

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DIEGO GUIMARÃES DOS SANTOS

**PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS PARA UNIDADES HABITACIONAIS DE BAIXA RENDA**

DM 04 / 2014

**UFPA / ITEC / PPGEE
Belém – Pará – Brasil
2014**

I

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DIEGO GUIMARÃES DOS SANTOS

**PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS PARA UNIDADES HABITACIONAIS DE BAIXA RENDA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientadora: Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha

**UFPA / ITEC / PPGEE
Belém – Pará – Brasil
2014**

Dados Internacionais de Catalogação – na – Publicação (CIP)

Santos, Diego Guimarães dos, 1989-
Planejamento de sistemas de proteção contra
descargas atmosféricas para unidades
habitacionais de baixa renda / Diego Guimarães
dos Santos. - 2014.

Orientadora: Brigida Ramati Pereira da Rocha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2014.

1. Descargas elétricas - proteção. 2. Raio -
proteção. 3. Eletricidade atmosférica. I.
Título.

CDD 22. ed. 551.5632

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS PARA UNIDADES HABITACIONAIS DE BAIXA RENDA

AUTOR: DIEGO GUIMARÃES DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM 24 / 02 / 14

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha (Orientadora – UFPA)

Prof. Dr. Arthur da Costa Almeida (Membro – UFPA)

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior (Membro – UFPA)

Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá (Membro – UFPA)

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Membro – UNICAMP)

Prof. Dr. Valquíria Gusmão Macedo (Membro – UFPA)

VISTO: _____

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador PPGEE / ITEC / UFPA)

Parafrazeando Isaac Newton, dedico esta obra aos gigantes de minha vida, as Queridas Professoras Doutoras Brígida Ramati Pereira da Rocha e Valquíria Gusmão Macedo, por possibilitarem que este sonhador enxergasse mais longe.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por possibilitar esta maravilhosa experiência de aperfeiçoamento profissional;

Aos meus pais, pelo amor, carinho e educação desde a concepção;

A minha irmã Bettina, pela presença marcante e pelas reflexões filosóficas diárias;

A Professora Brígida, pela orientação, paciência, confiança, força e garra inabaláveis;

A Professora Valquíria, pela paciência e pelos conselhos e orientações indispensáveis;

Ao “Professor” Engenheiro Olavo, pela coragem, resistência e numerosas orientações;

A querida Amiga Rezerneide pelo apoio incondicional durante esses anos;

Aos Professores, Professoras e Colegas do “Grupo Raios SIPAM”;

Ao SIPAM e seus funcionários, por possibilitarem o desenvolvimento desta pesquisa;

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro indispensável nesta pesquisa;

“Minha mente é apenas um pequeno receptor, no universo existe um núcleo onde podemos extrair conhecimento, força e inspiração. Eu ainda não pude adentrar nos segredos deste núcleo, mas sei que ele existe.”

Nikola Tesla

SUMÁRIO

RESUMO	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
LISTA DE SIGLAS	XV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	
1.1 TEMA E PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
CAPÍTULO 2 – DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
2.1 A ATMOSFERA TERRESTRE	18
2.2 FORMAÇÃO E ELETRIZAÇÃO DAS NUVENS DE TEMPESTADE	19
2.3 O CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL	21
2.4 FORMAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RAIOS	23
2.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS RAIOS	27
2.5.1 Forma de Onda da Corrente dos Raios	27
2.5.2 Amplitude Máxima da Corrente dos Raios	29
2.5.3 Tempo de Frente de Onda	30
2.5.4 Tempo de Meia Onda	30
2.5.5 Taxa de Variação Máxima	30
2.5.6 Carga Elétrica Total Transferida	30
2.6 DENSIDADE DE RAIOS E ÍNDICE CERÁUNICO	31
2.7 SISTEMAS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	33
2.8 AFERIÇÃO E DETECÇÃO DE RAIOS NA AMAZÔNIA	37
2.9 PERFIL DA OCORRÊNCIA DE RAIOS NO BRASIL	39
2.10 PERFIL DA OCORRÊNCIA DE RAIOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL	39
CAPÍTULO 3 – PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
3.1 A NORMA NBR 5419	41
3.2 CARACTERÍSTICAS DA NORMA NBR 5419	41
3.3 ASPECTOS BÁSICOS DE UM SPDA	42

3.4 ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES DE UM SPDA	44
3.5 MÉTODO DE SELEÇÃO DO NÍVEL DE PROTEÇÃO	48
3.6 MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	54
3.6.1 Método de Franklin	54
3.6.2 Método de Faraday	55
3.6.3 Método Eletrogeométrico	56
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA	
4.1 MALHA DE ANÁLISE DE OCORRÊNCIA DE RAIOS	59
4.2 CORREÇÃO DAS MATRIZES DE DENSIDADE DE RAIOS	61
4.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DE SPDA	61
CAPÍTULO 5 – OCORRÊNCIAS DE RAIOS NO ESTADO DO PARÁ	
5.1 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS NO PERÍODO DE 1991 A 2009	62
5.2 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS EM 2010	64
5.3 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS EM 2011	66
5.4 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS DE ACORDO COM A NBR 5419	67
CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CASO: CONJUNTO TABOQUINHA	
6.1 PLANEJAMENTO DE SPDA NO CONJUNTO HABITACIONAL TABOQUINHA	68
6.1.1 Análise das Densidades de Ocorrência de Raios de Teixeira et al. (2011)	70
6.1.2 Análise das Densidades de Ocorrência de Raios da Rede STARNET	70
6.1.3 Análise das Densidades de Ocorrência de Raios segundo a NBR 5419	71
6.2 ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO FRANKLIN	72
6.3 ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO FARADAY	77
6.4 ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO	79
CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	84

RESUMO

A presente pesquisa tem como finalidade fazer um levantamento do perfil de ocorrência de descargas atmosféricas nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba, no período de 1991 até 2011 com o objetivo de determinar as características de ocorrência de raios nesses municípios, bem como identificar quais fatores precisam ser observados e/ou identificados com o intuito de se realizar um adequado planejamento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em empreendimentos habitacionais de baixa renda construídos pelo programa de aceleração do crescimento do governo federal, mais precisamente no conjunto habitacional Taboquinha, localizado no bairro do Cruzeiro em Icoaraci. A partir da análise comparativa realizada com dados de detecção de raios provenientes da rede de detecção de raios STARNET, dados de ocorrência de raios provenientes do sensor LIS instalado a bordo do satélite TRMM, bem como de dados provenientes da norma NBR 5419, concluiu-se que o presente conjunto habitacional necessita da instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas em virtude do registro de ocorrências de sinistros envolvendo a incidência direta de descargas atmosféricas, bem como de seus efeitos secundários. Ao final do trabalho de pesquisa são apresentados tópicos de discussão associados a conclusões sobre o perfil de ocorrência de raios na presente região de estudo que são explicitadas pela norma NBR 5419, fatos estes que podem vir a prejudicar o patrimônio público, bem como os cidadãos comuns e suas edificações.

Palavras – Chave: Descargas Elétricas; Raio; Eletricidade Atmosférica;

ABSTRACT

This research have the purpose to realize a study about the lightning occurrence profile over the municipalities of Belém, Ananindeua and Marituba, in the period of 1991 to 2011 with the objective to establish the lightning occurrence profile in these municipalities, as well as identify what kind of factors need to be observed and/or identified with the finality to realize an appropriate planning of protection systems against lightning in low income housing builded by the acceleration program of development from the federal government, more precisely in Taboquinha housing, located on the district of Cruzeiro in Icoaraci. After the realization of the comparative analysis with lightning occurrence data proceeding from the lightning detection network STARNET, lightning occurrence data from LIS sensor installed on board of the TRMM satellite, as well as lightning data acquired by the Brazilian Association of Technical Standards NBR 5419, it was possible to conclude that the Taboquinha housing need an appropriate protection system against lightning due to sinister occurrence records involving direct incidence of atmospheric discharges, as well as your secondary effects. In the end of this research will be presented some discussion topics related with some conclusions about the lightning occurrence profile in the present region presented by the NBR 5419 standard, because this incoherent conclusion may harm the public patrimony, as well as the common citizen and their construction.

KeyWords: Electric Discharges; Lightning; Atmospheric Electricity;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas da Atmosfera Terrestre	18
Figura 2 – Ilustração do Circuito Elétrico Global	22
Figura 3 – Aspecto Físico de uma Descarga Nuvem-Solo	25
Figura 4 – Aspecto Físico de uma Descarga Solo-Nuvem	26
Figura 5 – Aspecto Físico de uma Descarga Intra-Nuvem	26
Figura 6 – Forma de Onda Dupla Exponencial	28
Figura 7 – Curva de Heidler de uma Descarga Atmosférica Real	29
Figura 8 – Arranjo Físico do Método de Indicação de Direção	35
Figura 9 – Arranjo Físico do Método TOA	35
Figura 10 – Arranjo Físico do Método Interferométrico	36
Figura 11 – Localização Espacial dos Sensores da RDR-SIPAM	37
Figura 12 – Localização Espacial dos Sensores da STARNET	38
Figura 13 – Distribuição Horária dos Raios de Acordo com suas Intensidades	40
Figura 14 – Porcentagem dos Raios de Acordo com suas Correntes de Pico	40
Figura 15 – Aspecto Básico de um SPDA	42
Figura 16 – Captor tipo Franklin	43
Figura 17 – Especificação da Bitola Mínima dos Eletrodos de Aterramento	46
Figura 18 – Mapa Isoceráunico do Brasil	48
Figura 19 – Área de Exposição Equivalente	49
Figura 20 – Zona de Proteção do Método Franklin	55
Figura 21 – Definição da Distância “R”	57
Figura 22 – Prováveis Pontos de Incidência de Descargas Atmosféricas	58
Figura 23 – Pontos de Incidência Protegidos pelo Método Eletrogeométrico	58
Figura 24 – Malha de Análise de Ocorrência de Raios desenvolvida por Dentel (2013)	59
Figura 25 – Localização da Área de Estudo na Malha de Dentel (2013)	60
Figura 26 – Malha de Análise de Ocorrência de Raios nos Municípios de Belém, Ananindeua e Marituba	60
Figura 27 – Perfil de Ocorrência de Raios nos meses de Janeiro a Dezembro no período de 1991 a 2009	62
Figura 28 – Densidade Média de Ocorrência de Raios no período de 1991 a 2009	63
Figura 29 – Perfil de Ocorrência de Raios em 2010	65

Figura 30 – Perfil de Ocorrência de Raios em 2011	66
Figura 31 – Curvas Isoceráunicas do Estado do Pará	67
Figura 32 – Conjunto Habitacional Taboquinha	68
Figura 33 – Configuração do Método Franklin com 4 Capttores a 7 metros de Altura	72
Figura 34 – Configuração do Método Franklin com 4 Capttores a 6 metros de Altura	73
Figura 35 – Configuração do Método Franklin com 4 Capttores a 5 metros de Altura	73
Figura 36 – Configuração do Método Franklin com 4 Capttores a 4 metros de Altura	74
Figura 37 – Configuração do Método Franklin com 3 Capttores a 7 metros de Altura	74
Figura 38 – Configuração do Método Franklin com 3 Capttores a 6 metros de Altura	75
Figura 39 – Configuração do Método Franklin com 3 Capttores a 5 metros de Altura	75
Figura 40 – Configuração do Método Franklin com 2 Capttores a 10 metros de Altura	76
Figura 41 – Configuração do Método Franklin com 2 Capttores a 9 metros de Altura	76
Figura 42 – Configuração do Método Franklin com 2 Capttores a 8 metros de Altura	77
Figura 43 – Aspecto Arquitetônico da Fachada do Conjunto Habitacional	78
Figura 44 – Destaque dos Elementos da Fachada do Conjunto Habitacional	78
Figura 45 – Alguns pontos de Incidência de Raios nas Edificações do Conjunto Habitacional	79
Figura 46 – Aspecto da Zona Protegida pelo Método Eletrogeométrico	80
Figura 47 – Aspecto da Zona Protegida pelo Método Eletrogeométrico para uma Edificação	80
Figura 48 – Prováveis Locais para Instalação dos Eletrodos de Aterramento (em vermelho)	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de Estabilidade Atmosférica	21
Tabela 2 – Características de Algumas Etapas das Descargas Nuvem-Solo Negativas	24
Tabela 3 – Dados para Plotagem da Função de Heidler	29
Tabela 4 – Densidade de Ocorrência de Raios em Algumas Regiões do Mundo	31
Tabela 5 – Bitolas Mínimas dos Componentes do SPDA	44
Tabela 6 – Espessuras Mínimas dos Componentes do SPDA	44
Tabela 7 – Espaçamento Mínimo dos Condutores de Descida	45
Tabela 8 – Bitola dos Cabos de Equipotencialização (condução de grande parte da corrente dos raios)	46
Tabela 9 – Bitola dos Cabos de Equipotencialização (condução de pequena parte da corrente dos raios)	46
Tabela 10 – Tipos de Materiais suas Aplicações e Corrosões	47
Tabela 11 – Valores do Fator de Ponderação “A”	50
Tabela 12 – Valores do Fator de Ponderação “B”	51
Tabela 13 – Valores do Fator de Ponderação “C”	51
Tabela 14 – Valores do Fator de Ponderação “D”	51
Tabela 15 – Valores do Fator de Ponderação “E”	52
Tabela 16 – Critério para Instalação do SPDA	52
Tabela 17 – Níveis de Proteção	53
Tabela 18 – Ângulos de Proteção dos Captadores do Método de Franklin	54
Tabela 19 – Larguras dos Módulos da Malha de Faraday	56
Tabela 20 – Raios da Esfera Fictícia do Método Eletrogeométrico	57
Tabela 21 – Densidades Médias de Ocorrência de Raios no período de 1991 a 2009	63
Tabela 22 – Densidades de Ocorrência de Raios por mês no período de 1991 a 2009	64
Tabela 23 – Análise das Densidades de Ocorrência de Raios de Teixeira et al. (2011).	70
Tabela 24 – Análise da Densidade de Ocorrência de Raios da Rede STARNET.	70
Tabela 25 – Densidades de Ocorrência de Raios segundo a norma NBR 5419:2005.	71
Tabela 26 – Análise da Densidade de Ocorrência de Raios segundo a norma NBR 5419:2005.	71
Tabela 27 – Especificações Técnicas dos Componentes do SPDA do Conjunto Habitacional Taboquinha	81

LISTA DE SÍMBOLOS

P – Pressão do Gás

α – Volume Específico do Gás

T – Temperatura do Gás

g – Aceleração da Gravidade

c_p – Calor Específico a Pressão Constante

Q – Quantidade de Calor (Específico ou Latente)

γ_d - Razão Adiabática Seca

γ_s - Razão Adiabática Saturada

γ – Perfil Vertical de Temperatura

I_0 – Amplitude da Corrente da Descarga

τ_1 – Constante Relacionada ao Tempo de Frente de Onda

τ_2 – Constante Relacionada ao Tempo de Decaimento

N_g – Densidade de Ocorrência de Raios

T_d – Índice Ceráunico

θ – Azimute do Ponto de Ocorrência de Raio

FEM_{LO} – Tensão Induzida na Bobina Leste – Oeste

FEM_{NS} – Tensão Induzida na Bobina Norte – Sul

L – Comprimento da Estrutura

W – Largura da Estrutura

H – Altura da Estrutura

A_e – Área de Exposição Equivalente

N_{pr} - Número Provável de Raios que atingem a construção

P_0 – Probabilidade Ponderada de Ocorrência de Raios

R_p – Raio de Proteção (Raio da Base do Cone)

H_c – Distância do Captor ao Solo (Altura do Cone)

φ_p – Ângulo de Proteção do Para – Raio

LISTA DE SIGLAS

OMM – Organização Meteorológica Mundial

STARNET – Sferics Timing and Ranging Network

PPAE – Projeto de Prevenção Contra Acidentes Elétricos

TOA – Time of Arrival

OTD – Optical Transient Detector

LIS – Lightning Imaging Sensor

NASA – North American Space Agency

SIPAM – Sistema de Proteção da Amazônia

RDR SIPAM – Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia

TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission

SPDA – Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 TEMA E PROBLEMA

A região amazônica é considerada atualmente como a região que apresenta a maior biodiversidade do mundo, bem como a maior bacia hidrográfica do planeta. Em virtude de a mesma estar localizada próxima a linha do equador, seu clima é predominantemente equatorial, tendo como características marcantes, elevada umidade, elevada temperatura ambiente e elevado índice pluviométrico. De acordo com pesquisas realizadas na década de 90 por Rocha et al. (1996) e por Sousa et al. (1999) sabe-se que esta região é dotada de intensa atividade elétrica, associada a ocorrência de descargas elétricas atmosféricas provenientes de nuvens de tempestade, fato este que torna o ambiente regional nocivo à instalação e/ou manutenção de sistemas elétricos e de telecomunicação, aumentando o risco de acidentes com raios aos cidadãos comuns e suas edificações.

Pesquisas pioneiras de Melo et al. (2013) acerca de sinistros envolvendo descargas atmosféricas no estado do Pará no período de 2001 a 2012 demonstraram a necessidade do planejamento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas na região. Conforme essa publicação, no referido período foram registrados 13 eventos distintos envolvendo descargas atmosféricas no estado do Pará, totalizando ao todo 15 óbitos e 19 feridos. Um recente levantamento realizado por Brasileiro et al. (2014) sobre sinistros envolvendo a incidência direta de raios, bem como o surgimento de seus efeitos secundários nas edificações do conjunto habitacional Taboquinha, foco desta pesquisa, demonstraram a necessidade da instalação de um adequado sistema de proteção contra raios nesse conjunto habitacional.

A partir das análises realizadas pelos autores supracitados nota-se a relevância inerente ao adequado planejamento de sistema de proteção contra descargas atmosféricas não somente em empreendimentos habitacionais de baixa renda, mas também em empreendimentos de uma forma geral, de forma a garantir a segurança do cidadão e de seus bens materiais contra a incidência direta de descargas atmosféricas e seus efeitos secundários.

1.2 OBJETIVOS

Dentre os objetivos inerentes à presente dissertação destacam-se o levantamento do real perfil de ocorrência de descargas atmosféricas nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba com o intuito de realizar um adequado planejamento de sistemas de proteção contra a incidência direta de descargas atmosféricas em empreendimentos de baixa renda, mais precisamente no conjunto habitacional Taboquinha, contribuindo desta forma para o adequado mapeamento de ocorrência de raios na região metropolitana de Belém.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em seis capítulos; o primeiro deles destina-se a explicitação do tema bem como do problema inerente ao adequado planejamento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em empreendimentos habitacionais de baixa renda instalados na região amazônica. O segundo capítulo destina-se a apresentação das definições básicas acerca dos processos de formação e eletrização de nuvens de tempestade, bem como ao surgimento das descargas atmosféricas e suas principais características. No terceiro capítulo são apresentados as definições básicas sobre os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, seus componentes básicos e métodos de proteção, bem como os critérios necessários para a adequada implementação desses sistemas de acordo com a norma NBR 5419:2005 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas).

O quarto capítulo explicita a metodologia de análise de ocorrência de raios utilizada para se fazer o levantamento dos dados de ocorrência de raios nos municípios foco de pesquisa. No quinto capítulo é feita uma análise da ocorrência de descargas atmosféricas na região de estudo a partir de dados de ocorrência de raios processados por Teixeira et al. (2011) no período de 1997 a 2009 provenientes do sensor LIS, bem como de dados de ocorrência de raios provenientes da rede de detecção de raios STARNET observados durante os anos de 2010 e 2011. E por fim no último capítulo são apresentadas as conclusões provenientes da análise da necessidade da implementação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas no presente conjunto habitacional.

CAPÍTULO 2

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 A ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre é definida como sendo um conjunto de gases (vapor d'água, oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, etc.) e partículas sólidas e líquidas que envolvem toda a superfície terrestre. Teoricamente não existe um limite superior para a atmosfera, no entanto nota - se que com o aumento da altitude a densidade da atmosfera torna-se cada vez mais rarefeita em relação às altitudes mais baixas. Devido ao fato das características físico-químicas da atmosfera (concentração de compostos, temperatura, umidade, pressão, etc.) sofrerem intensas variações com o aumento da altitude, costuma - se dividir a atmosfera em uma série de camadas, cada uma delas apresentando peculiaridades únicas.

A atmosfera terrestre possui uma estrutura vertical extremamente variável quanto a inúmeros aspectos físico-químicos, o esquema apresentado na Figura 1 destaca de forma sucinta as inúmeras camadas em que a atmosfera terrestre é dividida, bem como o perfil de temperatura e pressão observado nas mesmas (SILVA, 2006).

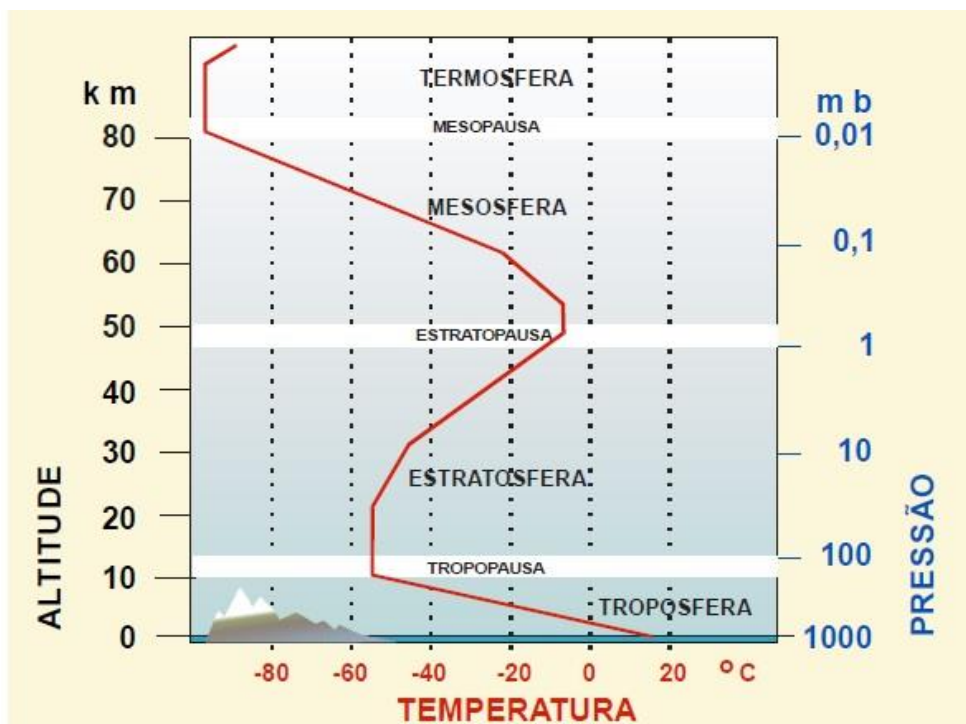


Figura 1 - Camadas da Atmosfera Terrestre.
Fonte: Silva (2006).

A Troposfera é a camada atmosférica que se encontra em contato direto com a superfície da Terra, atingindo uma altitude aproximada de 15 a 18 quilômetros no equador, e uma altitude de 6 a 8 quilômetros nos pólos, sendo sua espessura variável com as estações do ano. Esta camada consiste num invólucro onde ocorrem os fenômenos meteorológicos mais importantes e que afetam diretamente a vida sobre a superfície terrestre, em virtude da mesma se localizar próximo ao solo, os movimentos atmosféricos verticais e horizontais são intensos nesta camada. A Troposfera é aquecida principalmente pela absorção de radiação infravermelha proveniente do solo terrestre, energia esta proveniente da radiação solar. Outra importante característica da Troposfera é o fato de que praticamente todo o vapor d'água encontrar-se em seus limites. A atmosfera terrestre consiste numa máquina térmica cuja principal fonte de energia consiste na energia eletromagnética proveniente do sol, a conversão desta energia calorífica em energia mecânica é o fator responsável pelo surgimento dos movimentos circulatórios da atmosfera (VIANELLO; ALVES, 1991).

2.2 FORMAÇÃO E ELETRIZAÇÃO DAS NUVENS

Conforme destaca o Atlas Internacional de Nuvens (1972) as nuvens são definidas como sendo extensos aglomerados de partículas sólidas e líquidas visíveis a olho nu que se encontram em suspensão na atmosfera sendo constituídos basicamente por gotículas de água, partículas de gelo, bem como de eventuais partículas sólidas produzidas pelas atividades industriais do ser humano, bem como por fenômenos naturais. Para que as nuvens possam se desenvolver é preciso que o vapor d'água presente no ar atmosférico comece a se condensar, sendo que este processo exige a presença de partículas sólidas denominadas de núcleos de condensação, sendo as mesmas responsáveis por facilitar o processo de condensação do vapor d'água; caso não houvesse núcleos de condensação, o vapor d'água só se condensaria se a umidade relativa do ar atmosférico ultrapassasse 100%. Para se determinar se em uma determinada região da atmosfera terrestre existe a possibilidade da formação de nuvens, em especial nuvens de tempestade (Cumulus Nimbus) deve-se verificar se na respectiva região existe instabilidade atmosférica. A estabilidade atmosférica pode ser definida como sendo uma condição atmosférica na qual não se observa a presença de movimentos de massas de ar ascendentes ou descendes, por outro lado, caso haja instabilidade atmosférica os movimentos de massas de ar na vertical tendem a ser mais intensos que os horizontais (VIANELLO; ALVES, 1991).

A estabilidade atmosférica é determinada através da análise do perfil de variação do gradiente vertical de temperatura observado na camada da atmosfera em análise, sendo este gradiente térmico determinado através da equação (4) demonstrada da seguinte forma.

Partindo – se da primeira lei da termodinâmica tem-se que:

$$dQ = c_p \cdot dT - \alpha \cdot dP \quad (1)$$

Sabendo que a parcela de ar sofre uma expansão adiabática ao se elevar na atmosfera tem-se que:

$$c_p \cdot dT = \alpha \cdot dP \quad (2)$$

Sabendo-se que $dP = -\frac{g}{\alpha} \cdot dz$ tem-se que:

$$c_p \cdot dT = g \cdot dz \quad (3)$$

Derivando-se a equação (3) em relação à altura “z” vem que:

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = \gamma_d \quad (4)$$

A equação (4) demonstra que quando uma parcela de ar atmosférico se eleva gradativamente na atmosfera sofrendo um processo de expansão adiabática, sua temperatura começa a reduzir gradativamente a uma taxa constante conforme a mesma se eleva; esta razão de queda de temperatura é conhecida como razão adiabática seca (γ_d). Caso esta parcela de ar esteja saturada seu gradativo resfriamento tende a ser menos intenso em virtude das eventuais condensações que sofre ao se resfriar gradativamente, sendo a queda de temperatura neste caso denominada de razão adiabática saturada (γ_s). O gradiente vertical de temperatura é representado pelas variáveis “ γ_d ” e “ γ_s ” dependendo se a massa de ar em análise está saturada ou não, e para se determinar se a camada atmosférica em análise se encontra estável deve – se observar o critério de estabilidade com base na comparação dessas variáveis com o perfil vertical de temperatura “ γ ” observado através de sondagens aerológicas conforme destaca a tabela 1 (VIANELLO; ALVES, 1991).

Ar Seco	$\gamma < \gamma_d$	Camada Estável
	$\gamma = \gamma_d$	Camada Neutra
	$\gamma > \gamma_d$	Camada Instável
Ar Saturado	$\gamma < \gamma_s$	Camada Estável
	$\gamma = \gamma_s$	Camada Neutra
	$\gamma > \gamma_s$	Camada Instável

Tabela 1 – Critérios de Estabilidade Atmosférica.
Fonte: Vianello e Alves (1991).

As nuvens Cumulus Nimbus estão diretamente relacionadas à presença de massas de ar quente, bem como a presença de umidade e de instabilidade atmosférica, sendo seu desenvolvimento devido à presença de um gradiente térmico instável causado pelo intenso aquecimento diurno da superfície terrestre. Dentre os principais fenômenos meteorológicos associados a esses tipos de nuvem destacam-se, intensa atividade de chuva, trovões e relâmpagos, granizo, ventos de alta magnitude, súbitas variações de temperatura, bem como a possibilidade de formação de tornados e furacões (VIANELLO; ALVES, 1991).

Durante a formação dessas nuvens de tempestade as partículas que as constituem acabam por colidir umas com as outras incontáveis vezes, causando desta forma a eletrização dessas partículas no interior das nuvens; devido a essas colisões as nuvens de tempestade tendem a apresentar um perfil de eletrização bipolar, apresentando um aglomerado de cargas positivas em sua parte superior e um aglomerado de cargas negativas em sua parte inferior; a base da nuvem também pode apresentar pequenas concentrações de carga positiva (VISACRO, 2005).

2.3 O CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL

Estudos desenvolvidos ao longo dos anos sobre o comportamento eletromagnético do planeta Terra demonstraram que o mesmo em conjunto com sua atmosfera comportam-se como se fossem as armaduras de um capacitor esférico, sendo a parte sólida do planeta dotado de carga elétrica negativa e a atmosfera com carga positiva. Devido a este perfil de eletrificação bipolar, nota-se a existência de um campo elétrico contínuo de intensidade média de 100 V/m próximo a superfície terrestre durante o tempo bom (RAKOV; UMAN, 2003). Naturalmente devido a existência deste campo elétrico, bem como ao fato do ar atmosférico existente entre a eletrosfera e a superfície terrestre ser fracamente condutor, existe um fluxo de corrente estabelecido entre a eletrosfera e a crosta terrestre com uma intensidade da ordem de 1 KA,

fazendo com que este “capacitor planetário” apresente um comportamento característico de um capacitor defeituoso. Caso não houvesse um mecanismo capaz de carregar eletricamente a eletrosfera bem como a superfície terrestre, a carga elétrica presente em ambas as superfícies seria totalmente neutralizada num intervalo de tempo de aproximadamente dez minutos (RAKOV; UMAN, 2003).

De acordo com a teoria proposta por Wilson (1920) o mecanismo responsável pelo contínuo carregamento deste “capacitor planetário” são as nuvens de tempestade, sendo as mesmas consideradas como sendo os “geradores” de carga elétrica de um circuito elétrico global. O mesmo explicita que ao redor do mundo ocorrem cerca de 2000 tempestades a todo o momento em cerca de aproximadamente 10% de toda a superfície do planeta, sendo a região tempestuosa o gerador elétrico do circuito global, e as outras regiões destituídas de nuvens de tempestade comportam-se como simples cargas resistivas neste circuito elétrico global (WILSON, 1920). O mesmo ressalta que as descargas atmosféricas nuvem-solo são responsáveis pela transferência de carga elétrica negativa para a superfície do solo, e as descargas que se propagam do topo das nuvens em direção a eletrosfera, carregam a mesma positivamente.

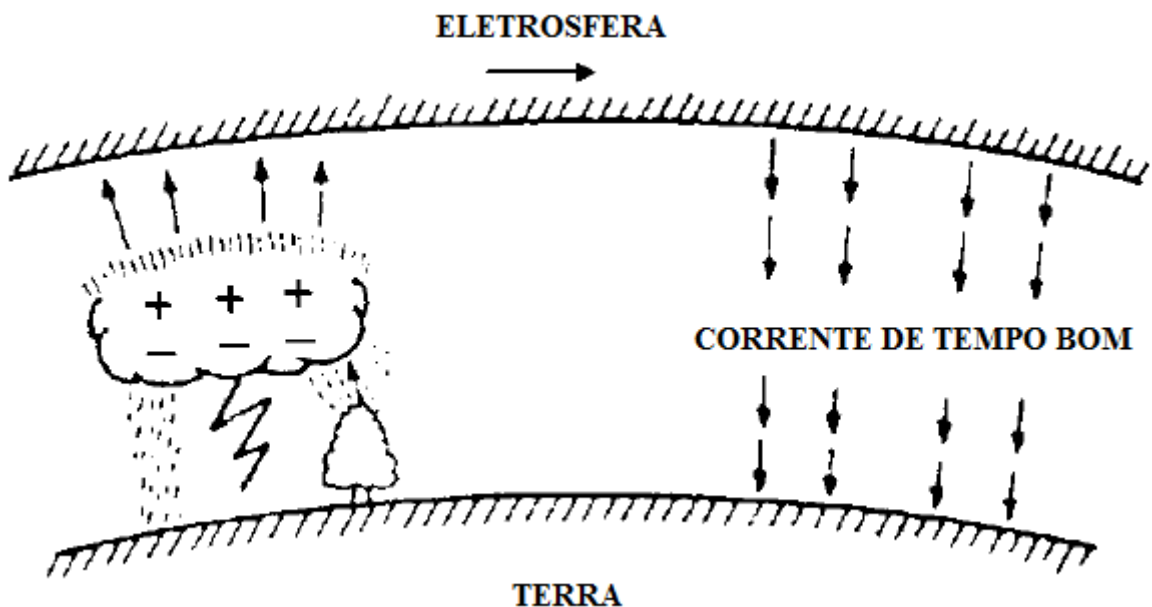


Figura 2 – Ilustração do Circuito Elétrico Global
Fonte: Adaptado de Pierce (1974).

2.4 FORMAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RAIOS

A superfície do planeta Terra em conjunto com sua atmosfera estão sujeitos a diversos fenômenos de natureza meteorológica tais como, descargas elétricas, chuva, movimentos de massas de ar quente e frio, tempestades de areia entre outros. No entanto em termos meteorológicos todas as manifestações que não envolvam basicamente o deslocamento de massa de ar, são definidas como sendo meteoros. Os meteoros são fenômenos observados na superfície da Terra bem como em sua atmosfera que envolvam basicamente a precipitação e/ou a suspensão de partículas sólidas ou líquidas, podendo inclusive consistir em fenômenos ópticos e/ou elétricos. As descargas atmosféricas conhecidas mais popularmente como raios são classificadas como sendo eletrometeoros, pois consistem numa manifestação visível e por vezes audível de eletricidade atmosférica (ATLAS INTERNACIONAL DE NUVENS-OMM, 1972).

Em termos técnicos a descarga atmosférica consiste numa intensa descarga elétrica de alta intensidade e de extensão quilométrica que se propaga na atmosfera podendo em alguns casos atingir a superfície da Terra, sendo produzida na grande maioria das vezes em nuvens de tempestade cumulus nimbus, no entanto pode-se observar a ocorrência de raios em outros fenômenos, tais como em erupções vulcânicas e em tempestades de areia (SOUZA, 2010).

As descargas atmosféricas não consistem numa simples condução de corrente elétrica entre a nuvem e solo, e sim numa sequência de eventos que ao interagirem uns com os outros produzem o efeito elétrico e conseqüentemente o sonoro inerente aos raios (RAKOV; UMAN, 2003). Quando o campo elétrico existente entre a parte inferior da nuvem de tempestade e a superfície do solo atinge uma amplitude que excede o valor da rigidez dielétrica do ar, intensos pulsos de corrente começam a se propagar a partir da parte inferior da nuvem formando uma espécie de canal ionizado por onde a corrente elétrica começa a fluir, sendo esta condução de corrente denominada de líder escalonado; quando o líder escalonado se aproxima gradativamente do solo, surge outro canal ionizado que começa a se propagar do solo em direção à parte inferior da nuvem de tempestade, sendo este denominado de líder conectante; quando o líder escalonado se conecta eletricamente com o líder conectante; completa-se a formação de uma ligação elétrica entre duas concentrações de cargas opostas sendo uma localizada na nuvem e outra localizada no solo. A partir da formação desta ligação elétrica entre nuvem e solo ocorre a condução de uma corrente elétrica de alta intensidade dirigida para a nuvem denominada de corrente de retorno, esta corrente por sua vez causa um extremo aquecimento no canal produzindo um intenso efeito luminoso (relâmpago) e conseqüentemente um forte deslocamento de ar que pode ser ouvido a vários quilômetros de distância (trovão).

Após a ocorrência da descarga de retorno é possível que o canal ionizado formado seja carregado novamente por outras concentrações de carga presentes na nuvem de tempestade, dando origem a descargas de retorno subsequentes. Na tabela 2 pode-se verificar algumas características físicas de alguns processos inerentes às descargas atmosféricas (RAKOV; UMAN, 2003).

Líder Escalonado	
Comprimento por Passo (m)	50
Duração de Cada Passo (μs)	20 – 50
Velocidade Média de Propagação (m/s)	$2 \cdot 10^5$
Duração Total (ms)	35
Descarga de Retorno	
Pico de Corrente (KA)	30
Taxa de Variação Máxima (KA/ μs)	$\geq 10 - 20$
Carga Elétrica Total Transferida (C)	5
Velocidade de Propagação (m/s)	$(1 - 2) \cdot 10^8$
Descarga de Retorno Subsequente	
Pico de Corrente (KA)	10 – 15
Taxa de Variação Máxima (KA/ μs)	100
Carga Elétrica Total Transferida (C)	1
Velocidade de Propagação (m/s)	$(1 - 2) \cdot 10^8$
Descarga Atmosférica Plena	
Duração Total (ms)	200 – 300
Número Médio de Descargas de Retorno	3 – 5
Intervalo entre as Descargas de Retorno (ms)	60
Carga Elétrica Transferida (C)	20

Tabela 2 – Características de Algumas Etapas das Descargas Nuvem-Solo Negativas.
Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

Conforme destaca Pinto Júnior (2005) as descargas atmosféricas podem ser classificadas de acordo com o sentido de propagação da descarga elétrica, podendo ser descargas intra – nuvem, quando ocorrem no interior das nuvens de tempestade, descargas inter – nuvem, quando se deslocam de uma nuvem para a outra, descargas nuvem-ar, quando se deslocam da nuvem para o ar circunvizinho a nuvem e descargas nuvem-solo e solo – nuvem, quando se deslocam

respectivamente da nuvem para o solo e do solo para a nuvem. As descargas que se deslocam entre a nuvem o solo tendem a ser bem mais estudadas que as demais em virtude de seu alto poder destrutivo, podendo ser classificadas de acordo com a polaridade do centro de carga que da origem ao líder escalonado, bem como ao sentido de propagação do líder, sendo denominadas de descarga negativa descendente ou ascendente, ou descarga positiva descendente ou ascendente. Esses quatro tipos de descargas nuvem – solo são responsáveis pela efetiva transferência de cargas elétricas do interior da nuvem de tempestade para o solo terrestre, no entanto sua frequência de ocorrência em relação às outras descargas é relativamente pequena, totalizando apenas um quarto do total de descargas que ocorrem ao redor do mundo (RAKOV; UMAN, 2003). Nas figuras 3, 4 e 5 pode-se observar o aspecto físico dos diferentes tipos de descargas atmosféricas.



Figura 3 – Aspecto Físico de uma Descarga Nuvem-Solo

Fonte: <http://cemig-energia.blogspot.com.br/2012/11/confira-dicas-para-caso-de-chuva-forte.html>



Figura 4 – Aspecto Físico de uma Descarga Solo-Nuvem
Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_\(meteorologia\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_(meteorologia))



Figura 5 – Aspecto Físico de uma Descarga Intra-Nuvem
Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_\(meteorologia\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_(meteorologia))

Em termos de frequência de ocorrência de raios sabe-se que de todas as descargas atmosféricas que ocorrem ao redor do mundo, cerca de 90% são descargas negativas descendentes, e cerca de 10% consistem em descargas positivas descendentes. Diferentemente das descargas descendentes, as ascendentes tendem a ocorrer apenas em estruturas de altura apreciável (cerca de 100 metros ou mais), bem como em objetos de altura mediana que se encontram em regiões de altimetria elevada (RAKOV; UMAN, 2003).

2.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS RAIOS

A partir da análise dos dados obtidos por Berger et al. (1975) através de duas torres de medição instalados no monte San Salvatore, na Suíça, os parâmetros físicos das descargas atmosféricas são sua forma de onda, amplitude máxima ou valor de pico, o tempo de frente de onda, o tempo de meia onda, o tempo de duração total, a derivada máxima, a carga elétrica total transferida e a quantidade de energia dissipada pelo raio ao atingir uma estrutura (RAKOV; UMAN, 2003; BERGER ET AL. 1975).

2.5.1 Forma de Onda da Corrente dos Raios

A forma de onda de uma descarga atmosférica consiste num parâmetro significativo para identificar certas características da descarga tais como, duração, quantidade de carga elétrica transferida, energia total dissipada entre outros. Em virtude da variação do perfil da forma de onda da corrente para cada descarga medida, faz – se necessário o estabelecimento de um modelo capaz de apresentar as principais características inerentes às formas de onda de cada tipo de descarga. Na literatura técnica referente à proteção contra raios é comum encontrar uma forma de onda denominada de dupla exponencial que é utilizada para observar os comportamentos de dispositivos e materiais quando sujeitos a surtos causados pela incidência de descargas atmosféricas em sistemas elétricos e eletrônicos.

Apesar desta forma de onda não representar fielmente as características da forma de onda genuína de um raio, a mesma pode ser obtida facilmente em laboratório através da descarga de um capacitor presente em um circuito RC. Na Figura 6 pode - se observar o perfil da forma de onda dupla exponencial.

Com o intuito de estabelecer uma forma de onda capaz de representar fielmente algumas características marcantes da forma de onda da corrente de um raio, uma função analítica foi desenvolvida pelo pesquisador alemão Heidler (1985), sendo a mesma capaz de representar de forma mais adequada as ondas de corrente produzidas pelas descargas atmosféricas, com base nas curvas média e mediana obtidas através dos dados de Berger et al. (1975). A função de Heidler (1985) permite o ajuste da forma de onda da corrente através da variação das constantes presentes em sua função analítica, a mesma é representada pela equação (5).

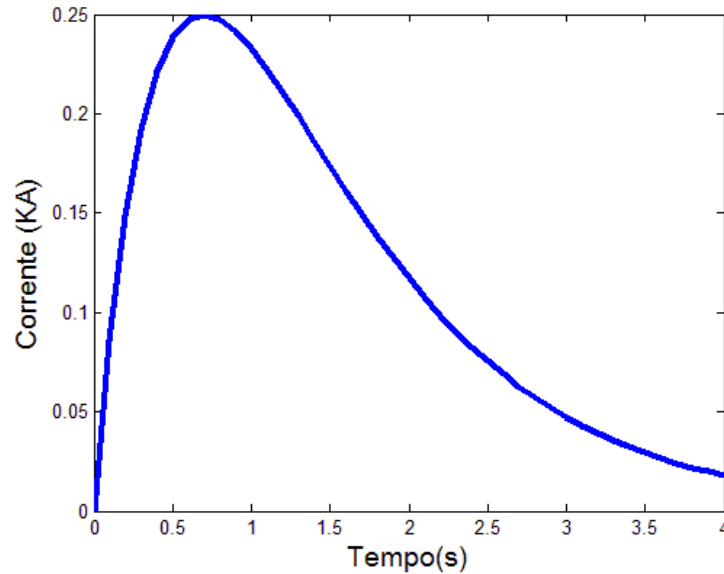


Figura 6 – Forma de Onda Dupla Exponencial da função $Y(x) = e^{-x} - e^{-2x}$

$$I(t) = \frac{I_0}{e^{-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}}} \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} \quad (5)$$

Onde:

I_0 – Amplitude da Corrente da Descarga

τ_1 – Constante Relacionada ao Tempo de Frente de Onda

τ_2 - Constante Relacionada ao Tempo de Decaimento

n – Valor entre 2 e 10

As formas de onda das correntes provenientes das descargas atmosféricas são obtidas através da soma de duas funções de Heidler; na Figura 7 pode-se observar a forma de onda de uma corrente de raio obtida através da função analítica desenvolvida por Heidler (1985), os dados utilizados para a plotagem da respectiva forma de onda encontram-se na tabela 3 abaixo apresentada. O autor ressalta que a função de Heidler apresenta o diferencial de apresentar a natureza côncava da forma de onda da corrente em seus instantes iniciais, bem como o característico decaimento de sua amplitude após a ocorrência de sua máxima amplitude.

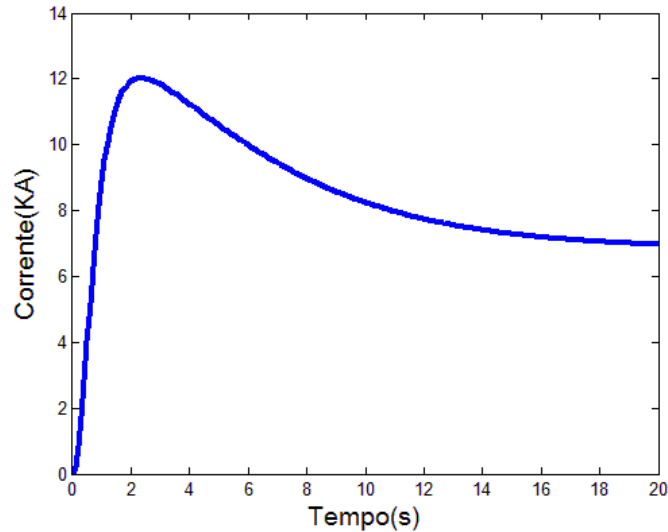


Figura 7 – Curva de Heidler de uma Descarga Atmosférica Real.
Fonte: Adaptado de Heidler (1985).

	I_0 (KA)	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)	n
Curva 1	10,7	0,95	4,7	2
Curva 2	6,5	4,6	900	2

Tabela 3 – Dados Para Plotagem da Função de Heidler.
Fonte: Adaptado de Heidler (1985)

2.5.2 Amplitude Máxima da Corrente dos Raios

Visacro (2005) explicita que o parâmetro amplitude máxima consiste no máximo valor atingido pela corrente da descarga atmosférica durante a sua medição, sendo que o valor mediano desta máxima amplitude pode variar em torno de 30 KA para as descargas atmosféricas positivas e negativas únicas. O autor destaca que apesar da literatura técnica adotar como valor de referência para a mediana máxima da amplitude de uma descarga negativa o valor de 33 KA, medições feitas através de uma torre instrumentada no Morro do Cachimbo em Minas Gerais demonstraram que a mediana máxima de uma corrente produzida por uma descarga atmosférica negativa pode atingir um valor de cerca de 45 KA, valor este que chega a superar a referência mundial em 50%. O mesmo destaca também o fato de ser observada também uma amplitude mediana de 16 KA para descargas negativas subsequentes, valor este que excede a referência internacional, de 12 KA, em aproximadamente 33,33% (VISACRO et al., 2004).

2.5.3 Tempo de Frente de Onda

O tempo de frente de onda de uma descarga atmosférica é definido como sendo o intervalo de tempo necessário para que a forma de onda da corrente do raio atinja sua máxima amplitude. De acordo com as medições de Berger et al. (1975) os tempos de frente de onda característicos para as descargas atmosféricas positivas e negativas são respectivamente de $22\mu\text{s}$ e $5,5\ \mu\text{s}$ (BERGER et al., 1975).

2.5.4 Tempo de Meia Onda

O tempo de meia onda pode ser definido como sendo o tempo necessário para que a forma de onda da corrente do raio atinja 50% de seu valor total, sendo que os valores medianos observadas para os vários tipos de descargas detectados na estação de San Salvatore (BERGER et al., 1975) são de 230 ms para as descargas positivas e 75 ms para as descargas negativas (BERGER et al., 1975).

2.5.5 Taxa de Variação Temporal Máxima

A taxa de variação temporal máxima de uma descarga atmosférica corresponde à variação da intensidade da corrente do raio por unidade de microssegundo, sendo seus valores medianos da ordem de $12\ \text{KA}/\mu\text{s}$ para as descargas negativas e $2,5\ \text{KA}/\mu\text{s}$ para as descargas positivas (BERGER et al., 1975).

2.5.6 Carga Elétrica Total Transferida

Com relação à intensidade da carga elétrica total transferida pela ocorrência das descargas atmosféricas, de acordo com a análise dos dados da estação de San Salvatore, sabe-se que a carga elétrica total transferida por uma descarga atmosférica positiva, por uma descarga negativa são respectivamente da ordem de 80 C e 5,2 C (BERGER et al., 1975).

2.6 DENSIDADE DE RAIOS E ÍNDICE CERÁUNICO

Para que se possa ter uma noção acerca do grau de periculosidade inerente a instalação bem como a manutenção de sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicação em uma determinada região, deve-se determinar primeiramente a frequência de ocorrência de descargas atmosféricas na referida região. Os indicadores responsáveis por fornecer estas informações são respectivamente à densidade de ocorrência de raios e o índice ceráunico. A densidade de ocorrência de raios pode ser definida como sendo o número de descargas atmosféricas que atingem uma área de um quilômetro quadrado durante um intervalo de tempo de um ano, e o índice ceráunico é definido como sendo o número de dias em que se observaram tempestades com raios durante um ano (SOUZA, 2010).

O valor assumido pela densidade de raios pode variar de forma significativa de região para região em virtude da intensidade da ocorrência de chuvas, da latitude, bem como do relevo da região que se pretende analisar. Locais dotados de alto relevo tendem a apresentar uma densidade de raios bem maior em relação às demais regiões, sendo observada a mesma situação em locais de intensa atividade pluviométrica. Na tabela abaixo são apresentados alguns valores da densidade de ocorrência de raios em locais de diferentes condições climáticas e geográficas.

Local	Densidade de Ocorrência de Raios (N_g)
Alemanha	1 – 1,5
Áustria	1 – 6
França	0,5 – 5
Itália	1 – 5
Austrália	0,2 – 4
África do Sul	0,5 – 14
Estados Unidos	0,1 – 14
México	1 – 10
Minas Gerais	1 - 12

Tabela 4 – Densidade de Ocorrência de Raios em Algumas Regiões do Mundo.
Fonte: Adaptado de Visacro (2005).

Em comparação ao indicador densidade de ocorrência de raios o índice ceráunico é mais utilizado para determinar a frequência de ocorrência de raios em uma determinada região, o mesmo é obtido através da percepção auditiva do efeito sonoro gerado pela ocorrência de uma

descarga atmosférica por um observador localizado em uma estação de medição. Devido ao fato do ouvido humano estar limitado a um alcance de dez quilômetros a precisão de detecção da ocorrência de raios é bem limitada em comparação ao outro indicador. Com a finalidade de estabelecer correspondências entre a densidade de ocorrência de raios e o índice ceráunico é comum o estabelecimento de equações que permitem determinar a densidade de ocorrência de raios de uma determinada região em função do número de dias de tempestades com raios que ocorreu na região em estudo; no entanto, como cada região apresenta um perfil de frequência de ocorrência de raios, as mesmas apresentam equações específicas correlacionando a densidade de ocorrência de raios com o índice ceráunico.

Na norma técnica NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) é possível encontrar uma equação que relaciona o índice ceráunico de uma determinada região com a sua respectiva densidade de raios, essa equação é apresentada abaixo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001).

$$N_g = 0,04(T_d)^{1,25} \quad (6)$$

Onde:

N_g – Densidade de Ocorrência de Raios

T_d – Índice Ceráunico da Região em Estudo

A referida norma estabelece uma equação relacionando a densidade de raios com o índice ceráunico para todo o Brasil, no entanto, sabe-se que a mesma não detém a capacidade de descrever adequadamente o perfil de ocorrência de raios para todas as localidades, haja vista que as mesmas apresentam diferentes perfis em termos meteorológicos e geográficos. A determinação desses indicadores pode ser facilitada através da instalação de sistemas de detecção de descargas atmosféricas próximas às localidades onde se pretende fazer este levantamento, haja vista que tais sistemas detêm a capacidade de determinar a densidade de ocorrência de raios da região em estudo em escalas da ordem de um quilômetro quadrado. Apesar de esses sistemas contribuírem de forma significativa para a determinação detalhado do perfil de ocorrência de raios de uma determinada localidade, é necessário dispor de dados de ocorrência de raios de um longo período de observação.

2.7 SISTEMAS DE DETECÇÃO E DETECÇÃO DE RAIOS

Para que se possa dimensionar de forma adequada um sistema de proteção contra a incidência de raios, bem como contra os efeitos secundários causados pela incidência de descargas atmosféricas em sistemas elétricos, eletrônicos bem como em edificações, deve-se primeiramente avaliar as características físicas dos raios com a finalidade de evitar possíveis falhas do sistema de proteção. Os sistemas capazes de fornecer essas informações são aqueles que envolvem a medição direta e indireta dos raios. A medição direta de descargas atmosféricas é efetuada através de torres instrumentadas, ou através da indução de raios por foguetes, e a medição indireta consiste na detecção da ocorrência dos raios através da captação de seus efeitos secundários, tais como radiações eletromagnéticas e efeitos sonoros e luminosos (VISACRO, 2005).

A medição direta de descargas atmosféricas por meio de torres instrumentadas é realizada com o auxílio de dois tipos de transdutores, o dispositivo shunt e a bobina de Rogowski. O dispositivo shunt consiste basicamente num elemento condutor de resistividade superior ao cobre, que é instalado em série com os cabos que conduzem a corrente produzida pelo raio ao atingir a torre de medição. Esses dispositivos são confeccionados com ligas metálicas que apresentam baixo coeficiente de temperatura para reduzir a variação da resistência elétrica do dispositivo, usualmente são empregadas ligas metálicas de níquel e cobre para confeccionar esses dispositivos. A desvantagem inerente à utilização deste dispositivo está diretamente relacionada à sua limitação para determinadas faixas de frequência em que sua reatância indutiva torna-se mais intensa que sua resistência ôhmica, fazendo com que a relação entre sua queda de tensão e a corrente produzida pelo raio seja não linear, fato este que eventualmente não é levado em consideração. Por outro lado em termos de versatilidade e confiabilidade pode-se fazer uso da bobina de Rogowski para estimar o valor da corrente produzida pelos raios. Seu funcionamento baseia-se na lei de indução eletromagnética de Faraday, quando a corrente produzida pelo raio é conduzida através da torre de medição, o campo magnético gerado pela mesma induz uma tensão nos terminais da bobina que é diretamente proporcional a intensidade da corrente produzida pela descarga (VISACRO, 2005).

A medição de descargas produzidas pelo lançamento de foguetes em direção as nuvens de tempestade pode ser uma alternativa para se estimar as características dos raios; esta técnica consiste no lançamento de um foguete em direção a uma nuvem de tempestade, sendo que em sua parte inferior encontra – se uma bobina de fio condutor devidamente aterrado que é desenrolado gradativamente pelo foguete em ascensão; ao se aproximar da nuvem surge um

líder ascendente na extremidade superior, do foguete que ao se conectar com o líder descendente da nuvem de tempestade que vai dar origem a uma descarga atmosférica artificial. As desvantagens inerentes a este procedimento estão diretamente relacionadas ao fato de haver necessidade de lançar inúmeros foguetes para que se possa produzir um raio artificial, bem como o fato de a forma de onda da corrente apresentar um perfil diferente de uma descarga atmosférica natural captada por uma torre de medição de raios (PISSOLATO FILHO, 2002).

Os sistemas de detecção de descargas atmosféricas são sistemas capazes de determinar a ocorrência de raios através do registro de seus efeitos secundários, sendo popularmente utilizada como registro de sua ocorrência a captação da radiação eletromagnética produzida pela ocorrência das descargas atmosféricas.

Conforme explicitam Rakov e Uman (2003) durante o processo de formação dos raios várias radiações eletromagnéticas são emitidas em diversas faixas de frequência, no entanto, sabe-se que o espectro desta radiação tende a apresentar máxima amplitude numa faixa de frequência entre 5 KHz até 10 KHz. Os autores ressaltam que eventualmente podem ser detectadas radiações eletromagnéticas numa faixa de frequência entre 3 MHz até 30 MHz.

Dentre os métodos utilizados atualmente para captar as radiações eletromagnéticas produzidas por descargas atmosféricas nuvem-solo destacam-se, o método da indicação da direção de ocorrência do raio, o método da diferença de tempo de chegada, sendo conhecido internacionalmente como o método TOA (Time of Arrival) e o método interferométrico.

No método de indicação da direção de ocorrência de raio é utilizado um par de bobinas cruzadas ortogonalmente entre si (Figura 8) e quando as mesmas são atingidas pela radiação eletromagnética das descargas atmosféricas, cada bobina induz certo valor de tensão sendo a relação destes valores fundamental para determinar o azimute de ocorrência da descarga atmosférica conforme destaca a equação abaixo (VISACRO, 2005).

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{FEM_{LO}}{FEM_{NS}} \right] \quad (7)$$

Sendo:

θ – Azimute do Ponto de Ocorrência do Raio;

FEM_{LO} – Tensão Induzida na Bobina Leste – Oeste;

FEM_{NS} – Tensão Induzida na Bobina Norte – Sul;

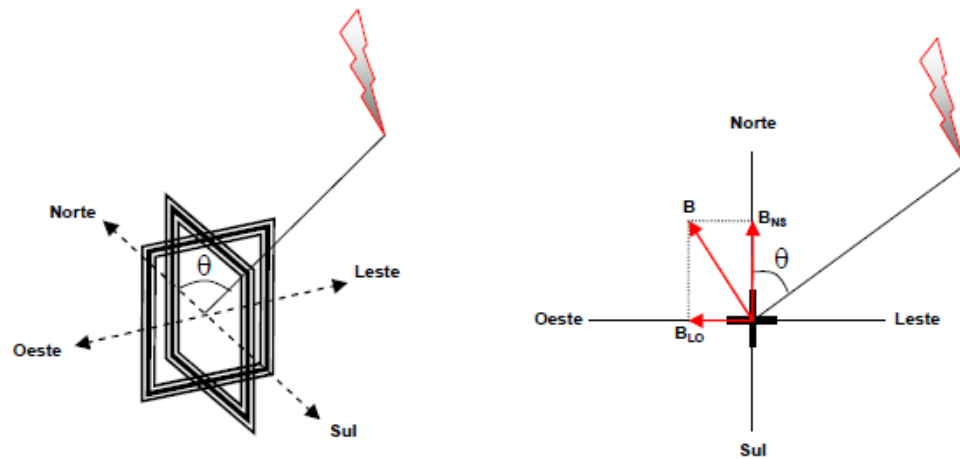


Figura 8 – Arranjo Físico do Método de Indicação de Direção.
Fonte: Sá (2011) originalmente adaptado de Rakov e Uman (2003).

Por outro lado no método TOA (Figura 9) as descargas atmosféricas são detectadas pela excitação de sensores pela radiação eletromagnética proveniente dos raios. Devido ao fato dos sensores estarem localizados a certa distância uns dos outros, a radiação eletromagnética é captada em instantes diferentes por cada um dos sensores, desta forma o lugar geométrico dos pontos em que a diferença de tempo é chegada é o mesmo para um determinado par de sensores consiste uma hipérbole, no entanto, para determinar a provável localização de incidência do raio deve-se possuir um mínimo de três sensores (VISACRO, 2005).

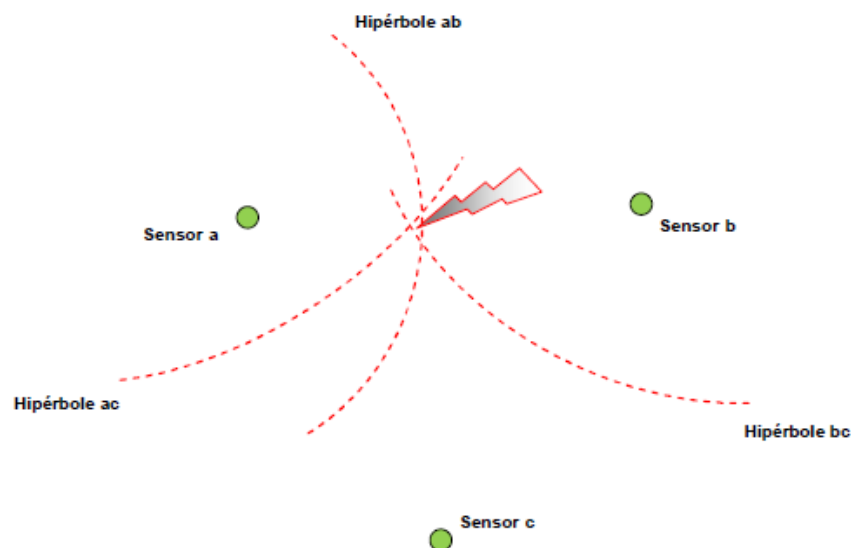


Figura 9 – Arranjo Físico do Método TOA.
Fonte: Sá (2011) originalmente adaptado de Rakov e Uman (2003).

Por fim no método interferométrico (Figura 10) utilizam-se um conjunto de antenas localizadas de tal forma que cada uma detecte a radiação eletromagnética em uma determinada fase, desta forma, a provável localização da ocorrência do raio é determinada através da

diferença de fase existente entre os sinais captados pelos sensores das antenas utilizados no arranjo de localização.

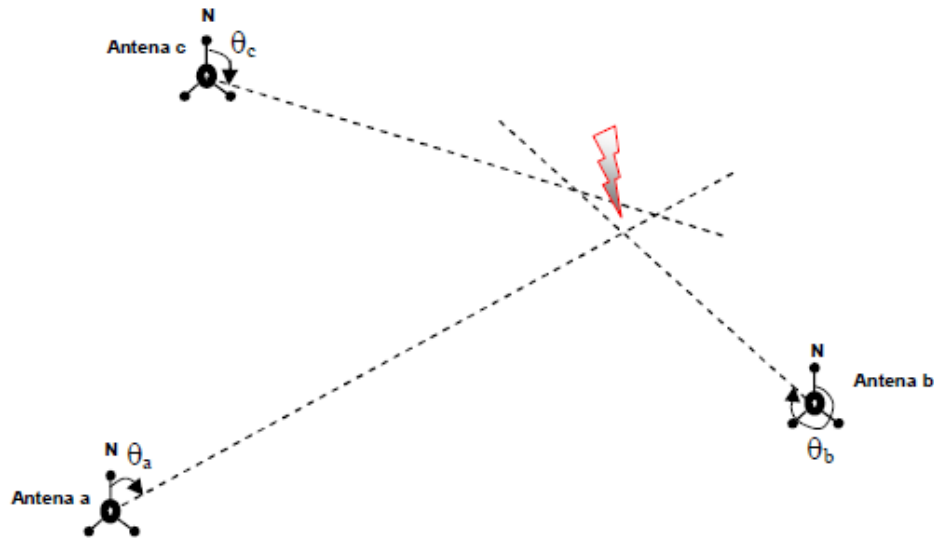


Figura 10 – Arranjo Físico do Método Interferométrico.
Fonte: Sá (2011) originalmente adaptado de Rakov e Uman (2003).

Aliado aos sistemas de detecção previamente comentados é possível detectar a ocorrência de raios através de sistemas de detecção instalados em satélites, sendo os mesmos capazes de cobrir uma área relativamente bem maior que os métodos anteriores. Dentre os principais sensores envolvidos diretamente na detecção de descargas atmosféricas através de satélites destacam-se o sensor OTD (Detector de Transitórios Ópticos) e o sensor LIS (Sensor de Imagens de Raios), sendo ambos desenvolvidos pela NASA (BOCCIPPIO; CHRISTIAN, 1998; CHRISTIAN et al., 1999).

De acordo com Visacro (2005) a partir da análise dos dados provenientes dos sensores LIS e OTD constatou-se que a incidência de descargas atmosféricas ao redor do mundo tende a ser bem mais intensa nos continentes do que nos oceanos, e a frequência de ocorrência de raios na região intertropical é mais intensa do que nas outras regiões. Apesar desses sistemas de detecção apresentarem um extenso campo visual, suas desvantagens incluem baixa eficiência de detecção durante o dia, devido a reflexão da luz solar pelas nuvens, dificuldade relativas a detecção de descargas atmosféricas nuvem – solo bem como reduzida capacidade de discriminação entre os vários tipos de descargas atmosféricas.

2.8 AFERIÇÃO E DETECÇÃO DE RAIOS NA AMAZÔNIA

O primeiro sistema de detecção de descargas atmosféricas a ser instalado na região amazônica, mais precisamente em sua porção oriental, foi a Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia (RDR-SIPAM) tendo a mesma operado no período de 2005 a 2009, sendo constituída basicamente por um conjunto de doze sensores do tipo LPATS-IV (fabricados pela empresa Vaisala) instalados nos municípios de Belém, Breves, São Luis, Paragominas, Tucuruí, Barra do Corda, Imperatriz, Parauapebas, Carolina, Redenção, São Felix do Araguaia e Natividade, e uma unidade de processamento localizada na cidade de Belém. Atualmente esta rede de detecção de raios encontra – se desativada e em processo de reestruturação (SÁ et al., 2011).

Os dados gerados por esta rede de detecção foram fundamentais para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas às características físicas dos raios, bem como para determinar o perfil de ocorrência dos mesmos na região amazônica, sendo que a localização das descargas atmosféricas pelos sensores que compoem a rede é efetuada através do método TOA com uma precisão de ocorrência na faixa de nanosegundos (SÁ, 2011). Na figura abaixo pode-se observar a localização espacial dos sensores que constituíam a RDR-SIPAM.

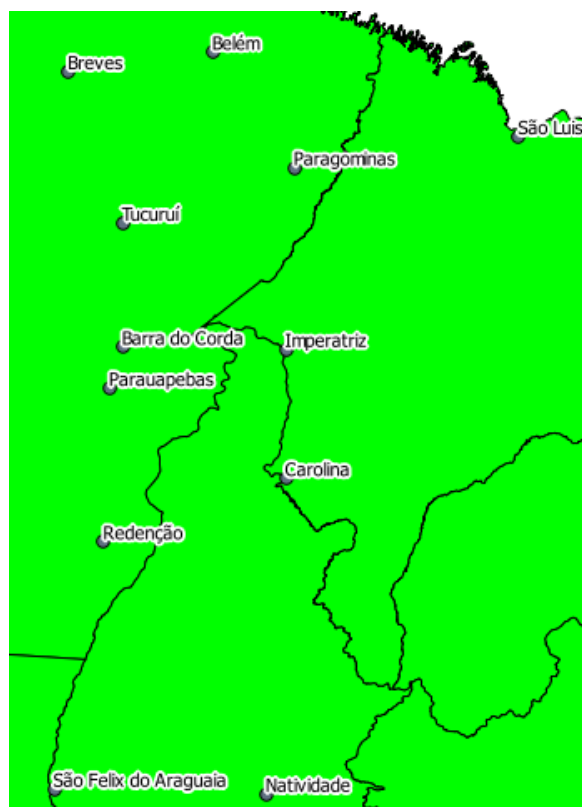


Figura 11 – Localização Espacial dos Sensores da RDR - SIPAM.

Em termos de medições diretas de descargas atmosféricas artificiais realizadas na região amazônica, a primeira delas foi realizada na cidade de Belém (PA) através da indução de descargas atmosféricas pelo lançamento de foguetes em direção as nuvens de tempestade, este projeto de pesquisa consistiu numa parceria entre a Universidade Federal do Pará, a Universidade de Campinas, o SIPAM e as empresas Celpa e Hindelet, tendo como objetivo principal determinar as características físicas das descargas atmosféricas desta região com a finalidade de aprimorar os sistemas de proteção contra raios, colaborando desta forma com a redução de acidentes envolvendo a ocorrência de raios, bem como com um aumento na margem de segurança dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

A rede experimental de detecção de raios STARNET foi instalada em 1997 sendo constituída inicialmente por cinco antenas receptoras de ondas de rádio operando numa faixa de frequência entre 7 KHz e 15 KHz, instaladas ao longo da costa leste dos Estados Unidos bem como na cidade de Porto Rico. Atualmente esta rede de detecção é composto por onze sensores, na figura 12 pode-se observar a localização espacial de cada um dos sensores da rede (MORALES et al. 2011).

Conforme destaca Dentel (2013) devido a momentânea desativação da RDR – SIPAM atualmente a região amazônica conta com somente um sistema de detecção de descargas atmosféricas a rede de detecção STARNET. A mesma ressalta que esta rede de detecção de raios apresenta um diferencial em relação a RDR-SIPAM, pois a rede STARNET detém uma zona de cobertura capaz de mapear a ocorrência de raios em toda a região amazônica, enquanto que a RDR-SIPAM cobria basicamente a porção oriental da região amazônica.

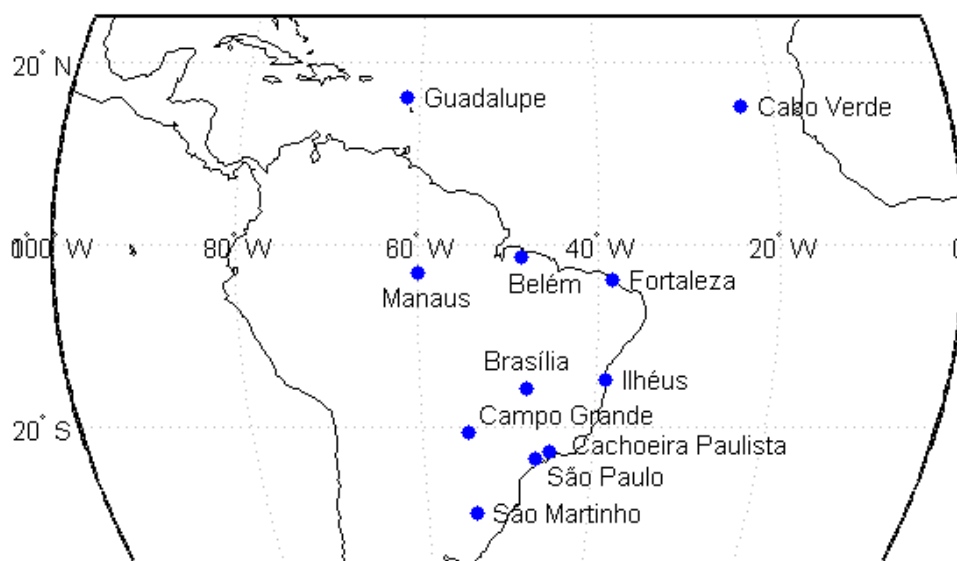


Figura 12 – Localização Espacial dos Sensores da STARNET.
Fonte: Dentel (2013).

2.8 PERFIL DE OCORRÊNCIA DE RAIOS NO BRASIL

Através da interpretação dos dados provenientes da utilização dos sensores LIS e OTD, sabe-se que o perfil de ocorrência de descargas atmosféricas na região intertropical do planeta é bem mais intensa do que nas regiões temperadas (CHRISTIAN et al., 1999); desta forma em virtude do Brasil estar localizado nesta região, é de se esperar que a incidência de raios em suas mediações sejam significativas. Pinto Júnior (2005) destaca que o Brasil é um dos países de maior incidência de raios no mundo, em virtude do mesmo situar-se próximo a linha do equador e apresentar grande extensão territorial.

O mesmo explicita que através da análise de dados de ocorrência de descargas atmosféricas provenientes de sensores ópticos instalados em satélites, estima-se que a ocorrência de raios em média no Brasil seja de 50 a 70 milhões de raios por ano, o que seria equivalente a ocorrência de dois raios a cada segundo, causando prejuízos patrimoniais da ordem de 500 milhões de reais por ano (PINTO JÚNIOR, 2005).

2.9 PERFIL DOS RAIOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Analises sobre dados de ocorrência de raios realizados por Almeida et al. (2008) no período de Outubro de 2006 a Dezembro de 2007 demonstraram que as descargas atmosféricas que incidem na região amazônica, mais precisamente em sua porção oriental, apresentam alta frequência de ocorrência e são dotadas de intensidade média superior as descargas atmosféricas que incidem nas zonas temperadas, explicitando-se desta forma o grau de periculosidade associado a instalação bem como a manutenção de sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicação na região amazônica. Em pesquisa posterior Almeida et al. (2010) ao analisar dados de ocorrência de raios provenientes da RDR-SIPAM no período de Outubro de 2006 a Dezembro de 2008, demonstrou que as descargas atmosférica que ocorrem na Amazônia oriental apresentam como mediana e valor médio para a corrente de pico os respectivos valores de 42 KA e 49 KA, valores estes que superam em cerca de 50% a referência adotada internacionalmente. Outro fator relevante da pesquisa de Almeida et al. (2010) refere-se a detecção de descargas atmosféricas com correntes de pico superiores a 250 KA (Cerca de 9 mil eventos de um total de 7 milhões) sendo registrado um valor máximo de 1008 KA para as descargas atmosféricas negativas, e 1350 KA para as descargas positivas, no entanto, em virtude dessas valores serem estimados pelo sistema de detecção da RDR-SIPAM, e não de fato medidos, não se sabe ao certo se os mesmos existem. As figuras abaixo explicitam as principais

características evidenciadas pelas descargas atmosféricas analisadas por Almeida et al. (2010) em sua pesquisa.

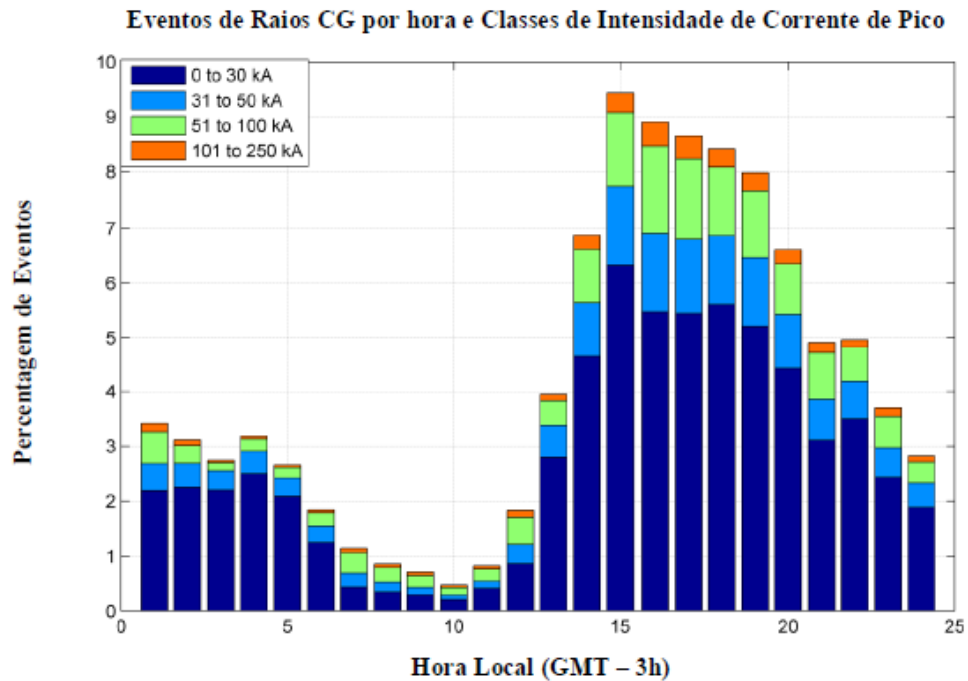


Figura 13 – Distribuição Horária dos Raios de acordo com suas Intensidades.
Fonte: Almeida et al. (2010).

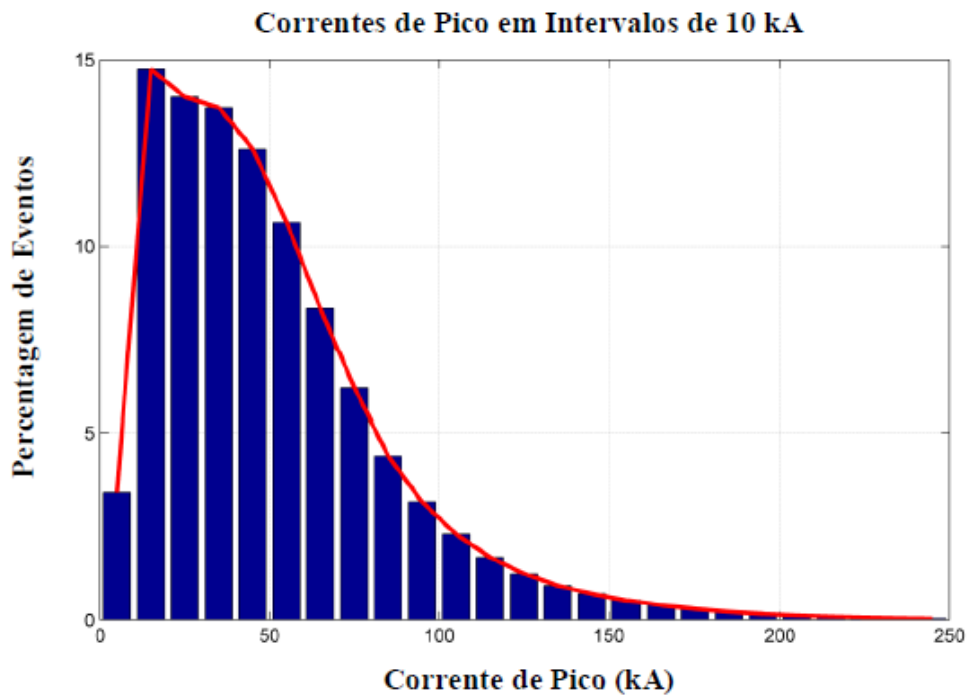


Figura 14 – Porcentagem dos Raios de acordo com suas Correntes de Pico.
Fonte: Almeida et al. (2010).

CAPÍTULO 3

PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1 A NORMA NBR 5419

A norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) tem como objetivo estabelecer padrões para o desenvolvimento de projetos relacionados à implementação bem como a manutenção de sistema de proteção contra raios, com a finalidade de proteger determinadas estruturas e/ou sistemas contra a incidência direta de descargas atmosféricas, garantindo desta forma a adequada proteção de equipamentos e pessoas que por ventura estejam localizados no interior das estruturas dotadas de adequado sistema de proteção contra raios, sendo a mesma aplicável em estruturas residenciais, comerciais, industriais, agrícolas e administrativas. Por outro lado a referida norma não se aplica a sistemas ferroviários, veículos, aeronaves, navios e plataformas marítimas, bem como a sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e sistemas de telecomunicação que estejam localizados externamente as estruturas protegidas, não garantindo também a adequada proteção de equipamentos e pessoas contra os feitos secundários causados pela incidência de descargas atmosféricas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

3.2 CARACTERÍSTICAS DA NORMA NBR 5419

A norma em questão não garante a proteção absoluta de estruturas bem como de bens materiais e pessoas que por ventura estejam localizados no interior de estruturas dotadas de sistemas de proteção contra raios, sendo capaz apenas de reduzir de forma significativa os danos causados pela incidência de descargas atmosféricas em estruturas protegidas, sendo a eficiência do respectivo sistema de proteção determinado através do nível de proteção estipulado para a referida estrutura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

3.3 ASPECTOS BÁSICOS DE UM SPDA

Conforme explicita Mamede (2007) as descargas atmosféricas consistem num dos fenômenos naturais que mais prejudicam o pleno funcionamento de sistemas elétricos, eletrônicos e de telecomunicação, podendo causar também danos estruturais a edificações bem como ao ser humano. Com o intuito de reduzir ou evitar os inconvenientes danos causados pela incidência de descargas atmosféricas em um determinado sistema ou estrutura, faz-se necessário a implementação de um sistema de proteção capaz de inibir os danos causados pelos raios, este sistema é denominado de Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA).

O SPDA é constituído basicamente por cinco elementos estruturais, são eles, o captor, o mastro, o isolador, o condutor de descida e os eletrodos de terra. Na figura abaixo é apresentado a configuração básica de um SPDA onde pode-se observar claramente a configuração física de cada um desses elementos.

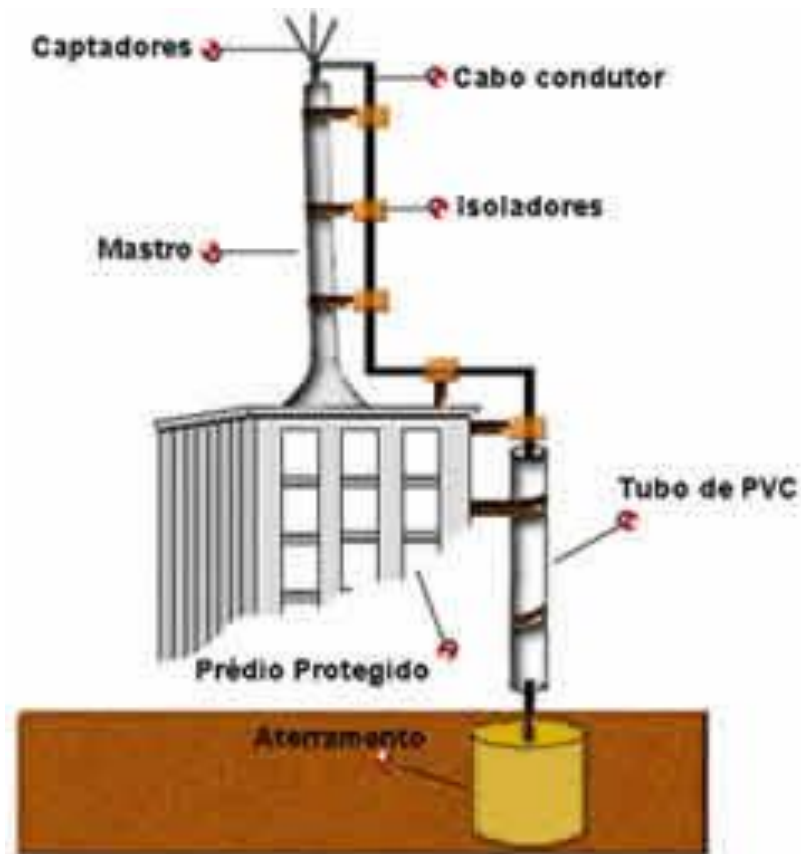


Figura 15 – Aspecto Básico de um SPDA.

Fonte: http://www.sindicocerto.com.br/materias_para_raios.htm.

O captor é o elemento responsável pela “captação” da descarga atmosférica proveniente da nuvem de tempestade sendo usualmente constituído de elementos metálicos, podendo apresentar em sua extremidade três ou mais pontas condutoras usualmente confeccionadas em aço inoxidável ou cobre (MAMEDE, 2007). Na figura abaixo pode-se observar o aspecto físico de um captor de raios do tipo Franklin.



Figura 16 – Captor Tipo Franklin.
Fonte: Mamede (2007).

O mastro consiste num tubo metálico com um comprimento entre 3 a 5 metros sendo responsável pelo suporte do captor bem como pela consequente condução da corrente do raio. O isolador consiste na base de fixação do mastro sendo responsável por evitar a condução da corrente do raio para a estrutura que se deseja proteger, sendo utilizados usualmente isoladores de porcelana vitrificada ou vidro temperado (MAMEDE, 2007). O condutor de descida é o elemento do SPDA que estabelece a conexão elétrica entre o sistema mastro-captor e os eletrodos de terra da malha de aterramento da instalação.

Os eletrodos de aterramento tem como função dispersar a corrente elétrica proveniente dos raios para o solo, sendo o arranjo e as dimensões desses eletrodos cruciais para que haja a plena dispersão da corrente dos raios, reduzindo desta forma a probabilidade de ocorrência de sobretensões na instalação que se deseja proteger (MAMEDE, 2007). Para que se possa dimensionar um SPDA de forma adequada deve-se primeiramente verificar se a estrutura que se deseja proteger está situada em local que apresenta elevada frequência de ocorrência de raios, bem como verificar o respectivo nível de proteção da instalação a ser protegida.

3.4 ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES DO SPDA

A norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) especifica os valores mínimos necessários para a adequada instalação dos componentes que constituem um sistema de proteção contra descargas atmosféricas; nas tabelas abaixo são apresentados as bitolas mínimas aceitáveis para os cabeamentos, bem como a espessura mínima dos captores e eletrodos de aterramento utilizados pelo referido sistema de proteção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Material	Captor e anéis intermediários mm ²	Descidas (para estruturas de altura até 20 m) mm ²	Descidas (para estruturas de altura superior a 20 m) mm ²	Eletrodo de aterramento mm ²
Cobre	35	16	35	50
Alumínio	70	25	70	--
Aço galvanizado a quente ou embutido em concreto	50	50	50	80

Tabela 5 – Bitolas Mínimas dos Componentes do SPDA.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Material	Captadores			Descidas	Aterramentos
	NPQ	NPF	PPF		
Aço galvanizado a quente	4	2,5	0,5	0,5	4
Cobre	5	2,5	0,5	0,5	0,5
Alumínio	7	2,5	0,5	0,5	--
Aço inox	4	2,5	0,5	0,5	5
NPQ – Não gera ponto quente; NPF – Não perfura; PPF – Pode perfurar;					

Tabela 6 – Espessuras Mínimas dos Componentes do SPDA.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Com relação a instalação dos cabos elétricos responsáveis pela condução da corrente da descarga atmosférica em direção a malha de aterramento, deve – se atentar para as seguintes observações, durante a instalação dos referidos cabos, deve – se tomar o cuidado de dispor os mesmos na forma mais retilínea possível, garantindo desta forma o menor percurso da corrente elétrica dos raios em direção aos eletrodos de aterramento; deve – se atentar também para o fato de não ser permitido a confecção de emendas nesses cabos, bem como que os mesmos disponham de proteção mecânica até uma altura mínima de dois metros e meio a partir do nível do solo, sendo esta proteção efetuada através da instalação de eletrodutos rígidos de PVC ou metálicos. Outro fato que deve ser observado com cautela consiste no adequado espaçamento entre os cabos de descida que devem obedecer os valores mínimos exigidos pela referida norma, apresentados na tabela 7; além do espaçamento mínimo exigido os mesmos devem ser instalados ao longo da estrutura da forma mais regular possível, devendo estar presentes em cada vértice da estrutura, se possível. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

NÍVEL DE PROTEÇÃO	ESPAÇAMENTO MÉDIO (m)
I	10
II	15
III	20
IV	25

Tabela 7 – Espaçamento Mínimo dos Condutores de Descida.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Os eletrodos de aterramento devem obedecer as bitolas mínimas necessárias de acordo com o nível de proteção estabelecido para a referida estrutura que se deseja proteger (Figura 17), bem como os condutores responsáveis pelo estabelecimento da equipotencialização de estruturas externas ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma determinada estrutura. Sendo que a especificação dos referidos cabos de equipotencialização dependem se os mesmos conduzirão apenas uma pequena porção da corrente dos raios, ou se os mesmos conduzirão uma parcela significativa da corrente do raios; as tabelas 8 e 9 especificam essas condições de condução (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

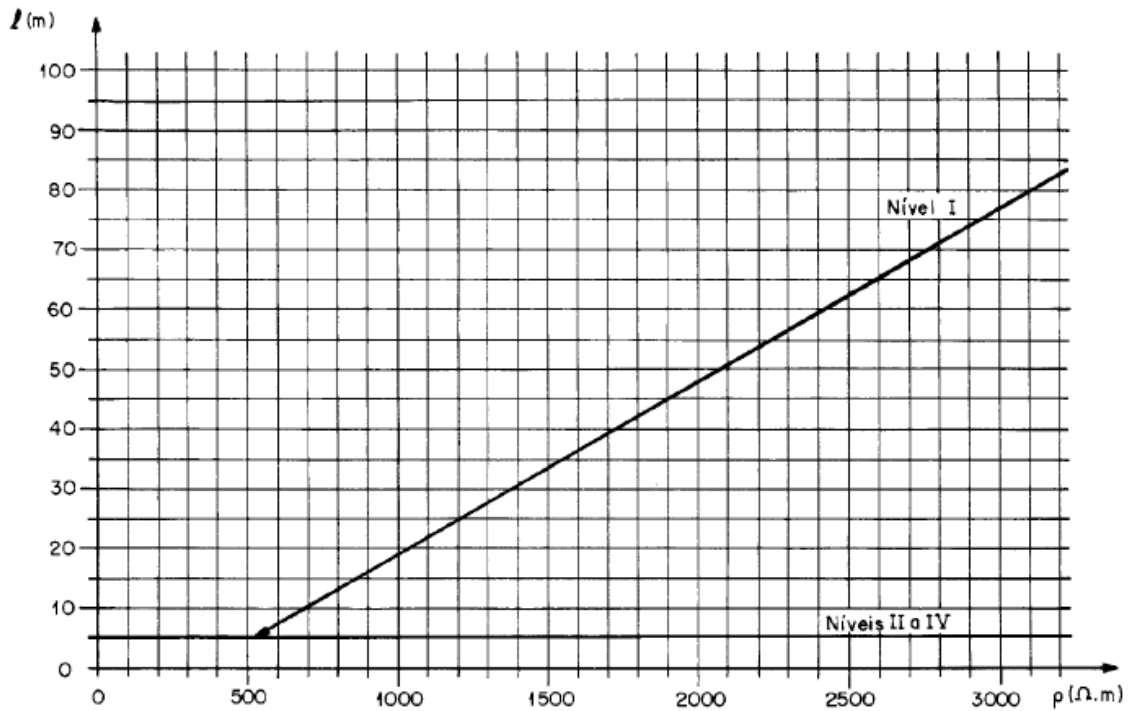


Figura 17 – Especificação da Bitola Mínima dos Eletrodos de Aterramento.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

NÍVEL DE PROTEÇÃO	MATERIAL	BITOLA (mm ²)
I - IV	Cobre	16
	Alumínio	25
	Aço	50

Tabela 8 – Bitola dos Cabos de Equipotencialização (condução de grande parte da corrente dos raios).
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

NÍVEL DE PROTEÇÃO	MATERIAL	BITOLA (mm ²)
I - IV	Cobre	6
	Alumínio	10
	Aço	16

Tabela 9 – Bitola dos Cabos de Equipotencialização (condução de pequena parte da corrente dos raios).
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Deve – se atentar também para a questão da corrosão dos componentes anteriormente dimensionados, sendo que os mesmos devem ser especificados de acordo com o tipo de aplicação e o tipo de corrosão que o mesmo possa sofrer conforme explicita a tabela 10 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Material	Aplicação				Corrosão		
	Ao ar livre	Enterrado	Embutido no concreto	Embutido no reboco	Resistência	Risco agravado	Eletrolítica
Cobre	Maciço, encordoadado ou como revestimento de haste de aço		--	Maciço ou encordoadado	A mais substâncias	Cloretos altamente concentrados; compostos sulfúricos; materiais orgânicos	--
Aço de construção comum ou galvanizado a quente	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	--	Boa, mesmo em solos ácidos	--	Com o cobre
Aço inoxidável	Maciço ou Encordoadado	Maciço ou encordoadado	--	Maciço ou encordoadado	A muitas substâncias	Água com cloretos dissolvidos	--
Alumínio	Maciço ou encordoadado	--	--	--	--	Agentes básicos	Com o cobre
Chumbo	Como revestimento		--	--	Altas concentrações de sulfatos	Solos ácidos	--

Tabela 10 – Tipos de Materiais suas Aplicações e Corrosões.
 Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Conforme destaca a norma os materiais utilizados devem ser capazes de suportar os efeitos das correntes das descargas atmosféricas, sendo que os materiais e suas dimensões devem ser escolhidos em função de seus respectivos riscos de corrosão. Os componentes do SPDA podem ser construídos com os materiais indicados na tabela anterior, desde que os mesmos tenham condutividade elétrica e resistência à corrosão compatíveis com a respectiva aplicação. Vale – se ressaltar que podem ser utilizados outros metais desde que suas características sejam equivalentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

3.5 MÉTODO DE SELEÇÃO DO NÍVEL DE PROTEÇÃO

O nível de proteção de uma determinada estrutura pode ser determinado através da análise dos seguintes critérios; a análise da avaliação do risco de exposição aos raios, a intensidade da área de exposição equivalente, a frequência média anual previsível de descargas atmosféricas sobre a estrutura e a avaliação geral do risco associado a estrutura a ser protegida (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

A avaliação do risco de exposição é determinada através da densidade de ocorrência de raios na região em que pretende – se instalar o SPDA, sendo este parâmetro determinado por meio de dados de ocorrência de raios registrados por sistemas de detecção de descargas atmosféricas, ou através da aplicação do mapa de curvas isoceráunicas na falta de dados de ocorrência de raios na região em estudo. Na figura abaixo é apresentado o mapa de curvas isoceráunicas para o Brasil de acordo com a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas).



Figura 18 – Mapa Isoceráunico do Brasil.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

A área de exposição equivalente (Figura 19) de uma determinada estrutura corresponde a uma região do espaço responsável pela atração das descargas atmosféricas em direção a estrutura a ser protegida, sendo este fator determinado através da equação (8).

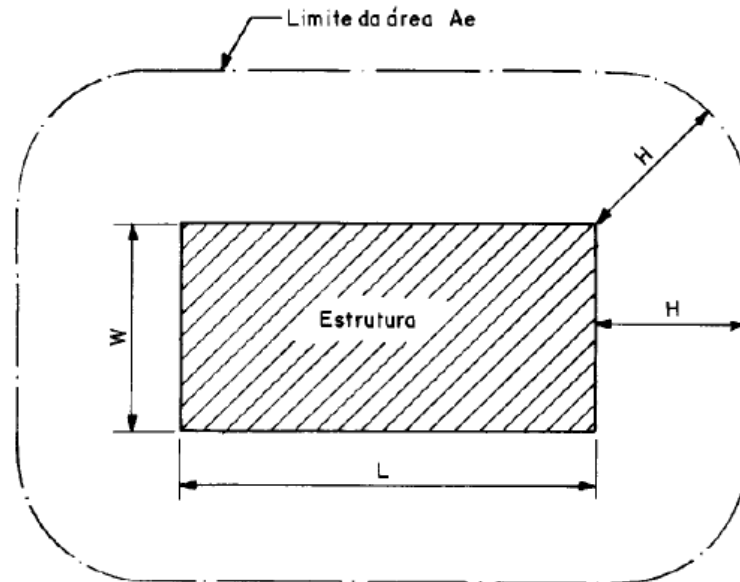


Figura 19 – Área de Exposição Equivalente.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

$$A_e = LW + 2LH + 2WH + \pi H^2 \quad (8)$$

Sendo:

L – Comprimento da Estrutura (em metros);

W – Largura da Estrutura (em metros);

H – Altura da Estrutura (em metros);

A frequência média anual previsível de descargas atmosféricas que incidem sobre uma determinada estrutura é determinada pela equação abaixo.

$$N_{pr} = N_d \cdot A_e \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

Sendo:

N_{pr} – Número provável de raios que atingem a construção;

N_d – Densidade de raios na região de estudo;

A avaliação geral do risco associado a uma determinada estrutura é determinada através do cálculo da probabilidade ponderada de ocorrência de raios em uma determinada estrutura de acordo com a equação 10, sendo seus respectivos fatores de ponderação associados ao tipo de estrutura, ao tipo de material utilizado em sua construção, ao seu conteúdo, a sua localização e ao tipo de topografia observada no local onde a estrutura a ser protegida se encontra conforme explicita a equação 10.

$$P_o = A.B.C.D.E.N_{pr} \quad (10)$$

Sendo:

A, B, C, D e E – Fatores de Ponderação;

N_{pr} - Número provável de raios que atingem a construção;

Nas tabelas 11 a 15 são apresentados os fatores de ponderação de acordo com a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas).

Tipo de Ocupação	Fator A
Casas e outras estruturas de porte equivalente	0,3
Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa	0,7
Fábricas, oficinas e laboratórios	1,0
Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo	1,2
Locais de Afluência de Público (por exemplo: igrejas, pavilhões, teatros, museus, exposições, lojas de departamento, correios, estações e aeroportos, estádios de esportes)	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades	1,7

Tabela 11 – Valores do Fator de Ponderação “A”.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Material de Construção da Estrutura	Fator B
Estrutura de aço revestida, com cobertura não metálica	0,2
Estrutura de concreto armado, com cobertura não metálica	0,4
Estrutura de aço revestida, ou de concreto armado, com cobertura metálica	0,8
Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1,0
Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1,4
Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica	1,7
Qualquer estrutura com teto de palha	2,0

Tabela 12 – Valores do Fator de Ponderação “B”.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos	Fator C
Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos	0,3
Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos	0,8
Subestações de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas, estações de rádio	1,0
Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público	1,7

Tabela 13 – Valores do Fator de Ponderação “C”.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Localização	Fator D
Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores de mesma altura ou mais alta (por exemplo: em grandes cidades ou em florestas)	0,4
Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar	1,0
Estrutura completamente isolada, ou que ultrapassa, no mínimo, duas vezes a altura de estruturas ou árvores próximas	2,0

Tabela 14 – Valores do Fator de Ponderação “D”.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Topografia	Fator E
Planície	0,3
Elevações moderadas, colinas	1,0
Montanhas entre 300 m e 900 m	1,3
Montanhas acima de 900 m	1,7

Tabela 15 – Valores do Fator de Ponderação “E”.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

A probabilidade ponderada de ocorrência de raios é um fator primordial para o dimensionamento de um SPDA, pois dependendo do valor assumido por esta variável, a implementação do referido sistema de proteção pode ser necessário ou não; a tabela 16 apresenta as condições mínimas necessárias para a implementação de um SPDA.

PROBABILIDADE PONDERADA	INSTALAÇÃO DO SPDA
$P_0 \leq 10^{-5}$	Desnecessária
$10^{-3} > P_0 > 10^{-5}$	Facultativa
$P_0 \geq 10^{-3}$	Obrigatória

Tabela 16 – Critério para Instalação do SPDA.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

A partir da análise dos critérios supracitados pode – se determinar o nível de proteção da estrutura que se deseja proteger contra a incidência direta de descargas atmosféricas de acordo com o tipo de estrutura, bem como do tipo de bem material que a mesma armazena, a tabela 17 explicita os níveis de proteção de acordo com esses critérios (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Classificação da estrutura	Tipo de estrutura	Efeitos das descargas atmosféricas	Nível de Proteção
Estruturas comuns	Residências	Perfuração da isolação de instalações elétricas, incêndios e danos materiais. Normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio	III
	Fazendas, estabelecimentos agropecuários	Risco direto de incêndio e tensões de passo perigosas. Risco indireto devido à interrupção de energia e risco de vida para animais devido à perda de controles eletrônicos, ventilação, suprimento de alimentação e outros	III ou IV
	Teatros, escolas, lojas de departamentos, áreas esportivas e igrejas	Danos às instalações elétricas (por exemplo: iluminação) e possibilidade de pânico Falha do sistema de alarme contra incêndio, causando atraso no socorro	II
	Bancos, companhias de seguro, companhias comerciais e outros	Como acima, além de efeitos indiretos com a perda de comunicações, falhas dos computadores e perda de dados	II
	Hospitais, casa de repouso e prisões	Como para escolas, além de efeitos indiretos para pessoas em tratamento intensivo e dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas	II
	Indústrias	Efeitos indiretos conforme o conteúdo das estruturas, variando de danos pequenos a prejuízos inaceitáveis e perda de produção	III
	Museus, locais arqueológicos	Perda de patrimônio cultural insubstituível	II
Estruturas com risco confinado	Estações de telecomunicação, usinas elétricas e Indústrias	Interrupção inaceitável de serviços públicos por breve ou longo período de tempo. Risco indireto para as imediações devido a incêndios, e outros com risco de incêndio	I
Estruturas com risco para os arredores	Refinarias, postos de combustível, fábricas de fogos, fábricas de munição	Risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores	I
Estruturas com risco para o meio ambiente	Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios bioquímicos	Risco de incêndio e falhas de operação, com consequências perigosas para o local e para o meio ambiente	I

Tabela 17 – Níveis de Proteção.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

3.6 MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.6.1 Método de Franklin

O método de proteção de Franklin consiste basicamente na instalação de captores sobre as estruturas que se deseja proteger com a finalidade de evitar a incidência direta de descargas atmosféricas nas mesmas, sendo que a altura de instalação dos captores depende do tipo de nível de proteção adotado para à respectiva estrutura. A norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) explicita os valores máximos permitidos para a implementação deste método de proteção de acordo com a tabela abaixo.

		NÍVEIS DE PROTEÇÃO			
		I	II	III	IV
ALTURA DO CAPTOR (m)	0 – 20	25°	35°	45°	55°
	21 – 30	--	25°	35°	45°
	31 – 45	--	--	25°	35°
	46 – 60	--	--	--	25°
	> 60	--	--	--	--

Tabela 18 – Ângulos de Proteção dos Captadores do Método de Franklin.
Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Conforme pode – se observar claramente nos dados presentes na tabela 18 o método de proteção de Franklin apresenta limitações para certas alturas em relação aos diferentes níveis de proteção adotados para as mais diferentes estruturas. Conforme explicita a norma NBR 5419:2005 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) para os níveis de proteção I, II e III nos respectivos intervalos de altura de 21 a 30, 31 a 45 e 46 a 60, recomenda – se a utilização dos métodos de Faraday ou Eletrogeométrico, no entanto, para alturas superiores a 60 metros recomenda – se a adoção do método de Faraday para todos os níveis de proteção.

De acordo com Mamede (2007) a instalação de captores sobre a estrutura a proteger de acordo com o método de Franklin garante a plena proteção contra a incidência direta de descargas atmosféricas em uma região do espaço limitada por um cone de altura igual à distância do topo do captor ao solo, e com um raio de base definido pela equação 11.

$$R_p = H_c \times \tan(\varphi_p) \quad (11)$$

Onde:

R_p - Raio de Proteção (Raio da Base do Cone)

H_c - Distância do Captor ao Solo (Altura do Cone)

φ_p - Ângulo de Proteção

Na figura 20 pode – se observar a zona de proteção criada pela instalação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas de acordo com o método Franklin.



Figura 20 – Zona de Proteção do Método Franklin.

Fonte: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Instalacoes/Proteccao_contra_raios/Sistemas_externos/Para-raios_tipo_hastes_Franklin.html

3.6.2 Método de Faraday

No método de proteção contra descargas atmosféricas de Faraday a proteção da estrutura é efetuada através da instalação de uma malha de condutores envolvendo toda a parte superior da estrutura que se deseja proteger, sendo que cada módulo da malha deve apresentar uma largura previamente definida de acordo com o respectivo nível de proteção da estrutura a ser protegida (tabela 19). O comprimento máximo permitido é obtido através da aplicação da equação 12 de acordo com a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas).

NÍVEL DE PROTEÇÃO	LARGURA DO MÓDULO DE PROTEÇÃO (m)
I	5
II	10
III	10
IV	20

Tabela 19 – Larguras dos Módulos da Malha de Faraday.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

$$C \leq 2 \times L \quad (12)$$

Onde:

C – Comprimento do Módulo da Malha de Faraday

L – Largura do Módulo da Malha de Faraday

Conforme explicita Mamede (2007) quanto maior for a abertura da malha protetora maior será o grau de proteção oferecido por este método, sendo recomendado a instalação de captos verticais com altura de 50 centímetros ao longo dos condutores que compõem a malha, sendo que os mesmos devem apresentar um afastamento máximo uns dos outros de até 8 metros. O mesmo explicita que o método de Faraday é indicado para edificações dotadas de altura relativamente baixa e de grande área horizontal, apresentando o mesmo grau de proteção associado a inúmeros para-raios tipo Franklin.

3.6.3 Método Eletrogeométrico

Conforme explicita a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) o método eletrogeométrico consiste num dos métodos mais largamente utilizados para se determinar a zona de proteção de uma determinada estrutura, sendo recomendado para estruturas dotadas de elevada altura bem como de projetos arquitetônicos complexos. Sua fundamentação teórica baseia-se no processo de formação dos raios, onde o lugar geométrico dos pontos onde as descargas atmosféricas podem incidir é delimitado por uma esfera cujo raio consiste na menor distância entre o líder descendente negativo e o líder ascendente positivo; a tabela 20 apresenta os valores típicos adotados de acordo com nível de proteção definido para a estrutura a ser protegida.

NÍVEL DE PROTEÇÃO	RAIO DA ESFERA (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Tabela 20 – Raios da Esfera Fictícia do Método Eletrogeométrico.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

A partir da determinação do raio da esfera fictícia e ao fazer com que a mesma se desloque sobre a estrutura que se deseja proteger contra a incidência direta de descargas atmosféricas, determina – se os locais onde devem existir para – raios garantindo desta forma a adequada proteção da estrutura; nas figuras 21, 22 e 23 pode – se observar a definição da distância “R”, bem como a aplicação do referido método.

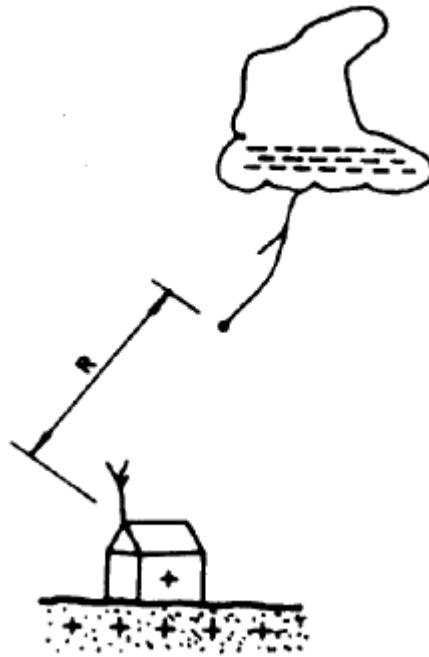


Figura 21 – Definição da Distância “R”.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

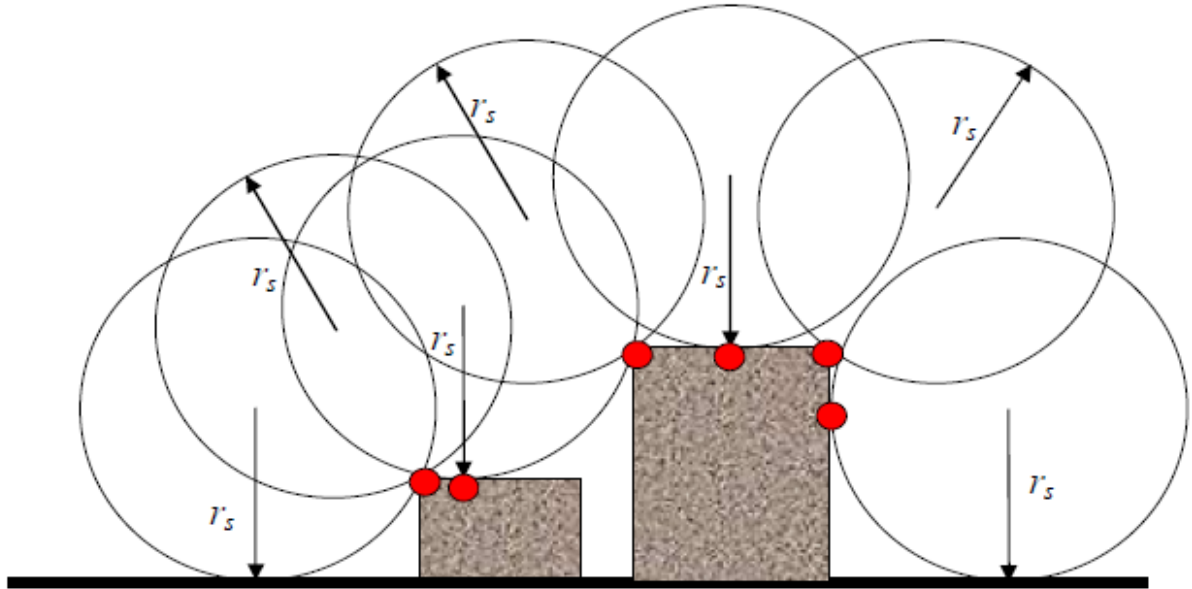


Figura 22 – Prováveis Pontos de Incidência de Descargas Atmosféricas.
 Fonte: Sá (2011) Originalmente adaptado de Rakov (2009).

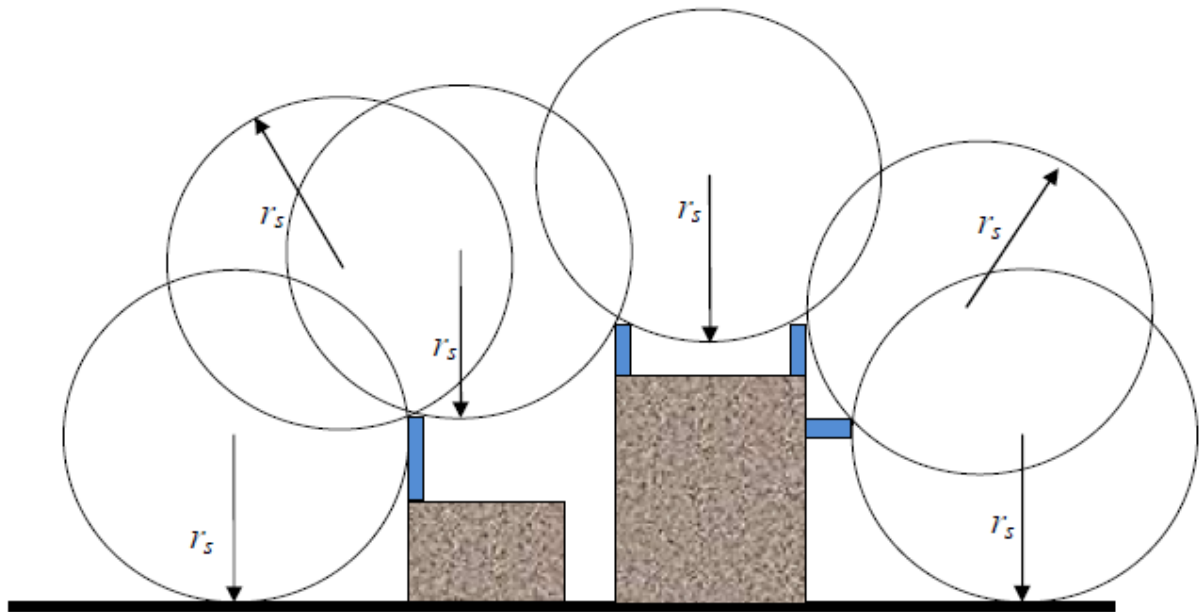


Figura 23 – Pontos de Incidência Protegidos pelo Método Eletrogeométrico.
 Fonte: Sá (2011) Originalmente adaptado de Rakov (2009).

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 MALHA DE ANÁLISE DE OCORRÊNCIA DE RAIOS

Pesquisas realizadas por Dentel (2013) sobre a rede de detecção de raios STARNET demonstraram que a mesma detém um perfil de operação intermitente, o que de certa forma prejudica a acurácia de detecção de raios em sua respectiva zona de cobertura; desta forma, com a finalidade de compensar o funcionamento intermitente dos sensores que a compõem, foi desenvolvido por Dentel (2013) uma série de fatores de correção de ocorrência de raios para cada pixel de sua respectiva malha de análise de ocorrência de raios, sendo esta correção efetuada em intervalos fixos de dez em dez minutos. Conforme explicitado pela autora os fatores de correção bem como o intervalo de aplicação dos mesmos foram estabelecidos a partir das configurações estáveis da rede de detecção de raios STARNET; na figura 24 é apresentado, a malha de análise de ocorrência de raios desenvolvida por Dentel (2013) com uma resolução de 100 quilômetros.

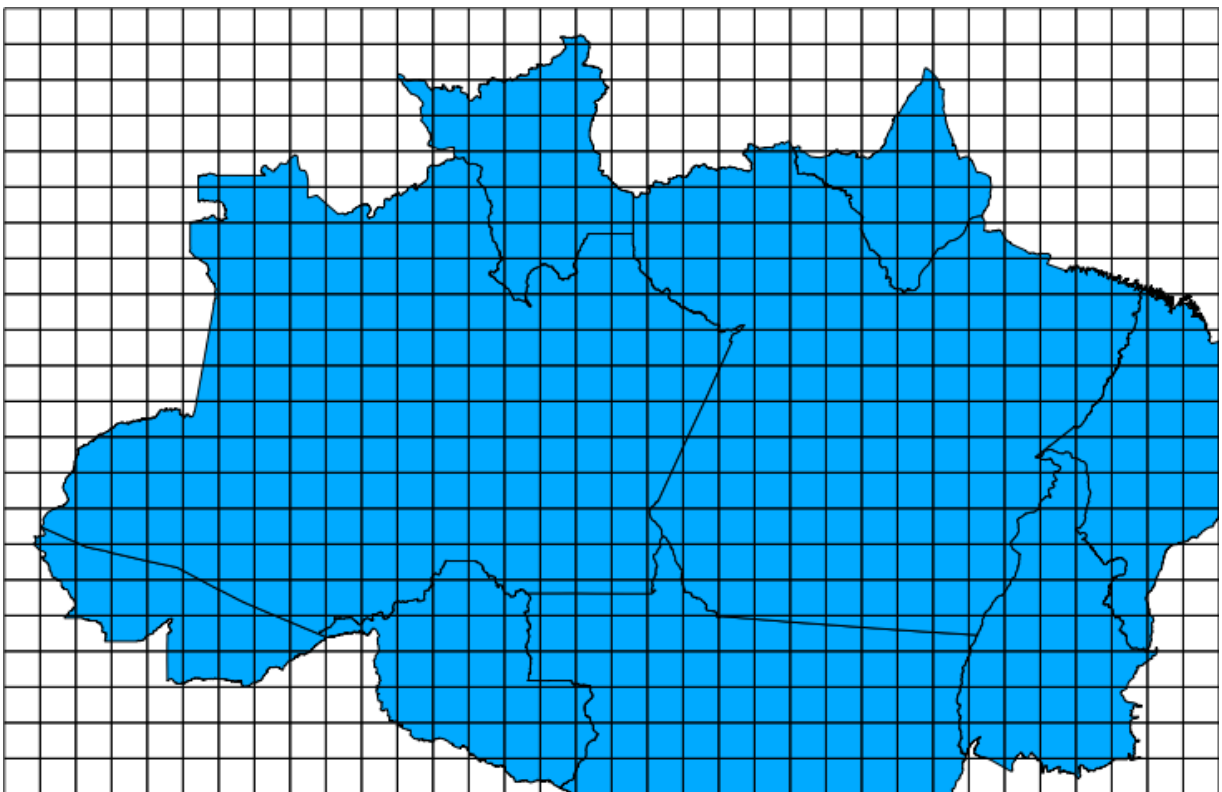


Figura 24 – Malha de Análise de Ocorrência de Raios desenvolvida por Dentel (2013).

No entanto como pretende – se fazer uma análise da ocorrência de raios nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba, desenvolveu – se uma malha de ocorrência de raios no interior da malha desenvolvida por Dentel (2013) com resolução de 10 quilômetros, com a finalidade de fazer uso de seus fatores de correção, na figura 25 apresenta – se a localização espacial da malha de análise de ocorrência de raios para aferição das descargas atmosféricas que atingem os municípios supracitados, e na figura 26 é apresentado um zoom dos pixels destacados em amarelo na figura 25.

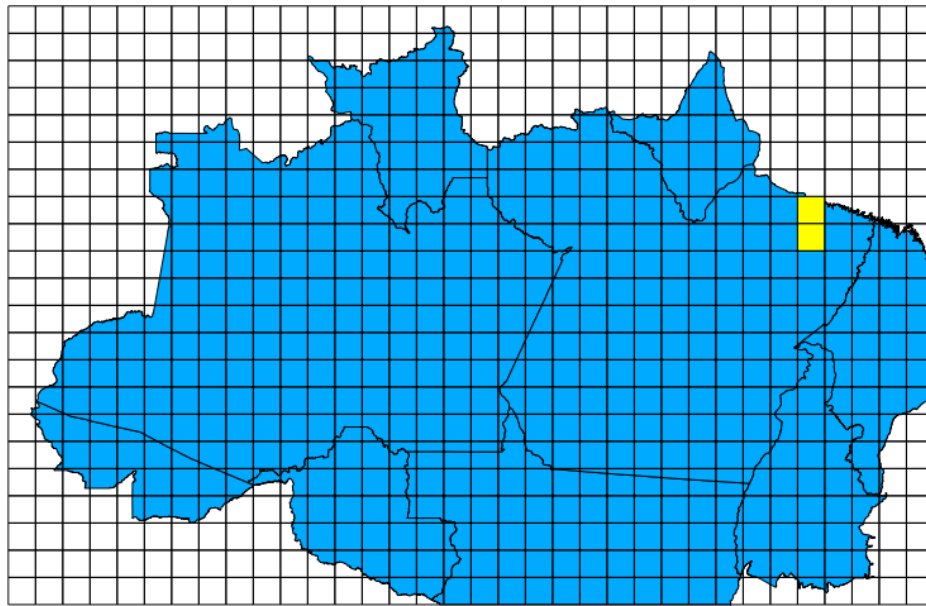


Figura 25 – Localização da Área de Estudo na Malha de Dentel (2013).

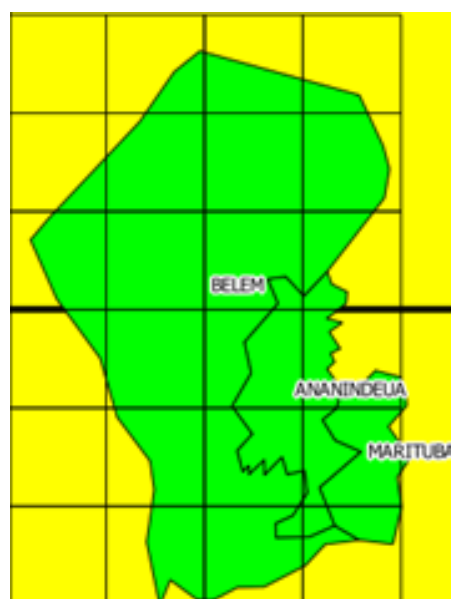


Figura 26 – Malha de Análise de Ocorrência de Raios nos Municípios de Belém, Ananindeua e Marituba.

4.2 – CORREÇÃO DAS MATRIZES DE DENSIDADE DE RAIOS

Conforme explicita Dentel (2013) para efetuar a correção do número de raios que incidem nos pixels de sua respectiva malha de análise de ocorrência de raios, faz – se uso da equação 13 com o auxílio do programa computacional MATLAB®.

$$D_c(i, j, k) = D(i, j, k) .* [1 + F_c(i, j, k)] \quad (13)$$

Sendo:

$D_c(i, j, k)$ – Matriz de Densidade de Raios Corrigida

$D(i, j, k)$ – Matriz de Densidade de Raios Original

$F_c(i, j, k)$ – Matriz dos Fatores de Correção

Para se realizar um estudo de ocorrência de raios nos municíós de Belém, Ananindeua e Marituba, devemos fazer um corte na matriz dos fatores de correção de ocorrência de raios com a finalidade de limitar a análise de ocorrência dos mesmos para os municípios supracitados; desta forma, efetuou – se um corte na matriz original dos fatores de correção desenvolvidos por Dentel (2013) limitando a análise para os pixels de número 268 e 302 de sua respectiva malha. Os índices “i” e “j” definem respectivamente o número de linhas e de colunas da maha de análise de ocorrência de raios que se pretende utilizar para efetuar a aferição da quantidade de raios que incidem na presente região de estudo, e o índice “k” corresponde ao número total de intervalos fixos de dez em dez minutos existentes ao longo de um ano que totalizam 52560 instantes para os anos regulares e 52704 instantes para os anos bissextos.

4.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DE SPDA

Como critérios a serem utilizados para averiguar se as edificações do presente conjunto habitacional necessitam de um adequado sistema de proteção contra a incidência de descargas atmosféricas serão utilizados parâmetros determinados pela norma NBR 5419 (Proteção Contra Descargas Atmosféricas) para averiguação da necessidade de implementação do referido sistema, dentre esses parâmetros destacam – se, a avaliação do risco de ocorrência de raios, a área de exposição equivalente da estrutura a ser protegida, a frequência média anual sobre a estrutura, bem como a avaliação geral do risco de ocorrência de raios.

CAPÍTULO 5

OCORRÊNCIAS DE RAIOS NO ESTADO DO PARÁ

5.1 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS NO PERÍODO DE 1991 A 2009

Estudos preliminares desenvolvidos por Teixeira et al. (2011) sobre a frequência de ocorrência de descargas atmosféricas na porção oriental da região amazônica, mais precisamente ao longo do estado do Pará, a partir do processamento de dados de ocorrência de raios provenientes do sensor LIS, demonstraram que a presente região é dotada de elevada frequência de ocorrência de descargas atmosféricas; na figura 27 são apresentados as densidades de ocorrência de raios observadas ao longo dos meses de Janeiro a Dezembro no período de 1991 a 2009, de acordo com o levantamento realizado por Teixeira et al. (2011).

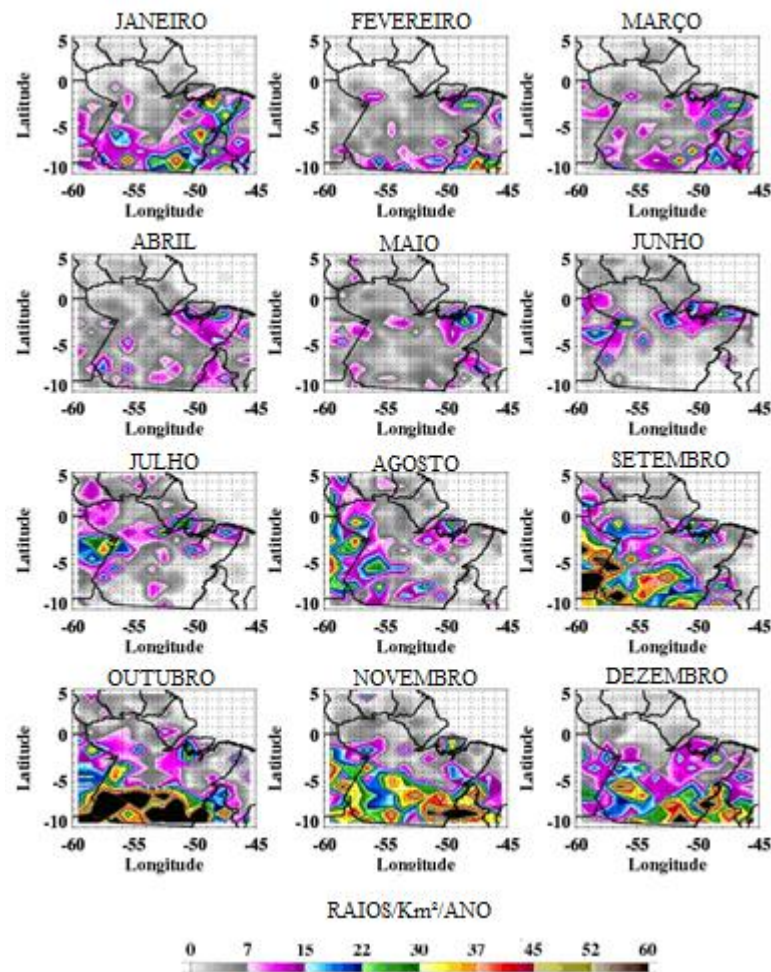


Figura 27 – Perfil de Ocorrência de Raios nos Meses de Janeiro a Dezembro no período de 1991 a 2009.
Fonte: Teixeira et al. (2011).

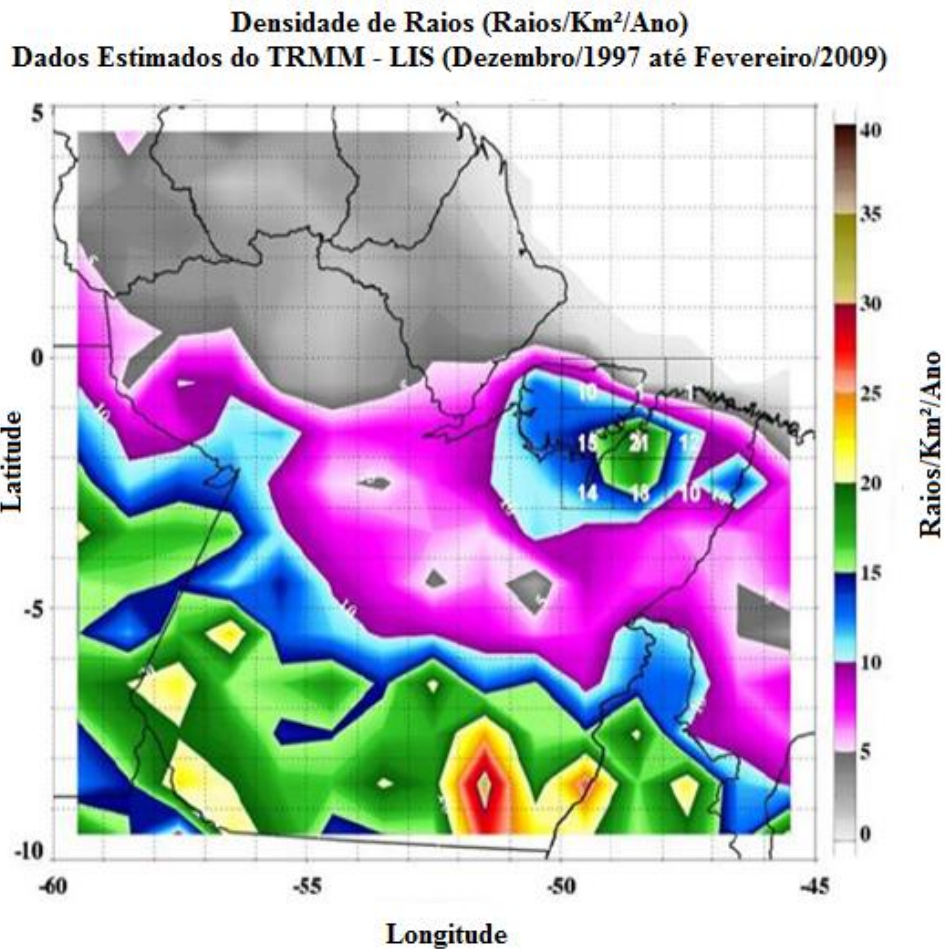


Figura 28 – Densidade Média de Ocorrência de Raios no período de 1991 a 2009.
 Fonte: Teixeira et al. (2011).

Os dados explicitados nas Figura 27 e 28 por Teixeira et al. (2011) podem ser resumidos pelos dados presentes nas tabelas 21 e 22. Como pode ser observado a porção oriental da região amazônica é dotada de intensa frequência de ocorrência de descargas atmosféricas, podendo atingir valores máximos de até 45 raios/Km²/ano durante o mês de Janeiro e valores médios máximos e mínimos de 21 raios/Km²/ano e 14 raios/Km²/ano respectivamente, fato este que deve ser levado em consideração quando se pretende fazer um planejamento de instalação de sistemas elétricos, eletrônicos, de telecomunicação bem como de empreendimentos habitacionais na referida região.

DENSIDADE MÉDIA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS (1991 – 2009)	
DENSIDADE MÁXIMA	21 raios/Km ² /ano
DENSIDADE MÍNIMA	14 raios/Km ² /ano

Tabela 21 – Densidades Médias de Ocorrência de Raios no período de 1991 a 2009.
 Fonte: Teixeira et al. (2011).

Mês	Densidade Máxima	Densidade Mínima
Janeiro	45	30
Fevereiro	30	15
Março	22	15
Abril	15	7
Maio	30	15
Junho	22	15
Julho	15	7
Agosto	15	7
Setembro	37	7
Outubro	15	7
Novembro	15	7
Dezembro	37	7

Tabela 22 – Densidades de Ocorrência de Raios por mês no período de 1991 a 2009.
Fonte: Teixeira et al. (2011).

5.2 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS NO ANO DE 2010

Pesquisas desenvolvidas acerca de sinistros envolvendo descargas atmosféricas no estado do Pará no período de 2001 a 2012 demonstraram a necessidade da adequada implementação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em empreendimentos habitacionais de baixa renda, bem como de uma adequada instrução relacionada à prevenção de acidentes envolvendo descargas atmosféricas (MELO et al., 2013). De acordo com Melo et al. (2013) no ano de 2010 foram registrados um total de 13 eventos relacionados a descargas atmosféricas, totalizando 15 mortes e 19 feridos.

A partir do processamento dos dados de ocorrência de raios do ano de 2010 provenientes da rede de detecção de raios STARNET na malha de análise desenvolvida para averiguar a frequência de ocorrência de raios nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba, obteve – se os perfis de ocorrência de raios apresentados pela Figura 29.

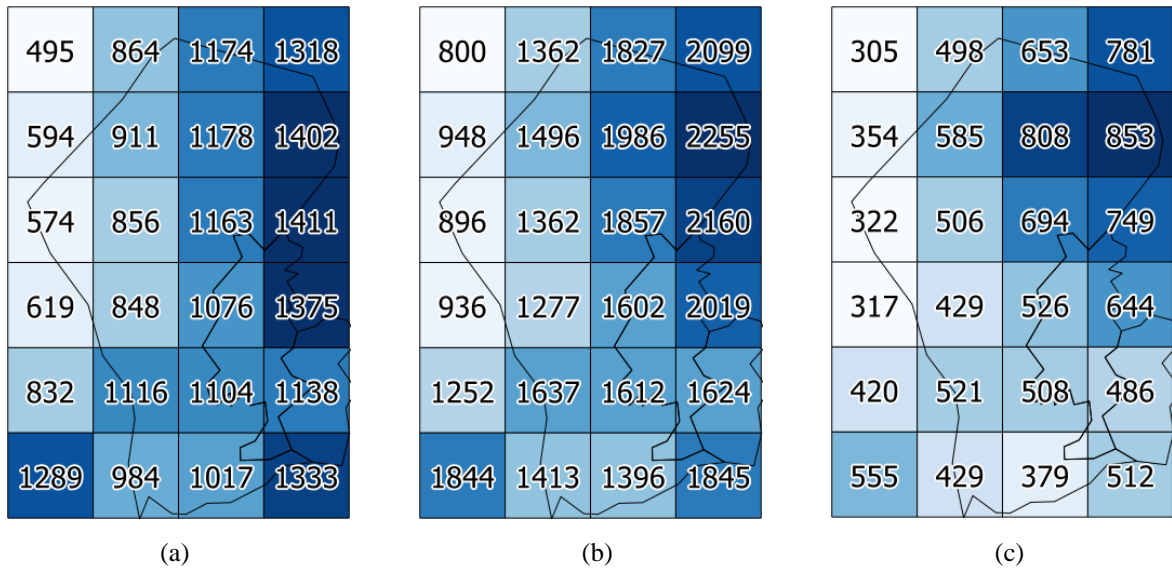


Figura 29 – Perfil de Ocorrência de Raios em 2010. (a) Ocorrência Não Corrigida. (b) Ocorrência Corrigida. (c) Diferença de Ocorrência de Raios.

Fonte: Do Autor.

A partir da análise dos dados de ocorrência de raios do ano de 2010 pôde – se constatar que no referido ano a densidade de ocorrência de raios nos municípios de Belém, Ananindeua e Marituba foi elevada, atingindo um valor médio de 16 raios/Km²/ano para a região como um todo, e os respectivos valores de 16 raios/Km²/ano e 18 raios/Km²/ano para os municípios de Belém e Ananindeua e Marituba respectivamente, sendo que região como um todo chegou a apresentar um índice cerâmico de 253 dias/ano com ocorrência de raios no presente ano.

Como pode – se constatar a partir dos dados presentes na Figura 29 no referido ano houve uma diferença de ocorrência máxima de raios de 853 unidades, o que evidencia novamente o fato explicitado por Rocha et al. (1996), Souza et al. (1999) e Almeida et al. (2008) acerca do comportamento elétrico da região amazônica, ou seja, que a mesma é dotada de intensa atividade elétrica, sendo esta manifestada através da ocorrência de descargas atmosféricas produzidas por nuvens de tempestade do tipo Cumulus Nimbus, sendo as mesmas prejudiciais a instalação bem como a manutenção de sistemas elétricos, eletrônicos, de telecomunicação, bem como da construção de empreendimentos industriais e habitacionais que por ventura estejam localizados na presente região.

5.3 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS NO ANO DE 2011

Por outro lado no ano de 2011 não foram registrados ocorrências de sinistros envolvendo descargas atmosféricas no estado do Pará (MELO et al. 2013). No entanto a análise da ocorrência de raios no presente ano se faz necessário com o intuito de se observar como a densidade de ocorrência de raios varia de um ano para o outro, desta forma após o processamento dos dados de ocorrência de raios provenientes da rede de detecção de raios STARNET, obteve – se, como resultado, os seguintes perfis de ocorrência de raios apresentados na Figura 30.

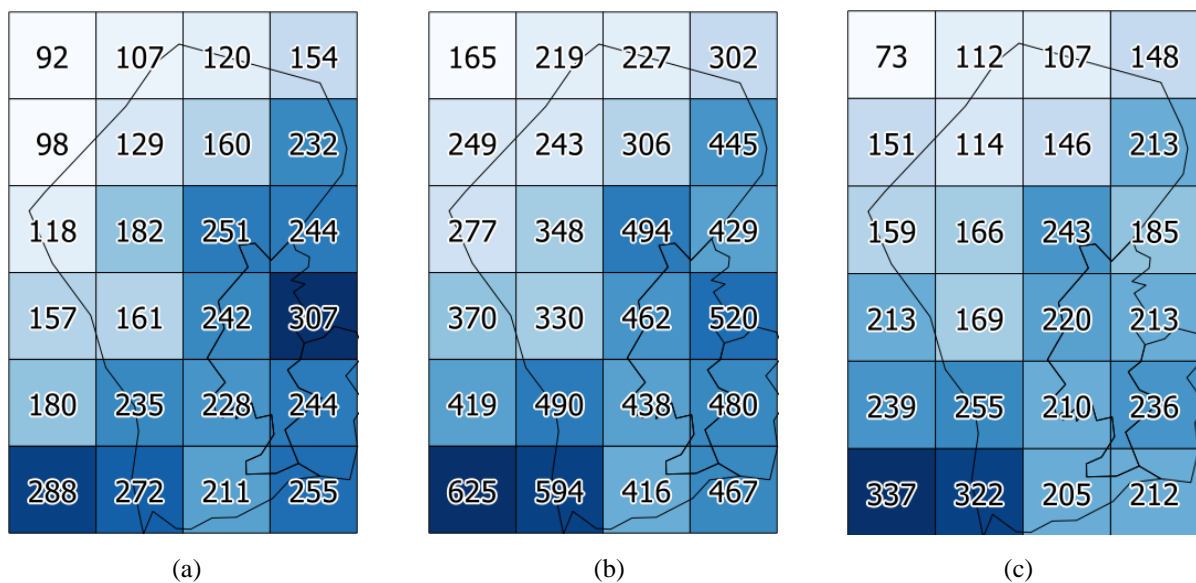


Figura 30 – Perfil de Ocorrência de Raios em 2011. (a) Ocorrência Não Corrigida. (b) Ocorrência Corrigida. (c) Diferença de Ocorrência de Raios.

Para o ano de 2011 foi observado uma densidade média de ocorrência de raios para a região de 4 raios/Km²/ano, e para os municípios de Belém, Ananindeua e Marituba foram observadas densidades de 4 raios/Km²/ano e 5 raios/Km²/ano respectivamente, apresentando a região de análise como um todo um índice ceráunico de 249 dias/ano em 2011. Ao comparar os resultados da ocorrência de raios nos anos de 2010 e 2011, nota – se a grande variabilidade que a densidade de ocorrência de raios pode assumir na porção oriental da região amazônica.

5.4 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE RAIOS DE ACORDO COM A NBR 5419

De acordo com a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) para determinar a densidade de ocorrência de raios em uma determinada região do país, deve – se primeiramente determinar o índice ceráunico correspondente à região de análise através do mapa de curvas isoceráunicas determinado através de observações de ocorrências de raios no período de 1971 a 1995. Um zoom do mapa de curvas isoceráunicas da referida figura destacando somente o estado do Pará é apresentado na Figura 31.

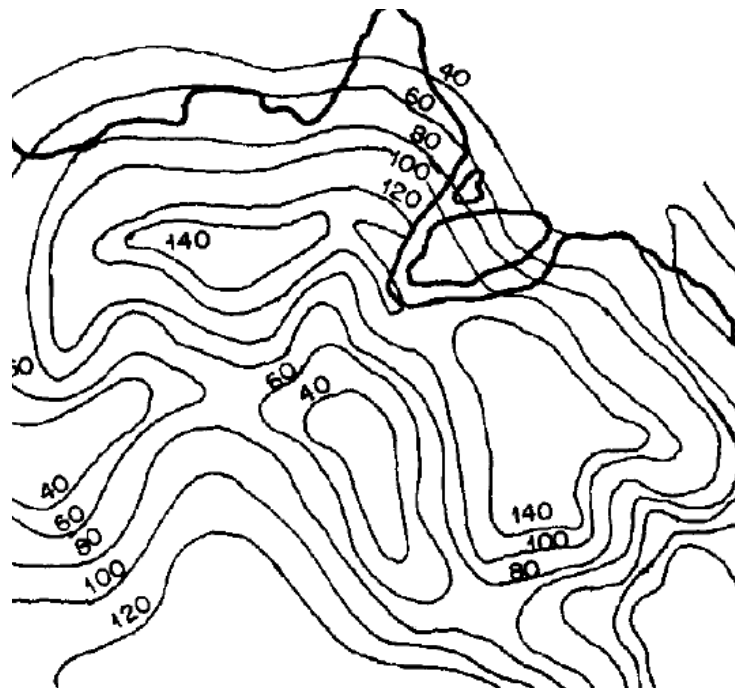


Figura 31 – Curvas Isoceráunicas do Estado do Pará.
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).

Conforme pode – se observar no mapa de curvas isoceráunicas os municípios de Belém, Ananindeua e Marituba podem apresentar índices ceráunicos variando de um máximo de 140 dias/ano até um mínimo de 80 dias/ano, como a curva referente a 40 dias/ano encontra – se bem mais afastada que as demais, desconsiderou – se a mesma para questões de cálculo de densidade de ocorrência de raios para os municípios em análise. Desta forma aplicando – se a equação (6) para os valores de índice ceráunico de 60, 80, 100, 120 e 140 dias/ano obteve – se as respectivas densidades de 7 raios/Km²/ano, 10 raios/Km²/ano, 13 raios/Km²/ano, 16 raios/Km²/ano e 19 raios/Km²/ano para a região de estudo.

De acordo com levantamentos realizados no respectivo empreendimento sabe – se que as edificações construídas consistem em conjuntos de apartamentos de dois andares com largura de 8 metros, comprimento de 31,5 metros e com altura de 7 metros. A partir das dimensões físicas da estrutura a ser protegida pode – se averiguar a possibilidade da instalação de um SPDA, bem como determinar o seu respectivo nível de proteção.

Conforme explicitado em capítulos anteriores para determinar se uma determinada estrutura necessita de um sistemas de proteção contra descargas atmosférica deve – se verificar, a avaliação do risco de ocorrência de raios na mesma, sendo este parâmetro determinado através da densidade de ocorrência de raios na região onde se encontra a estrutura; também são necessárias a área de exposição equivalente, a frequência média de incidência de raios e a avaliação geral do risco de incidência de descargas atmosféricas, sendo a mesma determinada através da probabilidade ponderada.

Desta forma aplicando-se a equação (8) com as dimensões físicas do empreendimento em questão encontra-se uma valor de 958,94 metros quadrados para a área de exposição equivalente da estrutura em análise, e de acordo com a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contradas Descargas Atmosféricas) a estrutura em análise encontra-se no nível de proteção III em virtude da mesma consistir em edificação residencial, sendo a mesma definida como sendo estrutura comum. Com relação aos fatores de ponderação adotados para a referida estrutura destacam-se respectivamente os valores de 1,2 para a constante “A” (tabela 11), devido a estrutura consistir numa ocupação tipo apartamento, o valor 1 para a constante “B” (tabela 12), devido a estrutura ser construída com alvenaria, o valor de 0,3 para a constante “C” (tabela 13), devido a estrutura em questão não conter objetos de elevado valor patrimonial, o valor de 0,4 para a constante “D” (tabela 14), devido a residência não se encontrar isolada e o valor de 0,3 para a constante “E” (tabela 15), devido a estrutura estar localizada em relevo de planície. A partir desses parâmetros serão feitas análises dos dados de densidade de ocorrência de raios apresentados por Teixeira et al. (2011), dados do ano de 2010 obtidos da rede de detecção de raios STARNET, bem como de dados obtidas através das curvas isocerânicas apresentadas pela norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) com a finalidade de averiguar se existe a necessidade da instalação de um SPDA no referido estabelecimento.

6.1.1 Análise das Densidades de Ocorrência de Raios de Teixeira et al. (2011)

Conforme explicita Teixeira et al. (2011) através do processamento de dados de ocorrências de raios registrados pelo sensor LIS instalado a bordo do satélite TRMM foi determinado para o período de 1991 a 2009 uma densidade média máxima de 21 raios/Km²/ano e uma densidade média mínima de 14 raios/Km²/ano, sendo detectado uma densidade de ocorrência de raios de 45 raios/Km²/ano durante o mês de janeiro no referido período. A partir desses dados de ocorrência de raios será investigada se existe a necessidade da instalação de um SPDA no respectivo empreendimento habitacional. Aplicando – se as equações (9) e (10) para as respectivas densidades de 14 raios/Km²/ano, 21 raios/Km²/ano e 45 raios/Km²/ano, obteve – se os valores expressos na tabela 23 para a frequência média de incidência de raios e a avaliação geral do risco.

Densidade de Raios (N_g)	Frequência Média de Incidência de Raios (N_{pr})	Avaliação do Risco (P_o)
14 raios/Km ² /ano	0,0134	0,00058 ~ 0,001
21 raios/Km ² /ano	0,0201	0,00087 ~ 0,001
45 raios/Km ² /ano	0,0432	0,002

Tabela 23 – Análise das Densidades de Ocorrência de Raios de Teixeira et al. (2011).

6.1.2 Análise das Densidades de Ocorrência de Raios da Rede STARNET

De forma similar a efetuada no item anterior analisa-se aqui a necessidade de implementação de um SPDA no conjunto habitacional Taboquinha através da análise da máxima densidade de ocorrência de raios registrada no ano de 2010 pela rede de detecção de raios STARNET; os resultados são apresentados na tabela 24.

Densidade de Raios (N_g)	Frequência Média de Incidência de Raios (N_{pr})	Avaliação do Risco (P_o)
16 raios/Km ² /ano	0,0153	0,00066 ~ 0,001

Tabela 24 – Análise da Densidade de Ocorrência de Raios da Rede STARNET.

6.1.3 Análise das Densidades de Ocorrência de Raios segundo a Norma NBR 5419:2005

A norma NBR 5419 (Poteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) determina a densidade de ocorrência de raios em uma determinada região do país a partir da aplicação da equação (6), e a partir do valor do índice ceráunico da região em questão obtido através do mapa de curvas isoceráunicas (Figura 31). Conforme pode-se observar na referida figura os índices ceráunicos para a região de estudo desta pesquisa variam de um mínimo de 60 dias/ano até um máximo de 140 dias/ano; desta forma, determinando-se as respectivas densidades de ocorrências de raios para os respectivos índices ceráunicos pode-se fazer o levantamento da necessidade de implementação de um SPDA no presente conjunto habitacional. Os resultados são apresentados nas tabelas 25 e 26.

Índice Ceráunico (T_d)	Densidade de Ocorrência de Raios $\{N_g = 0,04(T_d)^{1,25}\}$
60 dias/ano	7 raios/Km ² /ano
80 dias/ano	10 raios/Km ² /ano
100 dias/ano	13 raios/Km ² /ano
120 dias/ano	16 raios/Km ² /ano
140 dias/ano	19 raios/Km ² /ano

Tabela 25 – Densidades de Ocorrência de Raios segundo a norma NBR 5419:2005.

Densidade de Raios (N_g)	Frequência Média de Incidência de Raios (N_{pr})	Avaliação do Risco (P_o)
7 raios/Km ² /ano	0,00671	0,00029
10 raios/Km ² /ano	0,00959	0,00041
13 raios/Km ² /ano	0,0125	0,00054 ~ 0,001
16 raios/Km ² /ano	0,0153	0,00066 ~ 0,001
19 raios/Km ² /ano	0,0182	0,00079 ~ 0,001

Tabela 26 – Análise da Densidade de Ocorrência de Raios segundo a norma NBR 5419:2005.

6.2 ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO FRANKLIN

Conforme explicitado em capítulos anteriores para que se possa fazer uma análise de implementação de um SPDA com base no método de Franklin, deve-se primeiramente determinar o nível de proteção da estrutura que se deseja proteger, bem como a sua respectiva altura em relação ao solo, determinando-se desta forma o ângulo de proteção do captor a ser utilizado pelo SPDA. Como a estrutura em questão apresenta nível de proteção III e possui uma altura de sete metros, deve-se utilizar um captor com ângulo de proteção de 45° conforme explicita a tabela 18 adaptada da norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas). Aplicando – se a equação 11 com a finalidade de se determinar o raio de proteção produzido por um captor localizado a uma certa altura em relação ao topo da estrutura a proteger, nota-se que existe uma relação de igualdade entre o raio de proteção do captor e a altura do mesmo em relação ao topo da estrutura.

Inicialmente para fins de análise da eficácia do referido método de proteção considerou-se a instalação de quatro captores com ângulos de proteção de 45° igualmente espaçados de 8 metros uns dos outros, sendo suas respectivas alturas de 7 metros em relação ao topo da estrutura. Conforme pode – se observar na Figura 33 a configuração física deste SPDA garantiu a total proteção da estrutura contra a incidência de descargas atmosféricas.

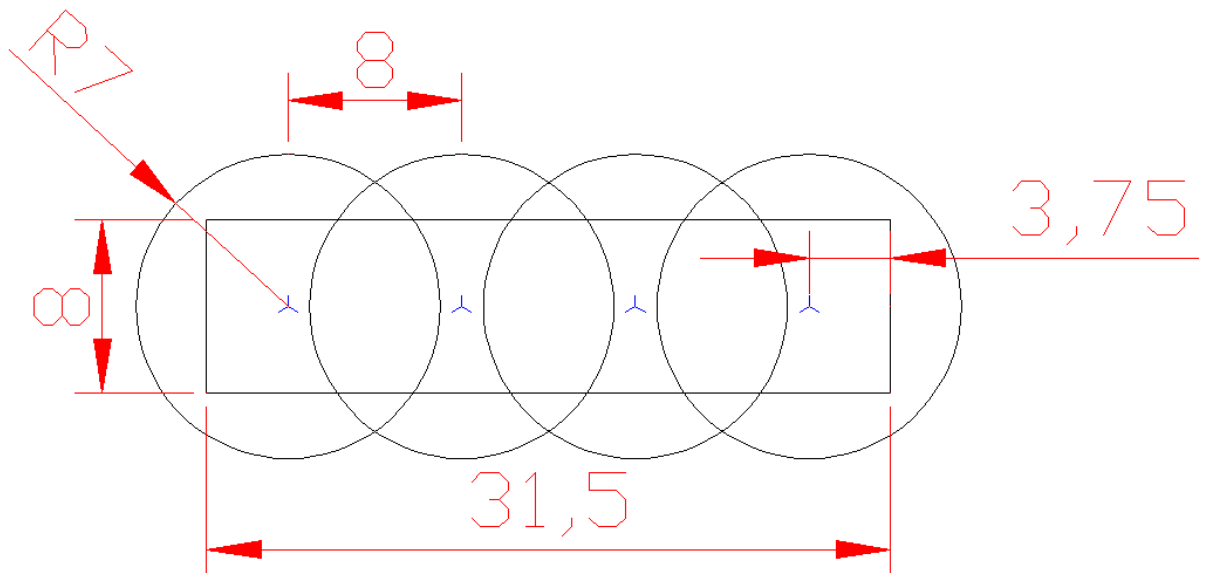


Figura 33 – Configuração do Método Franklin com 4 Captores a 7 metros de Altura.

Deve – se destacar também que se a altura dos capttores for de 6 metros em relação ao topo da estrutura, a mesma continuará a ser plenamente protegida pelo método conforme pode-se constatar na Figura 34 abaixo apresentada.

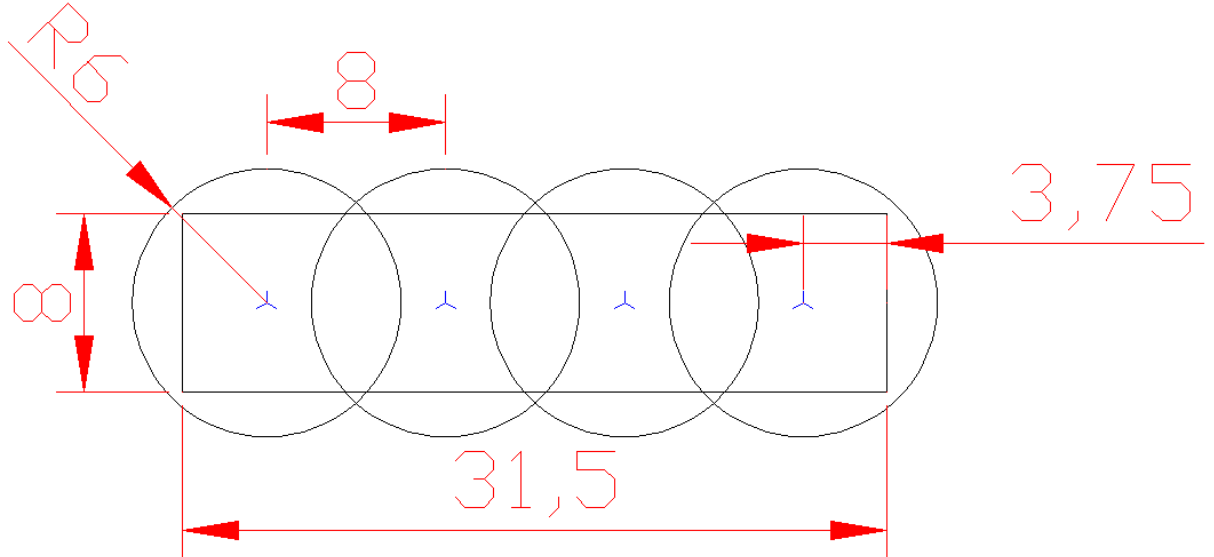


Figura 34 – Configuração do Método Franklin com 4 Capttores a 6 metros de Altura.

No entanto o presente método de proteção começa a apresentar falhas a partir do momento em que os capttores estão localizados a 5 metros de altura em relação ao topo da estrutura a ser protegida, as Figuras 35 e 36 apresentam respectivamente as configurações do método Franklin onde observa-se o surgimento de zonas desprotegidas pelo SPDA (em vermelho).

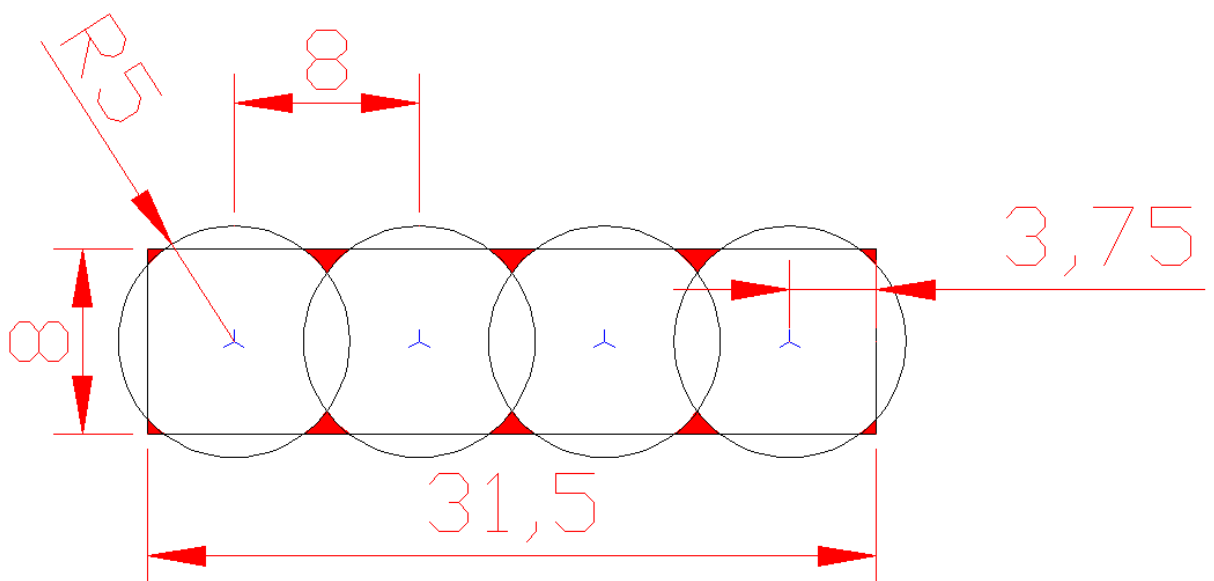


Figura 35 – Configuração do Método Franklin com 4 Capttores a 5 metros de Altura.

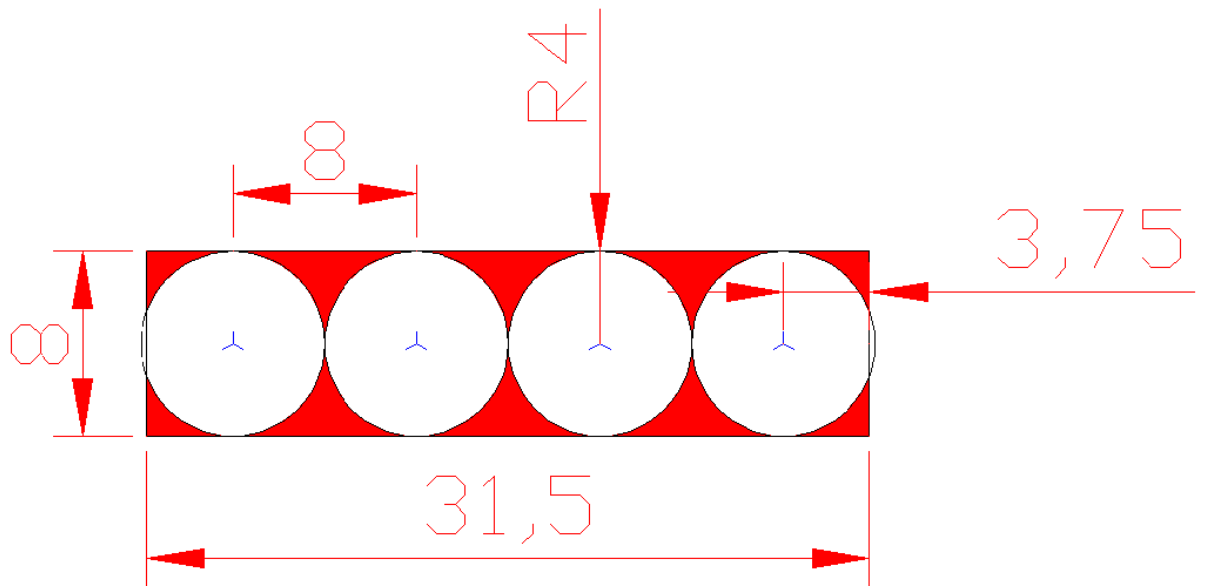


Figura 36 – Configuração do Método Franklin com 4 Captores a 4 metros de Altura.

O método de Franklin garante a proteção da referida estrutura caso se deseje utilizar três captadores ou dois captadores com ângulo de proteção de 45°; no entanto deve – se atentar para a altura mínima permitida para garantir a plena proteção da estrutura. As Figuras 37, 38 e 39 apresentam a configuração do método de Franklin com três captadores igualmente espaçados de 11 metros sendo os mesmos localizados nas respectivas alturas de 7, 6 e 5 metros em relação ao topo da estrutura, e as Figuras 40, 41 e 42 demonstram a configuração do método de Franklin com somente dois captadores igualmente espaçados de 16 metros um do outro apresentando as respectivas alturas de 10, 9 e 8 metros.

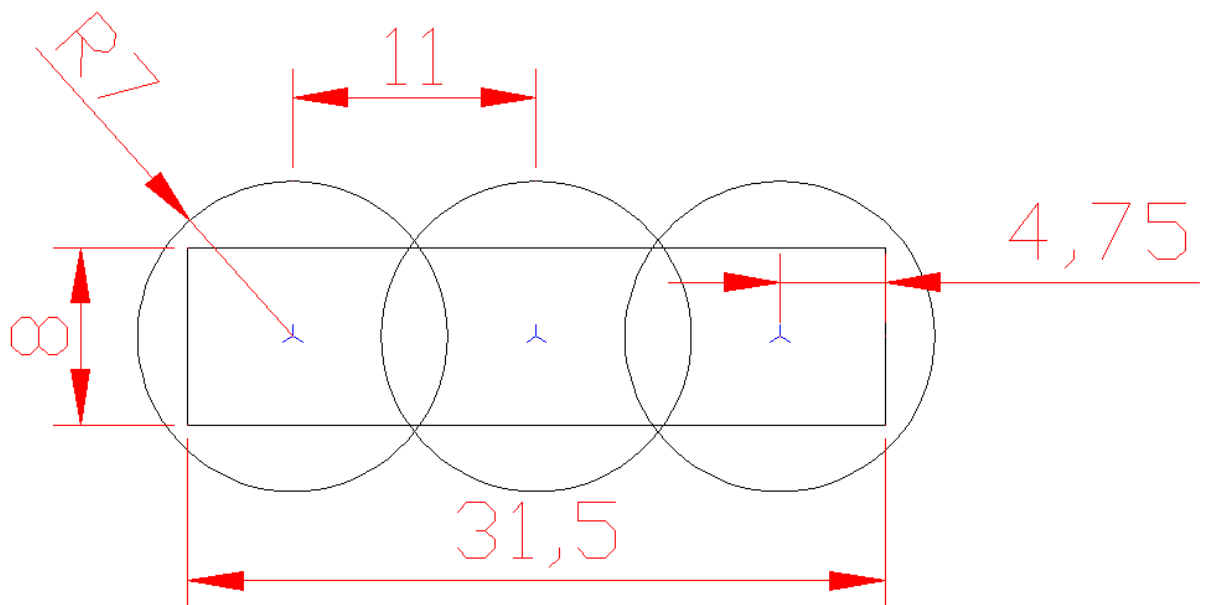


Figura 37 – Configuração do Método Franklin com 3 Captadores a 7 metros de Altura.

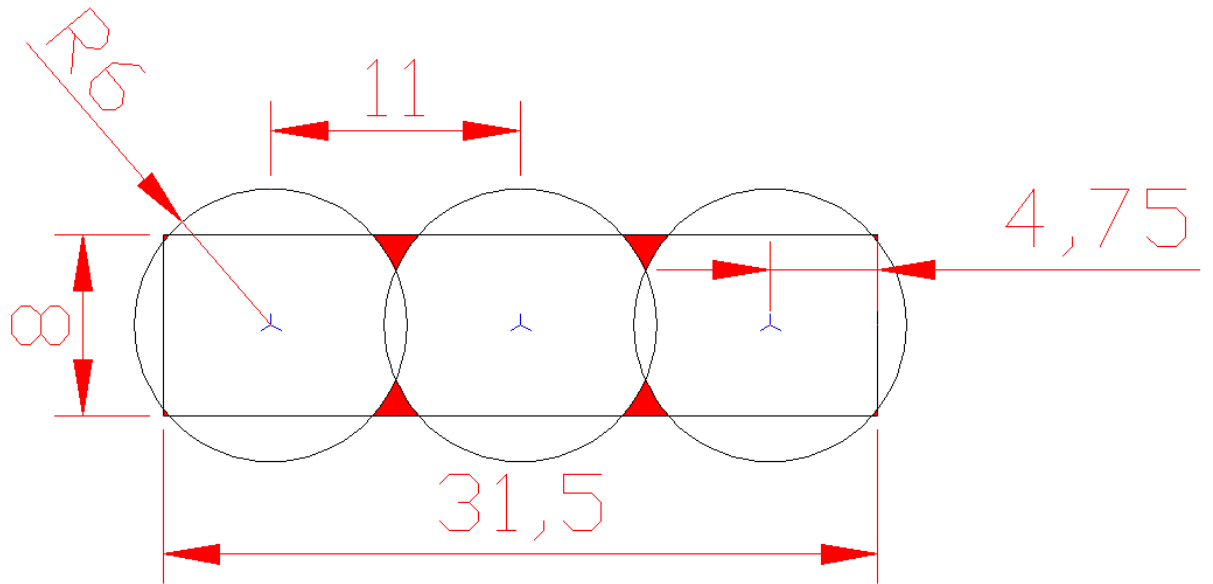


Figura 38 – Configuração do Método Franklin com 3 Captadores a 6 metros de Altura Evidenciando Áreas Desprotegidas pelo SPDA (em vermelho).

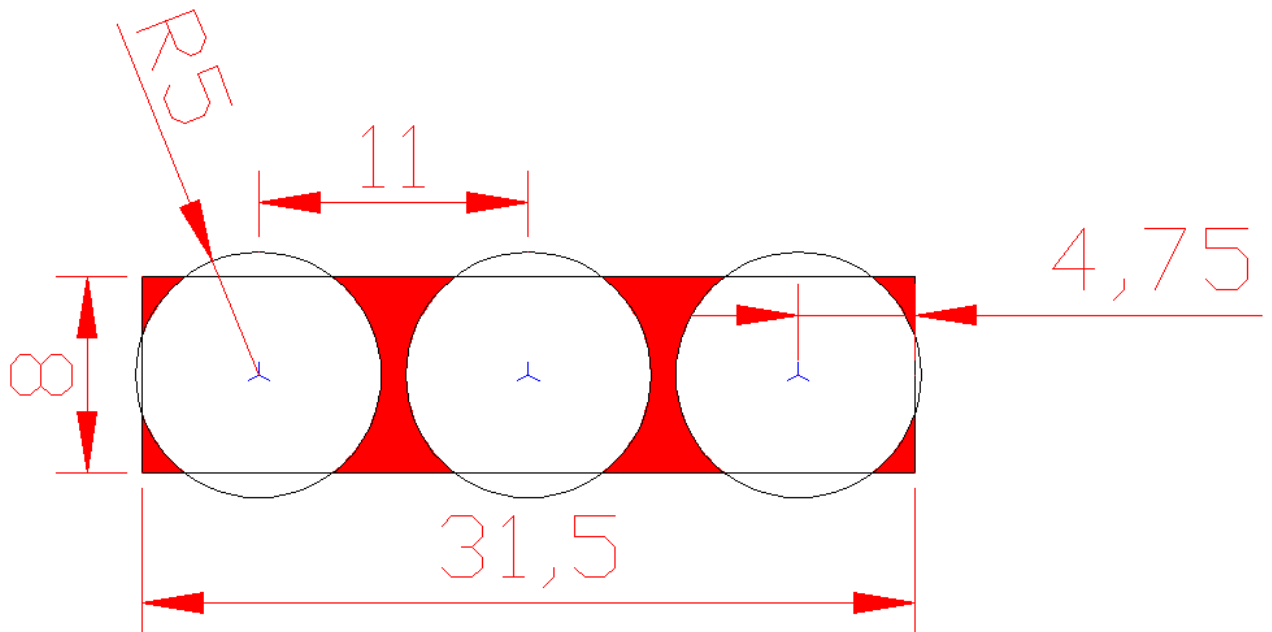


Figura 39 – Configuração do Método Franklin com 3 Captadores a 5 metros de Altura Evidenciando Áreas Desprotegidas pelo SPDA (em vermelho).

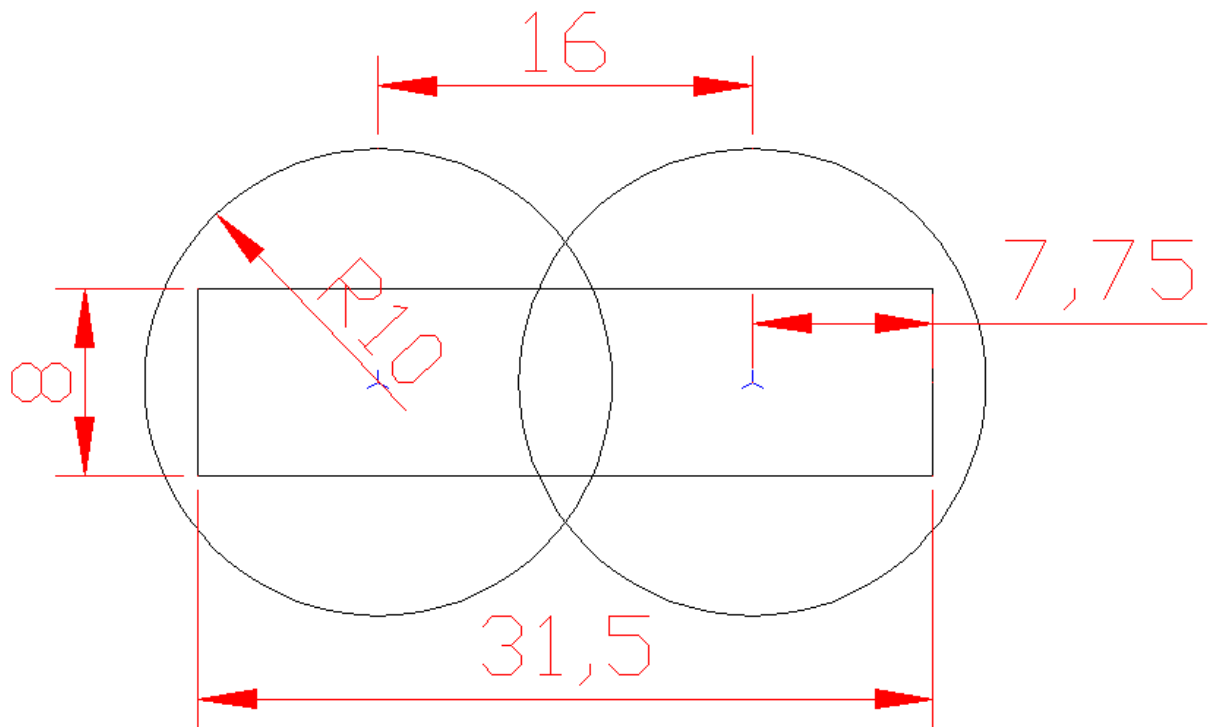


Figura 40 – Configuração do Método Franklin com 2 Captores a 10 metros de Altura.

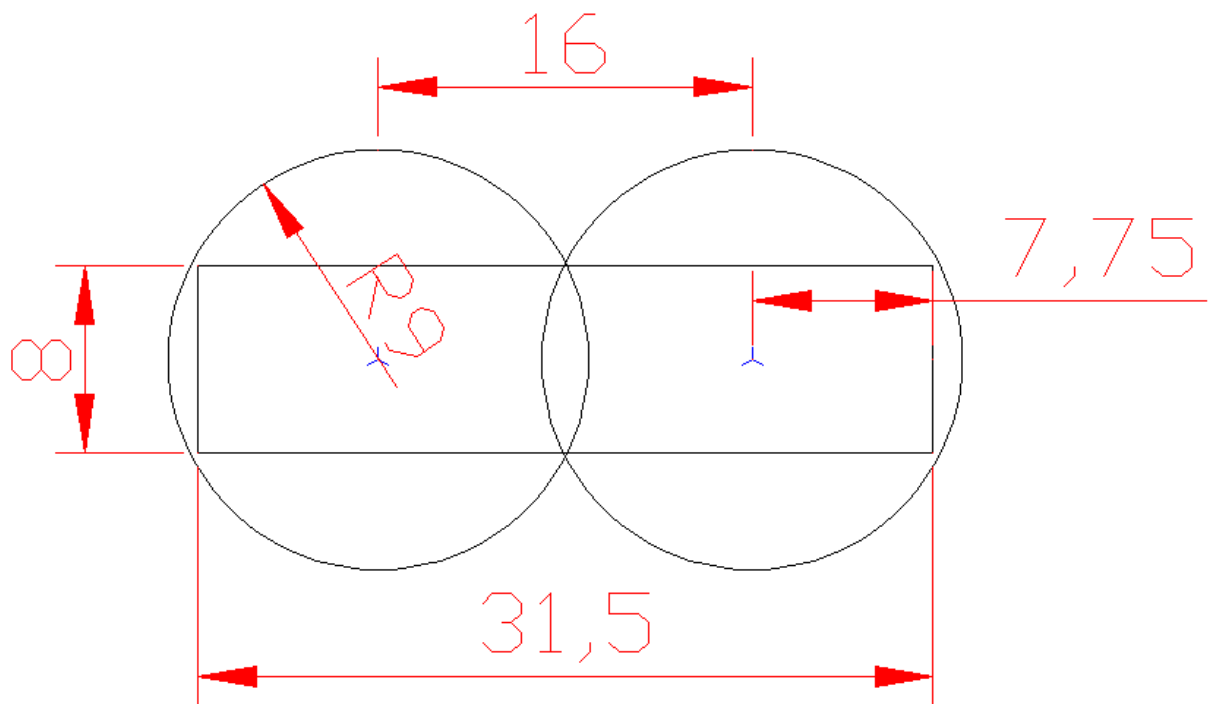


Figura 41 – Configuração do Método Franklin com 2 Captores a 9 metros de Altura.

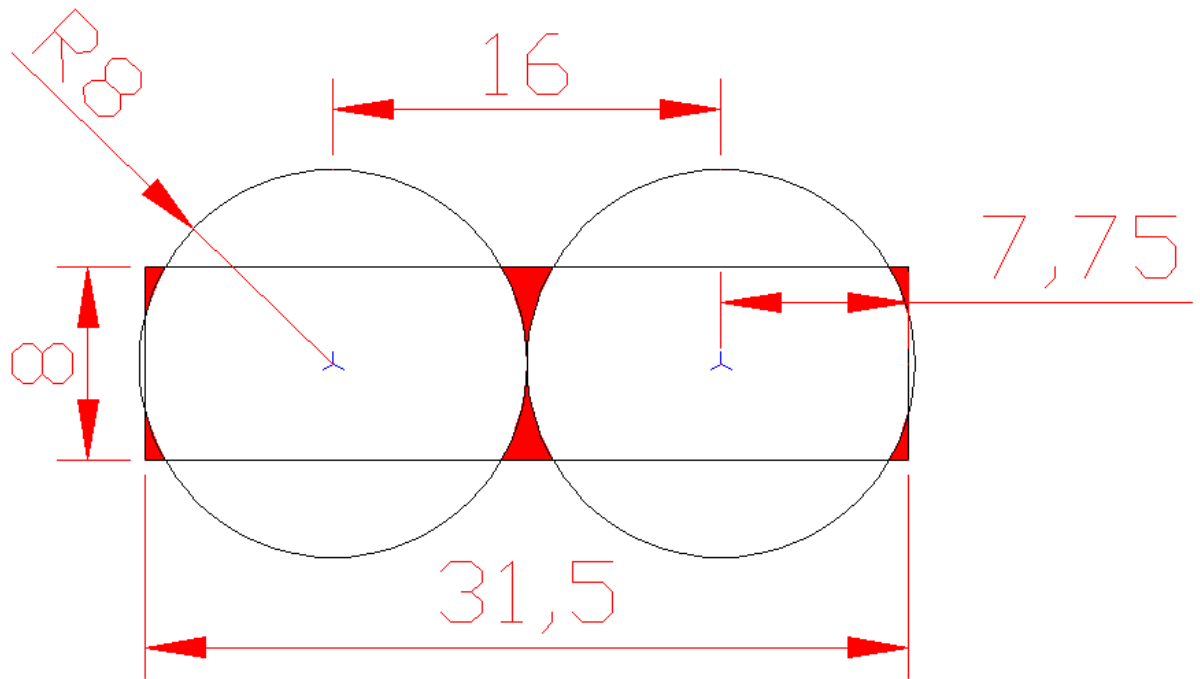


Figura 42 – Configuração do Método Franklin com 2 Captores a 8 metros de Altura Evidenciando Áreas Desprotegidas pelo SPDA (em vermelho).

6.2 ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO FARADAY

Conforme explicita Visacro (2005) para que se possa implementar um SPDA de acordo com o método de Faraday deve – se atentar para o fato de que o mesmo exige um revestimento de todas as faces da estrutura a se proteger com condutores formando uma série de reticulados. Caso não seja possível fazer este tipo de revestimento em uma das faces da estrutura a ser protegida o método é passível de falha. Levando-se em consideração o fato explicitado anteriormente pelo autor bem como a configuração física observada nas edificações do conjunto habitacional Taboquinha, nota – se que a implementação do referido método não pode ser efetuada no presente conjunto habitacional. Na figura abaixo é apresentado o aspecto da face frontal das edificações do conjunto habitacional Taboquinha.

Conforme pode-se observar claramente não é possível fazer o revestimento da porção frontal da edificação em virtude da mesma apresentar ao longo de sua superfície as janelas das residências, caixas de ar-condicionado, registros de água, grades das janelas e portões de ferro, pois conforme destaca a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) os condutores de descida devem estar afastados de portões, janelas, portas e qualquer outra abertura a uma distância mínima de 0,5 metros, fato este que impossibilita a instalação do presente método no conjunto habitacional Taboquinha.



Figura 43 – Aspecto Arquitetônico da Fachada do Conjunto Habitacional.
Fonte: Melo (2014).



Figura 44 – Destaque dos Elementos da Fachada do Conjunto Habitacional.
Fonte: Melo (2014).

6.3 ANÁLISE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO ELETROGEOMÉTRICO

Para implementar o método eletrogeométrico deve-se determinar o raio da esfera fictícia com a finalidade de localizar os prováveis pontos de incidência de descargas atmosféricas na estrutura que se deseja proteger, conforme destaca a tabela 20 adaptada da norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) para uma estrutura com nível de proteção III deve-se considerar um esfera fictícia de raio igual a 45 metros. Os empreendimentos habitacionais do conjunto Taboquinha consistem em edificações de dois andares sendo construídos com uma distância de dois metros um do outro, por este motivo durante a aplicação do referido método deve-se levar em consideração esta peculiaridade. Ao aplicar-se o referido método pode-se observar os prováveis pontos de incidência de descargas atmosféricas nas edificações conforme a figura abaixo.

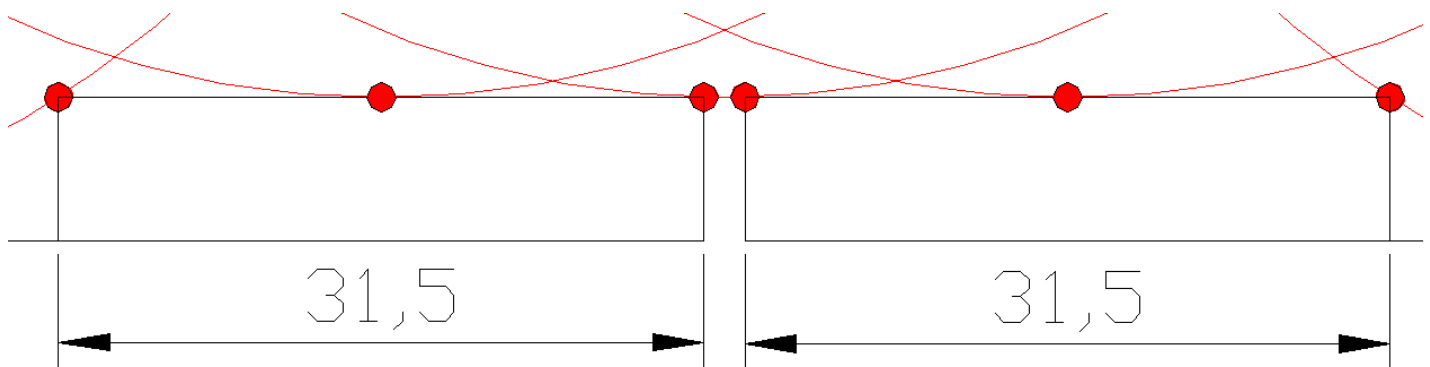


Figura 45 – Alguns pontos de Incidência de Raios nas Edificações do Conjunto Habitacional.

A partir da configuração evidenciada pela Figura 45 optou-se por fazer a instalação de captadores nas extremidades das edificações bem como em sua porção mediana com a finalidade de evitar a incidência de descargas atmosféricas, estando os mesmos instalados a uma altura de 3 metros em relação ao topo da estrutura, pois conforme explicita a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) os captadores de um SPDA que se encontram devidamente isolados da estrutura protegida devem estar localizados a uma distância superior a dois metros, desta forma, obteve-se a nova configuração apresentada pela Figura 46.

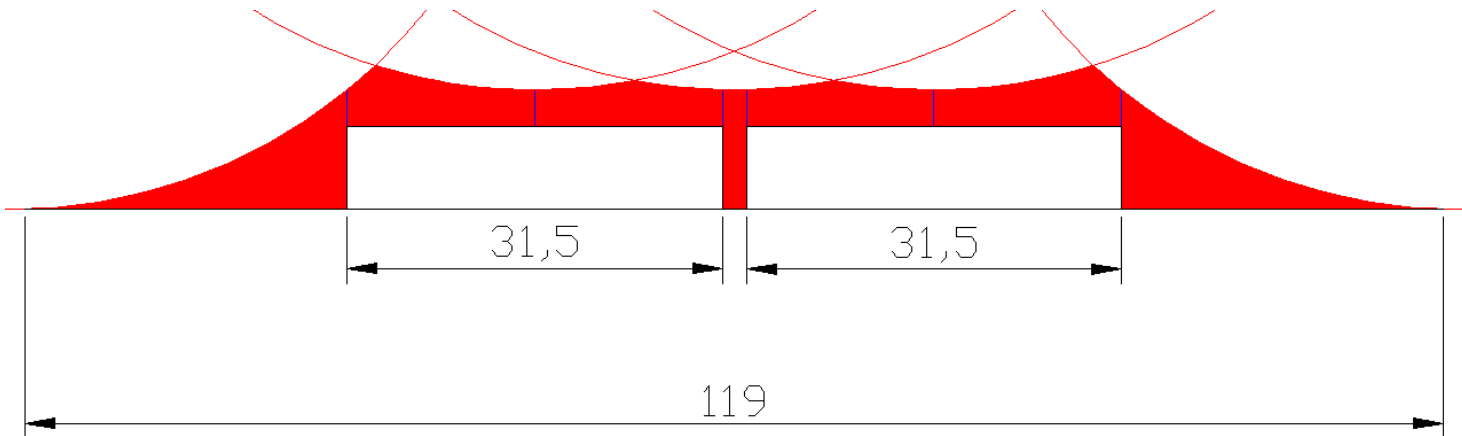


Figura 46 – Aspecto da Zona Protegida pelo Método Eletrogeométrico.

Conforme pode-se observar claramente na Figura 46 a instalação dos captosres produziu uma zona de proteção de extensão total de 119 metros ao redor das edificações do conjunto habitacional, garantindo desta forma a plena proteção das mesmas contra a incidência de descargas atmosféricas. Observa-se o mesmo fato caso se leve em consideração somente uma edificação isolada conforme destaca a figura abaixo.

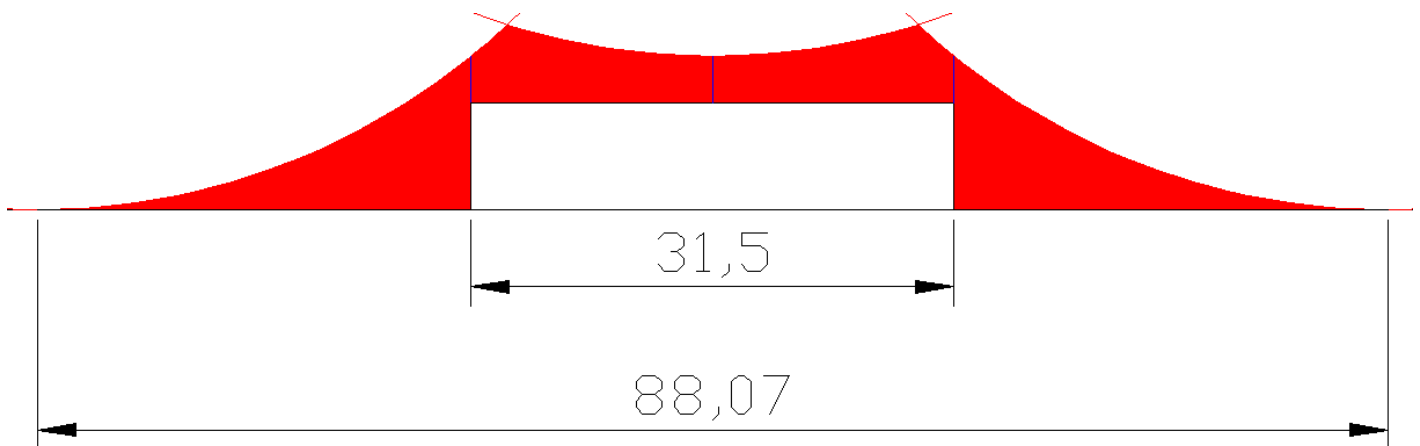


Figura 47 – Aspecto da Zona Protegida pelo Método Eletrogeométrico para uma Edificação.

Conforme explicita a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) os componentes de um SPDA devem apresentar configurações mínimas necessárias em termos de secção transversal bem como de espessura conforme destacam as tabelas 5 e 6 adaptadas da referida norma de proteção. A tabela abaixo explicita os valores a

serem adotados pelos componentes do SPDA a serem implementados nos empreendimentos habitacionais do conjunto habitacional Taboquinha.

COMPONENTE	SECÇÃO		
	TRANSVERSAL (mm ²)	ESPESSURA (mm)	MATERIAL
Captor	35	5	Cobre
Cabo de Descida	16	0,5	Cobre
Eletrodo de Aterramento	50	0,5	Cobre

Tabela 27 – Especificações Técnicas dos Componentes do SPDA do Conjunto Habitacional Taboquinha.

Optou-se por utilizar um captor de espessura de 5 milímetros devido ao fato da frequência de ocorrência de raios na região do empreendimento ser elevado fato este que pode vir a oferecer risco caso o captor não apresente resistência contra perfuração, bem como contra a ocorrência de pontos quentes em suas mediações, o que poderia oferecer risco para as armações de madeira utilizadas para sustentar o telhado da edificação bem como para as telhas que poderiam trincar devido ao extremo calor.

A norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) determina a presença de um determinado número de condutores de descida de acordo com o espaçamento médio admitido para cada nível de proteção, para o caso das edificações do presente empreendimento habitacional deve-se adotar um espaçamento máximo de 20 metros uns dos outros ao longo de todo o perímetro da edificação. Desta forma conclui-se que são necessários 4 cabos de descida, sendo que os mesmos devem estar distribuídos o mais uniforme possível ao longo do perímetro da edificação. Porém, deve-se atentar para o fato de que a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) não permite a proximidade dos cabos de descida com qualquer tipo de abertura, seja ela uma janela ou uma porta, fato este que impossibilita a instalação dos cabos de descida em sua porção frontal, bem como em sua porção dorsal devido existência de inúmeras entradas nas respectivas regiões (janelas, portões e caixas de ar-condicionado).

Como os eletrodos de aterramento precisam estar a uma distância mínima de 1 metro em relação as fundações da estrutura que se deseja proteger os mesmos devem ser instalados nas posições indicadas na figura abaixo de forma a obedecer os padrões da norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas).



Figura 48 – Prováveis Locais para Instalação dos Eletrodos de Aterramento (em vermelho).

Por sua vez os cabos de descida podem ser instalados no mesmo local que os eletrodos de aterramento (pontos em vermelho na Figura 48) ou nas extremidades da estrutura (pontos em azul na Figura 48), no entanto a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) explicita que o comprimento dos cabos de descida deve ser o menor possível de tal forma a oferecer o menor caminho em direção a malha de aterramento, desta forma optou-se por instalar os cabos de descida bem como os eletrodos de aterramento no ponto vermelho da Figura 48 que se encontra encostado na lateral da edificação, contribuindo desta forma para o aspecto estético do sistema de proteção, bem como para a proteção da conexão do cabo de descida com o eletrodo de aterramento contra a gradativa corrosão causada pelo contato com a água da chuva, aja vista que o mesmo se encontra sobre o telhado da edificação, lembrando-se que de acordo com a norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) deve ser previsto para os cabos de descida uma proteção contra choques mecânicos, sendo a mesma efetuada através da instalação de eletrodutos metálicos ou de PVC com altura mínima de 2,5 metros. Com relação aos fatores de ponderação adotados pela norma para o presente conjunto habitacional chama-se atenção para o valor de 0,3 adotado pela constante “C” pois conforme pode-se observar na tabela 13, não existe um fator de ponderação específico para apartamentos, além do mais a residência do cidadão de uma forma geral é considerada pela referida norma de proteção como sendo uma edificação destituída de valor patrimonial.

CONCLUSÕES

A partir das inúmeras análises expostas ao longo dos capítulos pôde-se concluir que o presente conjunto habitacional necessita de um adequado sistema de proteção contra descargas atmosféricas em virtude do mesmo estar localizado em um região dotada de elevada frequência de ocorrência de raios conforme exposto por Rocha et al. (1996), Sousa et al. (1999), Almeida et al. (2010) e Teixeira et al. (2011).

Dentre os métodos de proteção contra a incidência de descargas atmosféricas analisados o método de Franklin demonstrou que as edificações do presente conjunto habitacional podem ser devidamente protegidas através da instalação de 4, 3 ou 2 captosres em diferentes alturas, no entanto as alturas de instalação dos captosres do método Franklin são superiores em relação ao método eletrogeométrico, o que de certa forma demonstra a superioridade do método eletrogeométrico em relação ao de Franklin, visto que no método eletrogeométrico necessita-se apenas de três captosres instalados a uma altura de três metros em relação ao topo das edificações do conjunto habitacional, para que as mesmas estejam protegidas contra a incidência de descargas atmosféricas em suas mediações.

Outro fato que se pôde concluir através da análise do planejamento do SPDA do presente conjunto habitacional está diretamente relacionado as conclusões estabelecidas pela norma NBR 5419 (Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas) com relação a intensidade do nível ceráunico para a região em estudo bem como para os fatores de ponderação adotados para o presente empreendimento.

Pesquisas desenvolvidas por Dentel (2013) sobre a frequência de ocorrência de raios na região amazônica no período de 2008 a 2011 demonstraram que o índice ceráunico da região como um todo chega a ser superior a 200 dias/ano, valor este que não é abordado pela referida norma para a região em estudo; deve – se destacar também que os valores de índice ceráunico adotados pela mapa de curvas isoceráunicas da referida norma além de serem baseados em registros obtidos durante a década de setenta, são de difícil aplicação quando se pretende realizar estudos de ocorrência de raios com maior resolução em diferentes regiões do país. Para o caso da região metropolitana de Belém conforme explicita os dados da tabela 26, pôde-se concluir com base nos dados de ocorrência de raios provenientes das curvas isoceráunicas que a implementação do SPDA no referido conjunto habitacional pode ser obrigatória ou facultativa dependendo do valor de índice ceráunico atribuído para a região, fato este que pode comprometer a segurança de estruturas destituídas de SPDA devido a conclusões precipitadas adquiridas pelos dados de ocorrência de raios provenientes da referida norma.

REFERÊNCIAS

- ABNT – NBR 5419, **Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- ALMEIDA, A. C., ROCHA, B. R. P., SOUZA, J. R. S., MONTEIRO, J. H. A., SOUZA, W. A.; **Statistical Analysis of High Intensity Lightning Strokes Detected by SIPAM'S LDN over the Amazon Region. GROUND 2008 & 3d LPE**. Florianópolis, Brazil, 2008.
- ALMEIDA, A. C.; SOUZA, J. R. S.; SÁ, J. A. S.; MONTEIRO, J. H. A.; ROCHA, B. R. P.; PISSOLATO FILHO, J. A. **Características dos Raios Nuvem-Solo na Amazônia Oriental: Subsídios para Proteção de Sistemas Elétricos**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, 2010.
- ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. **Ligthning Parameters for Engineering Aplication**, Electra, n° 69, pp 65 – 101, March 1980.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Trad. Igeuz Caracelli. Bookman. Porto Alegre, 2001.
- ATLAS INTERNACIONAL DE NUVENS – OMM**. 2. Ed. Tradução por FERRÃO, R. C. P., Rio de Janeiro: DNMET, 1972, 68p.
- BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H. **Parameters of Lightning Flashes**, Electra, n° 41, p. 23 – 37, Jul. 1975.
- BOCCIPPIO, D. J.; CHRISTIAN, H. J. **Optical Detection of Lightning from Space**; Proceedings of ILDC, Tucson, Arizona, USA, Nov. 1998.
- BRASILEIRO, B. C.; ROCHA, B. R. P.; MELO, R. G. **Technical Analysis of the Needs for Protection System for Atmospheric Discharge for Individual Households at Community Taboquinha, Belém, PA**. International Conference on Grounding and Earthing. May 2014 Manaus. Brazil.
- CASTELLAN, G. W. **Físico – Química**; Tradução de Luiz Carlos Guimarães, Livros Técnicos e Científicos, v1. Rio de Janeiro, 1978.
- CASTRO, Carlos A. Nieto de. **Introdução à Teoria Cinética dos Gases**. Lisboa: Faculdade de Ciências de Lisboa, 1997.
- CHALMERS, J. A. 1967. **Atmospheric Eletricity**. 2nd edition, 515pp., New York: Pergamon Press.
- CHRISTIAN, H. J. BLAKESLEE, R. J.; GOODMAN, S. J. MACH, D. A. STEWART, M. F.; BUECHLER, D. E.; KOSHAK, W. J. HALL, J. M.; BOECK, W. L. DRISCOLL, K. T. BOCCIPPIO, D. J. **The Lightning Imaging Sensor**, in Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Gunterville, Alabama, pp. 746 – 749, June 1999.

- DENTEL, L. M. **Modelagem de Sistemas de Detecção de Raios na Amazônia**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, Pará, 2013.
- GISH, O. H.; WAIT, G. R. 1950. **Thunderstorms and the Earth's General Electrification**. J. Geophys. Res. 55: 473 – 84.
- GRINGEL, W., ROSEN, J. M., HOFFMAN, D. J. 1986. **Electrical Structure from 0 to 30 Km**. In the Earth's Electrical Environment, eds. E. P. Krider and R. G. Roble, pp. 166 – 82, Washington, DC: National Academy Press.
- HEIDLER, F. **Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP – Berechnung**. Proceedings of 18th ICLP, pp 63 – 66, Munich, Sept. 1985.
- HEWITT, C. N.; JACKSON, A. V. **Atmospheric Science for Environmental Scientists**. UK: Wiley – Blackwell, 2009.
- MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. LTC, 7ª Edição, Rio de Janeiro, 2007.
- MELO, R. G. **Riscos e Cuidados quanto as Descargas Elétricas em Programas de Habitação e Urbanização no Pará**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, Pará, 2014.
- MORALES, C. A. NEVES, J. R. ANSELMO, E. 2011: **Sferics Timing and Ranging Network – STARNET: Evaluation over South America**. Proceedings of the 14th International Conference on Atmospheric Electricity – ICAE, Rio de Janeiro, Brazil.
- OPARIN, A. I. 1938. **The Origin of Life on Earth**. New York: Macmillan (Translation from Russian; original published in Moscow in 1936).
- PIERCE, E. T. 1974. **Atmospheric Electricity – some themes**. Bull. Am. Meteor. Soc. 55: 1186 – 94.
- PINTO JUNIOR, Osmar. **A Arte da Guerra Contra os Raios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- PISSOLATO FILHO, J. **Desenvolvimento de Técnicas para Medição de Parâmetros de Correntes de Cargas Atmosféricas Artificiais**. 2002. (Relatório de pesquisa).
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A., **Ligthing Physics and Effects**, Cambridge University Press, 2003.
- REID, G. C. 1986. **Electrical Structure of the Middle Atmosphere**. In the Earth's Electrical Environment, eds. E. P. Krider and R. G. Roble, pp. 183 – 94, Washington, DC: national Academy Press.

ROCHA, B. R. P., SOUZA, J. R. S., COSTA, J. M. **Electric and Magnetic Fields from Lighting in Belem.** *Anais do II Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, pp. 55-58, Ouro Preto - MG, 1996.

SÁ, J. A. S.; ROCHA, B. R. P.; PISSOLATO FILHO, J.; MONTEIRO, J. H. A.; FROTA, W. M.; ALMEIDA, A. C.; SOUZA, J. R. S. **On Cloud – to – Ground Lightning Peak Currents for the Amazon Region Energy Planning.** Proceedings of the International Lightning Protection Association Symposium, 24th – 25th November, Valencia, Spain, 2011.

SÁ, J. A. **Descargas Atmosféricas na Amazônia: Reconhecimento e Análise dos Parâmetros de Interesse para o Planejamento Estratégico dos Sistemas de Proteção de Linhas de Transmissão.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, Pará, 2011.

SILVA, Mário Adelmo Varejão. **Meteorologia e Climatologia.** 2.ed. Recife: Versão Digital 2, 2006.

SOUZA, J. R. S.; ROCHA, B. R. P.; CARRERA, G. T. **CG-Lightning Observation (and applications) Around Belém During the 1995-1998 Period.** In: *Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection*, Vol. 1, pp. 17-21, São Paulo - SP, 1999.

SOUZA, J. R. S. Raios: Relâmpagos e Trovões. In: Gorayeb, I.S. (Org.). *Revista Amazônia II*. 1ed. Belém: RM GRAPH Ltda, 2010, v. 2, p. 85-87.

TEIXEIRA, V. A.; MOTA, V. G.; SOUZA, J. R. S.; RIBEIRO, W. M. N. **Lightning Density Distribution over Eastern Amazonia, from 10-years Data of Observations by TRMM – LIS.** XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil

TIPLER, P. A. **Física.** Rio de Janeiro: Guanabara dois, v.1. 1978. 514p.

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia Básica e Aplicações.** Viçosa – Minas Gerais: Imprensa Universitária, 1991.

VISACRO, S., SCHROEDER, M. A. O., SOARES, Jr, A., CHERCHIGLIA, L. C. L., SOUSA, V. J. **Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station,** *Journal on Geophysical Research*, v. 109, N. D01105, 1 – 11, 2004.

VISACRO FILHO, Silvério. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia.** São Paulo: Artliber Editora, 2005.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey.** USA: Academic Press, 2005.

WILSON, C. T. R. **Investigation on Lightning Discharges and on the Electric Field of Thunderstorms.** *Philosophic Transactions of Royal Society of London*, n.221, 1920.