

Eduardo Marcon Kafer

**SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS PARA UMA INDÚSTRIA TÊXTIL: ESTUDO  
DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica  
Orientador: Prof. Dr. Renato Lucas  
Pacheco

Florianópolis  
2018



Marcon Kafer, Eduardo

SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS  
PARA UMA INDÚSTRIA TÊXTIL: ESTUDO DE CASO / Eduardo  
Marcon Kafer ; orientador, Renato Lucas Pacheco,  
2018.

119 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, , Graduação  
em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. SPDA. 3. Análise de  
Risco . 4. Aterramento Elétrico. I. Pacheco, Renato  
Lucas. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.



Eduardo Marcon Kafer

**SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS PARA UMA INDÚSTRIA TÊXTIL: ESTUDO  
DE CASO**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pela Banca  
Examinadora

Local, 15 de fevereiro de 2018.

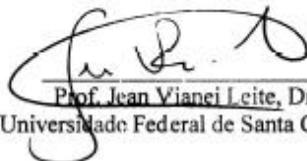


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.  
Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Jean Vianei Leite, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Gustavo Xavier de Andrade Pinto.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho ao meu querido avô Ilgo, que hoje comemora esta conquista junto comigo. Ele no céu, e eu na Terra.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a meus pais pelo apoio incondicional ao longo de minha trajetória acadêmica, à minha família, que sempre esteve ao meu lado, e aos meus queridos amigos, que tornaram estes anos de faculdade tão especiais.

Agradeço à toda equipe docente do Curso de Graduação Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela dedicação incondicional ao ensino de seus pupilos. Em especial, agradeço ao ilustre Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr., nosso estimado coordenador e meu orientador, pela constante luta em benefício da Universidade e pela honra de tê-lo presente como membro da banca avaliadora.

Agradeço também ao Prof. Jean Viane Leite, Dr. e ao Eng. Gustavo Xavier de Andrade Pinto, pela participação na banca avaliadora e pela crítica honesta, inteligente, e altamente construtiva.



*“Quando vejo um homem cego por ganância, sacrificando seu tempo, seu sono, sua liberdade, sua virtude, e talvez até seus amigos por fúteis ambições, que pena, penso eu, ele pagou caro demais pelo apito”.*  
(Benjamin Franklin, 1758)



## RESUMO

Este trabalho aplica os conceitos, métodos e melhores práticas referentes a sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) e aterramento elétrico à um estudo de caso, que toma as instalações de uma indústria têxtil, localizada no município de Concórdia – SC, como objeto de estudo. Identificou-se que a unidade não possui SPDA, tampouco dispositivos de proteção contra surtos (DPS) instalados, comumente encontrados em estruturas da mesma natureza. Através de uma detalhada análise de risco, concluiu-se que a empresa está, de fato, desprotegida e exposta aos riscos impostos por descargas atmosféricas e necessita de medidas de proteção. Por esta razão, propôs-se uma solução que contempla o projeto de um SPDA, interno e externo, e de um sistema de aterramento adequado, que somados reduzem os riscos existentes à valores toleráveis, assegurando a proteção da edificação.

**Palavras-chave:** SPDA. Aterramento elétrico. Análise de risco.



## **ABSTRACT**

This essay applies theoretical concepts, design methods and usual practices regarding lightning protection systems (LPS) and electrical grounding towards a case study, which analyses the facilities of a textile industry located in the state of Santa Catarina, Brazil. The first field inspection revealed that, due to the absence of both internal and external protection systems, the building is unshielded against electrical discharges, which is highly unusual given the industry's size, geographical location and branch of activity. A detailed risk analysis pointed out to the fact that the facilities are, indeed, exposed to the effects of lightning bolts, and therefore, requires protective measures. In order to ensure safety, the essay proposes a solution that includes the design of a complete lightning protection system and electrical grounding ring, which combined are able to reduce the risks to acceptable values.

**Keywords:** LPS. Electrical grounding. Risk analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nuvem carregada eletricamente.....	31
Figura 2 – Descarga elétrica entre nuvem e terra .....	34
Figura 3 – Sequência cronológica de um piloto descendente.....	35
Figura 4 – Pilotos ascendentes partindo do topo de edifícios.....	36
Figura 5 – Configuração dos eletrodos para o método de Wenner .....	39
Figura 6 – Configuração do terrômetro MTD20KWe para medições de resistividade.....	41
Figura 7 – Croquis de medição via método de Wenner .....	43
Figura 8 – Modelagem do solo em duas camadas .....	45
Figura 9 - Curvas $\rho \times a$ para solo de duas camadas.....	47
Figura 10 – Curvas de resistividade de Endrenyi.....	50
Figura 11 – Tensão de passo .....	52
Figura 12 – Circuito equivalente da tensão de passo .....	53
Figura 13 – Haste vertical cravada em solo homogêneo.....	55
Figura 14 – Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes .....	56
Figura 15 – Linhas equipotenciais resultantes de duas hastes paralelas.....	57
Figura 16 – Paralelismo entre as hastes de aterramento.....	59
Figura 17 – Arranjo em quadrado vazio com 8 hastes .....	59
Figura 18 – Casa danificada por um raio .....	61
Figura 19 – Esquemático de um SPDA externo.....	62
Figura 20 – Subsistema captor tipo Franklin.....	63
Figura 21 – Árvore de danos .....	68
Figura 22 – DPS trifásico com conexão de neutro.....	70
Figura 23 – Fluxograma para avaliação da necessidade de proteção ....	74
Figura 24 – Sistema de proteção contra descargas atmosféricas completo .....	77
Figura 25 – Esfera rolante aplicada à um para-raios Franklin.....	79
Figura 26 – Mapa topográfico.....	83
Figura 27 – Densidade de descargas atmosféricas para a terra .....	84
Figura 28 - Número de eventos perigosos calculados pela análise de risco .....	91
Figura 29 – Probabilidades de danos calculadas .....	93
Figura 30 – Probabilidades de perdas calculadas.....	93
Figura 31 - Componentes de risco da estrutura em seu estado atual.....	94
Figura 32 - Componentes de risco recalculadas com SPDA classe III e DPS classe I.....	95
Figura 33 – Detalhamento da instalação de barras chatas de alumínio em um telhado.....	97

Figura 34 – Detalhamento da instalação de um condutor de descida tipo barra chata.....	99
Figura 35 – Detalhamento da instalação de um DPS trifásico.....	100
Figura 36 – Direções de medição utilizadas no ensaio via método de Wenner.....	101
Figura 37 – Curva $\rho \times a$ com os valores do ensaio de resistividade...	103
Figura 38 – Prolongamento da curva $\rho \times a$ para estratificação em duas camadas.....	104

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Efeitos de raios em diferentes estruturas .....	66
Quadro 2 - Componentes principais de um SPDA .....	69
Quadro 3 – Componentes de risco considerados para cada tipo de perda .....	72



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de rigidez e constante dielétrica para diferentes materiais .....	33
Tabela 2 – Correntes de descarga mínimas e comprimento de salto .....	36
Tabela 3 – Espaçamentos recomendados pela NBR 7117 .....	42
Tabela 4 – Número mínimo de linhas de medição por faixa de área ....	42
Tabela 5 – Valores de K para aterramento em quadrado vazio com 8 hastes .....	60
Tabela 6 – Valores típicos de distâncias entre condutores de descida ..	64
Tabela 7 – Dimensões mínimas para interligação de BEP ou BEL .....	71
Tabela 8 – Valores típicos para riscos toleráveis .....	73
Tabela 9 – Valores de parâmetros de diferentes métodos de proteção..	75
Tabela 10 – Ângulos de proteção $\alpha$ ( $^{\circ}$ ) para diferentes classes de SPDA e alturas do captor .....	76
Tabela 11 – Principais aspectos estruturais da instalação .....	85
Tabela 12 – Principais aspectos da linha de transmissão .....	85
Tabela 13 – Quadro de cargas da unidade industrial.....	86
Tabela 14 – Relação dos bens armazenados na estrutura.....	87
Tabela 15 – Parâmetros característicos da edificação .....	89
Tabela 16 – Parâmetros da linha de energia.....	89
Tabela 17 – Parâmetros de entrada referentes à linha de sinal.....	90
Tabela 18 – Características da zona de proteção.....	90
Tabela 19 – Número de eventos perigosos para cada ponto de impacto	92
Tabela 20 – Componentes do sistema captor .....	96
Tabela 21 – Componentes do sistema de descida .....	98
Tabela 22 – Dados obtidos das medições de resistividade.....	102
Tabela 23 – Desvios padrão e valores finais de resistividade .....	102
Tabela 24 – Parâmetros resultantes da estratificação do solo em duas camadas .....	104
Tabela 25 – Componentes do sistema de aterramento .....	105
Tabela 26 – Parâmetros do cálculo da resistência de aterramento e valores finais .....	106



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEL	Barramento de equipotencialização local
BEP	Barramento de equipotencialização principal
DPS	Dispositivo de Proteção conta Surtos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
SPDA	Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas
ABVTEX	Associação Brasileira do Varejo Têxtil
FNQ	Fundação Nacional da Qualidade
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MPS	Medida de proteção contra surtos
LEMP	Light electromagnetic impulse



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS .....	26
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>29</b>
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	29
2.2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	30
<b>2.2.1</b>	<b>Eletrização das nuvens.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Formação do raio .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Descarga elétrica proveniente de um raio.....</b>	<b>34</b>
2.2.3.1	Descarga piloto .....	35
2.2.3.2	O último salto.....	36
2.2.3.3	Descarga principal.....	37
2.3	ATERRAMENTO ELÉTRICO .....	37
<b>2.3.1</b>	<b>Medição da resistividade do solo .....</b>	<b>38</b>
2.3.1.1	Método de Wenner.....	38
2.3.1.2	Procedimento de medição e análise dos resultados.....	40
<b>2.3.2</b>	<b>Estratificação do solo .....</b>	<b>44</b>
2.3.2.1	Modelagem em duas camadas e configuração de Wenner....	45
2.3.2.2	Método simplificado para estratificação em duas camadas ..	47
<b>2.3.3</b>	<b>Sistemas de aterramento.....</b>	<b>49</b>
2.3.3.1	Resistividade aparente e resistência de aterramento .....	49
2.3.3.2	Tensão de passo .....	51
2.3.3.3	Tensão de toque .....	53
2.3.3.4	Componentes e configurações de um sistema de aterramento.....	54
2.4	SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	61

<b>2.4.1</b>	<b>Conceitos básicos.....</b>	<b>62</b>
<b>2.4.2</b>	<b>- Efeitos de raios em edificações .....</b>	<b>65</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Componentes de um SPDA .....</b>	<b>68</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Avaliação e gerenciamento do risco .....</b>	<b>71</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Métodos de projeto .....</b>	<b>75</b>
2.4.5.1	Método de Franklin.....	76
2.4.5.2	Método da gaiola de Faraday .....	77
2.4.5.3	Método eletrogeométrico ou esfera rolante .....	78
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>81</b>
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	81
3.2	CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA.....	82
<b>3.2.1</b>	<b>Localização geográfica .....</b>	<b>83</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Condições climáticas e densidade de descargas atmosféricas .....</b>	<b>84</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Estado atual das instalações.....</b>	<b>85</b>
3.3	ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO.....	87
<b>3.3.1</b>	<b>Determinação das quantidades relevantes e zonas de proteção .....</b>	<b>88</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Área de exposição equivalente e número anual de eventos perigosos .....</b>	<b>91</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Avaliação da probabilidade de danos .....</b>	<b>92</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Avaliação das quantidades de perdas .....</b>	<b>93</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Avaliação geral do risco e seleção das medidas de proteção .....</b>	<b>93</b>
3.4	PROJETO DO SPDA .....	95
<b>3.4.1</b>	<b>Método de projeto.....</b>	<b>95</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Posicionamento e dimensionamento do subsistema captor .....</b>	<b>96</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida.....</b>	<b>97</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Sistemas internos de proteção.....</b>	<b>99</b>

3.5	PROJETO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	100
3.5.1	Medição de resistividade.....	100
3.5.2	Estratificação do solo em duas camadas .....	103
3.5.3	Distribuição e dimensionamento do sistema de aterramento .....	104
4	CONCLUSÕES .....	107
	REFERÊNCIAS .....	109
	APÊNDICE A – Esquemático do SPDA .....	113
	APÊNDICE B – Subsistema de descida e aterramento .	115
	ANEXO A – Diagrama unifilar.....	117



## 1 INTRODUÇÃO

Apesar de presente no cotidiano do planeta desde os primórdios, o raio só passou a ser compreendido propriamente no século XVIII, através dos estudos e experimentos de Benjamin Franklin. Ele acreditava que o raio possuía natureza elétrica e afirmava que o mesmo nada mais era do que uma corrente elétrica de grandes proporções. Em 1752, junto a seu filho em um tempestuoso dia na Filadélfia, Franklin pôs sua teoria à prova através do famoso experimento da pipa e chave, o qual impulsionou o desenvolvimento da ciência dedicada ao estudo do fenômeno e suas aplicações práticas. Mesmo não sendo o primeiro a teorizar a relação entre raios e eletricidade, Franklin foi o primeiro a provar experimentalmente sua natureza à comunidade científica, abrindo portas para o sucesso de seus sistemas de proteção. Ao contrário do senso comum, o experimento não cativou a invenção do para-raios, mas impulsionou sua aceitação e aplicação, pois o mesmo já havia sido inventado por Franklin dois anos antes, por decorrência de suas observações a respeito do efeito eletrostático de pontas metálicas.

Contribuições históricas à parte, tempestades eletrostáticas apresentam grandes riscos à segurança da sociedade, especialmente em locais alvejados pelo fenômeno com frequência. Segundo o INPE (2017), a incidência de mais de 50 milhões de raios por ano torna o Brasil um dos líderes mundiais no critério, fato que reforça a necessidade SPDA em áreas de risco e explica sua vasta aplicação ao longo do território nacional.

O estudo objeto deste trabalho identificou a ausência de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em uma indústria têxtil no interior de Santa Catarina, sendo que a mesma se encontra em situação de risco. A empresa está alocada no topo de uma colina relativamente isolada, sem cobertura vegetal elevada ou SPDA próximos, no município de Concórdia – SC, características que compõem um perfil de risco elevado em função da alta probabilidade de incidência de raios. De acordo com o mapa de descargas atmosféricas do INPE, utilizado como padrão pela NBR5419 (ABNT, 2015), a região registra uma alta densidade de descargas atmosféricas, com aproximadamente 10,3 descargas por km<sup>2</sup> por ano. A possível incidência de raios afeta a segurança dos funcionários e oferece uma série de riscos estruturais, ambos fatores que motivaram a busca por uma solução permanente.

Portanto, através do estudo do fenômeno físico, métodos de projeto e características estruturais específicas espera-se desenvolver um SPDA e sistema de aterramento adequado, satisfazendo as necessidades técnicas e orçamentárias da empresa. A implementação física do sistema, porém,

foge do escopo deste trabalho por limitações práticas e ficará a critério da empresa.

### 1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma solução técnica, através do projeto de um SPDA e sistema de aterramento, que reduza os riscos de perda de vida humana e de valor econômico a valores toleráveis, garantindo, assim, a segurança dos funcionários e do investimento concentrado na empresa.

A tarefa divide-se em três grandes objetivos. O primeiro visa conduzir uma análise de risco detalhada no local e avaliar se há, de fato, riscos à serem levados em consideração e se estes ultrapassam valores toleráveis. O segundo objetivo consiste em selecionar as medidas de proteção adequadas caso precise-se reduzir os riscos no local. Por fim, o trabalho visa projetar as soluções encontradas e propor suas implementações à indústria.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Espera-se, ao final do projeto, alcançar os objetivos abaixo.

1. Fazer um levantamento bibliográfico acerca dos fundamentos teóricos e estado da arte em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento elétrico.
2. Estudar em detalhe a legislação e normas técnicas atualizadas relevantes.
3. Conduzir uma análise de risco na estrutura da indústria têxtil e determinar a necessidade de proteção.
4. Selecionar as medidas de proteção necessárias para reduzir os riscos existentes à valores toleráveis.
5. Projetar uma solução que contemple um SPDA completo (interno e externo) e um sistema de aterramento, de modo a atender aos requisitos técnicos e necessidades do cliente.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Sem considerar o capítulo introdutório, este trabalho divide-se em três grandes capítulos, os quais subdividem-se em secções focadas em temas individuais.

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento do projeto. Inicialmente, aborda-se de maneira breve a contextualização histórica de SPDA, desde os trabalhos de Benjamin Franklin no século XVIII. Em seguida, o capítulo discute o processo de formação de descargas atmosféricas com foco nas características climatológicas e eletrostáticas do fenômeno, afim de esclarecer sua natureza. As seções seguintes dedicam-se ao aterramento elétrico, com foco em três frentes: medição da resistividade do solo, estratificação em duas camadas e sistemas de aterramento. Esta parte do trabalho embasa a concepção do aterramento elétrico proposto pelo projeto final. Por último, o capítulo aborda, por um viés técnico, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, com foco no processo de análise de risco e métodos de projeto. Estas seções embasam a seleção das medidas de proteção e dimensionamento dos sistemas.

O Capítulo 3 expõe o desenvolvimento do trabalho prático desenvolvido na indústria têxtil. As primeiras seções contextualizam o problema através do levantamento de informações da empresa, características climatológicas e especificações acerca do estado atual das instalações. Logo mais, o capítulo desvia o foco para os resultados da análise de riscos conduzida no local, levando ao seu gerenciamento através da seleção de medidas de proteção. Estes resultados embasam o dimensionamento do SPDA, tratado em sequência. Define-se, então, o método de projeto, posicionamento espacial dos captosres e descidas, dimensionamento dos componentes e interligação aos sistemas internos. Por fim, o capítulo é direcionado ao sistema de aterramento, iniciando com os resultados das medições de resistividade e estratificação em duas camadas e finalizando na distribuição e dimensionamento dos componentes.

O Capítulo 4, por sua vez, consolida as conclusões do trabalho através da comparação dos resultados obtidos e objetivos inicialmente traçados. Além disso, avalia-se de forma crítica a validade das soluções propostas, dados coletados e decisões tomadas ao longo do trabalho, afim dar luz às possibilidades de melhoria.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Capítulo 2 organiza o estudo bibliográfico em quatro áreas distintas. Inicialmente, revisa-se brevemente a história dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, com o intuito de prover contexto ao estado da arte atual e mostrar a direção para a qual a área caminha. Em seguida, abordam-se os fundamentos físicos por trás dos raios, com ênfase no processo de formação e peculiaridades, visando compreender o fenômeno por um viés analítico. Logo mais, discute-se em detalhe as formulações e conceitos relevantes acerca de sistemas de aterramento elétrico, afim de embasar o desenvolvimento do projeto inicialmente proposto. Por fim, estudam-se as metodologias de projeto, componentes, aplicações, melhores práticas e conceitos fundamentais de SPDA, indispensáveis para o sucesso deste trabalho.

### 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

Em 1752, na Filadélfia (EUA), o cientista, escritor e diplomata Benjamin Franklin testou algumas de suas suposições físicas ao empinar uma pipa de papel com fio metálico em meio à uma tempestade. Franklin amarrou o fio à uma chave de metal que, segurada por ele através de fios de seda, atuava como o corpo receptor das cargas provenientes da tempestade. Ao ver os primeiros sinais de eletricidade, ele estava convicto de sua hipótese. O experimento em breve seria vastamente conhecido como “*The Philadelphia Experiment*” ou “*Franklin’s Kite and Key*”, acrescentando mais uma linha em seu longo currículo de grandes feitos.

Benjamin Franklin foi o primeiro cientista a propor a possibilidade de provar experimentalmente a conexão entre raios e eletricidade, mas a ideia por trás de tal identidade já era conhecida entre o meio acadêmico. Ao longo da primeira metade do século XVIII, vários estudiosos da eletricidade observaram similaridades entre o fenômeno e o comportamento de descargas elétricas e, em 1746, John Freke na Inglaterra e Johann Winkler na Alemanha defenderam publicamente a teoria da identidade elétrica do raio. Trabalhando de modo independente na Filadélfia, Franklin e seus colaboradores também observaram as mesmas qualidades expressadas por seus colegas. Nas anotações que guardava sob a data 7 de novembro de 1749, o cientista cita 12 particularidades compartilhadas entre o fluido elétrico e o raio e observa, ainda, que o fluido elétrico aparenta ser atraído por pontas metálicas. No entanto, neste momento não havia nenhuma evidência prática para sustentar a hipótese. Em uma carta à John Lining contendo uma série de

estudos e experimentos, Franklin (1755) escreve: “[...] mas já que ambos coincidem em todas as demais particularidade comparáveis, não será possível que coincidam nisso também? Que o experimento seja feito”.

Em março de 1750, Franklin escreve a Peter Collinson sugerindo que hastes agudas fossem utilizadas, ao invés de esferas metálicas ou de madeira, no topo de mastro. Segundo ele, as hastes drenariam silenciosamente o fogo elétrico dos céus, protegendo assim prédios e navios de descargas elétricas. A sugestão aparece novamente em julho do mesmo ano, só que dessa vez com a adição de um fio condutor ligando a haste ao solo ou água. O perigoso experimento mostrou que um raio nada mais era do que uma corrente elétrica de grandes proporções, abrindo portas para uma nova abordagem científica ao fenômeno.

## 2.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Apesar de trivial do ponto de vista da ciência moderna, a composição do fenômeno conhecido como raio permaneceu uma incógnita pela maior parte da história da humanidade. Segundo Rakov e Martin (2003), sua natureza elétrica foi aceita pela comunidade científica somente em meados do século XVIII, com o sucesso dos experimentos de Thomas-François Dalibard, na França, e Benjamin Franklin, nos Estados Unidos, possibilitando, assim, novas abordagens acerca de sua formação.

A ocorrência de descargas atmosféricas sucede um processo físico de eletrização das nuvens de chuva, decorrente da formação e movimentação das cargas elétricas em seu interior. No entanto, embora possua raízes microscópicas, por tratar-se de um fenômeno diretamente relacionado com o clima, compreendê-lo através de uma abordagem meteorológica é bastante útil, especialmente quando se deseja projetar sistemas de proteção.

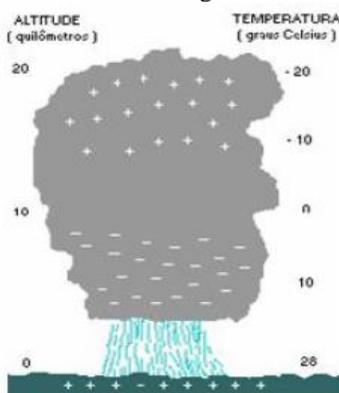
### 2.2.1 Eletrização das nuvens

Descargas elétricas em geral ocorrem em virtude do campo elétrico gerado pelas cargas existentes no sistema. No caso das nuvens, o campo provém do desequilíbrio eletrostático decorrente do processo conhecido por eletrização atmosférica, que explica a formação e movimentação de cargas no interior da nuvem de chuva. Segundo Wang (2013), a formação de cargas em nuvens é explicada através da composição de modelos convectivos e modelos por colisões. No entanto, não se pode afirmar com exatidão, tampouco generalizar, o que realmente

transcorre durante o processo, apesar de existirem premissas básicas e conceitos físicos necessários para sua ocorrência.

O modelo de eletrização convectiva (GRENET, 1947), apesar de introduzir conceitos relevantes, apresenta-se insuficiente nos tempos atuais, pois explica apenas uma parte do fenômeno (WANG, 2013). A teoria assume um campo elétrico preexistente à formação das nuvens, o qual é responsável pela produção de íons. Conforme a nuvem de chuva se forma, os íons positivos concentram-se em seu centro, induzindo o surgimento de cargas negativas na periferia (Figura 1). No entanto, os ventos ascendentes do centro da nuvem causam, por sua vez, correntes de ar descendentes nas bordas, que carregam os íons negativos para sua base, produzindo regiões eletricamente distintas. Embora não descreva satisfatoriamente a distribuição de cargas nas nuvens, o modelo destaca a importância da convecção no processo de eletrização (WANG, 2013), e descreve premissas básicas usadas em modelos mais complexos.

Figura 1 – Nuvem carregada eletricamente



Fonte: (COUTINHO & ALTOÉ, 2003).

As teorias mais completas acerca da eletrização atmosférica baseiam-se nas colisões entre partículas, supondo que a transferência de cargas ocorre por contato durante o processo de convecção, abordado no modelo anterior. Entretanto, apesar de convergirem em vários aspectos, os modelos por colisões dividem-se em indutivos e não-indutivos. No primeiro caso, microrregiões polarizadas são induzidas nas partículas de água e gelo por ação de um campo elétrico preexistente. Quando a região positiva de uma partícula entra em contato com a região negativa de outra, cargas elétricas se movimentam de modo a neutralizar as regiões

previamente polarizadas, resultando no desequilíbrio eletrostático de ambas partículas. Por coexistirem em diferentes tamanhos, densidades e estados físicos simultaneamente, partículas mais leves (como, por exemplo, gelo) são carregadas para o topo da nuvem pela convecção, enquanto as mais pesadas descem para a base da nuvem. Tal movimentação de partículas leva ao acúmulo de cargas em regiões distintas, que resulta em um campo elétrico interno.

Modelos não-indutivos, por outro lado, afirmam que a geração de cargas ocorre em função de colisões entre partículas com características intrínsecas diferentes. Pequenas partículas de neve e gelo, por exemplo, ao colidirem com partículas maiores, adquirem carga elétrica. Os cristais mais leves, transportados para o topo da nuvem, são carregados positivamente durante a colisão, enquanto as gotículas mais pesadas (carregadas negativamente) descem para a base. De maneira análoga aos modelos anteriores, a concentração de cargas opostas em regiões distintas da nuvem resulta em sua eletrização. Novamente se observa que a convecção desempenha um papel fundamental no processo, tendo em vista que a ausência do fenômeno inviabilizaria a formação do campo elétrico em todos os casos. Segundo a NOAA (2012), modelos por colisões não-indutivas aparentam ser mais adequados do que os demais na maioria das vezes, em função das características observadas e da composição amostral de nuvens tempestuosas.

O que realmente ocorre durante o processo de eletrização, no entanto, permanece alvo de debate e especulação. Segundo Lamb (2011), modelos indutivos, não-indutivos e convectivos ocorrem em conjunto, sendo que a predominância de um em relação aos demais depende das características particulares dos eventos meteorológicos causadores da eletrificação.

### **2.2.2 Formação do raio**

A atmosfera terrestre oferece, na maioria das vezes, uma rigidez dielétrica próxima de 3000 V/mm, tornando-a um meio considerado isolante para baixas tensões. Isso significa que as moléculas de ar oferecem uma quantidade escassa de elétrons livres, dificultando a condução de correntes elétricas. Todavia, diferentes condições de temperatura, umidade e pressão alteram a rigidez dielétrica da atmosfera, de modo a facilitar ou dificultar a ocorrência de descargas. A Tabela 1 ilustra valores típicos para a rigidez dielétrica e constantes usadas com recorrência.

No entanto, por mais efetivo que seja, todo dielétrico passa a apresentar comportamento condutor quando exposto à um campo elétrico intenso o suficiente. Sob tais condições, a diferença de potencial existente entre os terminais do material polariza a estrutura atômica de modo a gerar elétrons livres, formando, então, um canal ionizado. Em função da disponibilidade de elétrons, o material antes isolante, agora passa a oferecer baixa resistência à condução elétrica.

Tabela 1 - Valores típicos de rigidez e constante dielétrica para diferentes materiais

<i>Material</i>	<i>Constante Dielétrica</i>	<i>Campo de Ruptura V/cm</i>
<i>Ar</i>	<i>1</i>	$3 \times 10^4$
<i>Óleo</i>	<i>2,3</i>	$1,5 \times 10^5$
<i>Papel</i>	<i>3</i>	$2 \times 10^5$
<i>Porcelana</i>	<i>7</i>	$2 \times 10^5$
<i>Vidro</i>	<i>6</i>	$3 \times 10^5$
<i>Parafina</i>	<i>2</i>	$3 \times 10^5$
<i>Mica</i>	<i>6</i>	$2 \times 10^6$

Fonte: Adaptado de (COUTINHO & ALTOÉ, 2003).

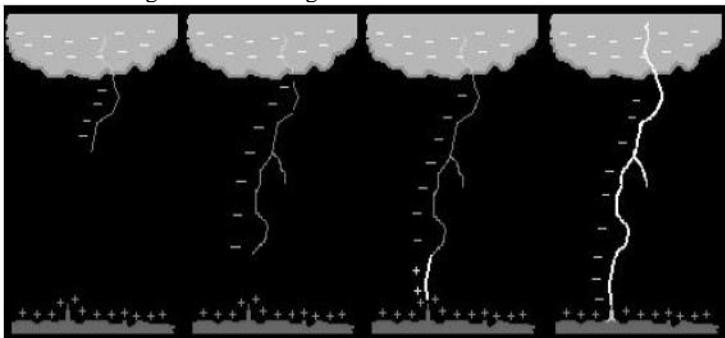
De maneira análoga, quando uma nuvem está bastante carregada, o campo elétrico induzido rompe a rigidez dielétrica do ar ao fornecer energia suficiente para que os elétrons das moléculas escapem de seu núcleo, tornando-os livres. O fenômeno produz um canal ionizado, com resistência elétrica próxima de zero, pelo qual a descarga se propaga.

Todavia, o fato é tão instantâneo que impossibilita ao olho humano distinguir suas etapas, uma vez que o raio precursor (piloto) atinge o solo com velocidade de aproximadamente 1500 km/s. A incidência do raio piloto cria um canal ionizado de baixa resistência que conecta a nuvem à terra por um curto-circuito, desencadeando a descarga principal, ou descarga de retorno, que parte da terra à nuvem com velocidade muito superior (30.000 km/s). A Figura 2 ilustra a sequência de eventos.

De maneira análoga, quando uma nuvem está bastante carregada, o campo elétrico induzido rompe a rigidez dielétrica do ar ao fornecer energia suficiente para que os elétrons das moléculas escapem de seu núcleo, tornando-os livres. O fenômeno produz um canal ionizado, com resistência elétrica próxima de zero, pelo qual a descarga se propaga.

Todavia, o fato é tão instantâneo que impossibilita ao olho humano distinguir suas etapas, uma vez que o raio precursor (piloto) atinge o solo com velocidade de aproximadamente 1500 km/s. A incidência do raio piloto cria um canal ionizado de baixa resistência que conecta a nuvem à terra por um curto-circuito, desencadeando a descarga principal, ou descarga de retorno, que parte da terra à nuvem com velocidade muito superior (30.000 km/s). A Figura 2 ilustra a sequência de eventos.

Figura 2 – Descarga elétrica entre nuvem e terra



Fonte: (COUTINHO & ALTOÉ, 2003)

Para efeito de grandeza, é importante salientar que a descarga principal de um raio apresenta valores típicos entre 2000 e 200.000 Ampères, possibilitando ainda a ocorrência de descargas terciárias. Nota-se que as correntes observadas nas descargas terciárias variam de 100 a 1000 Ampères e possuem um tempo de duração bastante inferior ao da descarga principal.

Por fim, ao contrário do que indica o senso comum, conclui-se que os raios não são constituídos por somente uma grande descarga, mas pela sequência de eventos abordada anteriormente.

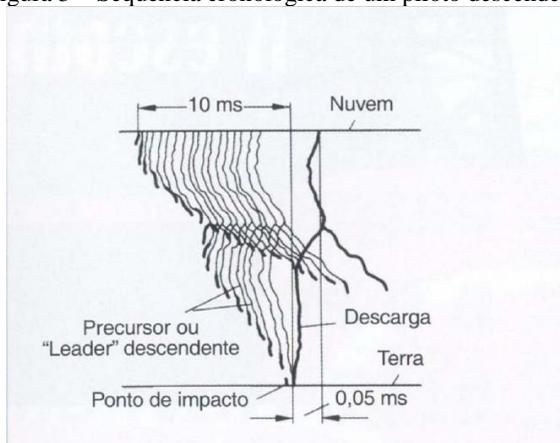
### 2.2.3 Descarga elétrica proveniente de um raio

Conforme abordado na seção anterior, o raio pode ser entendido como uma sequência de eventos, cujo epicentro consiste em uma descarga principal de alta intensidade. A próxima parte deste trabalho tem como objetivo investigar cada etapa do fenômeno separadamente, afim de melhor compreender os impactos causados ao longo de sua ocorrência.

### 2.2.3.1 Descarga piloto

Um raio piloto, segundo Coutinho e Altoé (2003, p.13), é gerado a partir do momento em que a diferença de potencial entre nuvem e terra excede a rigidez dielétrica instantânea do ar, causando o surgimento de um canal de ar ionizado que se desloca através de saltos. Tal descrição toma como base técnicas fotográficas específicas, que revelam uma linha quebrada descendente em trechos retilíneos em direção ao solo. A orientação dos saltos é aleatória, pois a ruptura em torno da cabeça de cada trecho precursor depende das condições atmosféricas instantâneas na vizinhança do fenômeno. A Figura 3 ilustra o processo em uma escala temporal.

Figura 3 – Sequência cronológica de um piloto descendente



Fonte: (ARAÚJO, 2010)

Também através de análises fotográficas, observou-se que o comprimento de cada salto depende da carga da nuvem que o origina, como pode ser observado na Tabela 2, que exibe valores típicos para correntes de descarga mínimas interceptadas nos quatro níveis de proteção normalizados frente aos respectivos comprimentos de salto. Vale lembrar que o percentual de raios captados provém de um estudo conduzido em 1945 no hemisfério norte. Logo, no Brasil, espera-se encontrar valores divergentes.

Tabela 2 – Correntes de descarga mínimas e comprimento de salto

Nível de Proteção	Corrente de Raio (kA)	Comprimento de Salto (m)	% Raios Captados
I	3	20	-98
II	5	30	-80
III	10	45	-70
IV	16	60	-60

Fonte: (ARAÚJO, 2010)

Por fim, tendo em vista que os raios se deslocam através de saltos com direções imprevisíveis e com comprimentos que variam de dezenas até centenas de metros, nota-se que, de fato, o exato ponto de impacto define-se somente no último salto. Portanto, quanto maior a corrente do raio, mais facilmente o mesmo é captado (COUTINHO & ALTOÉ, 2003).

#### 2.2.3.2 O último salto

Conforme abordado anteriormente, a descarga principal toma forma uma vez que o último salto precursor conecta, através do canal de ar ionizado, a nuvem carregada ao ponto de impacto na terra. Por oferecer baixa resistência à condução de corrente elétrica, o canal habilita a livre propagação da descarga principal, sendo que sucessivas descargas podem ocorrer no mesmo canal condutor em curtos espaços de tempo.

Figura 4 – Pilotos ascendentes partindo do topo de edifícios



Fonte: (FAPESP, 2017)

Em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, por exemplo, o campo elétrico induzido pelo piloto descendente na superfície

dos captores provoca o surgimento de um piloto ascendente (Figura 4), que parte do captor em direção ao piloto descendente, fechando o circuito no encontro de ambos. O fenômeno garante que a neutralização da descarga ocorra de modo apropriado, sendo que o ponto de encontro pode ocorrer a uma distância de metros, senão quilômetros, da estrutura protegida, aumentando ainda mais sua eficácia.

### 2.2.3.3 Descarga principal

Segundo Araújo (2010), as descargas principais, ou correntes de retorno, partem da terra em direção à nuvem, possuem alta intensidade e neutralizam, mesmo que parcialmente, o aglomerado de cargas produtor do campo elétrico. Ao contrário do piloto, a descarga principal se desloca em direção às cargas opostas da nuvem de tempestade através do canal ionizado, neutralizando-as ao longo do processo. Valores típicos para a intensidade da corrente de retorno variam entre 2 e 200 kA, enquanto a corrente do precursor usualmente limita-se a 1 kA.

Nota-se que em ocasiões onde há grandes aglomerados de cargas, uma só descarga pode não ser suficiente para a neutralização, originando, assim, outras descargas terra-nuvem no mesmo canal ionizado. Em tais casos, estudos revelam que as descargas de retorno duram cerca de algumas centenas de microssegundos, enquanto os respectivos intervalos de tempo entre descargas consecutivas encontram-se na casa de milissegundos.

## 2.3 ATERRAMENTO ELÉTRICO

Um bom aterramento elétrico é fundamental para a segurança, bom funcionamento e confiabilidade operacional de instalações elétricas (KINDERMANN, 1995). Sua concepção busca sempre obter uma baixa resistência de aterramento de modo homogêneo, afim de manter os potenciais decorrentes de correntes de falha dentro dos limites, escoar descargas atmosféricas e cargas estáticas em carcaças para a terra e assegurar um bom referencial de tensão.

No entanto, o projeto e implementação de um sistema de aterramento satisfatório é, com frequência, um grande desafio imposto pelas condições naturais do local. Regiões rochosas, em especial, possuem resistividades características do solo bastante altas decorrentes de suas composições minerais, o que dificulta a obtenção da baixa resistência de malha muitas vezes necessária ao projetista. Por consequência, tais situações encarecem a obra de modo a questionar sua

viabilidade. Por este motivo, ressalta-se a importância de avaliar cuidadosamente os parâmetros de entrada, tanto na análise de risco quanto nos demais cálculos do projeto, afim de evitar superdimensionamento sem afetar a segurança e funcionalidade da instalação.

### 2.3.1 Medição da resistividade do solo

Entende-se por resistividade do solo a característica indicadora de oposição ao fluxo de corrente elétrica apresentada por um volume de solo. Segundo a Lei de Ohm, a resistividade  $\rho$  de um ponto contido em um volume tridimensional com dimensões  $x$ ,  $y$  e  $z$  pode ser expressa por (1), sendo  $\vec{E}$  o vetor campo elétrico (V/m) e  $\vec{J}$  a densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>).

$$\rho(x, y, z) = \frac{\vec{E}(x, y, z)}{\vec{J}(x, y, z)} \quad (1)$$

Em função da heterogeneidade da maioria dos solos, a resistividade varia de acordo com a região geográfica, apresentando inclusive perfis distintos a poucos metros um do outro. Segundo Kindermann (1995), há vários fatores que influenciam a resistividade do solo. Entre eles vale ressaltar: o tipo de solo, a composição e concentração salina, as quantidades e perfis das camadas de solo, a umidade e a temperatura do local e a compactação do solo.

As medições de resistividade desempenham um papel essencial em sistemas de aterramento, pois afetam diretamente o traçado, dimensionamento e custo de implementação do projeto. Por essa razão, recomenda-se dedicar um foco especial na seleção e execução do método, bem como na interpretação dos resultados.

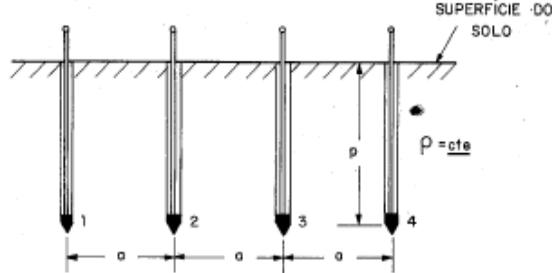
O método de medição mais conhecido e utilizado na prática é o método de Wenner, que toma como base, assim como os métodos de Lee e Shlumbeger – Palmer, as equações de Maxwell do eletromagnetismo aplicadas ao solo (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). O projeto alvo deste trabalho fez uso do método de Wenner, o qual será detalhado na seção seguinte.

#### 2.3.1.1 Método de Wenner

O método de Wenner busca determinar a resistividade elétrica do solo através do uso de quatro hastes de aterramento cravadas em linha

reta, com mesma profundidade  $p$  e espaçadas igualmente por um vão de comprimento  $a$  (Figura 5).

Figura 5 – Configuração dos eletrodos para o método de Wenner



Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

Uma vez estabelecida a configuração inicial, uma corrente elétrica  $I$ , de valor conhecido, é injetada na haste 1 e coletada na haste 4. A passagem da corrente entre os terminais induz potenciais nos pontos 2 e 3, expressos pelas equações (2) e (3), respectivamente. Logo, a diferença de potencial entre as estacas é dada por (4).

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

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[ \frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3)$$

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

Dividindo a tensão entre 2 e 3 pela corrente  $I$  injetada no ponto 1 obtém-se o valor de resistência  $R$  do solo para uma profundidade de penetração aceitável, conforme (5).

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

Isolando  $\rho$ , nota-se que a resistividade elétrica do solo é dada por (6), conhecida como fórmula de Palmer:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2p)^2 + (2a)^2}}} [\Omega \cdot m] \quad (6)$$

Considera-se (6) aplicável quando o espaçamento entre as hastes for ao menos 10 vezes maior do que seu diâmetro. Para grandes afastamentos, na ordem de 20 vezes a profundidade, a equação se reduz a (7).

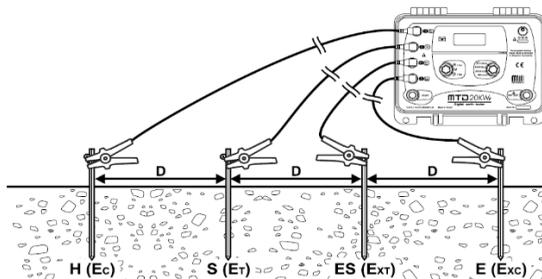
$$\rho = 2\pi aR [\Omega \cdot m] \quad (7)$$

### 2.3.1.2 Procedimento de medição e análise dos resultados

Atualmente, utiliza-se o terrômetro digital como principal instrumento de medição via método de Wenner. Além de medir a resistividade do solo com boa precisão, o aparelho também apura a resistência de aterramento de hastes ou malhas já implementadas, o que é extremamente conveniente, visto que tais medições são recorrentes e essenciais em projetos de aterramento. A seguir o aparelho MTD20KWe, fabricado pela empresa MEGABRAS, será tomado como exemplo prático para a descrição do método de medição, pois o mesmo foi utilizado ao longo do projeto alvo deste trabalho. Vale lembrar que há diversas opções de terrômetros digitais disponíveis no mercado que, apesar de se basearem no método de Wenner, podem não sugerir o mesmo *setup*. É importante salientar que divergências entre instruções de diferentes fabricantes não implica baixa performance ou descumprimento de normas técnicas, contanto que o equipamento esteja devidamente calibrado e certificado pelos órgãos de homologação.

Para medições de resistividade, deve-se posicionar a chave seletora em  $\rho$  (4 pole) e conectar as estacas auxiliares conforme a Figura 6. Ao pressionar o botão *Start*, o MTD20KWe injeta uma corrente  $I$ , proveniente de sua fonte interna controlada, entre as hastes conectadas aos terminais  $H(E_C)$  e  $E(E_{XC})$ , e calcula a resistência elétrica com (5), dado que a tensão  $V_{23}$  é lida através dos eletrodos  $S(E_T)$  e  $ES(E_{XT})$ .

Figura 6 – Configuração do terrômetro MTD20KWe para medições de resistividade



Fonte: (MEGABRAS, 2017)

Deve-se ajustar a escala do aparelho adequadamente sempre que necessário afim de garantir uma boa leitura. O resultado da medição, exibido no *display* central, deve ser inserido em (6) para obter o correspondente valor de resistividade. Segundo Kindermann (1995, p.22), os seguintes cuidados devem ser tomados na hora de efetuar as medições:

- a) verificar o devido alinhamento das hastes;
- b) verificar se o espaçamento entre as quatro hastes é idêntico;
- c) as hastes devem estar cravadas a uma mesma profundidade; recomenda-se entre 20 e 50 cm;
- d) o aparelho deve estar posicionado simetricamente entre o *setup*;
- e) as hastes devem estar limpas, sem a presença de ferrugem ou óxidos que dificultem contato elétrico;
- f) a condição do solo no dia das medições deve ser registrada;
- g) não devem ser feitas medições em dias tempestuosos, visto que há possibilidade de raios;
- h) deve-se sempre utilizar EPIs (botas isolantes, luvas, filtro solar, entre outras);
- i) impedir a presença de pessoas não autorizadas e animais no local;
- j) verificar se o aparelho está calibrado, em boas condições e com bateria suficiente.

A norma técnica NBR 7117 (ABNT, 2012) recomenda que o procedimento de medição utilize espaçamentos e direções padrão, sendo que o maior espaçamento deve abranger, no mínimo, a diagonal do terreno. Para uma determinada direção, deve-se registrar os valores medidos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Espaçamentos recomendados pela NBR 7117

Espaçamento $a$ (m)	Leitura R ( $\Omega$ )	Resistividade $\rho$ ( $\Omega.m$ )
1		
2		
4		
6		
8		
16		
32		

Fonte: (ABNT, 2012)

Tratando-se das direções de medição, a recomendação varia de acordo com as características do terreno em análise. No entanto, a NBR 7117 (ABNT, 2012) estabelece as quantidades mínimas e especifica as direções necessárias para cada caso com base na área da superfície, conforme indica a Tabela 4. O processo resultará em um conjunto de tabelas similares à Tabela 3, que deverão ser posteriormente submetidas à análise estatística para validação e interpretação dos dados coletados. A Figura 7 mostra os croquis de medição.

Tabela 4 – Número mínimo de linhas de medição por faixa de área

Área do Terreno (m <sup>2</sup> )	Numero Mínimo de Linhas	Layout
Inferior a 1000	2	Figura 7 - a
Entre 1000 e 2000	3	Figura 7 - b
Entre 2000 e 5000	4	Figura 7 - c
Entre 5000 e 10000	5	Figura 7 - d
Entre 10000 e 20000	6	Figura 7 - e

Fonte: (ABNT, 2012)

Feitas as medições em todas as direções, o primeiro passo para determinar se a informação tem validade ou não é calcular a média aritmética das resistividades para cada espaçamento adotado ao longo do ensaio, conforme (8).

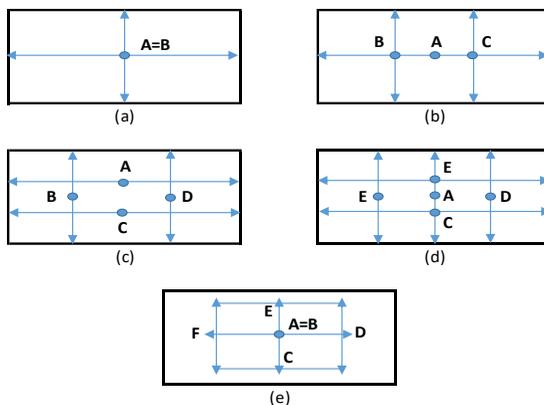
$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad \forall \quad \begin{matrix} j = 1, q \\ i = 1, n \end{matrix} \quad (8)$$

onde:

$\rho_M(a_j)$  é a resistividade média para o espaçamento  $a_j$ ;

$n$  é o número de medições efetuadas para o espaçamento  $a_j$ ;  
 $\rho_i(a_j)$  é o valor da  $i$ -ésima medição de resistividade com o espaçamento  $a_j$ ;  
 $q$  é o número de espaçamentos empregados.

Figura 7 – Croquis de medição via método de Wenner



**Legenda**

Linhas de medição A,B,C,D,E e F

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2012)

Em seguida, deve-se calcular o desvio padrão associado a cada medida em relação ao valor médio através de (9).

$$|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)| \quad \forall \quad \begin{matrix} j = 1, q \\ i = 1, n \end{matrix} \quad (9)$$

Deve-se, então, desconsiderar os valores de resistividade com desvios maiores do que 50% em relação à média, conforme a expressão (10).

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \geq 50 \% \quad \forall \quad \begin{matrix} j = 1, q \\ i = 1, n \end{matrix} \quad (10)$$

Valores de resistividade com desvio abaixo de 50 % podem ser considerados como representativos. Caso observe-se um grande percentual de medidas desconsideráveis pelo critério da equação (10), recomenda-se que o ensaio seja conduzido novamente na mesma região.

Caso o desvio persista, deve-se considerar a área como uma região independente para efeito de modelagem (KINDERMANN, 1995). Os valores remanescentes são utilizados para o novo cálculo da resistividade média por espaçamento, que servirá de base para o traçado da curva  $\rho \times a^1$ , necessária para a aplicação dos métodos de estratificação do solo abordados mais adiante.

Em suma, o procedimento de medição contém nove etapas essenciais:

- a) certificar-se de que os cuidados listados anteriormente são devidamente atendidos;
- b) efetuar as medições para todos os espaçamentos e direções pertinentes ao ensaio;
- c) registrar os valores de resistência e resistividade na Tabela 3;
- d) calcular a resistividade média para cada espaçamento;
- e) calcular o desvio padrão de cada medição de resistividade em relação à média;
- f) descartar as medições com desvio superior a 50 %;
- g) avaliar a validade do ensaio com base no número de medições representativas;
- h) recalcular a resistividade média com os valores remanescentes;
- i) traçar a curva  $\rho \times a$  com os valores finais de resistividade.

### 2.3.2 Estratificação do solo

Assim como em formações rochosas, a presença de camadas horizontais também é frequentemente observada em perfis de solo. A estratificação do perfil com base na resistividade de cada camada, segundo Kindermann (1995, p.27), é de grande utilidade em projetos de aterramento, visto que cada camada impacta diretamente a resistência de malha da instalação projetada para o terreno.

Métodos de estratificação multicamadas são alvo de constante pesquisa e inovação no mundo acadêmico, sendo que a grande maioria foca em duas frentes de inovação: modelagem matemática e aquisição de dados. De fato, observa-se que ambas as frentes buscam soluções para problemas práticos impostos por projetos de aterramento de alta sofisticação, que necessitam alta precisão e confiabilidade ao mesmo tempo que apresentam restrições técnicas, geológicas e climatológicas.

---

<sup>1</sup> Curva de resistividade medida por espaçamento adotado.

No entanto, os métodos de estratificação que utilizam a curva  $\rho \times a$ , obtida através das medições propostas pelo capítulo anterior, como parâmetro de entrada, produzem resultados perfeitamente válidos para aplicações gerais. Dentre eles, destacam-se os seguintes métodos:

- a) método de estratificação em duas camadas;
- b) método de Pirson;
- c) método Gráfico.

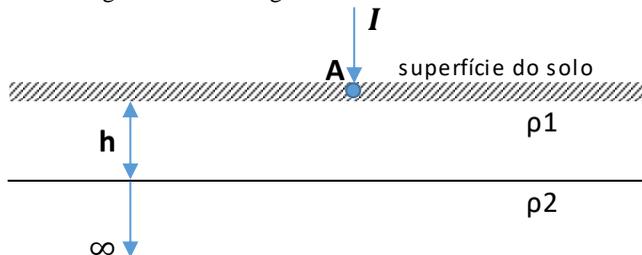
Em função das condições geológicas encontradas no local onde o estudo de caso alvo deste trabalho foi conduzido, somente o método de duas camadas será abordado em detalhe na próxima secção.

### 2.3.2.1 Modelagem em duas camadas e configuração de Wenner

As medições obtidas com os ensaios de resistividade pelo método dos quatro eletrodos (Wenner), somadas às equações do eletromagnetismo aplicadas em um perfil de solo com duas camadas, possibilitam determinar a resistividade e a profundidade de cada uma delas através de modelagem matemática.

Quando a corrente elétrica  $I$  entra no solo de duas camadas através do ponto A (Figura 8), níveis equipotenciais são induzidos na primeira camada, os quais devem satisfazer a equação de Laplace (11).

Figura 8 – Modelagem do solo em duas camadas



Fonte: Adaptado de (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (11)$$

Onde  $V$  corresponde ao potencial na primeira camada.

Quando se desenvolve (11) relativamente a  $V$  de qualquer ponto  $p$  da primeira camada do solo, distanciado de  $r$  da fonte de corrente em A, deduz-se a seguinte expressão:

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (12)$$

onde:

$V_p$  é o potencial de um ponto  $p$  qualquer da primeira camada em relação ao infinito;

$\rho_1$  é a resistividade da primeira camada;

$\rho_2$  é a resistividade da segunda camada;

$h$  é a profundidade da primeira camada;

$r$  é a distância do ponto  $p$  à fonte de corrente;

$K$  é o coeficiente de reflexão limitado entre -1 e 1, dado pela expressão:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (13)$$

Quando se aplica a configuração de Wenner (Figura 5) ao solo de duas camadas, a corrente  $I$  injetada pelo ponto 1 retorna ao terrômetro pelo ponto 4, induzindo tensões nos terminais 2 e 3. O potencial no ponto 2 pode ser expresso pela superposição do efeito da corrente elétrica entrando em 1 e saindo em 4. Aplicando a superposição em (12), tem-se que os potenciais  $V_2$  e  $V_3$  são expressos por (14) e (15), respectivamente. Intuitivamente, a diferença de potencial  $V_{23}$ , definida por  $V_2 - V_3$ , leva à (16).

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (14)$$

$$V_3 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (15)$$

$$V_{23} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right] \right\} \quad (16)$$

A tensão  $V_{23}$  dividida pela corrente  $I$  representa a resistência elétrica ( $R$ ) medida pelo terrômetro. Sendo assim, a expressão (16) pode ser substituída pela expressão (17), onde o termo  $2\pi aR$  equivale à  $\rho(a)$ , conforme visto na equação (7), resultando, por fim, na expressão (18).

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

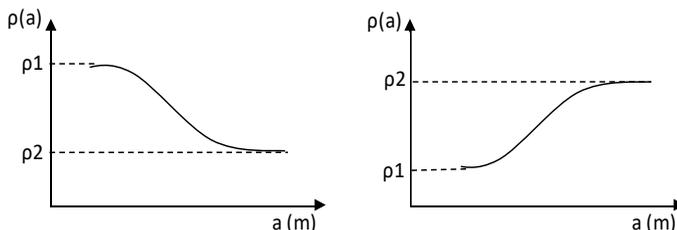
$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \quad (18)$$

O resultado de (17) é fundamental na elaboração dos métodos de estratificação em duas camadas (KINDERMANN, 1995 p.31). Na seção seguinte, a afirmação será ilustrada através do desenvolvimento do método simplificado para estratificação em duas camadas.

### 2.3.2.2 Método simplificado para estratificação em duas camadas

Dependendo da aplicação, é possível obter resultados eficazes a partir do método simplificado para estratificação em duas camadas (ABNT, 2012). Kinderman (1995, p.42) recomenda seu uso em ocasiões onde a curva  $\rho$  x  $a$  apresentar um dos formatos propostos pela Figura 9.

Figura 9 - Curvas  $\rho$  x  $a$  para solo de duas camadas



Fonte: Autoria própria

É natural, e de certa forma intuitivo, notar que pequenos espaçamentos entre as hastes no método de Wenner produzam resultados com mais contribuição da primeira camada de solo, visto que há um

paralelismo menor entre as hastes. De modo similar, grandes espaçamentos permitem que a corrente penetre mais profundamente no solo, produzindo resultados influenciados pela segunda camada.

Através da análise da Figura 9, determina-se os valores das resistividades da primeira e da segunda camada pelo prolongamento e assíntota que interceptam o eixo das ordenadas. Logo, uma vez com ambos valores, calcula-se o coeficiente de reflexão  $K$  dado por (13).

O único valor ainda necessário para o cálculo de (18) é  $h$ , que corresponde à espessura da primeira camada. No entanto, segundo Kindermann (1995, p.42), a filosofia do método consiste em tornar o espaçamento entre as hastes igual à espessura da primeira camada. Logo, assumindo a existência deste espaçamento, (18) se torna (19), que retorna o valor de  $M_{(a=h)}$ .

$$\frac{\rho_{(a=h)}}{\rho_1} = M_{(a=h)} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n)^2}} \right] \quad (19)$$

Em outras palavras, (19) indica que, caso o espaçamento entre as hastes seja igual à espessura da primeira camada, a resistividade medida pelo terrômetro será definida por (20).

$$\rho_{(a=h)} = \rho_1 \cdot M_{(a=h)} \quad (20)$$

Portanto, basta usar o valor encontrado na curva  $\rho$  x  $a$  para determinar o correspondente valor de  $h$ . Como  $M_{(a=h)}$  depende, exclusivamente, do coeficiente de reflexão definido pelas resistividades  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , é possível determinar seu valor através de uma tabela padrão, conforme sugere a NBR 7117 (ABNT, 2012). O método de estratificação, segundo a norma, resume a rotina de cálculo nos seguintes passos:

- a) prolongar  $\rho(a)$  x  $a$  até interceptar o eixo das ordenadas, o que indicará  $\rho_1$ ;
- b) traçar a assíntota à  $\rho(a)$  x  $a$  e prolongá-la até interceptar o eixo das ordenadas, o que indicará  $\rho_2$ ;
- c) calcular  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ . Com este valor, determinar o valor de  $M_0$ .
- d) calcular  $\rho_m = M_0 \cdot \rho_1$ ;
- e) localizar  $\rho_m$  na curva  $\rho(a)$  x  $a$  e localizar o valor da espessura  $h$  da primeira camada.

Com os valores de  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  e  $h$  resolve-se o problema de estratificação do solo em duas camadas.

### 2.3.3 Sistemas de aterramento

Define-se por sistema de aterramento o conjunto de elementos, condutores e não condutores, ativos e passivos, associados com a finalidade de escoar corrente elétrica para a terra, evitar a indução de tensões parasitas, proteger circuitos elétricos, limitar tensões de surto e garantir a segurança e funcionamento das instalações como um todo (PFEIFFER, 2001). Uma vez implementado, a condução de corrente elétrica ocorre através da resistividade aparente, que resulta do conjunto de eletrodos e características naturais específicas do local. Sendo assim, uma mesma configuração dos elementos pode apresentar resistividades aparentes diferentes, assim como solos de perfil similar com arranjos distintos.

#### 2.3.3.1 Resistividade aparente e resistência de aterramento

Solos com várias camadas apresentam resistividades distintas, dependendo da configuração de aterramento utilizada, pois fatores como a geometria, composição geológica e tamanho do sistema afetam diretamente o fluxo da corrente elétrica em direção ao solo (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). A resistividade vista pelo sistema de aterramento interligado ao solo é definida como resistividade aparente e conversa com a resistência de aterramento através de (21):

$$R_{\text{Aterramento}} = \rho_a \cdot f(g) \quad (21)$$

onde:

$R_{\text{Aterramento}}$  é a resistência elétrica do sistema de aterramento;

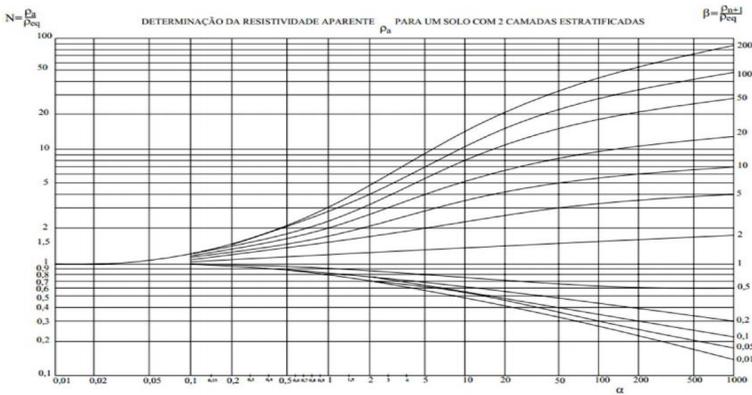
$\rho_a$  é a resistividade aparente do solo;

$f(g)$  é a função característica resultante da geometria e demais particularidades do sistema.

Para situações que envolvam solos estratificados em duas ou mais camadas e que apresentem geometrias complexas, recomenda-se calcular a resistividade aparente do solo com base nas curvas desenvolvidas por Endrenyi (1963), as quais dependem dos valores dos coeficientes de penetração ( $\alpha$ ) e divergência ( $\beta$ ) (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

Quando o solo é estratificado em várias camadas, deve-se aplicar um método de redução, de modo a transformar o sistema em apenas duas camadas equivalentes. Como o caso em análise será estratificado dentro do modelo simplificado de duas camadas, as técnicas de redução não serão abordadas em detalhe. No entanto, é importante ressaltar que a obtenção da configuração com uma camada de resistividade  $\rho_{eq}$  e espessura  $d_{eq}$  é necessária para dar sequência ao processo (GIBERTONI,2013).

Figura 10 – Curvas de resistividade de Endrenyi



Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

O coeficiente de penetração remete à profundidade alcançada pelas correntes elétricas escoadas para o solo através do sistema de aterramento observado, definido por (22):

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} \quad (22)$$

onde:

$r$  é o raio do anel equivalente do sistema de aterramento;

$d_{eq}$  é a espessura equivalente da camada.

O cálculo do raio  $r$  para hastes alinhadas e igualmente espaçadas entre si define-se por:

$$r = \frac{(n - 1)}{2} \cdot e \quad (23)$$

sendo:

$n$  o número de hastes de aterramento cravadas em posição vertical;

e o espaçamento entre as hastes.

Para demais configurações o valor de  $r$  é calculado através de (4.22):

$$r = \frac{A}{D} \quad (24)$$

onde:

$A$  é a área da malha de aterramento;

$D$  é a maior dimensão da malha do aterramento.

Por sua vez, o coeficiente de divergência corresponde à relação entre a resistividade da primeira camada, com espessura definida, e a da segunda camada, que se estende ao infinito. De certa forma,  $\beta$  é análogo ao coeficiente de reflexão entre as camadas descrito pela expressão (13), e é expresso por (25):

$$\beta = \frac{\rho_{(n-1)}}{\rho_{eq}} \quad (25)$$

tal que:

$\rho_{(n-1)}$  é a resistividade da segunda camada;

$\rho_{eq}$  é a resistividade da primeira camada ou camada equivalente.

Uma vez obtidos ambos coeficientes, pode-se calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) através do uso das curvas de resistividade desenvolvidas por Endernyi (Figura 10), onde  $\alpha$  pertence ao eixo das abscissas e  $\beta$  indica a curva correspondente. O ponto que intercepta os coeficientes aponta o valor de  $N$ , o qual retorna a resistividade aparente através da expressão (26) (GIBERTONI,2013).

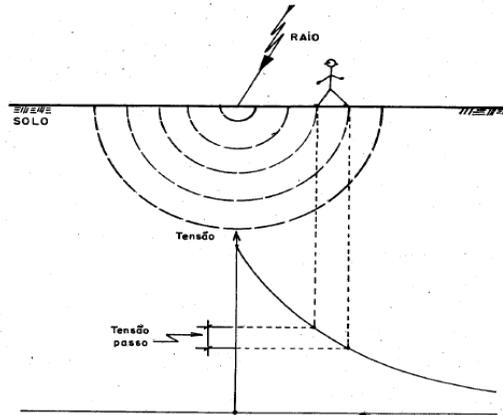
$$\rho_a = N \cdot \rho_{eq} \quad (26)$$

### 2.3.3.2 Tensão de passo

A norma NBR7117 (ABNT, 2012) define a tensão de passo como a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo afastados pela distância do passo de uma pessoa, considerado um metro. O fenômeno ocorre quando há superfícies equipotenciais induzidas em função do escoamento de corrente para o solo e pode comprometer seriamente a segurança do local, caso seus níveis sejam elevados. Ao tomar a ocorrência de um raio como exemplo, a Figura 11 ilustra a

indução da tensão de passo (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

Figura 11 – Tensão de passo



Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

A Figura 12, também usada por Kindermann e Campagnolo (1998, p.131), mostra o circuito equivalente relativo à existência de uma tensão de passo, sendo  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  as resistências dos trechos de solo considerados. Resolvendo o circuito, tem-se:

$$V_{Passo} = (R_{ch} + 2R_C) \cdot I_{Choque} \quad (27)$$

onde:

$R_{ch}$  é a resistência do corpo humano considerada  $1000\Omega$ ;

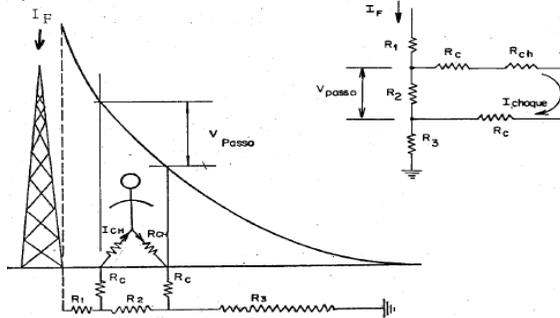
$R_C$  é a resistência de contato, que pode ser considerada igual a três vezes a resistividade superficial do solo ( $\rho_s$ ), de acordo com a IEEE-80;

$I_{Choque}$  é a corrente de choque que percorre o corpo humano.

No entanto, Kindermann (1995) afirma, com base nos trabalhos de Dalziel (1956), que a variável de maior risco em (27) é a corrente de choque, pois é a causa da fibrilação ventricular. Segundo Dalziel (1956), o corpo humano suporta uma corrente de choque conforme (28), conhecida por limite de Dalziel:

$$I_{Choque} = \frac{0,166}{\sqrt{t}} \quad (28)$$

Figura 12 – Circuito equivalente da tensão de passo



Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

Onde  $t$  corresponde ao tempo de duração da corrente de choque, em segundos, com valor limitado entre 0,03 e 3. A equação de Dalziel é utilizada para a obtenção do limite permissível e aceitável de corrente para que não ocorra fibrilação enquanto a pessoa estiver submetida à tensão de passo ou toque (KINDERMANN, 1995).

É possível, então, determinar o potencial de passo máximo admissível através da substituição do limite de Dalziel (28) em (27), resultando em (29).

$$V_{Passo\ Max} = \frac{116 + 0,696\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (29)$$

### 2.3.3.3 Tensão de toque

Segundo a NBR 7117 (ABNT, 2012), a tensão de toque define-se pela diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo, separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal de um braço de uma pessoa, considerada igual a um metro. De modo análogo ao caso anterior, deseja-se que a tensão de toque não ultrapasse os valores impostos pelo limite de Dalziel, afim de evitar que a corrente de choque provoque a ocorrência de fibrilação ventricular.

Pela análise do circuito equivalente, nota-se que a tensão de toque é expressa por (30). Substituindo  $R_C$  por  $3\rho_s$  e  $I_{choque}$  por (28), conclui-se que a tensão de toque máxima admissível é calculada através de (31).

$$V_{Toque} = \left( R_{ch} + \frac{R_C}{2} \right) \cdot I_{choque} \quad (30)$$

$$V_{Toque Max} = \frac{116 + 0,174\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (31)$$

Vale observar que um cuidado especial deve ser tomado no controle e prevenção de tensões de toque. A corrente de choque em tais casos tende a percorrer caminhos que passam diretamente por órgãos vitais, aumentando a chance de ocorrer fibrilação ventricular.

#### 2.3.3.4 Componentes e configurações de um sistema de aterramento

O escoamento da corrente elétrica pelo sistema de aterramento, se dá através da resistividade aparente ( $\rho_a$ ) que o solo apresenta para a configuração em questão. Logo, a resistência de aterramento associada ao arranjo é expressa em função de  $\rho_a$  e das características dos componentes interligados ao solo (GIBERTONI, 2013).

Uma haste inserida verticalmente em um solo homogêneo, conforme mostra a Figura 13, apresenta uma resistência elétrica dada por (32) (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998):

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) [\Omega] \quad (32)$$

sendo:

$\rho_a$  a resistividade aparente do solo ( $\Omega.m$ );

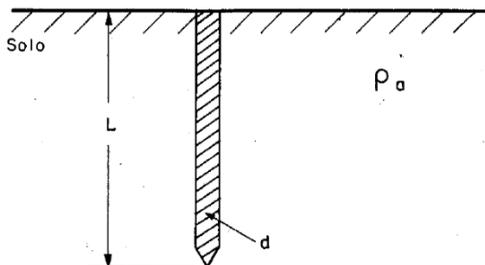
$L$  o comprimento da haste (m);

$d$  o diâmetro do círculo de secção transversal da haste (m).

Pela análise de (32) é possível observar que a resistência de aterramento é afetada, principalmente, pela forma geométrica do eletrodo em interação com o solo (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). Dessa forma, a resistência total vista por um equipamento conectado à uma tomada de terra é composta:

- a) da resistência da conexão do cabo de ligação com o equipamento;
- b) da impedância do cabo de ligação;
- c) da resistência da conexão do cabo de ligação com o sistema de aterramento;
- d) da resistência do material que forma o sistema de aterramento;
- e) da resistência de contato do material com a terra;
- f) da resistência da cavidade geométrica do sistema de aterramento com a terra.

Figura 13 – Haste vertical cravada em solo homogêneo



Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

Dentre os fatores citados, destaca-se o último, que se refere à resistência de terra do sistema. Seu valor é, geralmente, muito superior aos demais e depende das condições específicas do solo. As parcelas restantes são menores e podem ser controladas com facilidade (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

No entanto, nem sempre o uso de uma só haste atinge o valor de resistência necessário ao projeto. Em tais casos, conforme indica (32), é necessário atuar sobre os parâmetros que afetam a resistência elétrica do conjunto. Sendo assim, é possível:

- i) aumentar o diâmetro da haste;
- ii) aumentar o comprimento da haste;
- iii) associar hastes em paralelo;
- iv) reduzir  $\rho_a$  através de tratamento químico ou técnicas complementares.

Aumentar o diâmetro da haste, apesar de ser um procedimento simples, raramente é a melhor solução. Cada incremento na seção do condutor implica em uma redução logarítmica da resistência correspondente, ao mesmo tempo que aumenta a quantidade de insumos necessários ao projeto. Tal circunstância pode inviabilizar, do ponto de vista econômico, a implementação do sistema de aterramento. Usualmente, seleciona-se um diâmetro compatível com a resistência mecânica necessária para suportar o afinco ao solo (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

O aumento do comprimento da haste, por outro lado, faz a resistência de terra decair na razão inversa de  $L$ , o que torna o método bastante atrativo. Neste escopo, destaca-se o método de hastes profundas,

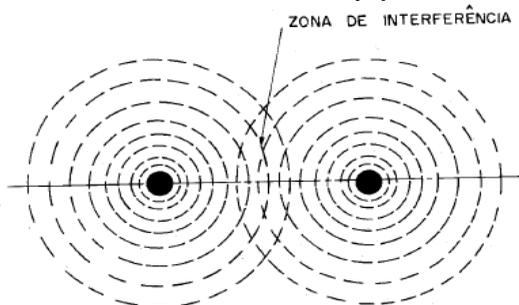
que se resume a instalar os eletrodos em profundidades maiores, de modo a alcançar as camadas inferiores. Além do aumento de  $L$ , outros fatores ajudam a melhorar ainda mais a qualidade do aterramento (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). Entre eles, vale salientar:

- a) atingimento de camadas com menor resistividade;
- b) condição de água presente no solo estável ao longo do tempo;
- c) condição de temperatura constante e estável ao longo do tempo;
- d) produção de gradientes de potencial maiores no fundo do solo, o que reduz drasticamente os potenciais de passo na superfície.

O uso de perfuratriz e bomba de água acionadas hidráulicamente por pressão do óleo do guindaste é a alternativa mais recomendada para a implementação de hastes profundas, pois apresenta os melhores resultados práticos (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

Conectar hastes de aterramento em paralelo é um método bastante utilizado para a redução da resistência de terra. No entanto, ao contrário do que o senso comum pode sugerir, a resistência equivalente do conjunto não pode ser calculada através da simples lei de paralelismo de resistências elétricas em geral, devido às interferências nas zonas de atuação das superfícies equipotenciais (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). A Figura 14 ilustra a interferência causada por duas hastes cravadas no solo.

Figura 14 – Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes



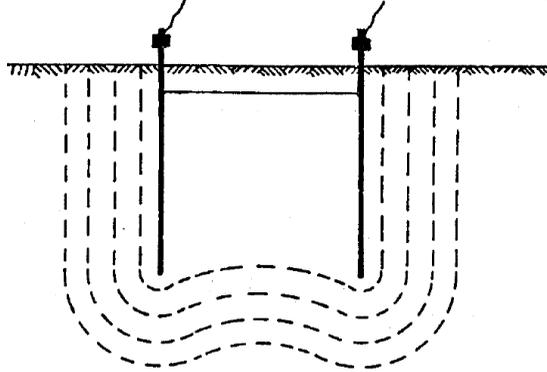
Fonte: (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998)

As linhas equipotenciais resultantes do arranjo com duas hastes em paralelo são representadas pela Figura 15. Observa-se que o fluxo de corrente proveniente das hastes é bloqueado, o que resulta em uma resistência de terra individual superior. Isso ocorre devido à diminuição da área de dispersão efetiva de cada haste, causada pela zona de

interferência (KINDERMANN, 1995). Portanto, a relação entre as resistências do sistema de duas hastes é dada por (33).

$$\frac{R_{1haste}}{2} < R_{2haste} < R_{1haste} \quad (33)$$

Figura 15 – Linhas equipotenciais resultantes de duas hastes paralelas



Fonte: (KINDERMANN, 1995)

Nota-se que o aumento do espaçamento entre as hastes paralelas reduz a interferência entre elas. Em teoria, um espaçamento muito superior ao comprimento das hastes tornaria a interferência praticamente nula. No entanto, tal espaçamento não seria economicamente viável. Na prática, o espaçamento utilizado gira em torno do comprimento das hastes. Adota-se, com frequência, três metros como padrão (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

Para compreender o cálculo da resistência de aterramento de um sistema composto por várias hastes conectadas em paralelo, é conveniente analisar o caso com somente duas hastes. Conforme abordado no parágrafo anterior, deve-se levar em conta o acréscimo de resistência causado pela zona de interferência (FLORES, 2014). Desta forma, a resistência elétrica apresentada por cada haste no grupo define-se como:

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^n R_{hm} \quad (34)$$

onde:

$R_h$  é a resistência apresentada pela haste “h” no conjunto, considerando as demais interferências;

$n$  é o número de hastes paralelas;

$R_{hh}$  é a resistência individual de cada haste, sem a presença das demais;

$R_{hm}$  é o acréscimo de resistência à “h” em função da resistência mútua com a haste “m”, definida por (35);

$$R_{hm} = \frac{\rho_a}{4\pi L} \ln \left[ \frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (35)$$

tal que:

$e_{hm}$  é o espaçamento entre a haste “h” e a haste “m”;

$L$  é o comprimento da haste “m”.

O parâmetro  $b_{hm}$  é a diagonal que tem início na extremidade superior de “h” ou “m” e o fim na extremidade oposta da outra haste, podendo ser calculado através de trigonometria básica. Desenvolvendo (34) para cada haste pertencente ao grupo, determina-se a resistência individual de cada uma dentro do conjunto, conforme (36).

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + \dots + R_{nm} \quad (36)$$

Obtendo-se todos os valores de resistência individual pertinentes ao sistema, levando em consideração os efeitos de interferência, pode-se calcular a resistência equivalente das hastes interligadas através do paralelismo, expresso por (37) (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998) e ilustrado pela Figura 16.

$$R_{eq} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (37)$$

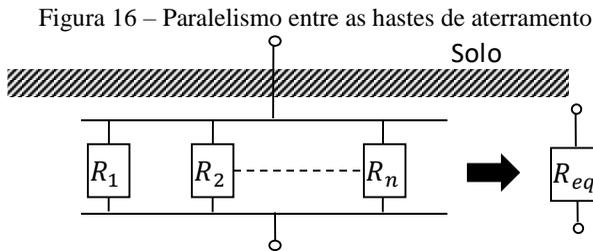
A relação entre a resistência equivalente do conjunto de hastes e a resistência individual de cada haste é definida pelo índice de aproveitamento ( $K$ ), ou índice de redução, representado por (38).

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}} \quad (38)$$

Logo, isolando  $R_{eq}$ , tem-se:

$$R_{eq} = K \cdot R_{1haste} \quad (39)$$

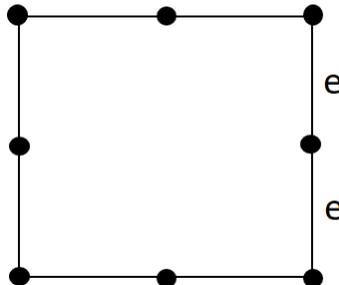
A relação expressa por (39) indica que o valor da resistência de aterramento equivalente corresponde à resistência de uma única haste (sob a premissa de que todas as hastes do sistema são iguais) ponderada pelo índice de redução, o qual é geralmente expresso em curvas padrão ou tabelas afim de facilitar os procedimentos de cálculo (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). Vale lembrar que, através do cálculo das resistências  $R_n$ , é possível determinar a resistência equivalente de outros arranjos, mesmo que estes não possuam valores tabelados de  $K$ .



Fonte: Autoria própria

O dimensionamento de um sistema com a configuração apelidada de “quadrado vazio” é um bom exemplo de utilização do coeficiente “ $K$ ”. O sistema ilustrado pela Figura possui oito hastes espaçadas por “ $e$ ” e apresenta um índice de redução expresso pela Tabela 5, assumindo-se  $d = 1/2''$ .

Figura 17 – Arranjo em quadrado vazio com 8 hastes



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Valores de K para aterramento em quadrado vazio com 8 hastes

<b>Valores de K p/ Quadrado Vazio de 8 Hastes</b>				
<b>Espaçamento (m)</b>	<b>Tamanho da haste (<math>d = 1/2''</math>)</b>			
	<b>1,2 m</b>	<b>1,8 m</b>	<b>2,4 m</b>	<b>3,0 m</b>
<b>0,5</b>	0,41	0,50	0,56	0,61
<b>1,0</b>	0,23	0,28	0,31	0,39
<b>1,5</b>	0,20	0,22	0,25	0,29
<b>2,0</b>	0,17	0,2	0,22	0,26
<b>2,5</b>	0,17	0,18	0,20	0,23
<b>3,0</b>	0,16	0,17	0,19	0,21

Fonte: Adaptado de (KINDERMANN, 1995)

As alternativas de tratamento químico do solo devem ser aplicadas somente quando o sistema de aterramento já está implementado, mas necessita de uma menor resistência de terra, ou quando a situação apresenta limitações que forcem o uso de tais técnicas (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). Os materiais aplicados devem possuir as seguintes propriedades:

- Boa higroscopia;
- Não lixiviável;
- Não ser corrosivo;
- Apresentar baixa resistividade;
- Ser quimicamente estável no solo;
- Não ser tóxico e não causar danos ambientais.

Atualmente, o uso de géis higroscópicos (apelidados de “hidrogel”) é a alternativa de tratamento químico mais utilizada no mercado. Propriedades como sua estabilidade química, baixa corrosibilidade, insolubilidade em água, alta higroscopia e efeito de longo prazo tornam o método bastante atrativo para sistemas já instalados. No entanto, ressalta-se a importância de dimensionar devidamente os sistemas de aterramento de modo a evitar o uso deste tipo de tratamento. Carvão mineral, serragem e limalha de ferro também são soluções adotadas com frequência.

Para solos muito secos, rochosos e de alta resistividade, recomenda-se cimentar os eletrodos aterrados com concreto (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998). O método, além de

relativamente barato, é bastante efetivo em função da elevada resistência física, higroscopia e condutividade elétrica do material. Tais qualidades são alvo de constante pesquisa e desenvolvimento desde o início da implementação do concreto para fins de aterramento, resultando em composições direcionadas especificamente para a aplicação (VENKATRAMAN & TAMIZHARASAN, 2015).

## 2.4 SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A norma NBR 5419-1 (ABNT, 2015) define um SPDA por um sistema completo, composto por elementos internos e externos, destinado a proteger uma estrutura contra os efeitos de descargas atmosféricas. Os requisitos básicos, assim como o dimensionamento dos componentes, dependem das características físicas da estrutura, condições naturais da região e finalidade funcional do local, devendo sempre respeitar a legislação vigente afim de garantir a segurança necessária (MAMEDE, 2017).

Estruturas em situação de risco que não possuem um SPDA adequado estão expostas à incidência direta e indireta do fenômeno, que pode causar, por sua vez, prejuízos que vão de simples danos materiais a fatalidades. Logo, deve-se sempre avaliar o risco atrelado ao projeto antes da implementação e desenvolvimento do mesmo, visto que, raramente, análises superficiais são suficientes para expor todos os fatores necessários para uma boa execução.

Figura 18 – Casa danificada por um raio



Fonte: (INPE, 2017)

Nas próximas secções do trabalho, serão apresentados os princípios fundamentais dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, assim como os métodos de projeto que neles se baseiam, com o objetivo de dar luz às vantagens, desvantagens, problemas e soluções pertinentes à projetos de tal natureza.

### 2.4.1 Conceitos básicos

Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas são projetados com o intuito de proteger e minimizar os efeitos de raios em estruturas. Segundo Araújo (2010, p.45), sua composição e principais funções são as seguintes:

- Sistema externo de proteção: sistema composto pelos subsistemas de captores, condutores de descida e aterramento elétrico (Figura 19);
- Sistema interno de proteção: conjunto de dispositivos de proteção que reduzem os efeitos eletromagnéticos causados pela corrente de descarga dentro do volume a proteger, sendo composto de DPS e MPS;
- Primeira função: neutralizar, através do efeito das pontas, a evolução do gradiente de potencial elétrico entre o solo e as nuvens, através do constante escoamento de cargas elétricas da atmosfera para a terra;
- Oferecer à descarga elétrica insurgente em suas proximidades um caminho de escoamento preferencial seguro, de modo a reduzir os efeitos estruturais.

Figura 19 – Esquemático de um SPDA externo



Fonte: (MONTAL, 2017)

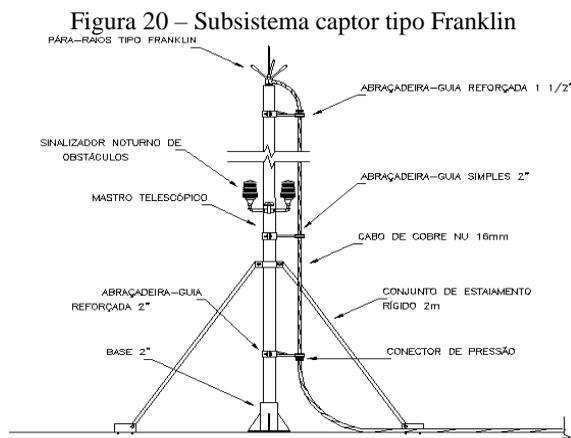
É importante lembrar que a instalação de um SPDA não impede a incidência raios e nem tão pouco os atrai (ARAÚJO, 2010).

Para que se compreenda os métodos de projeto, é conveniente abordar alguns detalhes acerca dos subsistemas que compõe um SPDA individualmente. Além disso, destaca-se que cuidados devem ser tomados, em especial, nas interligações entre os subsistemas, uma vez que falhas nas conexões comprometem a confiabilidade da instalação.

O subsistema captor tem como principal função receber as cargas incidentes sobre o topo das estruturas e distribuí-las ao longo dos condutores de descida (COUTINHO & ALTOÉ, 2003). O conjunto é composto de elementos condutores, que se dividem em duas categorias:

- Captore naturais: partes metálicas da estrutura como tubos, tanques, calhas e coberturas de galpões potencialmente expostas a descargas atmosféricas;
- Captore não naturais: elementos condutores como hastes condutoras e cabos horizontais implementados com a finalidade de proteger a estrutura.

A Figura 20 mostra um subsistema captor tipo Franklin.



Fonte: (TERMOTÉCNICA, 2017)

Além dos elementos citados anteriormente, fazem parte do subsistema captor:

- mastro: geralmente tubular, em aço galvanizado e com diâmetros na faixa de duas polegadas. Sua finalidade é dar suporte ao captor e servir de condutor metálico;
- base de fixação: Geralmente em alumínio fundido, projetadas para diâmetros de 1,5" e 2";
- isoladores: também provém suporte aos demais elementos do sistema. Usualmente são fabricados de vidro ou porcelana vitrificada, para tensões de 10 KV;
- conectores: fazem a interligação de partes condutores, de modo a garantir continuidade elétrica. São feitos de bronze, latão, cobre ou aço e são geralmente aparafusados.

Os condutores de descida, por sua vez, são responsáveis por conectarem o sistema captor ao sistema de aterramento. É comum o uso de cabos de cobre, alumínio ou aço galvanizado com secções que variam entre 35 e 200 mm<sup>2</sup>. No entanto, constituem-se ainda condutores de descida as estruturas metálicas e armaduras de aço de estruturas de concreto que possuem continuidade elétrica até a base (MAMEDE, 2017). A norma ABNT NBR 5419 (ABNT, 2015) especifica que os condutores de descida devem prover o menor caminho possível para a corrente elétrica e recomenda que sejam espaçados de acordo com a classe do SPDA, conforme indica a Tabela 6.

Tabela 6 – Valores típicos de distâncias entre condutores de descida

<b>Classe SPDA</b>	<b>Distância (m)</b>
I	10
II	10
III	15
IV	20

NOTA: É aceitável um desvio máximo de 20% dos valores acima.

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

É obrigatória por norma a instalação de conexões de ensaio em todos os condutores de descida, as quais podem ser abertas somente com o auxílio de ferramentas. Sugere-se que a conexão seja feita a uma altura de 1,5 m a partir do piso. A conexão entre o condutor de descida e os eletrodos de aterramento ou captos deve ser feita através de solda elétrica ou exotérmica, de modo a suportar as tensões mecânicas provocadas por correntes de surto.

Por se tratar de um tópico de extrema importância, a discussão acerca de sistemas de aterramento foi desenvolvida individualmente no item 4.3. No entanto, o aterramento elétrico para sistemas de proteção contra descargas atmosféricas descrito pela NBR 5419 (ABNT, 2015) possui algumas particularidades, especialmente no que diz respeito aos requisitos mínimos. Logo, julga-se relevante uma breve análise da legislação vigente.

Inicialmente, sob o ponto de vista de proteção, uma única infraestrutura de aterramento completamente interligada é preferível e adequada a todos os propósitos (ABNT, 2015). Sugere-se que o eletrodo atenda a todos os sistemas da instalação, atuando como referência de terra.

A norma recomenda que as armaduras das fundações da estrutura sejam utilizadas sempre que possível. No entanto, nas demais situações, deve-se utilizar um arranjo em anel, externo à estrutura protegida, cujo condutor permaneça em contato com o solo por, ao menos, 80 % de sua extensão. Malhas de aterramento também são aceitáveis para a finalidade. É importante ressaltar que, embora 20 % do anel possa não estar em contato direto com o solo, é fundamental que exista continuidade elétrica ao longo do eletrodo (ABNT, 2015).

O tamanho do anel é determinado pela classe do SPDA, pelo tamanho da área de proteção e pela resistividade do solo. Caso não seja possível executar um aumento no anel em função dos valores requeridos por norma, eletrodos adicionais podem ser incluídos ao aterramento, de modo a contabilizar um incremento no comprimento total. Apesar de não ser mais explicitamente abordado pela norma, sugere-se que o valor da resistência de terra total do conjunto fique inferior a  $30 \Omega$  (MAMEDE, 2017).

#### **2.4.2- Efeitos de raios em edificações**

A ciência devota ao estudo dos raios evoluiu a partir da necessidade de lidar com suas consequências, que por séculos pareceram inevitáveis às então testemunhas de sua força destrutiva. Edificações alvejadas por raios podem sofrer danos que comprometem, muitas vezes, a integridade e segurança da estrutura, sendo que a intensidade da corrente, modo de incidência e condições locais específicas afetam diretamente as chances de suas ocorrências. Os danos podem se estender para além da própria estrutura alvejada, envolvendo a vizinhança e o ambiente local (COUTINHO & ALTOÉ, 2003).

Segundo a NBR 5419 (ABNT, 2015), os principais fatores relevantes em estruturas para efeitos de descargas atmosféricas incluem:

- a) materiais de construção (madeira, alvenaria, concreto, barras de aço);
- b) função (residência, escritório, fábrica, armazém, hotel, escola, hospital) ;
- c) ocupantes e conteúdo (pessoas ou animais, presença de materiais inflamáveis ou combustíveis, sistemas eletrônicos);
- d) linhas elétricas e tubulações metálicas que adentram a estrutura (linhas de energia, linhas de telefonia, tubulações em geral);
- e) medidas de proteção existentes (para raios, DPS, medidas de proteção para reduzir risco à perda de vida);
- f) dimensão do risco (limitações de espaço para evacuação, alta incidência de raios, estrutura perigosa ao ambiente).

Pensar em danos causados por raios somente na esfera física não compreende o que ocorre na realidade. Os possíveis resultados dependem muito do tipo de estrutura afetada e podem ser resumidos pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Efeitos de raios em diferentes estruturas

<b>Tipo de estrutura de acordo com sua finalidade ou conteúdo</b>	<b>Efeitos das descargas atmosféricas</b>
Casa de moradia	Perfuração da isolação das instalações elétricas, incêndio e danos materiais. Falha de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos.
Casa de campo, sítio ou fazenda	Perfuração da isolação das instalações elétricas, alto risco de incêndio e danos materiais. Ferimentos a seres vivos por tensões de passo e toque. Perda de animais por fibrilação ventricular
Teatro ou Cinema Hotel Escola Shopping centers	Danos em instalações elétricas que tendem a causar pânico (por exemplo, iluminação elétrica) Falhas em sistemas de alarme de incêndio
Bancos Estabelecimentos comerciais	O mesmo do caso anterior, adicionando-se problemas de perda comunicação, falhas de computadores e perda de dados
Hospitais Casa para idosos Clínicas de tratamento	O mesmo do caso anterior, adicionando-se problemas relacionados a tratamentos médicos intensivos e remoção de pacientes sem mobilidade

Indústrias	Efeitos adicionais dependendo do conteúdo das fábricas, os quais podem gerar perda total de produção
Museu e Igrejas	Perda de patrimônio cultural insubstituível
Armazéns de munição ou fogos de artifício	Incêndio e explosão com consequências à planta e arredores
Indústria química Refinaria Usina nuclear	Incêndio e mau funcionamento com consequências altamente prejudiciais ao meio ambiente local e global

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

O dano causado por descargas atmosféricas deve-se, em parte, ao seu ponto de impacto. Observam-se quatro posições distintas do ponto de impacto que devem ser levadas em consideração ao longo do projeto, sendo elas (ABNT, 2015):

- a) descargas atmosféricas na estrutura;
- b) descargas atmosféricas próximas a estrutura;
- c) descargas atmosféricas sobre linhas elétricas ou tubulações metálicas;
- d) descargas atmosféricas próximas à linhas elétricas ou tubulações.

Descargas que incidem diretamente na estrutura apresentam, além do risco de choque elétrico por tensões de passo e toque, um alto risco de danos mecânicos imediatos provocados pelas forças eletromagnéticas (ARAÚJO, 2010). Além disso, incêndios e explosões podem ocorrer em função das altas temperaturas do canal de plasma ou, até mesmo, das altas correntes que percorrem os condutores. Por este motivo, a proteção externa contra a incidência direta de raios deve ser priorizada caso identifique-se riscos não toleráveis que ameacem a integridade e a segurança do local (MAMEDE, 2017).

Quando há incidência de raios nas proximidades, os danos geralmente estendem-se à falha de equipamentos elétricos e eletrônicos por efeitos de LEMP (ABNT, 2015). Todavia, o fenômeno pode também induzir tensões de passo nos arredores de edificações próximas caso estas não possuam aterramento adequado.

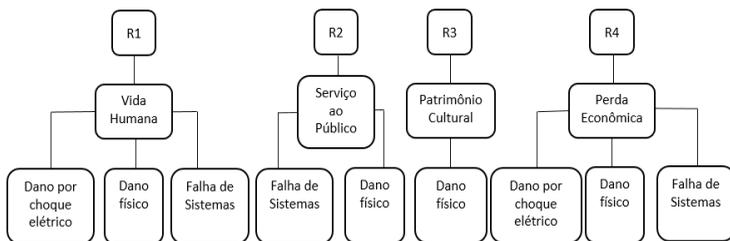
Descargas atmosféricas incidentes sobre linhas de transmissão, em especial, também podem causar grandes prejuízos. O centelhamento decorrente das sobretensões e correntes que percorrem a linha podem

causar incêndios e explosões, enquanto a transmissão do surto para dentro da estrutura induz tensões de passo e toque, ocasionando choque elétrico. É provável que, assim como nos casos anteriores, equipamentos elétricos e eletrônicos também sejam alvo de mau funcionamento.

Por fim, os riscos associados à queda de descargas atmosféricas próximas à linhas de transmissão ou tubulações metálicas restringe-se ao mau funcionamento de equipamentos. Este caso é particularmente sensível a estruturas empresariais, que dependem dos recursos tecnológicos para suas atividades. A perda de dados ou de capacidade produtiva em geral pode acarretar prejuízos tão severos quanto à perda de matéria prima, estrutura ou maquinário.

Em suma, a análise de risco que determinará a necessidade ou não de proteção parte da identificação e estratificação dos tipos de danos (ABNT, 2015), que expõe as possíveis perdas consequentes. Cada perda, por sua vez, está associada à um risco que, somado aos demais, compõe o risco total ao qual a estrutura está exposta. Se o risco total superar o risco tolerável, necessita-se implementar medidas de proteção. A análise de risco proposta pela NBR 5419-2 (ABNT, 2015) foi utilizada integralmente no desenvolvimento deste trabalho e será abordada novamente nos capítulos referentes ao projeto. A Figura 21 ilustra a composição dos riscos com base nos tipos de danos.

Figura 21 – Árvore de danos



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

### 2.4.3 Componentes de um SPDA

Conforme abordado na Seção 2.4.1, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas subdividem-se em sistemas internos e externos de proteção (COUTINHO E ALTOÉ, 2003). Os componentes de cada sistema diferem-se uns dos outros em função do comportamento

específico da corrente de descarga para cada ambiente, adequando-se às componentes de risco relevantes.

O sistema externo de proteção visa interceptar as descargas atmosféricas, conduzir a corrente de descarga para o solo por um caminho seguro e dispersá-la na terra com rapidez e eficiência. Fazem parte do sistema externo os subsistemas de captação, de condutores de descida e de aterramento. Seus componentes principais (não naturais) são elencados pelo Quadro 2, junto ao material que os compõe e os subsistemas aos quais pertencem. Vale lembrar que o sistema externo deve evitar o efeito de centelhamento, através de técnicas de equipotencialização e posicionamento seguro dos elementos.

Quadro 2 - Componentes principais de um SPDA

Componente	Material	Subsistema		
		Captor	Descida	Terra
Hastes captoras	Cobre, aço galvanizado, alumínio, latão, bronze	X		
Minicaptores	Cobre, aço galvanizado, alumínio	X		
Captore Franklin	Latão cromado, Aço inoxidável	X		
Mastro Telescópico	Aço galvanizado.	X		
Suportes de Fixação	Latão cromado, aço galvanizado	X	X	
Cabos de suporte	Aço galvanizado, aço cobreado, alumínio	X		
Cabos condutores	Aço galvanizado, aço cobreado, alumínio	X	X	X
Conectores	Cobre, aço galvanizado, alumínio, latão, bronze, aço estanhado	X	X	
Grampos	Cobre, aço galvanizado, alumínio, latão, bronze	X	X	
Isoladores	Cerâmica vitrificada, vidro isolador	X	X	
Solda exotérmica	Ligas de óxido de cobre e alumínio	X	X	X
Caixas de inspeção	PVC, concreto, cerâmica			X
Hastes de aterramento	Cobre, aço cobreado, aço galvanizado			X
Gel higroscópico	Sais químicos			X

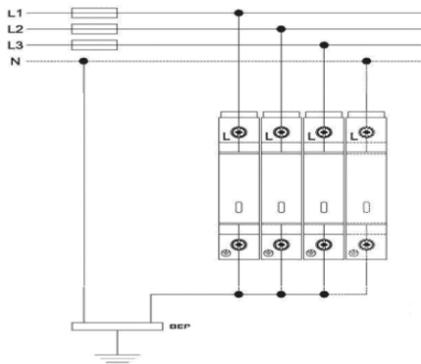
Fonte: Autoria própria

O sistema interno de proteção, por outro lado, busca impedir a ocorrência de centelhamentos perigosos no interior do volume a ser protegido, proveniente da corrente elétrica da descarga elétrica que incide sobre a estrutura ou sobre o próprio sistema externo de proteção. Existe a possibilidade de ocorrer centelhamentos entre o SPDA e instalações metálicas, sistemas internos e partes condutivas em geral, mesmo quando o projeto se enquadra nos padrões normativos (ABNT, 2015).

O princípio utilizado para minimizar tais riscos é a equipotencialização das partes metálicas, equipamentos e sistemas internos, pois assume-se que tal medida evitará o centelhamento através do escoamento das correntes indesejadas (BEEMAN, 1955). Segundo a NBR 5419-3 (ABNT, 2015), os meios de interligação podem ser:

- a) direto: através de condutores de ligação em locais onde os condutores naturais não fornecem continuidade elétrica;
- b) indireto: através de DPS, onde a conexão direta por meio de condutores não possa ser realizada (Figura 22);
- c) indireto: através de centelhadores, onde a conexão direta por meio de condutores não seja permitida.

Figura 22 – DPS trifásico com conexão de neutro



Fonte: (WEG, 2017)

Dispositivos de proteção contra surtos (DPS) são desenvolvidos para proteger as instalações de sobretensões que adentram à estrutura, usualmente provocadas pelo impacto direto ou indireto de descargas atmosféricas. Independentemente da origem, raios provocam perturbações e picos de tensão na rede elétrica, que podem danificar equipamentos eletrônicos ou até mesmo a própria instalação. Ao desarmar, o dispositivo conecta o barramento de potencial ao sistema de aterramento, seja por meio de um BEP ou BEL, evitando, assim, a

propagação da sobretensão. Logo, o DPS deve ser dimensionado de modo a suportar a corrente de descarga estabelecida para o projeto. É importante lembrar que os condutores de interligação, incluindo barramentos, também devem ser dimensionados de acordo com a corrente de descarga associada ao nível de proteção. As dimensões mínimas segundo a NBR 5419 (ABNT, 2015) são conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Dimensões mínimas para interligação de BEP ou BEL

Nível do SPDA	Modo de instalação	Material	Área da secção reta (mm <sup>2</sup> )
I a IV	Não enterrado	Cobre	16
		Alumínio	25
		Aço galvanizado a fogo	50
	Enterrado	Cobre	50
		Alumínio	N/A
		Aço galvanizado a fogo	80

Fonte: (ABNT, 2015)

As especificações acerca da metodologia de equipotencialização são descritas integralmente na norma NBR 5419 (ABNT, 2015) e, por esta razão, não serão abordadas em detalhe neste trabalho.

#### 2.4.4 Avaliação e gerenciamento do risco

A metodologia de projeto proposta pela NBR 5419 (ABNT, 2015) utiliza os resultados da análise de risco, descrita em sua segunda parte, para determinar a necessidade de proteção, nível de proteção e soluções cabíveis para a redução de riscos. Ao contrário das versões anteriores, que traziam uma avaliação bastante singela, a norma atual oferece um estudo bastante abrangente das estruturas e estratifica os danos possíveis em:

- $Ri_1$ : risco de perda de vida humana;
- $Ri_2$ : risco de perda de serviço ao público;
- $Ri_3$ : risco de perda de patrimônio cultural;
- $Ri_4$ : risco de perda de valor econômico.

Uma das grandes evoluções observadas na análise de risco refere-se ao conceito e determinação do nível de proteção de uma estrutura. A antiga versão da norma adotava o nível de proteção como parâmetro de entrada, o qual era selecionado com base nas características funcionais da estrutura, como por exemplo: casa, escola, hospital ou fazenda. Este

conceito mudou. Atualmente, caso autoridades locais não especifiquem um valor mínimo, o nível de proteção é determinado com base nas medidas necessárias para se reduzir os riscos existentes à valores toleráveis, o que torna a tomada de decisão criteriosa e embasada em fundamentos técnicos. A mudança permite ao projetista selecionar as soluções através de critérios bastante tangíveis, evitando, assim, superdimensionamento.

Os riscos citados anteriormente subdividem-se em componentes de risco de acordo com o ponto de impacto da descarga atmosférica, conforme indica o Quadro 3.

Os componentes de risco descritos pelo quadro são expressos pela equação geral (40):

$$Ri_X = N_X \cdot P_X \cdot L_X \quad (40)$$

onde:

$N_X$  é o número de eventos perigosos por ano;

$P_X$  é a probabilidade de dano à estrutura;

$L_X$  é a perda consequente.

Quadro 3 – Componentes de risco considerados para cada tipo de perda

Fonte de danos	Descarga na estrutura (S1)			Descarga perto da estrutura (S2)	Descarga em uma linha conectada à estrutura (S3)			Descarga perto de uma linha conectada à estrutura (S4)
	$Ri_A$	$Ri_B$	$Ri_C$		$Ri_M$	$Ri_U$	$Ri_V$	
Risco para cada tipo de perda								
$Ri_1$	*	*	*a	*a	*	*	*a	*a
$Ri_2$		*	*	*		*	*	*
$Ri_3$		*				*		
$Ri_4$	*b	*	*	*	*b	*	*	*

\*a - Somente para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas onde a falha de sistemas pode provocar a perda de vida humana  
 \*b - Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

O número de eventos perigosos  $N_X$  é calculado com base na densidade de descargas atmosféricas ( $N_G$ ) e pelas características físicas da estrutura, sua vizinhança, linhas conectadas e o solo. Sua determinação específica é descrita no anexo A da NBR 5419-2 (ABNT, 2015).

A probabilidade de dano à estrutura é principalmente afetada pelas características estruturais, linhas de transmissão conectadas e medidas de

proteção existentes. A metodologia específica de cálculo pode ser consultada no anexo B da NBR 5419-2 (ABNT, 2015).

O último fator da equação geral do risco, a perda consequente  $L_X$ , é determinado com base na funcionalidade da estrutura em análise, frequência de pessoas, tipo de serviço ofertado ao público, valor dos bens e quantidade de perdas. Recomenda-se consultar o anexo C da NBR 5419-2 (ABNT, 2015) para maiores detalhes acerca de sua determinação.

A norma apresenta um enfoque especial na análise e gerenciamento de risco, pois os resultados provenientes desta etapa servem de base para a seleção e dimensionamento das medidas de proteção. O procedimento geral para o gerenciamento de risco resume-se aos seguintes passos (ABNT, 2015):

- a) identificação da estrutura a ser protegida;
- b) identificação dos tipos de perdas na estrutura e os correspondentes riscos relevantes;
- c) avaliação do risco  $Ri$  para cada tipo de perda  $Ri_1$  a  $Ri_4$ ;
- d) avaliação da necessidade de proteção, por meio da comparação dos riscos  $Ri_1$  a  $Ri_4$  com os riscos toleráveis  $Ri_T$ ;
- e) avaliação da eficiência do custo de proteção pela comparação do custo total das perdas com ou sem as medidas de proteção. Neste caso a avaliação dos componentes de risco  $Ri_4$  deve ser feita no sentido de avaliar tais custos.

Os riscos toleráveis  $Ri_T$ , segundo a NBR 5419 (ABNT, 2015), podem ser representados pelos valores da Tabela 8.

Tabela 8 – Valores típicos para riscos toleráveis

Tipo de Perda		$Ri_T(y^{-1})$
<b>L1</b>	Perda de vida humana ou ferimentos permanentes	$10^{-5}$
<b>L2</b>	Perda de serviço ao público	$10^{-3}$
<b>L3</b>	Perda de patrimônio cultural	$10^{-4}$
<b>L4</b>	Perda de valor econômico	$10^{-3}$

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

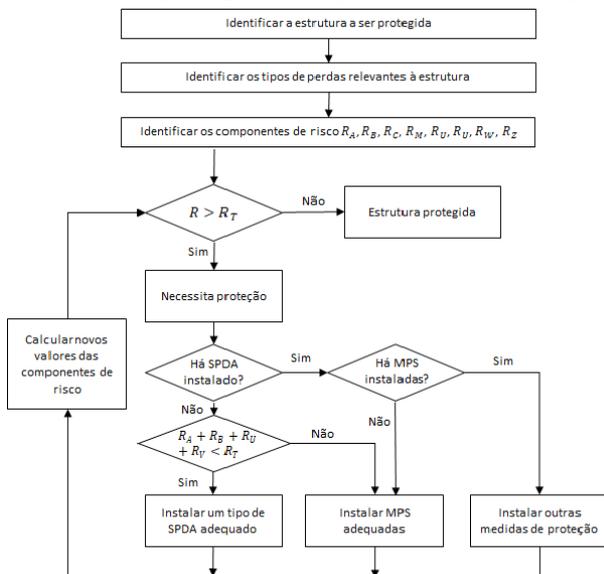
O risco tolerável referente à perda de valor econômico pode, quando necessário, ser calculado através da metodologia proposta pela norma, ou ser especificado pelo projetista de acordo com a estrutura em análise. No entanto, o valor da Tabela 8 é utilizado caso a perda exista,

mas não se possui os dados necessários para a avaliação de custo/benefício.

Uma vez mapeados, deve-se considerar, obrigatoriamente, os riscos  $Ri_1$ ,  $Ri_2$  e  $Ri_3$  para a avaliação de necessidade de proteção. Cada risco deve ser comparado individualmente com o correspondente valor de risco tolerável, de modo a verificar se a relação  $Ri \leq Ri_T$  é atendida. Caso os riscos totais superem o risco tolerável, deve-se projetar medidas de proteção cabíveis e reavaliar o resultado da comparação anterior. De forma simplificada, os seguintes passos devem ser tomados para cada tipo de risco (Figura 23):

- identificação dos componentes  $Ri_X$  que compõe o risco;
- cálculo dos componentes de risco identificados  $Ri_X$ ;
- cálculo do risco total  $Ri$ ;
- identificação dos riscos toleráveis  $Ri_T$ ;
- comparação do risco  $Ri$  com  $Ri_T$ .

Figura 23 – Fluxograma para avaliação da necessidade de proteção



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

O fluxograma da Figura 23 ilustra o procedimento para determinar a necessidade de proteção, assim como as medidas de proteção a serem adotadas. A análise descrita pelo procedimento revela que os riscos

podem, muitas vezes, ser reduzidos através de soluções que não englobam um sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas. No entanto, em situações onde os riscos de dano à vida humana ou dano à integridade estrutural são relevantes, a implementação de tal sistema é imprescindível.

### 2.4.5 Métodos de projeto

Esta seção do trabalho aborda os detalhes acerca dos principais métodos de projeto de SPDA externo. A seleção e posicionamento dos componentes de um sistema externo de proteção resulta, basicamente, do uso de um dos três métodos de proteção (MAMEDE, 2017):

- a) método de Franklin (ângulo de proteção);
- b) método da gaiola de Faraday;
- c) Método eletrogeométrico ou esfera rolante.

Os principais parâmetros de posicionamento dos elementos variam de acordo com a classe de SPDA necessária ao projeto e podem ser consultados na Tabela 9. Para maiores detalhes acerca do ângulo de proteção para diferentes alturas, recomenda-se consultar a Tabela 10.

Tabela 9 – Valores de parâmetros de diferentes métodos de proteção

Classe do SPDA	Métodos de proteção		
	Raio da esfera rolante (m)	Máximo afastamento dos condutores da malha (m)	Ângulo de proteção $\alpha^\circ$ - ( $H = 20$ m)
I	20	5x5	21
II	30	10x10	39
III	45	15x15	49
IV	60	20x20	53

\* *H* corresponde à altura do captor em relação ao plano de referência

Fonte: Adaptado de (ABNT, 2015)

De certo modo, os dois primeiros métodos reduzem-se à casos particulares do método da esfera rolante. No entanto, o uso dos métodos de Franklin e Faraday são, com frequência, mais convenientes em diversas aplicações (COUTINHO & ALTOÉ, 2003).

Por fim, ressalta-se que os métodos mencionados não são exclusivos. Nada impede que o projetista utilize, por exemplo, um arranjo que combine para-raios Franklin e malhas condutoras em uma mesma

edificação. Tudo depende das características estruturais, nível de proteção necessário e melhor relação custo/benefício.

#### 2.4.5.1 Método de Franklin

O método de Franklin faz referência à clássica configuração proposta por Benjamin Franklin ainda no século XVIII, composta por um captor pontiagudo no topo de um mastro, conectado à terra através de um cabo condutor. As pontas metálicas propiciam um acúmulo de cargas no local, que gera um campo elétrico mais intenso do que em outros pontos do corpo. Por este motivo, as cargas elétricas são escoadas preferencialmente pelo captor, evitando a ocorrência de rupturas dielétricas indesejadas. O volume de proteção é determinado por um cone, cujo ângulo  $\alpha$  ( $^{\circ}$ ) da geratriz é função do nível de proteção desejado e da altura do captor em relação ao plano de referência (MAMEDE, 2017).

Segundo a norma NBR 5419-3 (ABNT, 2015), o método é adequado para edificações de formato simples e está sujeito aos limites de altura e ângulos de proteção expressos pela Tabela 10. Estruturas fora das limitações de altura requerem o uso de um dos outros dois métodos de proteção.

Tabela 10 – Ângulos de proteção  $\alpha$  ( $^{\circ}$ ) para diferentes classes de SPDA e alturas do captor

Altura H (m)	Classe do SPDA			
	I	II	III	IV
10	46	53	61	65
15	35	46	55	60
20	21	38	49	53
25	*	30	41	49
30	*	22	38	44
35	*	*	31	41
40	*	*	28	38
45	*	*	22	34
50	*	*	*	30
60	*	*	*	21

\* Somente os métodos Faraday e esfera rolante são aceitáveis

Fonte: Autoria própria

Cada para-raios Franklin deve possuir ao menos um condutor de descida conectado ao sistema de aterramento, dimensionado de acordo com os requisitos da NBR 5419-3 (ABNT, 2015). As dimensões mínimas



malha (COUTINHO & ALTOÉ, 2003), cujos espaçamentos máximos são determinados pelo nível de proteção desejado (Tabela 9). Preferencialmente, deve-se fixar os condutores de descida e anéis de cintamento por debaixo do reboco. Em edificações com fachadas já prontas, os condutores podem ser fixados diretamente sobre o acabamento. Recomenda-se, em tais casos, o uso de barras chatas de alumínio para reduzir os efeitos estéticos.

Assim como no método de Franklin, o dimensionamento dos condutores é especificado na norma NBR 5419-3 (ABNT, 2015).

#### 2.4.5.3 Método eletrogeométrico ou esfera rolante

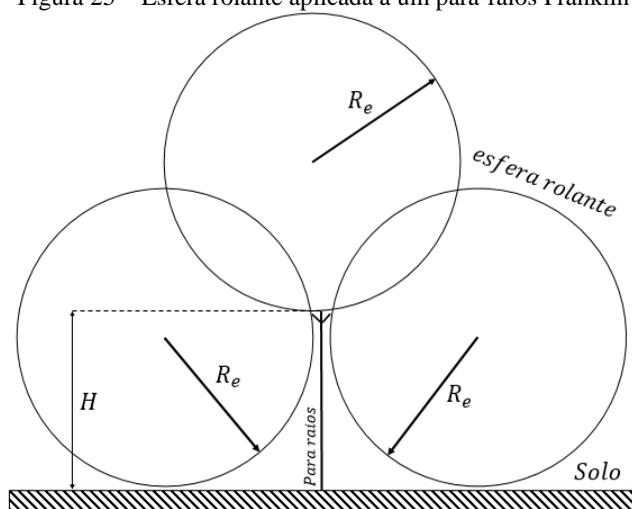
O método eletrogeométrico baseia-se no estudo de registros fotográficos, parâmetros dos raios, ensaios laboratoriais de alta tensão e simulações de modelagens matemáticas. Inicialmente, seu uso restringia-se à linhas de transmissão, mas foi logo adaptado para estruturas em geral (COUTINHO & ALTOÉ, 2003). O processo de formação dos raios, abordado anteriormente, fundamenta a premissa de existência de uma esfera com raio  $R_e$ , cujo centro localiza-se na extremidade do líder antes do último salto. Os pontos pertencentes ao contorno da esfera correspondem aos prováveis locais impactados por descargas atmosféricas. Por outro lado, as regiões não tocadas pela esfera, ao rolar a mesma sobre o solo e sistema de proteção, constituem as zonas protegidas (MAMEDE, 2017).

O raio da esfera é determinado pelo nível de proteção desejado ao SPDA, conforme mostra a Tabela 9. Tais valores são calculados a partir da corrente máxima de crista do primeiro raio negativo ( $I_{max}$ ), através de (41).

$$R_e = 10 * I_{max}^{0,65} \quad (41)$$

Segundo a NBR 5419 (ABNT, 2015), não há contraindicações para o uso do método da esfera rolante. Recomenda-se, em especial, o uso deste método em estruturas complexas, que necessitem soluções híbridas. A Figura 25 ilustra o conceito abordado previamente para o caso de um para-raios Franklin de altura  $H$ . A área entre o para-raios e as esferas constitui a zona de proteção do sistema.

Figura 25 – Esfera rolante aplicada à um para-raios Franklin



Fonte: Autoria própria



### 3 ESTUDO DE CASO

Este capítulo dedica-se a apresentar os resultados do estudo conduzido nas instalações da indústria têxtil sobre a qual este trabalho foi desenvolvido. Primeiramente, verificou-se as características da indústria e da região na qual ela se localiza, afim de prover contexto ao problema. Em seguida, conduziu-se a análise de risco conforme a norma NBR 5419-2 (ABNT, 2015), que resultou na avaliação da necessidade de proteção e seleção das medidas adotadas. Após a análise, projetou-se as soluções cabíveis para garantir a proteção da edificação através da redução individual dos riscos. Por fim, verificou-se a eficiência das medidas projetadas através da comparação dos novos riscos com os riscos toleráveis.

#### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho baseia-se no estudo das instalações de uma indústria têxtil localizada no município de Concórdia – SC, que não possui nenhum sistema de proteção contra descargas atmosféricas em suas instalações. Segundo a proprietária, a empresa de engenharia responsável pelo projeto e execução da obra julgou a aquisição de tal sistema opcional.

Por motivos econômicos, a empresa optou por não implementar um SPDA durante a fase de construção das novas estruturas, em fevereiro de 2012. No entanto, em 2017 dois computadores, um televisor e um equipamento de audioconferência queimaram após uma noite tempestuosa, alertando a sócia-diretora da unidade sobre um possível problema na segurança da instalação.

O local abriga um investimento estimado em 1,7 milhões de reais entre maquinário e estoque de matéria prima, além de abrigar mais de 20 funcionários diretos, além de receber clientes e fornecedores diariamente. Dado que a unidade fabril está alocada em uma colina bastante elevada, com alto índice cerâmico e sem edificações elevadas nas proximidades, vale questionar a decisão da empresa de engenharia acerca da necessidade de proteção.

Propõe-se, então, através do desenvolvimento deste projeto:

- a) avaliar o estado atual das instalações;
- b) levantar as características do solo local;
- c) conduzir uma análise de risco e avaliar se há ou não necessidade de proteção;

- d) determinar quais medidas de proteção satisfazem as necessidades da unidade fabril;
- e) dimensionar um SPDA adequado para a indústria.

Vale notar que a norma técnica referente a SPDA vigente na época da construção era bastante diferente da norma atual. Logo, é possível que a estrutura, hoje incompatível com a norma, estivesse em condições aceitáveis no momento de sua concepção.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA

A indústria foco deste trabalho pertence à área têxtil e, desde 1996, atua principalmente no segmento de enxovais para bebês. Roupas, acessórios e itens para animais de estimação também compõe o crescente portfólio, pois contemplam a estratégia de expansão no varejo, segundo a sócia-diretora. Tanto o escritório administrativo quanto a produção operam na mesma unidade fabril, no município de Concórdia – SC, onde trabalham cerca de 20 funcionários diretos.

O mercado composto por grandes redes especializadas no setor infantil é o foco de negócios da empresa no Brasil e no mundo. As marcas de alto valor agregado, destaques da companhia, sempre apresentaram um ótimo desempenho, principalmente nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. No entanto, observou-se um alto crescimento das linhas mais acessíveis no mercado nacional, com foco em públicos B<sup>2</sup> e C<sup>3</sup>, superando, em faturamento, as marcas principais em 2017. No mercado internacional, por outro lado, especialmente nos Estados Unidos, Chile e Austrália, o volume de vendas ainda é exclusivamente destinado às marcas de maior valor.

Os produtos consistem em conjuntos coordenados que englobam: lençóis de berço, colchas, almofadas, acessórios para carrinhos, babadores e demais acessórios do gênero. A matéria prima utilizada nos processos de fabricação é predominantemente composta por espumas e tecidos de algodão.

A empresa é nacionalmente reconhecida por órgãos como ABVTEX, FNQ, SEBRAE e FIESC por excelência em gestão, responsabilidade social e responsabilidade ambiental. Segundo a sócia-diretora, o sonho da empresa é atingir os mais altos patamares de

---

<sup>2</sup> Público com renda familiar entre R\$ 8.641,00 e R\$ 11.261,00 (FGV, 2016).

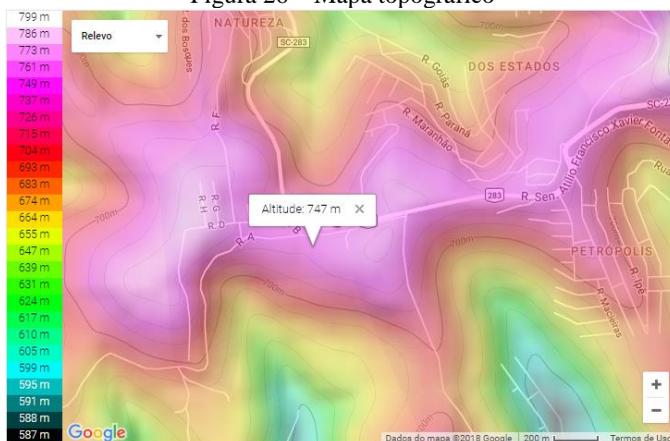
<sup>3</sup> Público com renda familiar entre R\$ 2.005,00 e R\$ 8.640,00 (FGV, 2016).

excelência através do desenvolvimento sustentável, unindo as pessoas por um mundo melhor.

### 3.2.1 Localização geográfica

A planta industrial localiza-se nos subúrbios do município de Concórdia – SC, em um bairro onde a altitude média chega a variar 200 metros nas proximidades. Além disso, o terreno específico fica no topo de uma colina relativamente isolada, com 12 metros de altura em relação ao nível da rua. A plaqueta no centro do mapa topográfico da Figura 26 aponta a localização da empresa e mostra sua altitude.

Figura 26 – Mapa topográfico



Fonte: (TOPOGRAPHIC-MAP, 2018)

Durante o ensaio de medição da resistividade do solo, que será abordado mais adiante, percebeu-se que o solo local possui uma camada terrosa de coloração avermelhada, relativamente fina (aproximadamente 30 centímetros), seguida por uma camada bastante rochosa, difícil de se penetrar somente com as hastes de cobre e marreta. De fato, segundo a EMBRAPA (2004, p.18), os solos que mais se correlacionam com a região são do tipo latossolo roxo e avermelhado, com composições rochoso-basálticas e graníticas. Em termos de aterramento, tal composição não é ideal, pois dificulta a execução do projeto, bem como a obtenção de baixas resistividades de malha (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 1998).

### 3.2.2 Condições climáticas e densidade de descargas atmosféricas

A região de Concórdia – SC possui clima subtropical continental e apresenta, segundo o relatório disponibilizado pela EMBRAPA (2004, p.25), as seguintes características climatológicas relevantes:

- i) alta pluviosidade, com um volume médio anual de chuvas entre 1.500 e 2.000 mm por ano;
- ii) boa distribuição pluviométrica entre as estações, sem estação seca definida;
- iii) alta amplitude térmica ao longo do ano;
- iv) elevada densidade de descargas atmosféricas.

A densidade de descargas atmosféricas, também conhecido por índice cerâmico, é um parâmetro que indica a quantidade de descargas atmosféricas registradas por quilômetro quadrado ao longo de um ano. O mapa cerâmico fornecido pelo INPE é a fonte oficial do indicador, sendo o mesmo considerado para todos os cálculos propostos pela NBR 5419 (ABNT, 2015). A região de Concórdia apresenta, segundo o mapa, uma densidade de 10,3 descargas/km<sup>2</sup>/ano (Figura 27). Em comparação com demais regiões do Brasil, esta densidade é considerada mediana. No entanto, no escopo do estado de Santa Catarina, nota-se que o meio oeste é uma das regiões com maior incidência de descargas atmosféricas, perdendo apenas para o extremo oeste, que apresenta índices superiores a 13,0 descargas/km<sup>2</sup>/ano próximo à fronteira com a Argentina.

Figura 27 – Densidade de descargas atmosféricas para a terra



Fonte: (INPE, 2015)

### 3.2.3 Estado atual das instalações

Antes de analisar a edificação com foco no projeto do SPDA, é necessário detalhar as características físicas do local. A indústria consiste em um pavilhão de dois andares com base retangular, feito primordialmente de concreto. A Tabela 11 consolida os principais aspectos estruturais relevantes para o desenvolvimento do projeto.

Tabela 11 – Principais aspectos estruturais da instalação

Parâmetro	Observações	Símbolo	Valor
Comprimento	m	$L$	13,95
Largura	m	$W$	31,2
Altura	m	$H$	7,6
Altrura máxima	m	$H_{max}$	8,8
Elevação máxima do terreno	m	$\Delta E_T$	11,90
Área interna	m <sup>2</sup>	$A_D$	435,24
Área externa relevante	m <sup>2</sup>	$A_{EXT}$	439,41
Material das paredes	Concreto	-	-
Material do telhado	Zinco	-	-
Material das esquadilhas	Alumínio	-	-
Material do piso	Concreto	-	-

Fonte: Autoria própria.

De modo análogo, deve-se também avaliar o estado das linhas de transmissão que adentram a edificação. A Tabela 12 consolida os principais aspectos da linha de transmissão relevantes ao projeto.

Tabela 12 – Principais aspectos da linha de transmissão

Parâmetros	Comentário	Símbolo	Valor
Comprimento	Valor assumido em m	$L_L$	1000
Fator de instalação	Aérea	$C_l$	1
Fator tipo da linha	Energia	$C_T$	1
Fator ambiental	Suburbano	$C_E$	0.5
Blindagem da linha	N/A	$r_s$	1
Blindagem / isolamento	N/A	$C_{LD}$	1
Estrutura adjacente	Valor assumido em m <sup>2</sup>	$A_{DJ}$	250
Fator de localização	Isolado	$C_{DJ}$	1
Tensão suportável (kV)	-	$U_w$	2.5

Fonte: Autoria própria.

Em termos de maquinário, a empresa opera com 15 máquinas de costura elétricas, um infestador de espuma automático, uma estação de bordados industrial, um compressor de ar, quatro vaporizadores de roupas e outros pequenos equipamentos que pouco impactam na carga. A alimentação é feita através de uma linha aérea trifásica, que parte do transformador externo à instalação. Verificou-se que o único aterramento presente no local consiste na haste de terra instalada próxima à entrada de energia (ramal de entrada). A Tabela 13 traz o quadro de cargas completo da empresa.

Tabela 13 – Quadro de cargas da unidade industrial

Quadro de cargas - Centro de distribuição - Produção - 220/380V							
Circuito	Nº pontos	Carga		Disj. (A)	Cabo #mm²	Descrição	Fases
		(CV)	(W)				
1	36	-	2880	1x20A	3#2,5	Iluminação geral	T
2	11	-	3300	1x20A	3#2,5	Tomadas de uso geral	S
3	05	1	3750	1x20A	3#2,5	Alimentação máquinas de costura	R
4	05	1	3750	1x20A	3#2,5	Alimentação máquinas de costura	S
5	05	1	3750	1x20A	3#2,5	Alimentação máquinas de costura	R
6	04	-	6000	1x20A	3#6,0	Alimentação setor passar	S
7	02	1	1500	1x20A	3#2,5	Alimentação setor de corte	T
8	01	1	750	1x10A	3#2,5	Compressor de ar	T
9	04	1	3000	1x20A	3#4,0	Alimentação Infestador	R
10	04	1	3000	1x20A	3#4,0	Alimentação estação de bordados	T
11	04	-	2400	1x20A	3#2,5	Ventiladores	R
11		-	14960	1x20A	3#6,0	Ramal CD – Administrativo	RST
<b>TOTAL</b>	<b>81</b>	-	<b>49040</b>	<b>3x50A</b>	<b>4#10</b>	<b>Ramal alimentador da planta industrial</b>	<b>RST</b>

Fonte: Autoria própria.

Tratando-se de sistemas internos de proteção, a unidade conta somente com disjuntores termomagnéticos e disjuntores diferenciais instalados nos quadros de distribuição. Não há dispositivos de proteção contra surtos instalados no quadro ou entrada de energia. Atualmente, a CELESC obriga a instalação de um DPS classe II no ramal de entrada, caso a estrutura não possua SPDA, ou classe I com corrente de descarga mínima de 12,5 kA caso possua (CELESC, 2015). No entanto, a mudança na norma ocorreu somente em 2015, três anos após a conclusão das obras. Na época em que as instalações elétricas foram feitas, todos os

componentes estavam de acordo com a legislação vigente. Em relação a sistemas externos de proteção, ressaltase que não se encontrou, através da inspeção *in loco* e análise das plantas, nenhum dispositivo instalado.

Tabela 14 – Relação dos bens armazenados na estrutura

Equipamento	Unidades	Valor unitário	Valor total
Máquina de costura	15	BRL 3,200.00	BRL 48,000.00
Infestador automático	1	BRL 750,000.00	BRL 750,000.00
Estação de bordados	1	BRL 350,000.00	BRL 350,000.00
Vaporizador de roupas	4	BRL 500.00	BRL 2,000.00
Compressor de ar	1	BRL 2,800.00	BRL 2,800.00
Ar condicionado	4	BRL 2,500.00	BRL 10,000.00
Ventilador	4	BRL 500.00	BRL 2,000.00
Computador	9	BRL 2,000.00	BRL 18,000.00
CPU integrada	1	BRL 16,000.00	BRL 16,000.00
Equipamentos de suporte	-	BRL 30,000.00	BRL 30,000.00
Estoque de matéria prima	-	BRL 450,000.00	BRL 450,000.00
<b>Total</b>			<b>BRL 1,678,800.00</b>

Fonte: Autoria própria.

Avaliou-se, também, o valor estimado da edificação, de seus equipamentos e estoque de matéria prima, afim de se obter uma ordem de grandeza do risco de perda econômica. O imóvel é avaliado, segundo a sócia-diretora, em R\$ 800.000,00 e possui um inventário que soma cerca de 1,7 milhões de reais (Tabela 14). Os valores acerca dos equipamentos foram estimados com base na pesquisa de preços de equipamentos similares no mercado brasileiro. O valor médio do estoque foi fornecido pela empresa. Ressalta-se que, apesar de relevante, a análise de custo/benefício completa não pertence ao escopo deste trabalho, visto que as soluções abordadas posteriormente, direcionadas ao risco de perda de vida humana, reduzem também o risco de perda de valor econômico a valores toleráveis.

### 3.3 ANÁLISE E GERENCIAMENTO DE RISCO

O procedimento de análise e gerenciamento de risco proposto pela NBR 5419-2 (ABNT, 2015) foi utilizado na indústria têxtil afim de verificar a necessidade de proteção. Este item detalha os principais passos

da metodologia e expões os resultados obtidos para o desenvolvimento deste projeto.

### 3.3.1 Determinação das quantidades relevantes e zonas de proteção

O primeiro passo da análise de risco consiste em identificar os tipos de perdas associadas às zonas da edificação em questão. Para o caso desta indústria específica, será considerada somente uma zona de proteção (interior da edificação), onde as perdas consideráveis são:

- $L_1$ : perda de vida humana;
- $L_4$ : perda de valor econômico.

Logo, existindo tais perdas, necessita-se, segundo a norma (ABNT, 2015, p.61), uma avaliação detalhada da necessidade de proteção. Os riscos associados às perdas mapeadas são:

- $Ri_1$ : risco de perda de vida humana;
- $Ri_4$ : risco de perda de valor econômico.

Deve-se, então, estratificar os riscos e calcular as componentes individuais de risco sob a perspectiva de ambas perdas consideráveis, através da equação (40). Desta forma, tem-se:

- as componentes  $Ri_A$ ,  $Ri_B$ ,  $Ri_U$  e  $Ri_V$  para o risco  $Ri_1$ ;
- as componentes  $Ri_B$ ,  $Ri_C$ ,  $Ri_M$ ,  $Ri_V$ ,  $Ri_W$  e  $Ri_Z$  para o risco  $Ri_4$ .

Uma vez definidos, os riscos calculados devem ser comparados aos riscos toleráveis da Tabela 8. Naturalmente, somente serão relevantes os valores de  $Ri_T$  para perdas do tipo  $L_1$  e  $L_4$ , sendo respectivamente  $10^{-5}$  e  $10^{-2}$ . Caso os valores calculados superem os valores toleráveis, medidas de proteção devem ser adotadas afim de reduzir as componentes de risco de maior impacto.

Dado que a seleção e dimensionamento das medidas de proteção usa os valores oriundos da análise de risco, é importante ter um processo flexível, que permita ao engenheiro explorar várias alternativas simultaneamente. Ao longo do projeto desenvolveu-se uma planilha em Excel que retorna os valores dos riscos com base nos parâmetros de entrada definidos pelo projetista, de modo a facilitar a gestão de suas componentes. No entanto, é preciso que a apuração das características

relevantes seja feita antes de seu uso. Desta forma, os parâmetros de entrada coletados subdividem-se em:

- características da estrutura (Tabela 15);
- características da linha de energia (Tabela 16);
- características da linha de sinal (Tabela 17);
- características da zona de proteção (Tabela 18).

Tabela 15 – Parâmetros característicos da edificação

Parâmetros de Entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Densidade de descargas atmosféricas (1/km <sup>2</sup> /ano)	Elevado	N <sub>G</sub>	10,3
Comprimento da estrutura	Valor em metros	L	13,95
Largura da estrutura	Valor em metros	W	31,2
Altura da estrutura	Valor em metros	H	8,8
Fator de localização	Estrutura parcialmente isolada em colina	C <sub>D</sub>	1
SPDA	N/A	P <sub>B</sub>	1
Ligação equipotencial	Sem DPS	P <sub>EB</sub>	1
Blindagem espacial externa	Sem blindagem	K <sub>S1</sub>	1

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Parâmetros da linha de energia

Parâmetros de Entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Comprimento (m)	Valor assumido	L <sub>L</sub>	1000
Fator de instalação	Aérea	C <sub>I</sub>	1
Fator tipo da linha	Energia	C <sub>T</sub>	1
Fator ambiental	Suburbano	C <sub>E</sub>	0,5
Blindagem da linha	N/A	R <sub>S</sub>	1
Parâmetros de Entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Blindagem, aterramento, isolamento	N/A	CLD	1
Fator de localização	Isolado	CDJ	1
Tensão suportável do sistema interno (kV)		UW	2,5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Parâmetros de entrada referentes à linha de sinal

Parâmetros de Entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Comprimento (m)	Valor assumido	$L_L$	1000
Fator de instalação	Aérea	$C_I$	1
Fator tipo da linha	Sinais	$C_T$	1
Fator ambiental	Suburbano	$C_E$	0,5
Blindagem da linha ( $\Omega/\text{km}$ )	Aérea blindada	$R_S$	5
Blindagem, aterramento, isolação	N/A	$C_{LD}$	1
Tensão suportável do sistema interno (kV)		$U_W$	2,5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Características da zona de proteção

Parâmetros de Entrada	Comentário	Símbolo	Valor
Superfície do piso	Concreto	$r_t$	$10^{-2}$
Proteção contra choque	Na estrutura: nenhuma	$P_{TA}$	1
Proteção contra choque	Na linha: nenhuma	$P_{TU}$	1
Risco de incêndio	Normal	$r_f$	$10^{-2}$
Proteção de incêndio	Sistema automático com chuveiros	$r_p$	0,2
Fiação interna (energia)	Não blindada	$K_{S3}$	1
DPS coordenados	Entrada de energia: nenhum	$P_{SPD}$	1
Fiação interna (telecom)	Não blindada	$K_{S3}$	1
DPS coordenados	Entrada de Sinal: nenhum	$P_{SPD}$	1
Blindagem interna	Não blindada	$K_{S2}$	1
L1: perda de vida humana	Perigo especial	$h_z$	-
	D1: tensão de toque e passo	$L_T$	$10^{-2}$
	D2: devido à danos físicos	$L_F$	$2x10^{-2}$
	D3: falha de sistemas	$L_O$	-
L4: perda de valor econômico	D2: devido à danos físicos	$L_F$	0,5
	D3: devido à falha de sistemas	$L_O$	$10^{-2}$
Número de pessoas	Na zona de proteção	$n_z$	25
Número de pessoas	Em toda estrutura	$n_t$	25
Tempo na estrutura	Por pessoa	$t_z$	2170

Fonte: Autoria própria

Entre o levantamento de parâmetros básicos e o resultado final da análise de risco há uma série de variáveis intermediárias calculadas pelas equações da NBR 5419-2 (ABNT, 2015), que resultam da manipulação e ponderação das características coletadas nas tabelas anteriores. Por esta razão, somente os mais importantes aspectos do processo serão relatados nos itens a seguir.

### 3.3.2 Área de exposição equivalente e número anual de eventos perigosos

De modo geral, a área de exposição equivalente da estrutura é determinada através de (42):

$$A_D = L.W + 6.H.L.W + \pi(3H)^2 \quad (42)$$

onde as variáveis correspondem às dimensões da estrutura, conforme a Tabela 15.

Substituindo-se os valores em (42), tem-se que  $A_D = 24145,75 \text{ m}^2$ . Por se tratar de uma estrutura de formato simples, o valor de  $H$  pode ser substituído pela maior altura. Todavia, estruturas de forma complexa devem seguir o método gráfico proposto pela NBR 5419-2 (ABNT, 2015). Nota-se que as demais áreas equivalentes utilizadas no cálculo do número de eventos perigosos também possuem formulações próprias, as quais podem ser consultadas na mesma norma.

O número de eventos perigosos é basicamente o produto entre a área equivalente específica ( $A_X$ ), a densidade de descargas atmosféricas ( $N_G$ ) e as constantes de ponderação correlacionadas às características estruturais. Lembra-se que as componentes de risco são calculadas com o número de eventos perigosos relativos ao ponto de impacto. Logo, cada valor de  $N_X$  é determinado através de sua área equivalente correspondente. A Figura 28 é um trecho extraído da planilha de análise de risco desenvolvida para este trabalho e mostra as variáveis de cada  $N_X$ . Os valores totais calculados são expressos pela Tabela 19.

Figura 28 - Número de eventos perigosos calculados pela análise de risco

Nº eventos perigosos	$N_G$	$A_D$	$A_{DJ}$	$A_M$	$A_L$	$A_I$	$C_D$	$C_{DJ}$	$C_T$	$C_I$	$C_E$
$N_D$ - na estrutura	10.3	24145,7453					2				
$N_{DJ}$ - est. adjacente	10.3							0.5	1		
$N_M$ - prox. Estrutura	10.3			830525							
$N_I$ - linha	10.3				40000					1	1
$N_I$ - porx. Linha	10.3					2000000				1	1

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Número de eventos perigosos para cada ponto de impacto

Nº eventos perigosos	Total
$N_D$	0,497402
$N_{DJ}$	0
$N_M$	8,554408
$N_L$	0,206
$N_I$	10,3

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.3 Avaliação da probabilidade de danos

Este é o segundo fator de (40) a ser determinado para o cálculo das componentes de risco. As probabilidades de danos ( $P_X$ ) fornecidas pelo anexo B da NBR 5419-2 (ABNT, 2015) remetem a estimativas estatísticas influenciadas, principalmente, pela presença de sistemas de proteção na edificação. A planilha de análise de risco calcula as probabilidades através das formulações da norma e coeficientes inseridos pelo projetista, retornando, assim, os valores de:

- $P_A$ : probabilidade de uma descarga na estrutura causar ferimentos a seres vivos;
- $P_B$ : probabilidade de uma descarga na estrutura causar danos físicos;
- $P_C$ : probabilidade de uma descarga na estrutura causar falha de sistemas internos;
- $P_M$ : probabilidade de uma descarga próxima à estrutura causar falha de sistemas internos;
- $P_J$ : probabilidade de uma descarga na linha causar ferimentos a seres vivos;
- $P_V$ : probabilidade de uma descarga em uma linha causar danos físicos;
- $P_W$ : probabilidade de uma descarga em uma linha causar falha de sistemas internos;
- $P_Z$ : probabilidade de uma descarga próxima a linha causar falha de sistemas internos.

A Figura 29, extraída da planilha desenvolvida para este projeto, expressa os valores calculados das probabilidades listadas anteriormente.

Figura 29 – Probabilidades de danos calculadas

Componente	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P_M$	$P_U$	$P_V$	$P_W$	$P_Z$
Probabilidade de danos	1	1	1	1	1	0.8	0.7	1

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.4 Avaliação das quantidades de perdas

Um componente de perda corresponde à quantidade relativa média de um tipo de dano para um evento perigoso causado por uma descarga atmosférica, levando em consideração sua extensão e efeitos (ABNT, 2015, p.50). Os parâmetros de entrada variam de acordo com o tipo de perda considerada ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$ ) e para cada tipo de perda, com o tipo de dano causado associado.

O equacionamento proposto pela NBR 5419-2 (ABNT, 2015) foi utilizado para o cálculo das probabilidades de perdas presentes neste projeto. Ressalta-se que o projetista pode utilizar métodos alternativos para a definição destes parâmetros, tendo em vista que fatores incomuns são frequentemente encontrados em situações reais. No entanto, a norma recomenda que os coeficientes intermediários, utilizados para a obtenção de  $L_X$ , tomem como base os valores atribuídos pela norma.

A Figura 30, extraída da planilha de análise de risco desenvolvida para o projeto, mostra os valores de  $L_X$  utilizados para efeitos de cálculo.

Figura 30 – Probabilidades de perdas calculadas

Probabilidade de perda	$L_A$	$L_B$	$L_C$	$L_M$	$L_U$	$L_V$	$L_W$	$L_Z$
L1	2.4772E-05	4.95434E-05			2.47717E-05	4.95434E-05		
L2								
L3								
L4		2.50E-03	6.67E-03	6.67E-03		2.50E-03	6.67E-03	6.67E-03

Fonte: Autoria própria

### 3.3.5 Avaliação geral do risco e seleção das medidas de proteção

Uma vez concluído o cálculo do número de eventos perigosos, probabilidades de danos e quantidades de perdas, pode-se prosseguir para a avaliação do risco geral ao qual a estrutura encontra-se exposta. Desenhou-se a planilha de análise de risco de modo a expor o resultado consolidado e expandido por componente, com o intuito de facilitar a atuação do projetista. A Figura 31 mostra o trecho da planilha com os valores finais referentes à estrutura em seu estado atual.

Figura 31 - Componentes de risco da estrutura em seu estado atual

KTL	CONCÓRDIA - SC										2018
	Risco total	$Ri_A$	$Ri_B$	$Ri_C$	$Ri_M$	$Ri_U$	$Ri_W$	$Ri_Z$	$Ri_{i1}$	$Ri_{i2}$	
R1 - Vida humana	5.02E-05	1.23215E-05	2.4649E-05			5.10297E-06	8.16475E-06				NP I
R2 - Serviço ao público	0.00E+00										NP II
R4 - Valor econômico	1.96E-01		1.24E-03	4.97E-03	8.55E-02		8.16475E-06	1.44E-03	1.03E-01		NP IV

Fonte: Autoria própria.

Tratando-se do risco de perda de vida humana ( $Ri_1$ ), nota-se que as componentes de maior peso são  $Ri_A$  e  $Ri_B$ , referentes à probabilidade de ferimentos a seres vivos e danos estruturais, respectivamente. O risco total de  $Ri_1$  supera o risco tolerável  $R_T$  ( $10^{-5}$ ) em mais de 500 %, o que significa que há, obrigatoriamente, necessidade de se adotar medidas de proteção.

A proteção da estrutura também se justifica pelo risco de perda de valor econômico ( $Ri_4$ ), que ultrapassa o risco tolerável  $R_T$  ( $10^{-3}$ ). Neste caso, destacam-se as componentes  $Ri_Z$ ,  $Ri_C$  e  $Ri_M$ , todas relacionadas à probabilidade de falhas de sistemas internos. Dado que o valor de implementação do projeto é bastante inferior ao valor dos bens avaliados, não é necessário conduzir uma análise de custo-benefício completa. Mesmo assim, ressalta-se que o dimensionamento do sistema de proteção deve remeter à solução economicamente mais atrativa, não deixando de prover o nível de proteção necessário.

Para reduzir o risco  $Ri_1$  a um valor inferior à  $10^{-5}$ , é preciso selecionar medidas de proteção que ataquem efetivamente as componentes críticas. Para tal objetivo, propõe-se que as seguintes medidas de proteção sejam implementadas:

- Instalação de um SPDA completo classe III, modelado de acordo com o método Faraday, para neutralizar  $Ri_A$  e  $Ri_B$  através da redução da probabilidade  $P_B$ . De acordo com a NBR 5419-2 (ABNT, 2015), a medida reduz o fator para um décimo do valor original.
- Instalação de um DPS nível I na entrada de energia, dimensionado para 12,5 kV, conforme requisitado pela norma N-321.0001 (CELESC, 2015) a qualquer edificação com SPDA externo. O dispositivo reduz praticamente todas as variáveis relacionadas ao risco de falha em sistemas internos para  $10^{-2}$ .

Recalcula-se, então, as componentes de risco da Figura 31 levando em conta os efeitos das medidas de proteção, afim de verificar a eficácia da solução. A Figura 32 mostra os novos valores assumindo a existência de um SPDA classe III e um DPS classe I na entrada de energia.

Figura 32 - Componentes de risco recalculadas com SPDA classe III e DPS classe I

TIL	CONCÓRDIA - SC										2018	
Riscos Relevantes	Risco total	$R_{iA}$	$R_{iB}$	$R_{iC}$	$R_{iM}$	$R_{iV}$	$R_{iY}$	$R_{iW}$	$R_{iZ}$			
R1 - Vida humana	8.92E-07	2.5E-07	4.9E-07			5.1E-08	1.0E-07					
R2 - Serviço ao público	0.00E+00										x	
R4 - Valor econômico	3.92E-04		2.5E-05	5.0E-06	2.6E-04		1.0E-07	2.1E-06	1.0E-04			

Fonte: Autoria própria

O sistema reduz tanto o risco de perda de vida humana ( $R_{i1}$ ), quanto o risco de perda de valor econômico ( $R_{i4}$ ), para valores inferiores aos respectivos riscos toleráveis. Além disso, as medidas de proteção selecionadas são economicamente plausíveis, pois a seleção de níveis de proteção inferiores não reduz os riscos suficientemente.

### 3.4 PROJETO DO SPDA

Conforme abordado no item anterior, é necessário implementar um SPDA classe III na estrutura da indústria têxtil. O sistema externo reduzirá, principalmente, a probabilidade de danos a seres vivos e danos físicos, enquanto o sistema interno evitará a falha de sistemas internos.

Além de respeitar os requisitos técnicos, o SPDA deve atender às demandas específicas do cliente. Com isso em vista, as próximas seções do trabalho trazem o desenvolvimento da solução acordada entre a sócia-diretora da empresa e o projetista, a qual atende todos os interesses envolvidos.

#### 3.4.1 Método de projeto

O método de projeto mais indicado para a estrutura da indústria em análise é o método Faraday que, além de muito eficaz para edificações com geometria retangular, causa pouca interferência estética quando instalado. A sócia-diretora requisitou, especificamente, que o projeto seja o mais discreto possível, de modo a não comprometer a arquitetura do local.

Para minimizar tais efeitos estéticos, optou-se por utilizar barras chatas de alumínio nos subsistemas de captação e descida. A conexão com a haste de aterramento, no entanto, ainda será feita por cabos de cobre interligados às barras de descida através da caixa de inspeção.

### 3.4.2 Posicionamento e dimensionamento do subsistema captor

Através do método de Faraday, projetou-se a distribuição espacial dos condutores do sistema captor, exibida no Apêndice A deste documento. A Tabela 20 traz o dimensionamento dos componentes utilizados no sistema captor e suas respectivas quantidades necessárias.

Tabela 20 – Componentes do sistema captor

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Barra chata de alumínio	70 mm <sup>2</sup> x 3 m	52
Barra chata curva 90° de alumínio	70 mm <sup>2</sup> x 300 mm	6
Barra chata curva 90° vertical de alumínio	70 mm <sup>2</sup> x 300 mm	14
Minicaptadores de 30cm em aço galvanizado	300 mm x 10 mm	14
Parafuso cabeça chata em alumínio	1/4" x 5/8"	184
Porca sextavada em alumínio	1/4"	64
Bucha de nylon nº6	-	286
Parafuso autoatarrachante em inox	Ø4,2 x 32 mm	104

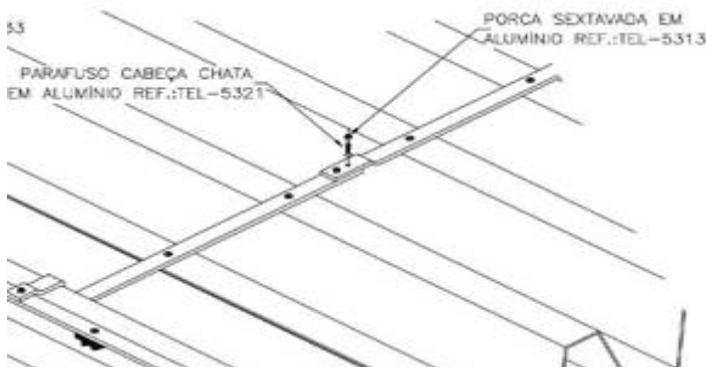
Fonte: Autoria própria

Por tratar-se de um SPDA classe III, o espaçamento máximo entre os condutores da malha não deve ultrapassar 15 metros (ABNT, 2015), conforme indicado pela Tabela 9. Desta forma, projetou-se o sistema captor com uma malha de anéis retangulares de 15 metros de comprimento por 6,9 metros de largura. A parte elevada no canto superior esquerdo da planta possui um anel próprio interligado ao sistema, que cobre todo o perímetro do bloco. O mesmo se aplica à saliência na parte superior, mesmo que sua altura seja inferior ao resto da edificação (Apêndice A).

Optou-se por distribuir 14 minicaptadores de aço galvanizado a fogo, de 30 cm de comprimento, nas quinas e condutores longos, afim de reduzir a probabilidade de danos causados por descargas atmosféricas no subsistema de captação. Todo o sistema de captação deve ser interligado à cobertura de zinco da edificação, para efeito de equipotencialização. Ressalta-se que isso pode ser feito, pois o material da cobertura atende

aos requisitos normativos acerca da espessura mínima permitida. A Figura 33 mostra o detalhe de instalação das barras chatas de alumínio.

Figura 33 – Detalhamento da instalação de barras chatas de alumínio em um telhado



Fonte: (TERMOTÉCNICA, 2017)

É fundamental que a fixação dos componentes seja devidamente executada através de porca sextavada e parafuso de alumínio (no caso deste projeto), conectores de pressão ou até mesmo solta exotérmica, de modo a garantir que o sistema resista às tensões mecânicas induzidas por descargas atmosféricas. Caso o contrário, a falha em uma ou mais junções pode danificar o SPDA e a estrutura, anulando completamente os efeitos de proteção.

### 3.4.3 Posicionamento e dimensionamento do subsistema de descida

A NBR 5419-3 (ABNT, 2015) especifica que o espaçamento entre os condutores de descida para um SPDA classe 3 deve ser entre 10 e 20 metros, sendo que um mínimo de duas descidas deve ser adotado para projeto via método Faraday. A representação esquemática do sistema de descida pode ser consultada nos apêndices A e B deste documento.

Adotou-se, inicialmente, seis descidas principais, sendo quatro nos cantos da edificação e duas no centro das laterais, de modo a proporcionar um espaçamento de 15 metros. No entanto, uma sétima descida foi acrescentada à saliência na parte superior na planta, afim de garantir um caminho mais direto para a corrente elétrica, caso raios atingissem a fachada norte da edificação, onde estão localizados os escritórios, servidores e demais equipamentos tecnológicos. As descidas nos cantos

são conectadas diretamente à um eletrodo vertical de aterramento, enquanto as demais são interligadas ao anel de cobre.

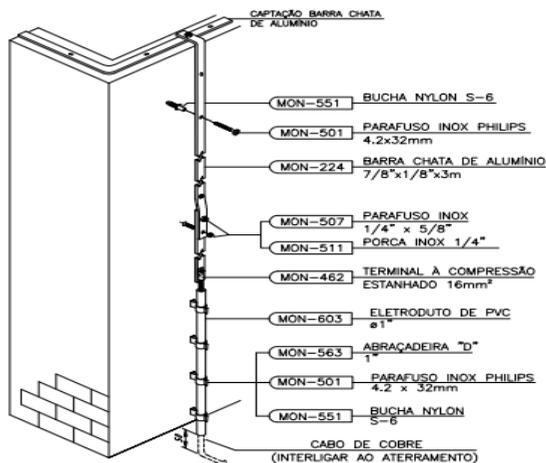
Optou-se por utilizar barras chatas de alumínio idênticas aquelas utilizadas no subsistema de captação para as descidas, visando alta funcionalidade e baixa interferência estética. A relação de componentes e seus dimensionamentos são expressos pela Tabela 21. Os condutores são aparafusados ao sistema captor e fixados à fachada da edificação por presilhas de aço e parafusos de aço inox. Um metro e meio acima do solo devem ser instaladas caixas de inspeção com um conector estanhado de pressão. Através do conector, a barra chata de descida é interligada ao cabo de cobre que, por sua vez, deve estar conectado ao sistema de aterramento por solda exotérmica. A saída da caixa de inspeção deve estar acoplada a um eletroduto de PVC de uma polegada, que acompanha o condutor até o solo. O tubo deve ser fixado à fachada da edificação por abraçadeiras. A Figura 34 ilustra os detalhes de instalação dos condutores de descida.

Tabela 21 – Componentes do sistema de descida

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Barra chata de alumínio	70mm <sup>2</sup> x 3m	22
Barra chata curva 90° vertical de alumínio	70mm <sup>2</sup> x 300mm	9
Parafuso cabeça chata em alumínio	1/4" x 5/8"	76
Porca sextavada em alumínio	1/4"	42
Bucha de nylon nº6	-	240
Parafuso autoatarrachante em inox	Ø4.2 x 32mm	132
Caixa de inspeção padrão SPDA suspensa	-	7
Conector barra-cabo de bronze estanhado	50mm	7
Presilhas de aço inox	70mm <sup>2</sup>	28
Cabo encordoado de cobre (m)	50mm	24
Eletroduto de PVC (m)	Ø1"	11
Solta exotérmica 150 GR	-	7

Fonte: Autoria própria

Figura 34 – Detalhamento da instalação de um condutor de descida tipo barra chata



Fonte: (MONTAL, 2018)

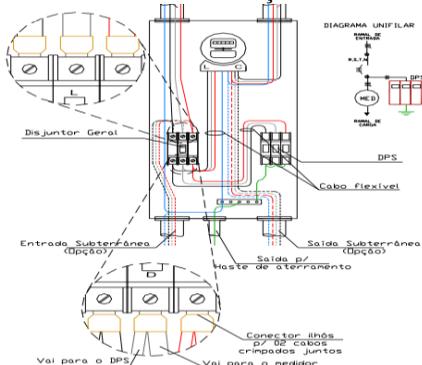
### 3.4.4 Sistemas internos de proteção

A análise de risco revelou que descargas na estrutura, na linha de transmissão e nas respectivas proximidades apresentam uma alta probabilidade de danos à unidade industrial foco deste trabalho. Levando em consideração a potência instalada no local, as características da carga, as dimensões da estrutura e o sistema de proteção contra descargas atmosféricas proposto como solução, avalia-se que a instalação de um único DPS na entrada de energia é suficiente para reduzir significativamente os riscos de danos a sistemas internos.

Optou-se por selecionar três módulos (um para cada fase) do DPS CLAMPER VCL Slim Classe I como solução para o projeto. O modelo possui capacidade de dreno de corrente de surto até 12,5 kA e opera a uma tensão máxima nominal de 275V, o que o torna adequado para estruturas com SPDA, segundo a norma N-321.0001 (CELESC, 2015). A Figura 35 mostra o detalhamento da instalação de um DPS trifásico na entrada de energia.

Em adição ao DPS, medidas de equipotencialização devem ser adotadas, de modo a interligar o SPDA às demais referências de terra existentes no sistema. Superfícies condutoras, barramentos e armaduras metálicas não aterradas também pertencem a este escopo.

Figura 35 – Detalhamento da instalação de um DPS trifásico



Fonte: (CELESC, 2015)

### 3.5 PROJETO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO

Apesar de existirem orientações normativas bastante específicas acerca do projeto de aterramento elétrico para SPDA, é necessário, primeiramente, avaliar as condições do solo local, afim de garantir um bom dimensionamento do sistema. No estudo, levantou-se informações de resistividade através de um ensaio pelo método de Wenner e, com base nos resultados, estratificou-se o solo em duas camadas. A análise do perfil do solo auxiliou a guiar o desenvolvimento do aterramento e embasou importantes decisões acerca da escolha, dimensionamento e posicionamento dos elementos.

#### 3.5.1 Medição de resistividade

As medições de resistividade foram feitas no terreno da indústria no dia 14 de dezembro de 2017, pelo método de Wenner. Utilizou-se o terrômetro MTD 20KWe, da MEGABRAS, com o auxílio de quatro estacas de cobre de um metro de comprimento e bitola de meia polegada. Ao longo de todas as medidas, penetrou-se as hastes a uma profundidade de 50 centímetros.

O procedimento ideal de medição, conforme abordado previamente, deve ser feito com os arranjos descritos pela NBR 7117 (ABNT, 2012) sobre o terreno que receberá o sistema de aterramento. No caso desta unidade industrial, a tarefa é impossível, pois a edificação já está concluída. Todavia, como o aterramento será em forma de anel exterior ao perímetro do prédio, é possível obter boas estimativas com base em medições próximas ao local.

Foram adotadas duas direções de medição (Figura 36):

- a) Norte – Sul: ensaio realizado na parcela não concretada do terreno;
- b) Sudoeste – Sudeste: utilizou-se uma faixa do terreno vizinho, em função do grande desnível na parte posterior do terreno da indústria.

Figura 36 – Direções de medição utilizadas no ensaio via método de Wenner



Fonte: Adaptado das plantas fornecidas pela empresa

Em relação às características do ambiente e instrumentos de medição utilizados no dia do ensaio, destaca-se que:

- a) o terrômetro estava com o certificado de calibração em dia;
- b) o terrômetro estava com a bateria carregada;
- c) a escala de medição do terrômetro foi ajustada corretamente em todas as medições;
- d) as hases de cobre estavam em boas condições e foram lixadas antes de entrarem em contato com o solo sempre que necessário;
- e) o dia estava parcialmente nublado, mas sem precipitação;
- f) o solo estava úmido, pois havia chovido nos dois dias antecedentes.

Por restrições de espaço físico, adotaram-se somente os espaçamentos de 1, 2, 4, 6 e 8 metros entre as hastes de cobre. As leituras feitas pelo aparelho e correspondentes valores de resistividade, calculados por (6), são representados na Tabela 22.

Tabela 22 – Dados obtidos das medições de resistividade

<b>ENSAIO DE RESISTIVIDADE VIA MÉTODO DE WENNER</b>			
<b>Data</b>	14/12/2017	<b>Profundidade do eletrodo</b>	0,5 m
<b>Local</b>	Concórdia - SC		
<b>Condição do Solo</b>	úmido	<b>Diâmetro do eletrodo</b>	1/2"
<b>Precipitação últimos 3 dias</b>	≈20 mm	<b>Observações</b>	
		*Eletrodos de cobre	
<b>Direção de medição</b>	<b>Espaçamento <math>a</math> (m)</b>	<b>Leitura R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Resistividade <math>\rho</math> (<math>\Omega.m</math>)</b>
Sul - Norte	1	31,2	258,0
	2	18,22	251,8
	4	8,68	224,0
	6	4,24	161,8
	8	2,63	133,1
Nordeste-Sudoeste	1	35,6	294,4
	2	17,83	246,4
	4	11,14	287,4
	6	5,38	205,3
	8	2,84	143,7

Fonte: Autoria própria

A próxima etapa consiste em submeter os resultados à análise estatística proposta pela secção 2.3.1. Desta forma, é possível eliminar as medições que desviam do valor médio em mais de 50 %. Assim, a Tabela 23 consolida os valores finais de resistividade.

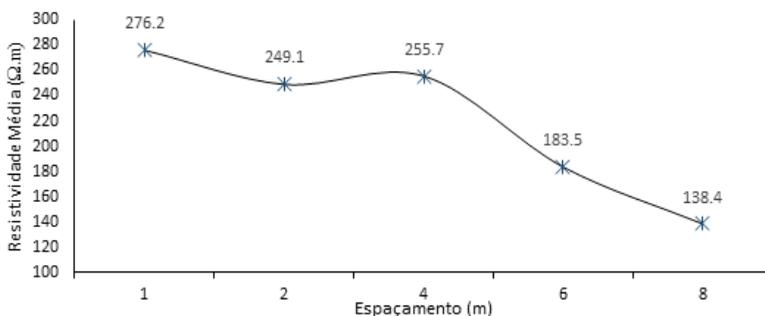
Tabela 23 – Desvios padrão e valores finais de resistividade

<b>Espaçamento <math>a</math> (m)</b>	<b>Desvios Relativos (%)</b>		<b>Resistividade Média (<math>\Omega.m</math>)</b>	<b>Resistividade Média Recalculada (<math>\Omega.m</math>)</b>
	<b>S-N</b>	<b>NE-SW</b>		
1	6,6%	6,6%	276,2	276,2
2	1,1%	1,1%	249,1	249,1
4	12,4%	12,4%	255,7	255,7
6	11,9%	11,9%	183,5	183,5
8	3,8%	3,8%	138,4	138,4

Fonte: Autoria própria.

Naturalmente, como só existem duas direções distintas, os desvios são iguais. Por sorte, todos os resultados apresentaram valores válidos, o que significa que não há necessidade de repetir o ensaio ou invalidar medições. Logo, já se pode traçar a curva  $\rho \times a$  com os valores finais de resistividade (Figura 37).

Figura 37 – Curva  $\rho \times a$  com os valores do ensaio de resistividade



Fonte: Autoria própria

Observa-se que distanciamentos maiores, mais impactados por camadas profundas, apresentam resistividades menores, enquanto espaçamentos curtos produzem valores relativamente elevados. Ao contrário do que se imaginava anteriormente, as camadas mais profundas do solo local, que aparentavam ser péssimas condutoras, possuem as menores resistividades, provavelmente decorrente das características higroscópicas da composição mineral.

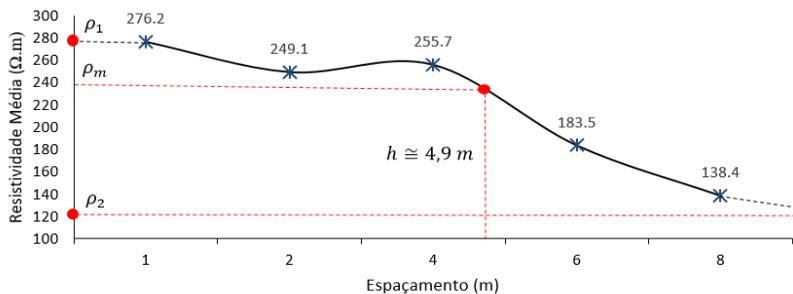
### 3.5.2 Estratificação do solo em duas camadas

Para delinear conclusões assertivas acerca do ensaio, é conveniente estratificar o solo em duas camadas. Como a situação não exige um alto grau de sofisticação e detalhamento, o método simplificado para esta estratificação é apropriado.

Ao prolongar a extremidade superior da curva  $\rho \times a$ , nota-se que o valor da resistividade  $\rho_1$  corresponde à aproximadamente 279 ( $\Omega.m$ ). Assumindo, agora, um espaçamento muito grande entre as hastes, traça-se uma assíntota que intercepta a curva no infinito, revelando a resistividade  $\rho_2$  (Figura 38). Com a razão entre  $\rho_2$  e  $\rho_1$ , encontra-se o valor de  $M_0$  e calcula-se o valor de  $\rho_m$  conforme (19). A espessura da camada equivalente de solo é obtida levando o valor de  $\rho_m$  ao eixo das

ordenadas e extraindo o correspondente valor do eixo das abscissas. A Tabela 24 consolida os valores finais da estratificação em duas camadas.

Figura 38 – Prolongamento da curva  $\rho \times a$  para estratificação em duas camadas



Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 – Parâmetros resultantes da estratificação do solo em duas camadas

Parâmetro	Valor
$\rho_1$ ( $\Omega.m$ )	279
$\rho_2$ ( $\Omega.m$ )	121
$\rho_1/\rho_2$	0,433
$M_0$	0,86
$\rho_m$ ( $\Omega.m$ )	240

Fonte: Autoria própria

A estratificação revela que o terreno possui uma resistividade média relativamente alta, levando em consideração as condições de umidade no dia do ensaio. Estima-se que valores superiores à 350  $\Omega.m$  sejam frequentes em períodos de seca, porém a boa distribuição pluviométrica ao longo das estações reduz esta probabilidade. Por fim, nota-se que, de fato, as camadas mais profundas apresentam uma melhor condutividade elétrica, ao contrário do que era estimado inicialmente.

### 3.5.3 Distribuição e dimensionamento do sistema de aterramento

A norma técnica NBR 5419-3 (ABNT, 2015) requisita a construção de um anel condutor, enterrado a, no mínimo entre 0,5 m de profundidade, externo ao perímetro da edificação a uma distância de aproximadamente um metro na horizontal. Malhas de terra e demais soluções com um maior grau de sofisticação também são aceitáveis. O anel de aterramento precisa, obrigatoriamente, estar em contato direto

com o solo por ao menos 80 % de sua extensão. Em adição ao anel, hastes verticais podem ser instaladas com o objetivo de reduzir a resistência aparente do arranjo e concentrar maiores gradientes de potencial em camadas de solo mais profundas, reduzindo o risco tensões de passo e toque.

A solução adotada para a estrutura da indústria consiste em um anel retangular de cobre nu, com quatro hastes de aterramento de meia polegada por 2,4 metros de comprimento soldadas nas arestas. Além de reduzirem os gradientes de potencial e a resistividade de terra, as hastes oferecem um caminho mais direto para as correntes dos condutores de descida principais (nos cantos), assegurando um bom escoamento. Em função do desnível do terreno e das melhores condições de temperatura e umidade, a profundidade do anel varia entre 0,7 m (fachada frontal da estrutura) e 1,4 m (laterais), conforme indica o Apêndice B. Todas as conexões pertencentes ao sistema de aterramento devem ser feitas através de solda exotérmica, inclusive aquelas que levam ao subsistema de descida. Os componentes do aterramento e suas respectivas dimensões e quantidades podem ser consultados na Tabela 25. A distribuição espacial detalhada dos elementos encontra-se nos apêndices A e B.

Tabela 25 – Componentes do sistema de aterramento

<b>Material</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>Quantidade</b>
Cabo encordoado de cobre nu (m)	50 mm <sup>2</sup>	108
Haste de aterramento COPPERWELD	1/2" X 2400 mm	4
Solda exotérmica 150 GR	-	14
Caixas de inspeção para aterramento em PVC	∅30cm x 300mm	4

Fonte: Autoria própria

Com o auxílio da metodologia de dimensionamento para sistemas de aterramento abordada no Capítulo 2, pode-se estimar a resistência de aterramento do arranjo projetado. A distribuição espacial dos condutores aproxima-se da estrutura de um quadrado vazio com quatro hastes de aterramento em suas arestas, o que permite o uso da mesma formulação particular.

Dessa forma, calcula-se a resistência equivalente do conjunto por (39), onde o coeficiente de redução  $K$ , com base na Tabela 5, é aproximado por 0,3. Basta agora determinar a resistência aparente de uma das hastes através de (32), onde a resistividade aparente  $\rho_a$  é determinada com o auxílio das curvas de Endrenyi. Utilizando os resultados da

estratificação do solo em duas camadas, obtém-se  $\alpha = 2,92$  e  $\beta = 0,5125$ . Os resultados finais encontram-se consolidados e referenciados pela Tabela 26

Tabela 26 – Parâmetros do cálculo da resistência de aterramento e valores finais

Parâmetro	Descrição	Valor	Equação
$A$	Área do sistema de aterramento (m <sup>2</sup> )	537,6	-
$D$	Diagonal do anel (m)	37,6	-
$r$	Raio equivalente (m)	14,3	(24)
$\alpha$	Coefficiente de penetração	2,92	(22)
$\beta$	Coefficiente de divergência	0,5125	(25)
$N$	Razão $\rho_a/\rho_{eq}$	0,8	(26)
$\rho_{eq}$	Resistividade equivalente ( $\Omega.m$ )	239	-
$L$	Comprimento da haste (m)	2,4	-
$d$	Diâmetro da haste (m)	0,0127	-
$\rho_a$	Resistividade aparente ( $\Omega.m$ )	191,2	(26)
$R_{1haste}$	Resistência aparente de uma haste ( $\Omega.m$ )	84,04	(32)
$K$	Coefficiente de redução	0,3	-
$R_{eq}$	Resistência do conjunto de aterramento ( $\Omega$ )	25,21	(38)

Fonte: Autoria própria

O sistema de aterramento projetado, além de estar em conformidade com as normas técnicas vigentes, propicia uma boa resistência de aterramento para o SPDA e para as funcionalidades da indústria. A adição de mais hastes de aterramento ao longo do perímetro do anel reduziria ainda mais este valor, no entanto, a empresa não necessita de tal performance técnica.

## 4 CONCLUSÕES

O estudo das instalações, funcionalidades e necessidades específicas da indústria têxtil sobre a qual este trabalho foi desenvolvido levou ao alcance dos objetivos traçados inicialmente.

O primeiro deles, que previa a avaliação dos riscos associados à ocorrência de descargas atmosféricas, foi alcançado através dos resultados da análise de risco detalhada na Seção 5.2. O processo revelou que as instalações da indústria estão desprovidas de um sistema de proteção adequado, uma vez que fatores como localização geográfica, clima, tipo de atividade empresarial, maquinário, potência instalada e funcionalidades práticas elevam o risco de perda para além dos limites aceitáveis.

O segundo objetivo, que visava propor métodos de proteção adequados, foi cumprido através do gerenciamento das componentes de risco, reduzindo-as individualmente à valores toleráveis pela seleção e dimensionamento das medidas de proteção. Notou-se que o risco de perda de vida humana existente no local é altamente impactado por  $Ri_A$  e  $Ri_B$ , pertinentes à danos a seres vivos e danos estruturais, respectivamente. O recálculo das probabilidades de perdas revelou que um SPDA classe III em adição à um DPS classe I seria suficiente para reduzir tanto o risco de perda de vida humana, quanto o de valor econômico, indicando uma boa solução para o problema.

O terceiro e último objetivo geral, que consiste em projetar um SPDA completo para a instalação, de modo a garantir que o risco permaneça dentro de limites toleráveis, demandou a maior parte do tempo e esforço dedicado a este trabalho. Considera-se que o projeto final obteve êxito, pois apresentou uma solução prática, eficiente e alinhada às normas técnicas atuais, além de compreender os requerimentos específicos da sócia-diretora.

O estudo da bibliografia acerca de SPDA, somado à análise da edificação, resultou na escolha do método Faraday como base para a distribuição e dimensionamento do sistema externo de proteção. Optou-se por dimensionar o sistema captor e o sistema de descida através de barras chatas de alumínio por motivos funcionais e estéticos. Os espaçamentos entre os condutores, por outro lado, embasam-se no nível de proteção selecionado ao longo do gerenciamento de risco e foram esboçados respeitando a legislação vigente. Além disso, julgou-se necessário acoplar minicaptadores de aço galvanizado ao sistema captor, com o propósito de proteger os condutores horizontais e quinas pontiagudas da edificação, aumentando a eficiência do sistema.

O sistema interno de proteção foi delineado com foco na instalação de um DPS na entrada de energia e na equipotencialização de barramentos, superfícies metálicas e armaduras flutuantes. Tais medidas reduzem exponencialmente os riscos associados a tensões de passo e toque no interior da edificação, além de proteger sistemas internos vitais para o funcionamento da atividade comercial, ao passo que asseguram um eficiente escoamento de correntes de falha para a terra.

Todavia, o bom funcionamento dos sistemas interno e externo de proteção é condicionado à qualidade do aterramento elétrico. O ensaio de medição de resistividade via método de Wenner revelou que as condições do terreno, do ponto de vista de aterramento, não são tão indesejáveis quanto se esperava inicialmente, permitindo arquitetar o sistema com critérios concretos. Apesar de apresentar um solo bastante rochoso, as camadas inferiores possuem boa higroscopia que, somada ao comportamento pluviométrico horizontal ao longo do ano, resultam em condições constantes de temperatura e umidade, configurando um solo mais condutor. A resistividade média do solo, porém, é elevada. No entanto, seus valores não são altos o bastante a ponto de impor restrições ao projeto.

A umidade do solo, em função das condições climáticas na época em que as medições foram feitas, resultou, muito provavelmente, em valores de resistividade inferiores à média do terreno. Para aumentar a confiabilidade dos resultados, recomenda-se repetir os ensaios após um breve período de seca, utilizando os mesmos croquis de medição.

Com base nas medições de resistividade, projetou-se um sistema de aterramento em anel retangular externo à edificação, com quatro hastes interligadas aos cantos. Apesar de a norma requisitar somente o anel, optou-se por incluir as hastes afim de reduzir a resistência de terra para menos de  $30 \Omega$  e concentrar gradientes de potencial maiores em camadas mais profundas. Além disso, no projeto, as hastes estão conectadas diretamente aos condutores principais de descida, que precisam do caminho de menor impedância possível para evitar centelhamento.

Por fim, conclui-se que, apesar de o projeto original atender aos regulamentos antigos, a estrutura não está em conformidade com a legislação atualizada, pois não oferece a proteção necessária às condições de risco existentes. O estado atual da edificação ameaça a segurança dos funcionários e do investimento concentrado no local, o que motiva a busca por melhorias. Recomenda-se fortemente que a indústria acate as soluções de proteção propostas por este trabalho em um futuro próximo, garantindo, assim, a continuidade de suas operações com confiabilidade, responsabilidade e, acima de tudo, segurança.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Marcel. **Projeto de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas para uma Linha de Transmissão de 69kV**. São Carlos, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419 - 1**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419 - 2**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419 - 3**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419 - 4**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7117**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**. Rio de Janeiro, 2008.
- BEEMAN, Donald. **Industrial Power Systems Handbook**. McGraw-Hill. New York, 1955. 971 p.
- BEZERRA, Sergio. **Avaliação de Sistemas de Aterramento Considerando a Utilização de Condutores e Hastes Envolvidos em Concreto**. São Paulo, 2011.
- CELESC. **Norma Técnica N-321.0001: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária**. Florianópolis, 2015.
- COUTINHO, Fernando; ALTOÉ, Cássio. **Levantamento de Estruturas que Necessitam de SPDA na UNB e Análise de seus Efetivos Sistema de Proteção**. Brasília, 2003.
- DALZIEL, Charles. **Effects of Electric Shock on Man**. Berkeley, 1956.

EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, 2004.

ENDRENYI, John. **Evaluation of Resistivity Test for Design of Sation Grounds in Non Uniform Soils**. Toronto, 1963.

FAPESP. **Pesquisadores Capturam Imagens de Prédios em São Paulo**. Disponível em: <[http://agencia.fapesp.br/pesquisadores\\_capturam\\_imagens\\_de\\_raios\\_at\\_ingindo\\_predios\\_em\\_sao\\_paulo/25409/](http://agencia.fapesp.br/pesquisadores_capturam_imagens_de_raios_at_ingindo_predios_em_sao_paulo/25409/)>. Acesso em: 02 Fev 2018.

GIBERTONI, Vinícius. **Utilização de Fórmulas Simplificadas no Dimensionamento de Malhas de Terra e suas Limitações em Relação a um Software**. São Carlos, 2013.

GRENET, George. **Essai d'explication de la charge electrique des nuage d'orages**. Paris, 1947.

KINDERMANN, Geraldo. **Choque Elétrico**. Porto Alegre, 1995.

KINDERMANN, Geraldo. **Descarga Atmosférica**. Porto Alegre, 1992.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. **Aterramento Elétrico**, 4ª edição. Porto Alegre, 1998.

KRAUSS, John D. **Electromagnetics**. McGraw-Hill, 4ªed. New York, 1992.

LAMB, Dennis. **Physics and Chemistry of Clouds**. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 2011

MAMEDE, João F. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. São Paulo: LTC, 2017. 980 p.

MONTAL. **Detalhes SPDA**. Disponível em: <<http://www.montal.com.br/detalhes-spda-estrutural-re-bar/category/21-52-folha-tipica-de-detalhamento-estrutural-em-predios.html>>. Acessado em: 15 Fev 2018.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NWS Lightning Safety: Understanding Lightning**. Silver Spring, MD, 2017.

PENTAIR. **ERICO Lightning Protection Handbook**. Minneapolis, 2017.

PFEIFFER, John. **Principles of Electrical Grounding**. Louisville, 2001.

RAKOV, Vladimir; MARTIN, Uman. **Lightning, Physics and Effects**. Cambridge University Press, Cambridge, 2003. 687 p.

TERMOTÉCNICA. **Apostila do Projetista**. Disponível em <<https://tel.com.br/conteudo-tecnico/apostila-projetista/>>. Acesso em: 08 Jan. 2018.

TOPOGRAPHIC-MAP. **Topographic Brazil**. Disponível em <<http://engb.topographic-map.com/places/Brazil-8976191/>>. Acesso em: 22 Dez 2017.

VIANA, Fernando. **Interpretação da Resistividade Aparente do Solo e Estratificação com Arranjo de Schlumberger**. Goiânia, 2016.

VISCARO, Silvério. **Descargas Atmosféricas – uma Abordagem de Engenharia**. 1ª ed. São Paulo, 2005.

VENKATARAMAN, Kirshnan; TAMISHARASAN, Vishwanath. **Electrically Conductive Concrete**. Chennai, Índia, 2016.

WANG, Pao K. **Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation**. Cambridge University Press, Cambridge, 2013. 452 p.

WEG. **Dispositivos de proteção contra surto**. 2017. Disponível em: <<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Protecao-de-Circuitos-Eletricos/Dispositivos-de-protecao-contrasurtos-SPW>>. Acessado em: 17 Fev 2018











