rho a$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26} = 0,4722\rho a$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36} = 0,4748\rho a$$

$$R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56} = 0,4722\rho a$$

$$R_6 = R_{61} + R_{62} + R_{63} + R_{64} + R_{65} + R_{66} = 0,4637\rho a$$

$$R_{eq-6} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} = 0,07836\rho a$$

Admitindo-se a resistividade do solo da primeira camada $\rho a = 122,24 \text{ } (\Omega.m)$, logo a resistência equivalente do sistema para o uso da haste do modelo 1 é:

$$R_{eq-6} = 9,579 \text{ } \Omega$$

Para o conjunto de 6 hastes paralelas, utilizando a haste modelo 2, temos:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36}$$

$$R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56}$$

$$R_6 = R_{61} + R_{62} + R_{63} + R_{64} + R_{65} + R_{66}$$

Como as hastes são iguais:

$$\begin{aligned} R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = R_{55} = R_{66} &= \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left[\frac{4L}{d} \right] = \frac{\rho a}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left[\frac{4,2,4}{2,54 \cdot 10^{-2}} \right] \\ &= 0,39357\rho a \end{aligned}$$

$$e_{12} = 15m \quad b_{12} = \sqrt{L^2 + e_{12}^2} = 15,19m$$

$$\begin{aligned} R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = R_{45} = R_{54} = R_{56} = R_{65} \\ = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{12} + L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12} - L)^2} \right] = 0,010566\rho a \end{aligned}$$

$$e_{13} = 30m \quad b_{13} = \sqrt{L^2 + e_{13}^2} = 30,096m$$

$$\begin{aligned} R_{13} = R_{31} = R_{42} = R_{24} = R_{53} = R_{35} = R_{64} = R_{46} &= \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{13} + L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13} - L)^2} \right] \\ &= 0,00529968\rho a \end{aligned}$$

$$e_{14} = 45m \quad b_{14} = \sqrt{L^2 + e_{14}^2} = 45,0639m$$

$$R_{14} = R_{41} = R_{25} = R_{52} = R_{36} = R_{63} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{14} + L)^2 - e_{14}^2}{e_{14}^2 - (b_{14} - L)^2} \right] = 0,00353521\rho a$$

$$e_{15} = 60m \quad b_{15} = \sqrt{L^2 + e_{15}^2} = 60,04798m$$

$$R_{15} = R_{51} = R_{26} = R_{62} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{15} + L)^2 - e_{15}^2}{e_{15}^2 - (b_{15} - L)^2} \right] = 0,002652\rho a$$

$$e_{16} = 75 \text{ m} \quad b_{16} = \sqrt{L^2 + e_{16}^2} = 75,038 \text{ m}$$

$$R_{16} = R_{61} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{16} + L)^2 - e_{16}^2}{e_{16}^2 - (b_{16} - L)^2} \right] = 0,0021218\rho a$$

Logo calcula-se:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} = 0,417747\rho a$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26} = 0,42619a$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36} = 0,4288\rho a$$

$$R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56} = 0,42619\rho a$$

$$R_6 = R_{61} + R_{62} + R_{63} + R_{64} + R_{65} + R_{66} = 0,4177\rho a$$

$$R_{eq-6} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} = 0,0707\rho a$$

Admitindo-se a resistividade do solo da primeira camada $\rho a = 122,24 \text{ } (\Omega.m)$, logo a resistência equivalente do sistema para o uso da haste do modelo 2 é:

$$R_{eq-6} = 8,64 \text{ } \Omega$$

Para o conjunto de 6 hastes paralelas, utilizando a haste modelo 3, temos:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36}$$

$$R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56}$$

$$R_6 = R_{61} + R_{62} + R_{63} + R_{64} + R_{65} + R_{66}$$

Como as hastes são iguais:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = R_{55} = R_{66} = \frac{\rho a}{2\pi L} \ln \left[\frac{4L}{d} \right] = \frac{\rho a}{2\pi \cdot 2,4} \ln \left[\frac{4,2,4}{2,54 \cdot 10^{-2}} \right]$$

$$= 0,3267\rho a$$

$$e_{12} = 15m \quad b_{12} = \sqrt{L^2 + e_{12}^2} = 15,297m$$

$$\begin{aligned} R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = R_{45} = R_{54} = R_{56} = R_{65} \\ = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{12} + L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12} - L)^2} \right] = 0,0105411\rho a \end{aligned}$$

$$e_{13} = 30m \quad b_{13} = \sqrt{L^2 + e_{13}^2} = 30,149m$$

$$\begin{aligned} R_{13} = R_{31} = R_{42} = R_{24} = R_{53} = R_{35} = R_{64} = R_{46} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{13} + L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13} - L)^2} \right] \\ = 0,005296\rho a \end{aligned}$$

$$e_{14} = 45m \quad b_{14} = \sqrt{L^2 + e_{14}^2} = 45,1m$$

$$R_{14} = R_{41} = R_{25} = R_{52} = R_{36} = R_{63} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{14} + L)^2 - e_{14}^2}{e_{14}^2 - (b_{14} - L)^2} \right] = 0,003534\rho a$$

$$e_{15} = 60m \quad b_{15} = \sqrt{L^2 + e_{15}^2} = 60,0749m$$

$$R_{15} = R_{51} = R_{26} = R_{62} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{15} + L)^2 - e_{15}^2}{e_{15}^2 - (b_{15} - L)^2} \right] = 0,003977\rho a$$

$$e_{16} = 75m \quad b_{16} = \sqrt{L^2 + e_{16}^2} = 75,06m$$

$$R_{16} = R_{61} = \frac{\rho a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{16} + L)^2 - e_{16}^2}{e_{16}^2 - (b_{16} - L)^2} \right] = 0,002121\rho a$$

Logo calcula-se:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} = 0,35217\rho a$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26} = 0,36058\rho a$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36} = 0,36190\rho a$$

$$R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} + R_{56} = 0,36190\rho a$$

$$R_6 = R_{61} + R_{62} + R_{63} + R_{64} + R_{65} + R_{66} = 0,35217\rho a$$

$$R_{eq-6} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}} = 0,0596\rho a$$

Admitindo-se a resistividade do solo da primeira camada $\rho_a = 122,24 \text{ } (\Omega.m)$, logo a resistência equivalente do sistema para o uso da haste do modelo 3 é:

$$R_{eq-6} = 7,297 \text{ } \Omega$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

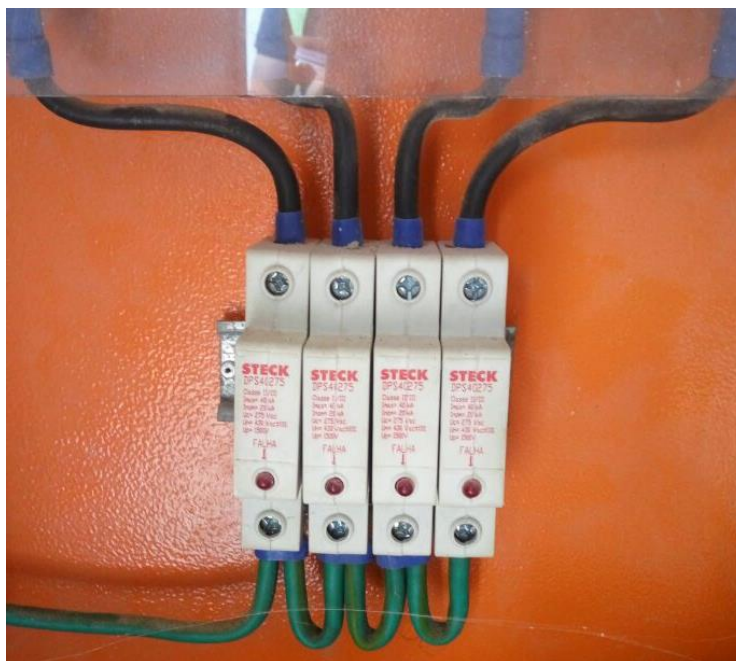
4.1. RESULTADO DO PROJETO DE SPDA

Para o projeto foi realizado a interligação equipotencial na entrada juntamente com o DPS projetado para o nível de proteção III. As conexões de entrada da linha aérea de sinal ou energia possuem blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento.

Para garantir a proteção interna do edifício deverá existir um sistema de proteção contra incêndio com a instalação de extintores. Para evitar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas causadas por uma descarga em uma linha elétrica, haverá a instalação de avisos visíveis de alerta.

Quanto ao Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS), o mesmo foi definido para atender o nível de proteção III e assim realizar a interligação equipotencial de descargas atmosféricas na entrada através da ligação das fases ao mesmo, com objetivo de reduzir diferenças de potencial causadas pelas descargas. O DPS deve se encontrar na entrada, ou seja, do quadro geral de distribuição do edifício, como pode ser mostrado na Figura 50.

Figura 50- Esquema da posição dos DPS's



Fonte: Autoria própria, 2018

A Tabela 12 contém a lista dos equipamentos dimensionados e necessários para o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, todos equipamentos estão descritos em quantidades e dimensões.

Tabela 12- Lista de equipamentos do SPDA

INTENS	QUANTIDADE
Caixa de Inspeção para Ensaios	12 unidades
Cabo de Cobre 35 mm ² (Descidas e Captação)	467,13 metros
DPS contendo centelhador	4 unidades
Fixador/ Isolador 200mm	85 unidades
Fixador/ Isolador 100mm	40 unidades
Tubo de Proteção Ø 1" x 2,5m	12 unidades

Fonte: Autoria própria, 2018.

4.2. RESULTADO DO PROJETO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO

Para medição de resistividade foram realizadas 5 medições consecutivas de resistência para cada valor de espaçamento escolhido. Devido a limitações do aparelho (terrômetro), não foi possível atender grandes espaçamentos, pois o mesmo possui um comprimento limitado de seus cabos de medição.

A explicação para a impossibilidade do cálculo do segundo trecho decrescente da curva de Pirson está no fato de que a o método utilizado para estratificar o solo mostrado pela bibliografia utilizada (KINDERMANN, 2002), causou erros na terceira camada quando aplicado o método de Driven Rod ou três hastes. Outro fator que pode ter influenciado diretamente foi devido as hastes de medição do terrômetro serem muito pequenas, cerca de 20 centímetros, logo para medição de camadas mais profundas a haste não tem comprimento suficiente para sensibilizar correntes sob efeito de maiores profundidades, desta forma irá apresentar erros no cálculo. Outro fator foi a limitação dos cabos do equipamento, onde os mesmos apresentavam comprimentos máximos de 16 metros, logo impossibilitando medições para longos comprimentos, a Figura 51 mostra a disposição do equipamento durante as medições em 16 metros, onde percebesse a dificuldade para tal medição.

Figura 51- Medição em 16 metros



Fonte: Autoria própria, 2018.

Logo por apresentar uma menor resistência de aterramento, é escolhida a haste referente ao terceiro modelo, ou seja, a haste de cobre de 3 metros de comprimento e seção de uma polegada. Referente as descidas da parte posterior do edifício, devido a simetria, possuem o mesmo espaçamento e a resistividade do solo ser a mesma, então o cálculo de dimensionamento é igual, logo são usadas as mesmas hastes.

Pela NBR5419/2015 é recomendável a interligação de todas as hastes de aterramento formando um anel de equipotencialização no perímetro do edifício, desta forma a resistência elétrica dos dois sistemas irá diminuir mais após a interligação. As hastes devem estar a uma profundidade de no mínimo 0,5 metros, e a uma distância de 1,5 metros do edifício, para cada haste haverá uma caixa de inspeção em alvenaria com 30x30x40(cm) de dimensão e preenchida com brita, logo totalizando 12 caixas de inspeção. Foi escolhido a conexão das descidas com as hastes por meio de solda exotérmica.

A Tabela 13 contém a lista dos equipamentos dimensionados e necessários para o Sistema de Aterramento, todos equipamentos estão descritos em quantidades e dimensões.

Tabela 13- Lista de Equipamentos para o Aterramento

INTENS	QUANTIDADE
Caixa de Inspeção do Aterramento (30x30x40 cm)	12 unidades
Hastes de Cobre (3m e 1")	12 unidades
Conectores para Solda	12 unidades
Cabo de Cobre (35mm ²) (Aterramento)	202,8 metros

Fonte: Autoria própria, 2018.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo a realização de um retrofit no edifício Pedro Fernandes Pereira, pertencente a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) campus Leste, situado na cidade de Mossoró-RN. Este retrofit consiste na realização dos projetos de: Sistema de Aterramento e Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

A edificação em questão é uma das mais antigas da instituição, a mesma é utilizada como um setor administrativo da universidade. Devido este ser um edifício de grande porte e nele existir um grande fluxo de pessoas em geral, se fez estritamente necessário para a realização deste trabalho.

No que se refere as medições com terrômetro, devido a certas limitações do aparelho, como o pequeno comprimento das hastes e da limitação no comprimento dos cabos de medição, não foi possível a obtenção de dados precisos. Entretanto os resultados obtidos para a resistividade do solo se mostraram extremamente coerentes, por se tratar de um solo caracteristicamente argiloso os valores obtidos estão dentro da faixa para aquele tipo de solo.

No sistema de captação do SPDA, devido a geometria simplificada do edifício foi optado escolher, por questões técnicas e econômicas, a captação por malha ou gaiola de Faraday, onde a mesma não altera nenhuma eficiência do sistema. No que se refere as descidas é muito importante que existam placas de alerta informando aos transeuntes para evitar o contato com os condutores.

É notório que ambos os sistemas são extremamente importantes para a proteção, seja ela humana, animal ou patrimonial. Evitando assim que descargas, sejam elas atmosféricas ou proveniente de equipamentos, não provoquem riscos ou danos diretos.

Por meio desse trabalho foi possível adquirir uma visão mais profissional sobre os fundamentos, funcionamentos, normas e projetos de Sistemas de Aterramento e Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas, dando maior atenção a critérios específicos que podem comprometer instalações e segurança, tais como a correta instalação e disposição dos elementos condutores, sejam eles para o sistema de aterramento de cargas ou captação e descida de descargas atmosféricas.

A instituição ainda possui outras estruturas antigas, onde estas também apresentam necessidade de retrofit's em suas instalações. Para trabalhos futuros são sugeridos a realização de mais adequações como estas deste trabalho, aplicadas nestas edificações citadas que as necessitam.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15751: Sistemas de Aterramento de Subestações - Requisitos**. Norma técnica, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Norma técnica, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas Parte 1: Princípios gerais**. Norma técnica, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5419-2: Proteção contra descargas atmosféricas Parte 2: Gerenciamento de risco**. Norma técnica, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5419-3: Proteção contra descargas atmosféricas Parte 3: Danos físicos a estrutura e perigos à vida**. Norma técnica, 2015.

CAVALIN, Geraldo; CERVELIN, Severino. **Instalações Elétricas Prediais**. 21 ed. São Paulo: Érica, 2013.

FLANDOLI, Fabio. **Manutenção do Aterramento**. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/5-aterramento/manutencao-do-aterramento/>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

GOOGLE MAPS. **Mossoró – RN**. 2017. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Cartilha de Proteção contra Raios**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/protecao/cartilha.de.protecao.contra.raios.php>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Infográfico- Morte por Raios**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/infografico.-.mortes.por.raios.php>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

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

LEITE, C.M.; PEREIRA FILHO, M.L. **Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos**. 4.ed. São Paulo: Oficina de Mydia, 1996.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas Industriais**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas Industriais**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FLORES, Ana José Martins. **Análise e Aplicação de Métodos para o Cálculo da Resistência de Terra em Sistemas com N Eletrodos Instalados em Solos Heterogêneos**. 2014. Dissertação – Universidade do Porto, Portugal. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/76656/2/32768.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

MINIPA. **Terrômetro Digital MTR-1520D Manual de Instruções**. Disponível em: http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/MTR-1520d-1301-BR.pdf > . Acesso em: 30 abr. 2017.

PINHEIRO, Thiago Figueira Leão. **Sistemas de Aterramento em Baixa Tensão**. 2013. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006066.pdf> >. Acesso em: 18 jul. 2018.

STÉFANI, Rodrigo Verardino de. **Metodologia de Projeto de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas para Edifício Residencial**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-30032012-113539/?&lang=br> >. Acesso em: 10 jul. 2018.

SOUZA, A. N. et al. **SPDA Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas Teoria, Prática e Legislação**. São Paulo: Érica, 2014.

SOZO, Iverson. **Desenvolvimento de uma ferramenta didática para cálculo de malha de aterramento**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná. Disponível em: < http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5650/1/PB_COELT_2014_2_03.pdf >. Acesso em: 15 jul. 2018.

WENNER, F. **Method of Measuring Earth Resistivity**. Bulletin of the Bureau of Standards. Washington D.C., 1916.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Memorial de Cálculo para análise de Risco da edificação

O presente documento tem por finalidade descrever o projeto de construção de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA), elaborado de acordo com a norma NBR 5419/2015. O edifício em questão não possuía um SPDA instalado.

Dados da edificação

Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)
9,0 m	13,40 m	82,80 m

A área de exposição equivalente (A_d) corresponde à área do plano da estrutura prolongada em todas as direções, de modo a levar em conta sua altura. Os limites da área de exposição equivalente estão afastados do perímetro da estrutura por uma distância correspondente à altura da estrutura no ponto considerado.

$$A_d = 13,40 \cdot 82,80 + 2 \cdot 3 \cdot 9 \cdot (13,40 + 82,80) + \pi \cdot (3 \cdot 9)^2 = 8594,54 \text{ m}^2.$$

Definições padrão NBR 5419/2015 em referência ao nível de proteção

Com o nível de proteção definido, a NBR 5419/2015 apresenta as características do SPDA a serem adotadas no projeto:

Ângulo de proteção (método Franklin) = 77° a 30°

Largura máxima da malha (método Gaiola de Faraday) = 15 m Raio da esfera rolante (método Eletrogeométrico) = 45 m

1.1. RISCO DE VIDA DE PERDA HUMANA (R1)

Risco de perda de vida humana (R1)

Os resultados para risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes) levam em consideração os componentes de risco de descargas na estrutura e próximo desta, e descargas em uma linha conectada à estrutura e próximo desta.

Para este risco em específico por se tratar de uma edificação que não corre risco de explosão e tampouco ser de cunho hospitalar os riscos Rc, Rm, Rw e Rz não oferecem risco de perda de vida humana, logo não são levados em consideração nos cálculos.

Componente Ra (risco de ferimentos a seres vivos causado por descargas na estrutura)

Componente relativo a ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora, nas zonas até 3m ao redor dos condutores de descidas.

Nd (número de eventos perigosos para a estrutura)

Cd (Fator de localização)	0,5
Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
$Nd = Ng \times Ad \times Cd \times 10^6$ (/ano)	0,02148345

Pa (probabilidade de uma descarga na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico)

Pta (Probabilidade de uma descarga a uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de toque e de passo)	1
Pb (Probabilidade de uma descarga na estrutura causar danos físicos)	1
$Pa = Pta \times Pb$	1

La (valores de perda na zona considerada)

rt (Fator de redução em função do tipo da superfície do solo ou do piso)	0,01
Lt (Número relativo médio típico de vítimas feridas por choque elétrico devido a um evento perigoso)	0,01
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
tz (Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona considerada) (h/ano)	8760
$La = rt \times Lt \times (nz/nt) \times (tz/8760)$	0,0001

Ra = Nd x Pa x La (/ano)	2,14835x10⁻⁶
---------------------------------	--------------------------------

Componente Rb (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na estrutura)

Componente relativo a danos físicos, causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente.

Nd (número de eventos perigosos para a estrutura)

Cd (Fator de localização)	0,5
Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (km ² xano)	5
Nd = Ng x Ad x Cd x 10 ⁻⁶ (/ano)	0,02148345

Pb (Probabilidade de uma descarga na estrutura causar danos físicos)	1
---	---

Lb (valores de perda na zona considerada)

rp (Fator de redução em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio)	1
rf (Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura)	1,00E-03
hz (Fator aumentando a quantidade relativa de perda na presença de um perigo especial)	2
Lf (Número relativo médio típico de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso)	0,1
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
tz (Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona considerada) (h/ano)	8760
Lb = rp x rf x hz x Lf x (nz/nt) x (tz/8760)	0,0002

Rb = Nd x Pb x Lb (/ano)	4,29669E-06
---------------------------------	--------------------

Componente Ru (risco de ferimentos a seres vivos causado por descargas na linha conectada)

Componente relativo a ferimentos aos seres vivos, causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura.

AL (área de exposição equivalente de descargas para a terra que atingem a linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
LL (Comprimento da seção de linha) (m)	200	100
AL = 40 x LL (m ²)	8000	4000

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
--	---

NL (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas na linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Ci (Fator de instalação da linha)	1	1
Ct (Fator do tipo de linha)	1	1
Ce (Fator ambiental)	0,5	0,5
NL = Ng x AL x Ci x Ce x Ct x (10 ⁶) (/ano)	0,02	0,01

Ndj (número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Adj (Área de exposição equivalente da estrutura adjacente) (m ²)	0	0
Cdj (Fator de localização da estrutura adjacente)	0,5	0,5
Ndj = Ng x Adj x Cdj x Ct x 10 ⁶ (/ano)	0	0

Ptu (Probabilidade de uma estrutura em uma linha que adentre a estrutura causar choques a seres vivos devidos a tensões de toque perigosas)	1
Peb (Probabilidade em função do NP para qual os DPS foram projetados)	1

Pu (probabilidade de uma descarga em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pld (Probabilidade dependendo da resistência Rs da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso Uw do equipamento)	1	1
Cld (Fator dependendo das condições de blindagem, aterramento e isolamento)	1	1
$P_u = P_{tu} \times P_{eb} \times P_{ld} \times C_{ld}$	1	1

Lu (valores de perda na zona considerada)

rt (Fator de redução em função do tipo da superfície do solo ou do piso)	0,01
Lt (Número relativo médio típico de vítimas feridas por choque elétrico devido a um evento perigoso)	0,01
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
tz (Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona considerada) (h/ano)	8760
$Lu = r_t \times L_t \times (n_z / n_t) \times (t_z / 8760)$	0,0001

R_u (Telecom) = (NL + NDJ) × PU × LU	0,000002
R_u (Energia) = (NL + NDJ) × PU × LU	0,000001
R_u (Total)	0,000003

Componente Rv (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na linha conectada)

Componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas, geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura), devido à corrente da descarga atmosférica transmitida, ou ao longo das linhas.

AL (área de exposição equivalente de descargas para a terra que atingem a linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
LL (Comprimento da seção de linha) (m)	200	100
AL = 40 x LL (m ²)	8000	4000

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
--	---

NL (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas na linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Ci (Fator de instalação da linha)	1	1
Ct (Fator do tipo de linha)	1	1
Ce (Fator ambiental)	0,5	0,5
NL = Ng x AL x Ci x Ce x Ct x (10 ⁻⁶) (/ano)	0,02	0,01

Ndj (número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Adj (Área de exposição equivalente da estrutura adjacente)	0 m ²	0 m ²
Cdj (Fator de localização da estrutura adjacente)	0.5	0.5
Ndj = Ng x Adj x Cdj x Ct x 10 ⁻⁶	0/ano	0/ano

Peb (Probabilidade em função do NP para qual os DPS foram projetados)	1
---	---

Pv (probabilidade de uma descarga em uma linha causar danos físicos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pld (Probabilidade dependendo da resistência Rs da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso Uw do equipamento)	1	1
Cld (Fator dependendo das condições de blindagem, aterramento e isolamento)	1	1
$P_v = P_{eb} \times P_{ld} \times C_{ld}$	1	1

Lv (valores de perda na zona considerada)

rp (Fator de redução em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio)	1
rf (Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura)	1,00E-03
hz (Fator aumentando a quantidade relativa de perda na presença de um perigo especial)	2
Lf (Número relativo médio típico de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso)	0,1
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
tz (Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona considerada) (h/ano)	8760
$L_v = r_p \times r_f \times h_z \times L_f \times (n_z/n_t) \times (t_z/8760)$	0,0002

Rv (Telecom) = (NL + NDJ) × Pv × Lv	0,000004
Rv (Energia) = (NL + NDJ) × Pv × Lv	0,000002
Rv (Total)	0,000006

Resultado de R1

O risco R1 é um valor relativo a uma provável perda anual média, calculado a partir da soma dos componentes de risco citados.

RISCOS	VALOR (10⁻⁵)
Ra	2,14835E-06
Rb	4,29669E-06

Rc	0
Rm	0
Ru	0,000003
Rv	0,000006
Rw	0
Rz	0
R1 (TOTAL)	$1,5445 \times 10^{-5}$

1.2. RISCO DE PERDAS DE SERVIÇO AO PÚBLICO (R2)

Os resultados para risco de perda de serviço ao público são levados em consideração os componentes de risco de descargas atmosféricas na estrutura e próxima desta, e descargas em uma linha conectada à estrutura e próxima desta.

Componente Rb (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na estrutura).

Componente relativo a danos físicos, que são causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando explosão ou incêndio, uma vez que podem também colocar em perigo o meio ambiente.

Nd (número de eventos perigosos para a estrutura)

Cd (Fator de localização)	0,5
Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
Nd = Ng x Ad x Cd x 10 ⁶ (/ano)	0,02148345

Pb (Probabilidade de uma descarga na estrutura causar danos físicos)	1
---	---

Lb (valores de perda na zona considerada)

rp (Fator de redução em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio)	1
rf (Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura)	1,00E-03
Lf (Número relativo médio típico de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso)	0,1

nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
$Lb = rp \times rf \times Lf \times (nz/nt)$	0,0001

$Rb = Nd \times Pb \times Lb$ (/ano)	2,14835E-06
--	--------------------

Componente Rc (risco de falha dos sistemas internos causado por descargas na estrutura).

Componente relativo a falhas de sistemas internos, causados por pulsos eletromagnéticos devido às descargas atmosféricas. Perda de serviço ao público pode ocorrer em todos os casos, junto com a perda de vida humana, nos casos de estruturas com risco de explosão, e hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos possam imediatamente colocar em perigo a vida humana.

Nd (número de eventos perigosos para a estrutura)

Cd (Fator de localização)	0,5
Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
$Nd = Ng \times Ad \times Cd \times 10^6$ (/ano)	0,02148345

Pc (probabilidade de uma descarga na estrutura causar falha a sistemas internos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pspd (Probabilidade em função do nível de proteção para qual os DPS foram projetados)	1	1
Cld (Fator dependendo das condições de blindagem, aterramento e isolamento)	1	1
$Pc.E = Pspd.E \times Cld.E$, $Pc.T = Pspd.T \times Cld.T$	1	1
$Pc = 1 - [(1 - Pc.E) \times (1 - Pc.T)]$	1	1

Lc (valores de perda na zona considerada)

Lo (Número relativo médio típico de vítimas por falha de sistemas internos devido a um evento perigoso)	0,01
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
$Lc = Lo \times (nz/nt)$	0,01

$Rc = Nd \times Pc \times Lc$ (/ano)	0,000214835
--------------------------------------	--------------------

Componente Rm (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na estrutura).

Componente relativo a falhas de sistemas internos, causados por pulsos eletromagnéticos devido às descargas atmosféricas. Perdas de serviço ao público pode ocorrer em todos os casos junto com a perda da vida humana, nos casos de estruturas com risco de explosão, e hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos possam imediatamente colocar em perigo a vida humana.

Nm (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas perto da estrutura)

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
Am (Área de exposição equivalente de descargas que atingem perto da estrutura) (m ²)	881200
$Nm = Ng \times Am \times 10^{-6}$ (/ano)	4,406

Pm (probabilidade de uma descarga perto da estrutura causar falha de sistemas internos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pspd (Probabilidade em função do nível de proteção para qual os DPS foram projetados)	1	1
Ks1 (Fator relevante à efetividade da blindagem por malha de uma estrutura)	1	1

Ks2 (Fator relevante à efetividade da blindagem por malha dos campos internos de uma estrutura)	1	1
Ks3 (Fator relevante às características do cabeamento interno)	1	1
Uw (Tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido) (kV)	1	1
Ks4 (Fator relevante à tensão suportável de impulso de um sistema)	1	1
$Pms = (Ks1 \times Ks2 \times Ks3 \times Ks4)^2$	1	1
$Pm.E = Pspd.E \times Pms.E$, $Pm.T = Pspd.T \times Pms.T$	1	1
$Pm = 1 - [(1 - Pm.E) \times (1 - Pm.T)]$	1	1

Lm (valores de perda na zona considerada)

Lo (Número relativo médio típico de vítimas por falha de sistemas internos devido a um evento perigoso)	0,01
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
$Lm = Lo \times (nz/nt)$	0,01

$Rm = Nm \times Pm \times Lm$ (/ano)	0,04406
--	----------------

Componente Rv (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na linha conectada).

Componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas, geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura), devido à corrente da descarga atmosférica transmitida, ou ao longo das linhas.

AL (área de exposição equivalente de descargas para a terra que atingem a linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
LL (Comprimento da seção de linha) (m)	200	100
AL = 40 x LL (m ²)	8000	4000

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
--	---

NL (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas na linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Ci (Fator de instalação da linha)	1	1
Ct (Fator do tipo de linha)	1	1
Ce (Fator ambiental)	0,5	0,5
NL = Ng x AL x Ci x Ce x Ct x (10 ⁶) (/ano)	0,02	0,01

Ndj (número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Adj (Área de exposição equivalente da estrutura adjacente)	0 m ²	0 m ²
Cdj (Fator de localização da estrutura adjacente)	0.5	0.5
Ndj = Ng x Adj x Cdj x Ct x 10 ⁻⁶	0/ano	0/ano

Peb (Probabilidade em função do NP para qual os DPS foram projetados)	1
---	---

Pv (probabilidade de uma descarga em uma linha causar danos físicos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
------------------------------	---------------------------------------	------------------------------

Pld (Probabilidade dependendo da resistência R_s da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso U_w do equipamento)	1	1
Cld (Fator dependendo das condições de blindagem, aterramento e isolamento)	1	1
$P_v = P_{eb} \times P_{ld} \times C_{ld}$	1	1

Lv (valores de perda na zona considerada)

rp (Fator de redução em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio)	1
rf (Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura)	1,00E-03
Lf (Número relativo médio típico de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso)	0,1
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
$L_v = r_p \times r_f \times L_f \times (n_z/n_t)$	0,0001

$R_v (\text{Telecom}) = (NL + NDJ) \times P_v \times L_v$	0,000002
$R_v (\text{Energia}) = (NL + NDJ) \times P_v \times L_v$	0,000001
$R_v (\text{Total})$	0,000003

Componente R_w (risco de falha dos sistemas internos causado por descargas na linha conectada).

Componente relativo a falhas de sistemas internos, causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta. Perda de serviço ao público pode ocorrer em todos os casos, junto com a perda de vida humana, nos casos de estruturas com risco de explosão, e hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos possam imediatamente colocar em perigo a vida humana.

AL (área de exposição equivalente de descargas para a terra que atingem a linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
LL (Comprimento da seção de linha) (m)	200	100
AL = 40 x LL (m ²)	8000	4000

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
--	---

NL (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas na linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Ci (Fator de instalação da linha)	1	1
Ct (Fator do tipo de linha)	1	1
Ce (Fator ambiental)	0,5	0,5
NL = Ng x AL x Ci x Ce x Ct x (10 ⁶) (/ano)	0,02	0,01

Ndj (número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Adj (Área de exposição equivalente da estrutura adjacente)	0 m ²	0 m ²
Cdj (Fator de localização da estrutura adjacente)	0.5	0.5
Ndj = Ng x Adj x Cdj x Ct x 10 ⁻⁶	0/ano	0/ano

Pw (probabilidade de uma descarga em uma linha causar falha a sistemas internos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pspd (Probabilidade em função do nível de proteção para qual os DPS foram projetados)	1	1

Pld (Probabilidade dependendo da resistência Rs da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso Uw do equipamento)	1	1
Cld (Fator dependendo das condições de blindagem, aterramento e isolamento)	1	1
$P_w = P_{spd} \times P_{ld} \times C_{ld}$	1	1

Lw (valores de perda na zona considerada)

Lo (Número relativo médio típico de vítimas por falha de sistemas internos devido a um evento perigoso)	0,01
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
$L_w = L_o \times (n_z/n_t)$	0,01

$R_w (\text{Telecom}) = (NL + NDJ) \times P_w \times L_w$	0,0002
$R_w (\text{Energia}) = (NL + NDJ) \times P_w \times L_w$	0,0001
$R_w (\text{Total})$	0,0003

Componente Rz risco de falha dos sistemas internos causado por descargas perto da linha).

Componente relativo a falhas de sistemas internos, causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta. Perda de serviço ao público pode ocorrer em todos os casos, junto com a perda da vida humana, nos casos de estruturas com risco de explosão, e hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos possam imediatamente colocar em perigo a vida humana.

Ai (área de exposição equivalente de descargas para a terra perto da linha).

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
LL (Comprimento da seção de linha) (m)	200	100
$AL = 4000 \times LL$ (m ²)	800000	400000

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
--	---

NL (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas na linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Ci (Fator de instalação da linha)	1	1
Ct (Fator do tipo de linha)	1	1
Ce (Fator ambiental)	0,5	0,5
$NL = Ng \times AL \times Ci \times Ce \times Ct \times (10^6)$ (/ano)	2	1

Pz (probabilidade de uma descarga perto da linha conectada à estrutura causar falha de sistemas internos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pspd (Probabilidade em função do nível de proteção para qual os DPS foram projetados)	1	1
Pli (Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga perto da linha conectada dependendo das características da linha e dos equipamentos)	1	1
Cli (Fator que depende da blindagem, do aterramento e das condições da isolamento da linha)	1	1
$Pz = Pspd \times Pli \times Cli$	1	1

Lz (valores de perda na zona considerada)

Lo (Número relativo médio típico de vítimas por falha de sistemas internos devido a um evento perigoso)	0,01
nz (Número de pessoas na zona considerada)	100
nt (Número total de pessoas na estrutura)	100
$Lz = Lo \times (nz/nt) \times (tz/8760)$	0,01

Rz (Telecom) = NL.T x Pz.T x Lz	0,02
Rz (Energia) = NL.E x Pz.E x Lz	0,01
Rz (Total)	0,03

Resultado de R2

O risco R2 é um valor relativo a uma provável perda anual média, calculado a partir da soma dos componentes de risco citados.

RISCOS	VALOR (10⁻³)
Ra	0
Rb	2,14835E-06
Rc	0,000214835
Rm	0,04406
Ru	0
Rv	0,000003
Rw	0,0003
Rz	0,03
R2 (TOTAL)	0,074579983

1.3. RISCO DE PERDAS DE PATRIMÔNIO CULTURAL

Os resultados para risco de perda de patrimônio cultural levam em consideração os componentes de risco de descargas na estrutura e em uma linha conectada à estrutura.

Componente Rb (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na estrutura).

Componente relativo a danos físicos, causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente.

Nd (número de eventos perigosos para a estrutura)

Cd (Fator de localização)	0,5
---------------------------	-----

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (km ² xano)	5
Nd = Ng x Ad x Cd x 10 ⁶ (/ano)	0,02148345

Pb (Probabilidade de uma descarga na estrutura causar danos físicos)	1
---	---

Lb (valores de perda na zona considerada)

rp (Fator de redução em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio)	1
rf (Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura)	1,00E-03
Lf (Número relativo médio típico de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso)	0,1
cz (Valor do patrimônio cultural na zona considerada) (R\$)	0
ct (Valor total da edificação e conteúdo da estrutura) (R\$)	1000000
Lb = rp x rf x Lf x (cz/ct)	0

Rb = Nd x Pb x Lb (/ano)	0
---------------------------------	----------

Componente Rv (risco de danos físicos na estrutura causado por descargas na linha conectada).

Componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas, geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura), devido à corrente da descarga atmosférica transmitida, ou ao longo das linhas.

AL (área de exposição equivalente de descargas para a terra que atingem a linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
LL (Comprimento da seção de linha) (m)	200	100
AL = 40 x LL (m ²)	8000	4000

Ng (Densidade de descargas atmosféricas para a terra) (/km ² x ano)	5
--	---

NL (Número médio anual de eventos perigosos devido a descargas na linha)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Ci (Fator de instalação da linha)	1	1
Ct (Fator do tipo de linha)	1	1
Ce (Fator ambiental)	0,5	0,5
$NL = Ng \times AL \times Ci \times Ce \times Ct \times (10^6)$ (/ano)	0,02	0,01

Ndj (número de eventos perigosos para uma estrutura adjacente)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Adj (Área de exposição equivalente da estrutura adjacente)	0 m ²	0 m ²
Cdj (Fator de localização da estrutura adjacente)	0.5	0.5
$Ndj = Ng \times Adj \times Cdj \times Ct \times 10^{-6}$	0/ano	0/ano

Peb (Probabilidade em função do NP para qual os DPS foram projetados)	1
---	---

Pv (probabilidade de uma descarga em uma linha causar danos físicos)

Linhas de Transmissão	Linhas de telecomunicações (T)	Linhas de energia (E)
Pld (Probabilidade dependendo da resistência Rs da blindagem do cabo e da tensão suportável de impulso Uw do equipamento)	1	1
Cld (Fator dependendo das condições de blindagem, aterramento e isolamento)	1	1
$Pv = Peb \times Pld \times Cld$	1	1

Lv (valores de perda na zona considerada)

rp (Fator de redução em função das providências tomadas para reduzir as consequências de um incêndio)	1
rf (Fator de redução em função do risco de incêndio ou explosão na estrutura)	1,00E-03
Lf (Número relativo médio típico de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso)	0,1
cz (Valor do patrimônio cultural na zona considerada) (R\$)	0
ct (Valor total da edificação e conteúdo da estrutura) (R\$)	1000000
$L_v = r_p \times r_f \times L_f \times (c_z/c_t)$	0

Rv (Telecom) = (NL + NDJ) × Pv × Lv	0
Rv (Energia) = (NL + NDJ) × Pv × Lv	0
Rv (Total)	0

Resultado de R3

O risco R3 é um valor relativo a uma provável perda anual média, calculado a partir da soma dos componentes de risco citados.

RISCOS	VALOR (10⁻⁴)
Ra	0
Rb	0
Rc	0
Rm	0
Ru	0
Rv	0
Rw	0
Rz	0
R3 (TOTAL)	0

1.4. RISCO DE PERDA DE VALORES ECONÔMICOS (R4)

Devido os dados para esta análise não estarem disponíveis, uma avaliação econômica não é requerida, logo o risco R4 para perda econômica (L4) não é considerado.

1.5. AVALIAÇÃO FINAL DO RISCO

O risco é um valor relativo a uma provável perda anual média. Para cada tipo de perda que pode ocorrer na estrutura, o risco resultante deve ser avaliado. Foram avaliados os seguintes riscos:

R1: risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes)

$$R1 = 1,544 \times 10^{-5} / \text{ano}$$

Status: A instalação de um sistema de SPDA é necessária, segundo a norma NBR5419/2015, pois $R > 10^{-5}$

R2: risco de perdas de serviço ao público

$$R2 = 74,5 \times 10^{-3} / \text{ano}$$

Status: A instalação de um sistema de SPDA é necessária, segundo a norma NBR5419/2015, pois $R > 10^{-3}$

R3: risco de perdas de patrimônio cultural

$$R3 = 0 / \text{ano}$$

Status: A instalação de um sistema de SPDA não é necessária para este risco, segundo a NBR5419/2015, pois $R \leq 10^{-3}$

1.6. SELEÇÃO DAS MEDIDAS DE PROTEÇÃO

Os riscos R1 e R2 necessitam de medidas de proteção, logo serão analisados.

RISCOS	R1 (10^{-5})	R2 (10^{-3})
Ra	0,214835	Não possui este risco
Rb	0,429669	0,00214835
Rc	Não possui este risco	0,214835
Rm	Não possui este risco	44,06
Ru	0,3	Não possui este risco
Rv	0,6	0,003
Rw	Não possui este risco	0,3
Rz	Não possui este risco	30
TOTAL	1,5445	74,579983

Para o risco R1 se concentra principalmente nos componentes Ru e Rv. Para o risco R2 se concentra principalmente nos riscos Rm, Rw e Rz.

Estes componentes de risco dominantes podem ser reduzidos:

- Provendo ao edifício completo com um SPDA de acordo com a ABNT NBR 5419-3. Também uma ligação equipotencial para descargas atmosféricas na entrada, um requisito obrigatório de SPDA, reduzindo também os componentes RU e RV por meio da probabilidade PEB;
- Provendo medidas de proteção contra as consequências de fogo (como extintores, sistema automático de detecção de incêndio etc.). Isto irá reduzir os componentes RB e RV por meio do fator de redução r_p ;
- Instalando uma proteção com DPS coordenados de acordo com a ABNT NBR 5419-4 para os sistemas de energia interno e sistemas de sinais. Isto irá reduzir os componentes RC, RZ, RM e RW por meio da probabilidade PSPD.

Solução:

- Proteger a edificação com um **SPDA classe III** ($PB = 0,1$ incluindo também $PEB = 0,05$);
- Incluir a interligação equipotencial de descargas atmosféricas obrigatória na entrada com **DPS projetados para NP III** ($PEB = 0,05$) e reduzir componentes RU e RV. E $P_{spd}=0,05$;
- Realizar na conexão de entrada da linha aérea de sinal ou energia a blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento, logo os valores se obtém $C_{ld}=1$ e $C_{li}= 0$, assim zerando R_v , logo $K_{s3}=0,01$;
- Instalar um sistema de proteção contra incêndio como extintores ($r_p = 0,5$);
- Para evitar choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas causadas por uma descarga em uma linha elétrica, se faz necessária a instalação de avisos visíveis de alerta ($PTU= 10^{-2}$).

Utilizando estes valores nas equações, novos valores de componentes de risco $R1^*$ e $R2^*$ são obtidos:

RISCOS	$R1 (10^{-5})$	$R1^*(10^{-5})$	$R2 (10^{-3})$	$R2^* (10^{-3})$
Ra	0,231	0,0214835	-	-
Rb	0,115	0,0214835	0,002307	0,000107417
Rc	-	-	2,307	0,0209464
Rm	-	-	-	0,000040599
Ru	50	0,00015	-	-
Rv	0,5	0,015	0,010	0,000075

Rw	-	-	10	0,015
Rz	-	-	-	0
TOTAL	50,846	0,0581169	1017,0	0,0365694

Logo com o SPDA instalado teremos,

R1: risco de perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes)

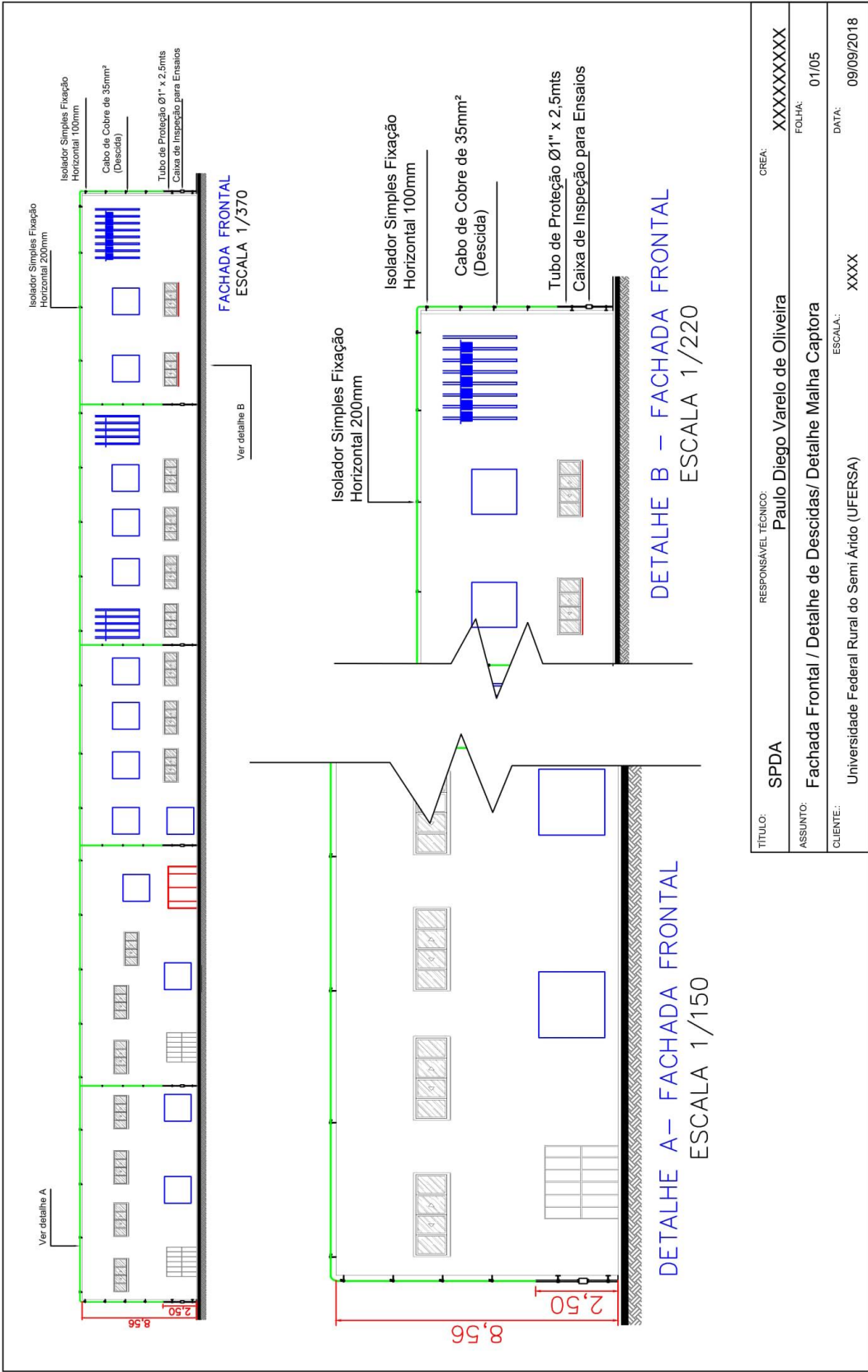
$$R1 = 0,0746 \times 10^{-5} / \text{ano} < RT = 10^{-5}$$

R2: risco de perdas de serviço ao público

$$R2 = 0,30594 \times 10^{-3} < RT = 10^{-3}$$

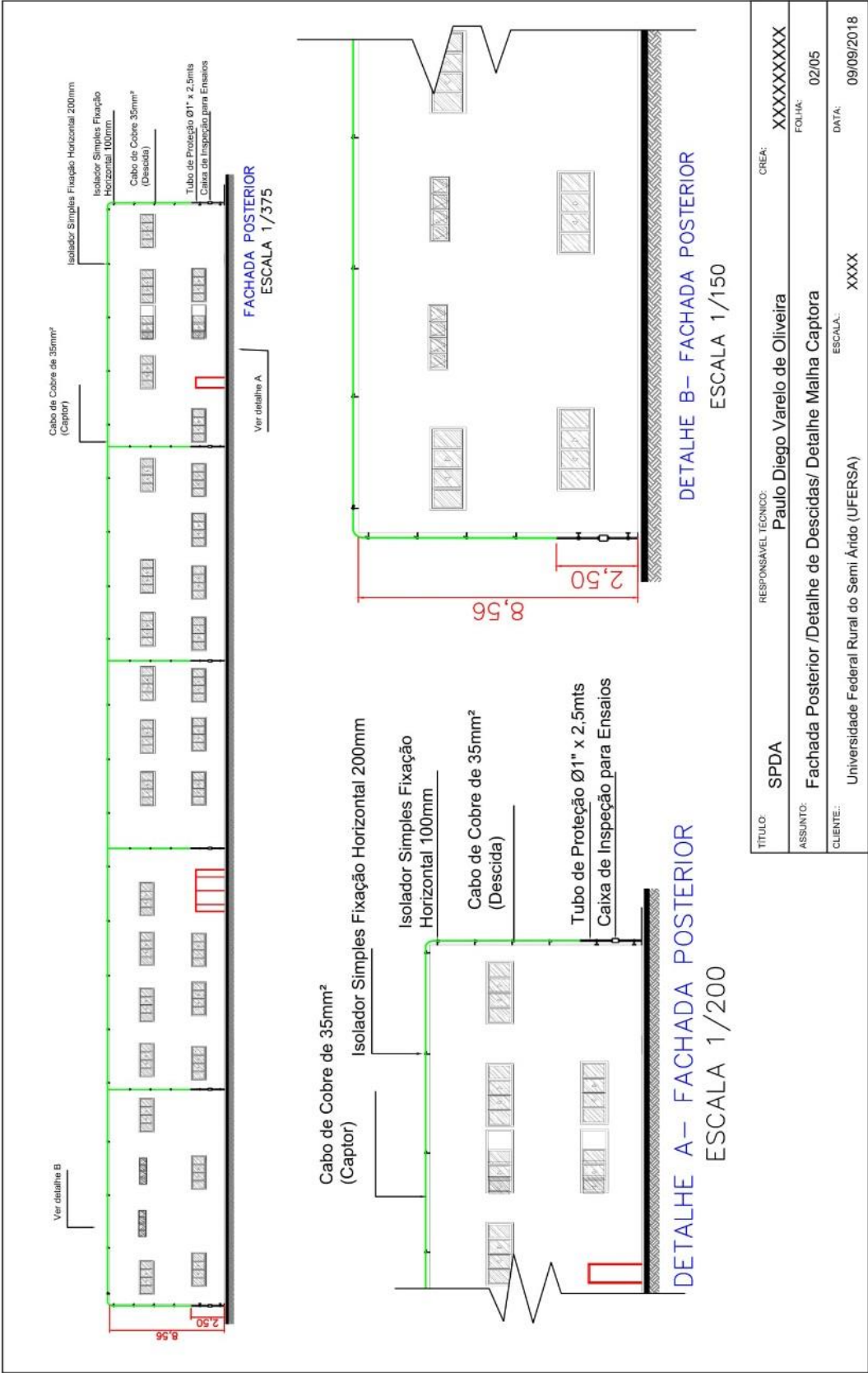
Assim temos que ambos os riscos estão dentro dos riscos toleráveis para o SPDA selecionado. É importante frisar que a escolha da solução para implementação de um SPDA é decidida por fatores técnicos e econômicos.

APÊNDICE B- Folha 01/05

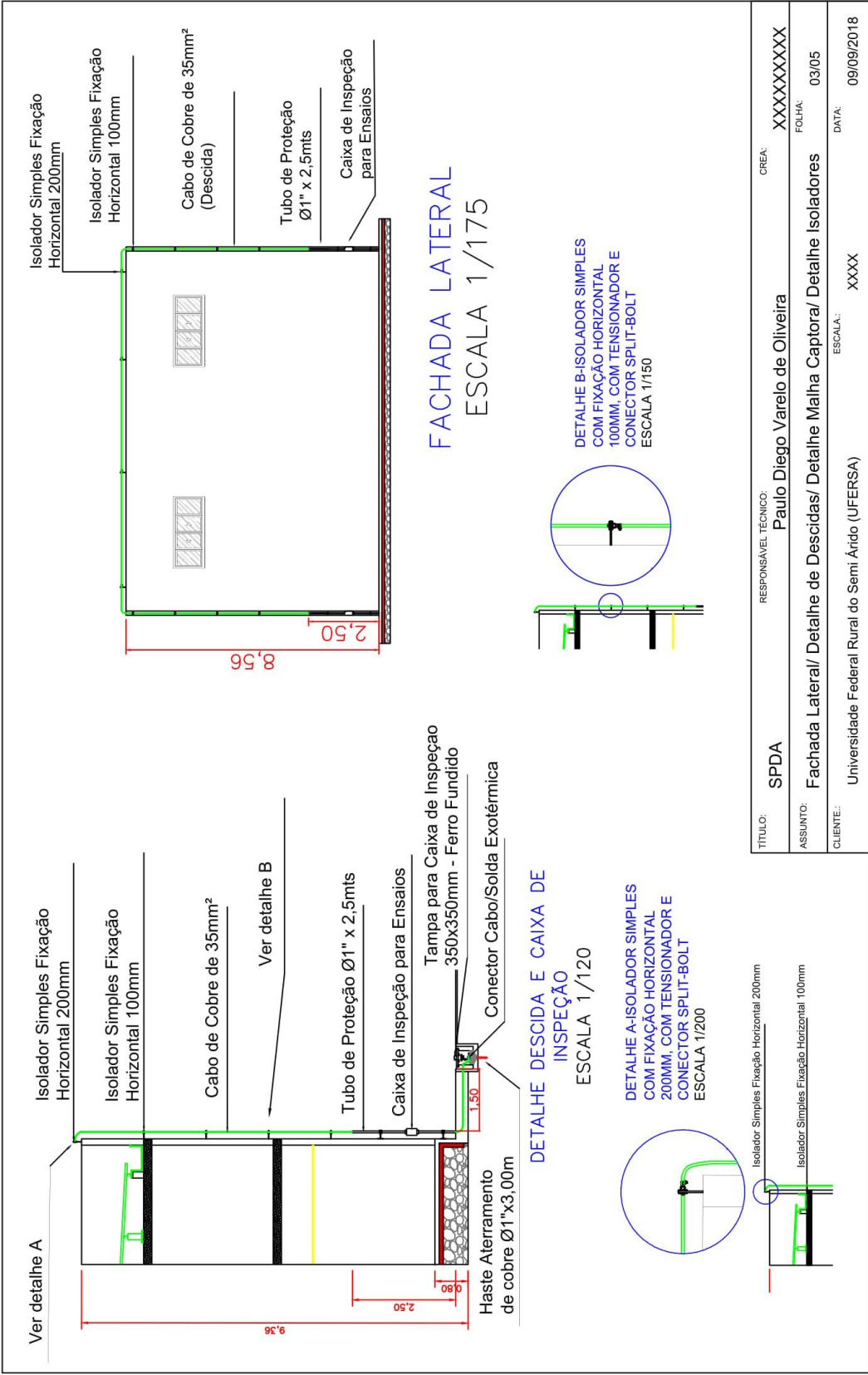


TÍTULO:	SPDA	RESPONSÁVEL TÉCNICO:	Paulo Diego Varelo de Oliveira	CREA:	XXXXXXXXXX
ASSUNTO:	Fachada Frontal / Detalhe de Descidas/ Detalhe Malha Captora			FOLHA:	01/05
CLIENTE:	Universidade Federal Rural do Semi Árido (UFERSA)	ESCALA:	XXXX	DATA:	09/09/2018

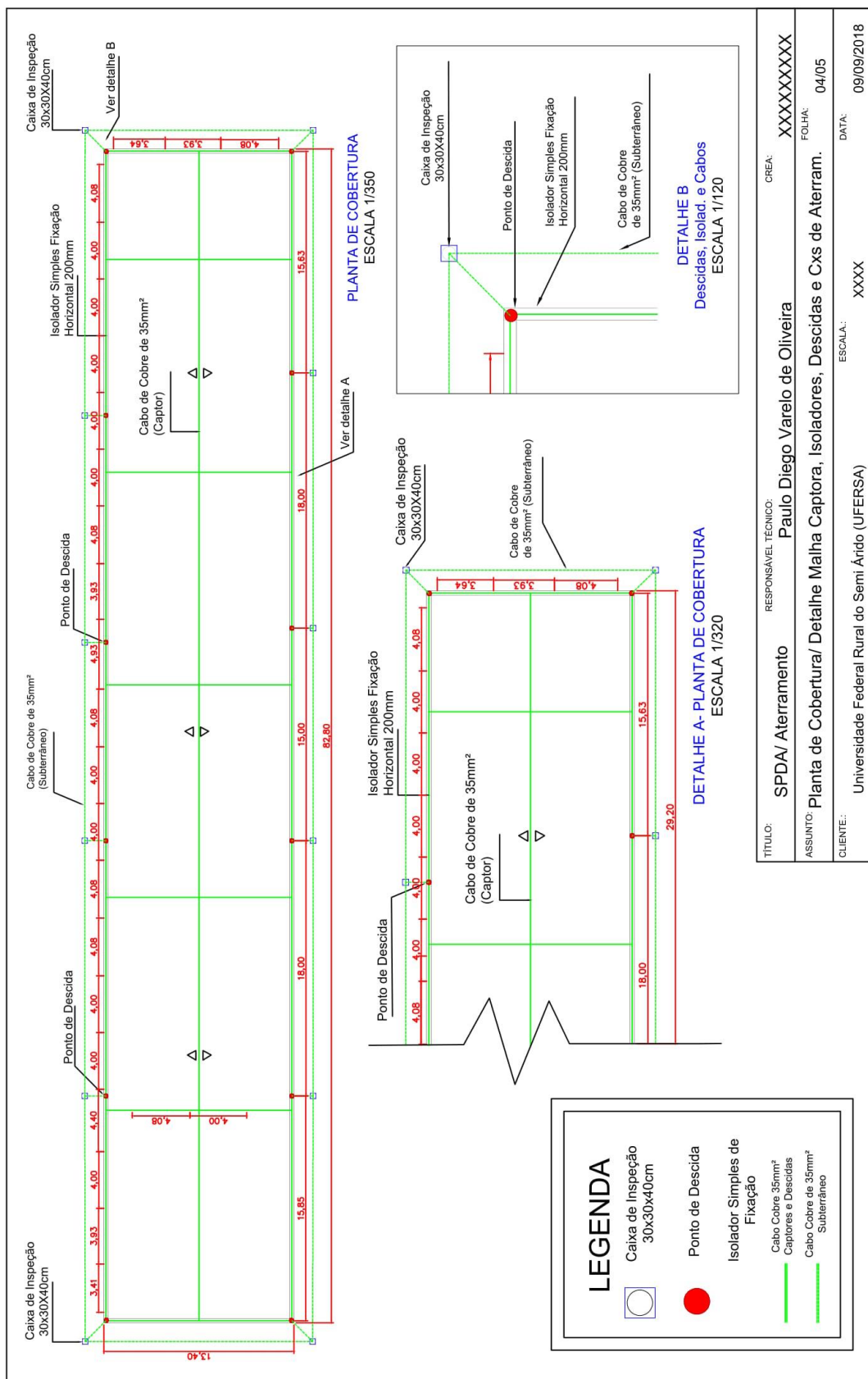
APÊNDICE C- Folha 02/05



APÊNDICE D- Folha 03/05



APÊNDICE E- Folha 04/05



APÊNDICE F- Folha 05/05

