

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

**ESTIMAÇÃO DO LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA
UTILIZANDO O MÉTODO TOA E TEMPOS ARTIFICIAIS DE DETECÇÃO DOS
SENSORES.**

BRUNO NAZARENO PRAZERES DE MIRANDA

DM 09/2016

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**

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

**ESTIMAÇÃO DO LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA
UTILIZANDO O MÉTODO TOA E TEMPOS ARTIFICIAIS DE DETECÇÃO DOS
SENSORES.**

BRUNO NAZARENO PRAZERES DE MIRANDA

DM 09/2016

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**

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

BRUNO NAZARENO PRAZERES DE MIRANDA

**ESTIMAÇÃO DO LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA
UTILIZANDO O MÉTODO TOA E TEMPOS ARTIFICIAIS DE DETECÇÃO DOS
SENSORES.**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de energia

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Miranda, Bruno Nazareno Prazeres de Miranda,
1989-

Estimação do local de incidência da descarga atmosférica utilizando o método toa e tempos artificiais de detecção dos sensores. / Bruno Nazareno Prazeres de Miranda. - 2016.

Orientador: Brigida Ramati Pereira da Rocha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2016.

1. Descargas elétricas - localização - testes. 2. Raios - propagação. 3. Eletricidade atmosférica. 4. Detectores. I. Título.

CDD 23. ed. 551.5632

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

**"ESTIMAÇÃO DO LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA UTILIZANDO
O MÉTODO TOA E TEMPOS ARTIFICIAIS DE DETECÇÃO DOS SENSORES"**

AUTOR: BRUNO NAZARENO PRAZERES DE MIRANDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

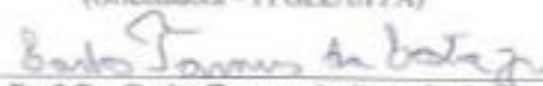
APROVADA EM: 22/03/2016

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Brígida Ramati Pereira da Rocha

(Orientadora - PPGEE/UFPA)




Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior

(Avaliador Interno - PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Valquíria Gusmão Macedo

(Avaliadora Externa ao Programa - FEE/UFPA)



Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá

(Avaliador Externo - UEPA)

VISTO:

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

AGRADECIMENTOS

É impossível avaliar quantas pessoas contribuíram na realização deste trabalho, mas agradeço por todos os incontáveis. A Deus por ter me dado força e sabedoria para enfrentar essa jornada que é a vida. Á Professora Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha, orientadora deste trabalho, por ter compartilhado comigo seus conhecimentos, conselhos e experiências no momento em que mais precisei.

A minha família por ter me dado amor direta e indiretamente, servindo de incentivo para tornar qualquer tipo de esforço e problema apenas um obstáculo capaz de ser ultrapassado. Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições neste trabalho. Aos professores do PPGEE, pela dedicação e conhecimentos adquiridos, que servirão de direção para tornar essa excursão intelectual mais proveitosa possível.

A minha futura esposa Bruna Viviane, que sempre ficava chateada comigo por não estar presente, pois estava na empreitada deste trabalho e a minha pretinha Maitê que hoje deve ter poucos dias de vida, mas que brilha muito mais que um tal de sol.

Agradeço ao meu amigo Jânio Flexa, que serviu de exemplo ao mostrar que a idade simplesmente é um estado de espírito.

SUMÁRIO

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESE	2
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPITULO 2 - ASPECTOS FÍSICOS DE PROPAGAÇÃO DOS RAIOS E A ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA ...	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DA TERRA.....	8
2.3 FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	14
2.4 TIPOLOGIA DOS RAIOS	22
2.5 IMPACTOS NO SISTEMA ELÉTRICO	24
CAPITULO 3 - REDES DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	29
3.1 INTRODUÇÃO.....	29
3.2 CAMPO ELETRICO FIELD MILL	29
3.3 SISTEMAS DE DIREÇÃO (MAGNETIC DIRECTION FINDERS – MDF).....	31
3.4 SISTEMA DE TEMPO DE CHEGADA (TIME OF ARRIVAL – TOA)	33
3.5 SISTEMA DE RADIO VHF (VERY HIGH FREQUENCY)	35
3.5.1 Linhas de base grande (Time Of Arrival - TOA)	35
3.6 SISTEMAS DE DETECÇÃO EM VLF(ATD).....	36
3.7 SISTEMAS ÓTICOS DE LOCALIZAÇÃO	38
3.7.1 Operational Linescan System – OLS.....	39
3.7.2 Optical Transiente Detector – OTD.....	40
3.7.3 Lightning Imaging Sensor – LIS	42
3.7.4 Fast On-orbit Recording of Transient Events – FORTE	43
CAPITULO 4 - REDES E SENSORES NA REGIÃO AMAZÔNICA	45
4.1 INTRODUÇÃO.....	45
4.2 LIGHTNING LOCATION AND PROTECTION – LLP	29
4.2.1 Funcionamento do Sensor	31
4.3 GLOBAL ATMOSPHERIC	33
4.4 STARNET.....	35
4.5 FUTURO DAS MEDIÇÕES.....	35

CAPITULO 5 – ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO DADOS TEMPORAIS	54
5.1 INTRODUÇÃO.....	54
5.2 RUÍDOS.....	54
5.2.1 Ruídos causados por campo magnético.....	57
5.2.2 Singularidade dos ruídos	58
5.2.2.1 Latência	58
5.2.2.2 Diafonia ou Crosstalk	59
5.2.2.3 Atenuação.....	59
5.3 GEOPROCESSAMENTO	60
5.3.1 Breve histórico do geoprocessamento	61
5.3.1.1 Evolução internacional	61
5.3.1.2 Desenvolvimento no Brasil	62
5.4 HIPÉRBOLES.....	64
5.5 ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO A PARTIR DO MÉTODO TOA	65
5.6 REGIÃO DE ESTUDO	73
5.7 LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES PARA ESTUDO	73
CAPITULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
1º SIMULAÇÃO: Adição de sensores a rede.....	81
2º SIMULAÇÃO: Adição do ruído	85
3º SIMULAÇÃO: Determinação do tempo de localização	88
4º SIMULAÇÃO: Tempos idênticos de detecção	95
CONCLUSÃO	100
TRABALHOS FUTUROS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração do experimento de Benjamin Franklin.	6
Figura 2. Ilustração da atmosfera terrestre.	7
Figura 3. Ilustração de uma nuvem cumulonimbus.	8
Figura 4. Raio provocou incêndio em usina em Ourinhos, no interior de São Paulo.	9
Figura 5. Espaço de ressonância de Schumann	10
Figura 6. Espectrograma dos valores da ressonância de Schumann	11
Figura 7. Circuito Elétrico DC.	12
Figura 8. Interações de LEP's entre a ionosfera e os cinturões de radiação mostrando um possível trajeto de propagação das ondas de um whistler.	14
Figura 9. Nuvens cumulonimbus largamente espalhadas.	16
Figura 10. Nuvens cúmulos em estágio avançado de crescimento	17
Figura 11. Nuvens cúmulos em estágio maduro	18
Figura 12. Processo indutivo de separação de cargas dentro das nuvens de tempestades	20
Figura 13. Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade	21
Figura 14. Modelo das linhas de campo elétrico na atmosfera devido aos centros principais de carga contidas numa nuvem de tempestade	22
Figura 15. Tipos de raios no céu: (a) entre-nuvens (EN); (b) intra-nuvem (IN).	23
Figura 16. Tipos de raios que envolvem o solo: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.	24
Figura 17. Diagrama esquemático de um field mill	29
Figura 18. Field Mill de cilindro seccionado	30
Figura 19. Variação do campo elétrico em Benevides-PA	31
Figura 20. Antenas loop cruzadas	32
Figura 21. Sensor IMPACT	32
Figura 22. Diagrama que representa as hipérbolas formadas pela diferença de tempo de pares de estações.	34
Figura 23. Sensor <i>Lightning Position and Tracking System</i> (LPATS)	34
Figura 24. Distribuição de descargas elétricas observadas pelo LDAR	36
Figura 25. (a) série temporal do campo elétrico vertical observado por dois receptores de rádio VLF; (b) definição de uma ATD.	38
Figura 26. Distribuição de descargas atmosféricas observadas pelo OLS referente ao período de 12 meses para 1989.	39
Figura 27. Operational Linescan System – OLS lançado a bordo do Titan 2.	40

Figura 28. Distribuição de descargas atmosféricas observadas pelo OTD referente ao período em janeiro/dezembro de 1999.....	41
Figura 29. Optical Transient Detector – OTD a bordo do satélite microlab.	41
Figura 30. Distribuição de descargas anual observadas pelo LIS para 2004.....	42
Figura 31. Lightning Imaging Sensor – LIS a bordo do satélite TRMM	43
Figura 32. Fast On-orbit Recording of Transient Events – FORTE a bordo do satélite PegasusXL ...	44
Figura 33. Sensor LLP Modelo 430 TSS	46
Figura 34. Operação Básica do sensor.....	47
Figura 35. Estrutura interna do sensor e seus principais componentes.	48
Figura 36. Sensor LPATS-IV.....	49
Figura 37. Funcionamento de uma rede de detecção utilizando sensores LPATS-IV.....	50
Figura 38. Funcionamento da rede do SIPAM	51
Figura 39. Localização dos sensores LPATS-IV pertencentes a rede do SIPAM.	52
Figura 40. Localização dos sensores da STANET no Brasil.....	53
Figura 41. Diagrama de blocos da antena e receptor	53
Figura 42. Mostra o modelo de um ruído acoplado a um sinal a partir de capacitâncias parasitas. .	57
Figura 43. Curva - atenuação pela frequência do cobre e do aço em 02 espessuras diferentes	58
Figura 44. Passos para se obter um geoprocessamento adequado as características desejadas	62
Figura 45. Hipérbole com lugar geométrico no plano: $ d_1 - d_2 = 2a$	65
Figura 46. Construção de um sistema de coordenadas	65
Figura 47. Equação reduzida para hipérbole; eixo real está sobre o eixo X	66
Figura 48. Equação reduzida para hipérbole; eixo real está sobre o eixo Y	66
Figura 49. Método das hipérbolas para detecção de descargas atmosféricas	68
Figura 50. Localização dos sensores com suas longitudes e latitudes	69
Figura 51. Ilustra os sensores no plano cartesiano	70
Figura 52. Locais de interseção de hipérbolas	71
Figura 53. Local de incidência da descarga atmosférica	72
Figura 54. Local de incidência do raio	72
Figura 55. Passo a passo do algoritmo TOA	73
Figura 56. Localização geográfica dos cinco sensores da rede	75
Figura 57. Sensor-1, long.: -48.462252, lat.: -1.409216, Av. Júlio César; Souza	76
Figura 58. Sensor-2, long.: -48.450520, lat.: -1.473810, Rua Augusto Correa; Guamá	76
Figura 59. Sensor-3, long.: -48.401136, lat.: -1.428246, Rua Fazenda	76
Figura 60. Sensor-4, long.: -48.505694, lat.: -1.459877, Tv. Gurupa com Rua São Boaventura; Cidade Velha	77
Figura 61. Sensor-5, long.: -48.415578, lat.: -1.358762, Tv. We trinta e quatro; coqueiro	77

Figura 62. Rede de detecção com cinco sensores em suas distancias mínimas entre eles de 71	
Figura 63. Máxima amplitude da rede, considerando a distância mínima dos sensores de 7km.....	79
Figura 64. Área de abrangência dos sensores para a distância máxima (400km) entre eles	80
Figura 65. Eficiência máxima da rede; 485205.00km ²	80
Figura 66. Ilustração da rede com três sensores.	81
Figura 67. Localização geográfica das descargas atmosféricas para uma rede com três sensores. ..	82
Figura 68. Localização das descargas atmosféricas com quatro sensores na rede.	83
Figura 69. Localização das descargas atmosféricas com cinco sensores na rede.	84
Figura 70. Local de incidência das descargas atmosféricas na presença do ruído interno.....	87
Figura 71. Localização geográfica de cem raios.	91
Figura 72. Ilustração da rede de detecção triangular.	95
Figura 73. Ilustração da rede de detecção quadrada.	96
Figura 74. Ilustração da rede de detecção pentagonal.....	96
Figura 75. Ilustração da rede de detecção triangular.	97
Figura 76. Ilustração da rede de detecção quadrada.....	97
Figura 77. Ilustração da rede de detecção pentagonal.....	97

RESUMO

Ao longo dos anos, os relâmpagos constituíram o ponto central das pesquisas de diversas comunidades científicas e tecnológicas em todo mundo, sem dúvida pela sua natureza agressiva e devastadora, mas principalmente pelos prejuízos causados no setor elétrico, logo é necessário esclarecer, o que é e para que serve um Sistema de Localização de Tempestades (SLT). Este trabalho propõe demonstrar o funcionamento de um algoritmo utilizado em SLT que serve para localizar, em termos geográficos, descargas atmosféricas, utilizando os tempos de chegada dos sinais eletromagnéticos nos elementos sensores. Para elaboração deste trabalho foi utilizado o formato de dados gerados por sensores LPATS IV pertencentes a (REDE DO SIPAM) e estes dados foram gerados de forma artificial para utilização no algoritmo. Esta localização será baseada em uma sequência finitas de regras que utilizará como ferramenta, a interseção de futuras hipérbolas, resultantes da diferença dos tempos de chegada em cada sensor. O algoritmo é capaz de identificar o local de incidência da descarga atmosférica utilizando um simples sistema de três sensores. Cada par de sensores define duas hipérbolas, em virtude de sua parte positiva e negativa formando duas interseções. Para análise do resultado é considerado o ponto de cruzamento mais próximo ao sensor que identificou a perturbação com menor tempo. Um estudo sobre a eletricidade atmosférica, tipos de raios, emissão de ondas eletromagnéticas durante tempestades, tipos de sensores eletromagnéticos e redes de detecção de raios deram subsídio para o projeto do algoritmo desenvolvido

Palavras-chave: Descargas atmosféricas, TOA, Localização, Sensores, Algoritmos, Hipérbole e Raio.

ABSTRACT

Over the years, lightning were the central point of researches in various scientific communities around the world, no doubt for its aggressive and devastating nature, but mostly for damage caused in the electricity sector, so it is necessary to clarify what is and what it is for a Lightning Location System (LLS). This work proposes to demonstrate the operation of the algorithm utilized in LLS that is used to locate in geographical terms, lightning, using the arrival times of electromagnetic signals in the sensors. In order to prepare this paper it was used the data format generated by LPATS IV sensors belonging to Amazon Protection System (SIPAM). These data were generated in an artificial way for use in the algorithm tests. The lightning location will be based on a finite sequence rules that use the intersection of hyperbolas, resulting from the difference of arrival times at each sensor. The algorithm is able to identify the lightning location incidence using a system with three sensors. Each pair of sensors defines two hyperbole forming a total of six, because each hyperbole has a bright side and a negative side, so there will be two intersections of three hyperboles. For analysis of the results is considered the nearest crossing point to the sensor that identified the electromagnetic disturbance faster. Studies about atmospheric electricity, lightning types, electromagnetic radiation during storms, types of electromagnetic sensors and lightning detection networks have given the knowledge to develop the algorithm.

Keywords: atmospheric discharge. Lightning location. TOA. Localization. Sensors. Algorvithm. Hyperboles. lightning.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido sobre o “mundo das descargas atmosféricas” e apesar de um amplo e árduo estudo nesta área, pouco se sabe sobre como podemos prever uma descarga atmosférica. O Brasil, em função da sua localização geográfica e da sua extensão territorial, sofre uma grande incidência de descargas atmosféricas, que causam prejuízos à nossa sociedade, pois essas são responsáveis por cerca de 70% dos desligamentos das linhas de transmissão e de 30% a 60% dos desligamentos das redes de distribuição. A descarga atmosférica é um dos fenômenos da natureza que intriga muito o homem desde a antiguidade e devido ao seu poder, sempre foi vista como algo superior, sendo considerada por alguns como uma “ação de Deus”.

Em estudos sobre descargas atmosféricas existe uma imensa preocupação em conhecer o ambiente eletromagnético que envolve o planeta Terra. Este assunto, apesar de ter sido bastante estudado, só agora está sendo desbravado e melhor conhecido em função do uso de sensores apropriados, que possam detectar e quantificar os efeitos elétricos, além de servir de base para a geração de teorias, bem como explicação dos fenômenos subjacentes, auxiliando de forma primordial. Contudo, atualmente, não há no ambiente da eletricidade atmosférica equipamentos que possam prever uma descarga atmosférica com uma antecedência considerável. Neste sentido, os sensores de raios têm ajudado bastante na análise quantitativa e qualitativa das descargas atmosféricas, especificamente no processo de localização das dessas.

O conceito básico de localização está apoiado em técnicas de triangulações, trilaterações e multilaterações, a partir de um conjunto de pontos de localização perfeitamente conhecidos, sendo importante a distância entre eles. Neste trabalho, vamos analisar os tempos de chegada da propagação do sinal da descarga atmosférica para cada sensor, empregando o método TOA (*time of arrival*), posto que, uma vez conhecido o instante em que o sinal foi emitido, podemos calcular a distância através da equação de uma hipérbole, de forma que seremos capazes de saber com relativa precisão a localização do evento. O software, em virtude de sua flexibilidade, é capaz de ajustar os sensores geograficamente, visando a diminuição do erro geográfico do raio e a análise do comportamento dos resultados na presença do ruído.

Analisando o notório grau de relevância das descargas atmosféricas, exposto acima, o objetivo central é determinar com precisão o local de incidência do raio nuvem-terra, verificar

o comportamento e singularidades dos raios que ocorrem na região onde as descargas atmosféricas incidem, detectar com precisão o local geográfico da descarga na presença de ruídos, quais tipos de ruídos interferem significativamente na rede de detecção, quantificar o grau de performance da rede na ausência ou presença de ruídos, quando se adiciona mais sensores de detecção e qual a amplitude do erro encontrado na presença do ruído.

O objetivo desta pesquisa foi implementar e testar um algoritmo capaz de detectar a incidência da descarga atmosférica nuvem-solo na área que abrange os sensores, estes responsáveis por fornecer o tempo de detecção da descarga. O algoritmo será baseado no método TOA (*Time of arrival*), que serve de base para a maioria dos softwares de detecção geográfica.

O método experimental abordado nesta pesquisa é de alto grau de relevância para a região amazônica, visto que a tecnologia empregada para a construção do software não está disponível como referência em bibliografias. É um procedimento metodológico com uma estrutura qualitativa e quantitativa que envolveu: O embasamento teórico sobre descargas atmosféricas através de fontes bibliográficas, para uma pesquisa conceitual adequada; o estudo sobre o funcionamento de uma rede de detecção, por meio das suas referências bibliográficas; simulação e validação do software baseado no método TOA; análise dos dados obtidos com os testes realizados com o software, utilizando dados temporais artificiais; análise dos dados de localização obtidos com simulações realizadas com o algoritmo, analisando a robustez da rede; verificação do desempenho da rede na presença de ruídos.

No primeiro capítulo deste trabalho são apresentados os aspectos metodológicos, o objetivo e sua organização do presente estudo.

No segundo capítulo são abordados alguns conceitos sobre o ambiente eletromagnético da Terra, a formação das descargas atmosféricas, as características das descargas, a tipologia dos raios e o impacto das descargas nos sistemas elétricos.

O terceiro capítulo descreve o funcionamento e histórico dos sistemas de localização de tempestades, tipos de sistemas de localização, funcionamento dos sensores de campo elétrico e magnético, vantagens e desvantagens dos sensores espalhados pelo mundo e as redes mundiais de localização de tempestade.

No quarto capítulo são apresentados os sensores, a rede de localização de descargas instaladas no estado do Pará, abordando suas peculiaridades, o processo de funcionamento e seu elevado foco no estudo sobre o fenômeno na região Amazônica.

No quinto capítulo é anunciado o software, abordando uma visão geral sobre a hipérbole, ruídos, o algoritmo *Time Of Arrival* (TOA), localização e características dos sensores empregados.

O sexto capítulo revela a realização dos testes, os resultados obtidos com o software em funcionamento, a análise dos resultados e a validação do programa. Primeiramente, são abordados testes com dados temporais simulados na rede; em seguida, a presença do ruído se faz necessária para avaliar o grau de robustez da rede; depois, é relatada a análise da adição de sensores, visando determinar com maior precisão a localização da descarga e, por fim, a comparação dos resultados.

CAPITULO 2 - ASPECTOS FÍSICOS DE PROPAGAÇÃO DOS RAIOS E A ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, os relâmpagos constituíram o ponto central das pesquisas de diversas comunidades científicas e tecnológicas em todo o mundo, indubitavelmente, pela natureza agressiva e devastadora do fenômeno. Recentemente, este interesse tem crescido por parte dos especialistas devido, em grande parte, à instalação de sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas, os quais permitem estudos das características físicas, geográficas e sazonais dos raios, cobrindo grandes áreas continentais e, em particular, as regiões habitadas (ORVILLE,1994, 1).

De forma simplificada, a descarga atmosférica pode ser descrita como uma descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Trata-se de um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra (MESQUITA,2006, p.17).

A descarga atmosférica é um fenômeno que sempre existiu, fazendo parte, inclusive, da própria evolução e formação do planeta Terra. Quando se deu o processo de resfriamento do planeta, as tempestades eram mais abundantes e violentas, o que ao longo dos tempos começou a se estabilizar, mantendo-se assim, um equilíbrio natural. Porém, com as ações humanas sobre o meio ambiente, percebe-se que estão ocorrendo mudanças significativas neste equilíbrio natural. Neste contexto, as descargas atmosféricas, sempre foram associadas a deuses e divindades, ou seja, algo que ocorria devido à vontade dos deuses, existindo relatos nas literaturas grega e chinesa, bem como na própria Bíblia (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 61, de 29 de abril de 2004).

O estudo científico deste fenômeno, e assim o início da desmistificação do assunto, somente se iniciou com Benjamin Franklin, quando este efetuou a célebre experiência de içar uma “pipa” que estava presa a um fio condutor, durante uma tempestade, conforme mostra a

figura 1. Assim, a carga induzida na “pipa” deslocava-se ao longo do fio, provocando uma pequena descarga entre um condutor preso e a sua mão.

Cabe ressaltar que muitos morreram nos anos seguintes tentando reproduzir a experiência (AAKER,1998, p.20).

Figura 1. Ilustração do experimento de Benjamin Franklin.



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução nº 24 de 27 de janeiro de 2000 – Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras. Brasília, DF. Janeiro, 2000a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 20 Fev 2016.

2.2 AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DA TERRA.

Toda a energia necessária para a sobrevivência dos seres terrestres vem da estrela de quinta ordem, ou seja, o sol, com um fluxo de radiação eletromagnética e um fluxo de plasma de partículas ionizadas (vento solar). Não fosse a existência de um campo magnético interno próprio do planeta, esse escudo protetor não funcionaria e a Terra seria submetida a uma intensidade maior de radiação cósmica, podendo gerar apagões mais frequentes e interferir rotineiramente nas comunicações. Satélites e plataformas espaciais precisariam de proteção extra.

Apesar de permitir a entrada de energia, mesmo que controlada, propiciando a existência de camadas com características específicas como a ionosfera e suas interações, o campo magnético terrestre age como um escudo protetor contra os excessos do sol. Assim, esse ambiente é nossa vida e ao mesmo tempo torna-se nosso algoz.

Figura 2. Raio provocou incêndio em usina em Ourinhos, no interior de São Paulo.

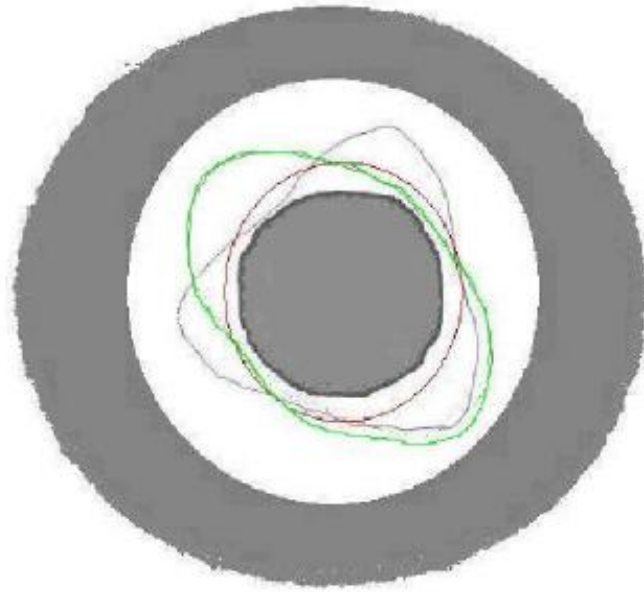


Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Evolução do Desempenho dos Indicadores de Qualidade. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=80>>. Acesso em: 10 Jan 2016.

Na atualidade, a ciência reconhece a existência de um circuito elétrico global, proposto por C.T.R. Wilson, em 1920, estabelecido entre componentes da região do escudo interior, interligando os fenômenos elétricos que ocorrem na ionosfera e magnetosfera com a superfície terrestre. Podemos dividir o circuito elétrico global em dois circuitos, um AC e outro DC.

O circuito AC da superfície terrestre é definido com uma frequência de 7,82 Hz, que ocorre na cavidade esférica formada entre a superfície da Terra e o início da ionosfera, alimentada pelas atividades globais de raios e denominada ressonância de “Shumann”, representado na Figura 3, que mostra graficamente a situação com três componentes harmônicas ilustradas.

Figura 3. Espaço de ressonância de Schumann

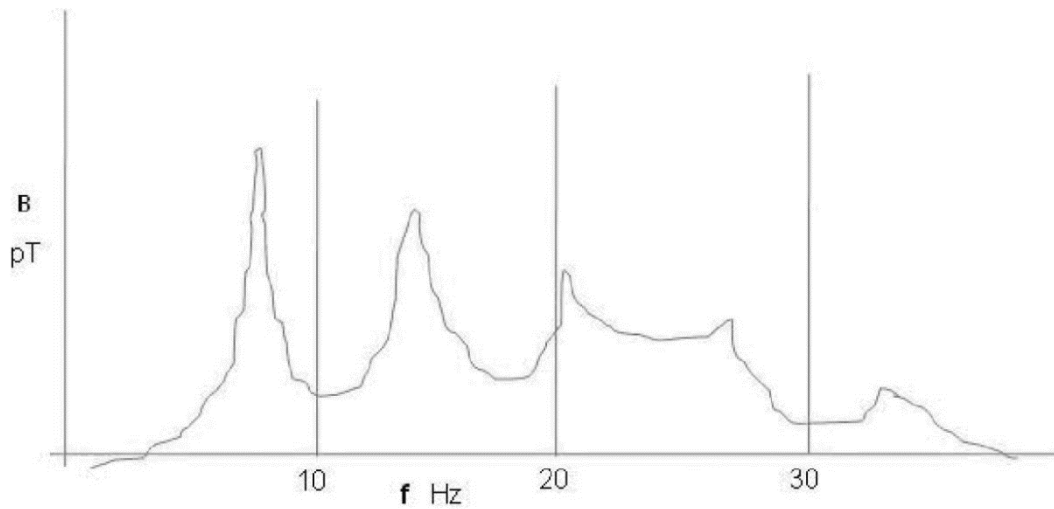


Fonte: ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A. J. 2015, p.23.

As oscilações, vistas na Figura 5, foram previstas por Winfred Otto Schumann, como uma análise para os seus alunos qual seria a frequência de ressonância por duas esferas concêntricas em uma cavidade. A partir destas oscilações, conseguiu-se detectar a base fundamental de oscilações posteriores, com maior intensidade e com comprimento de onda igual à circunferência da terra de frequência igual a 7,83 Hz, sendo que as próximas bases ocorrem com frequências: 14,3 Hz, 20,3 Hz, 27,3 Hz e 33,8 Hz que será visto na Figura 6

A Figura 4 mostra os picos de ressonância de Schumann, em várias estações pelo mundo, com valores de frequência (f) em Hertz e valores de densidade de fluxo magnético (B) em pico-tesla.

Figura 4. Espectrograma dos valores da ressonância de Schumann



Fonte: ANDRADE, M. T.; LANDINI, L. A. R.; PRADO Jr, F. A. A., 2001, p.24.

Estes valores de frequência de ressonância de Schumann podem ser calculados com o auxílio da seguinte fórmula:

$$f_n = \frac{c}{2a\pi} \sqrt{n(n-1)} \quad (1)$$

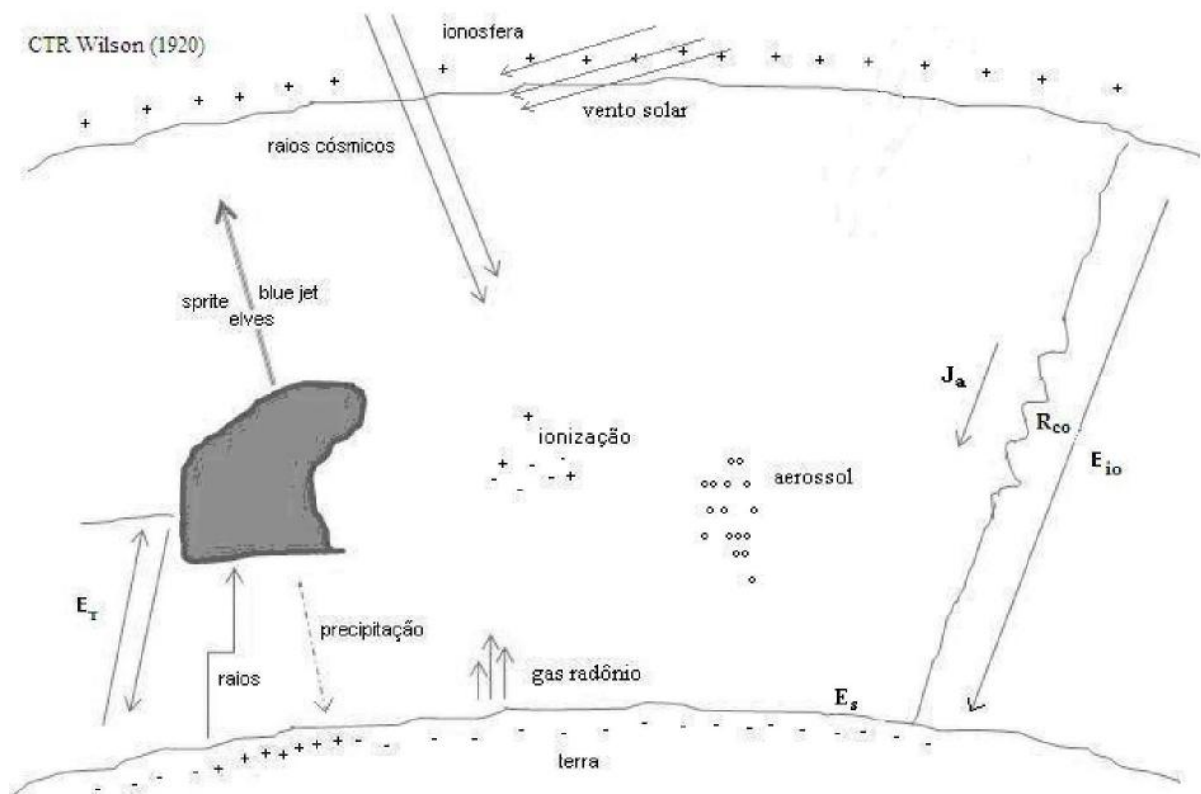
Esta fórmula é usada para uma cavidade ideal, onde c é a velocidade da luz, a é o raio da Terra e n é um número inteiro ($n=1,2,3\dots$), representando os modos de propagação. Estes valores registrados pela ressonância de Schumann podem estar sendo modulados (ou modulando) por fenômenos meteorológicos globais, que poderiam ser correlacionados, e servir como uma indicação para aspectos físicos, tais como a temperatura global da superfície terrestre, o vapor d'água da atmosfera e um parâmetro de grande influência no clima.

Ao contrário do circuito AC, o circuito DC compreende um ramo formado pelas fronteiras do início da ionosfera e a superfície da Terra em situações de bom tempo e tem uma condutividade que está na atmosfera vinda da irradiação cósmica (raios gama) e variam de 11 e 22 anos com o índice de atividade solar; na superfície o valor do campo elétrico gira em torno de 130V/m.

Com o tempo firme, esse ramo DC do circuito, nos permite inferir uma condutância líquida, G , e medir o fluxo de correntes da ordem de $1,5 \text{ pA/m}^2$, cuja integração por todas as áreas de tempo firme produz globalmente correntes de até $1,5 \text{ kA}$.

As tempestades e chuvas eletrificadas entre as nuvens e as superfícies da terra, compõem um dos ramos DC desse circuito global, onde a dinâmica é mais intensa e os portadores de cargas são gerados e separados por polaridade. O circuito elétrico DC será mostrado na Figura 5, com seus principais componentes.

Figura 5. Circuito Elétrico DC.



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES (ABRADEE). CODI-2.2.12.03.0 Análise das Conseqüências das Interrupções do Fornecimento de Energia Elétrica. 81 Comitê de Distribuição. Rio de Janeiro, 1996.

É nas nuvens de tempestades, principalmente do tipo Cumulonimbus, que ocorrem fenômenos elétricos mais conhecidos, como geração e separação de cargas elétricas, polarizando a nuvem onde as cargas positivas são acumuladas no topo e as negativas na base da nuvem; é claro que uma vez a nuvem polarizada pode haver atração de novos portadores de carga da região circunvizinha, reforçando a diferença de potencial.

Antes da descarga atmosférica há um processo de deposição de cargas, denominado *stepped leader*, que sai da nuvem, preparando o caminho e a deposição de portadores de carga para a descarga propriamente dita. Próximo à superfície da terra há um processo de conexão com *stremears*, que avançam da superfície da terra, iniciando a descarga. Se houver um segundo *stroke*, um *dart leader* é criado com subseqüentes descargas no mesmo canal. Estima-se que um valor em torno de 230 Coulomb são normalmente transferidos por descarga completa (SOBRENOME, ANO, p.39).

A descarga, o raio, teoricamente ocorre quando a rigidez dielétrica do ar é quebrada, seja no interior da nuvem ou entre a nuvem e a terra, que se polariza por influência das cargas na base da nuvem.

Não se sabe se essa quebra de dielétrico (se podemos denominá-lo com tal) é espontânea ou iniciada por eventos externos como raios cósmicos, segundo algumas teorias. A corrente de descarga emite pulsos de radiação eletromagnética em toda a gama do espectro, sendo conhecido como *sferics*, do inglês *radio atmospheric*.

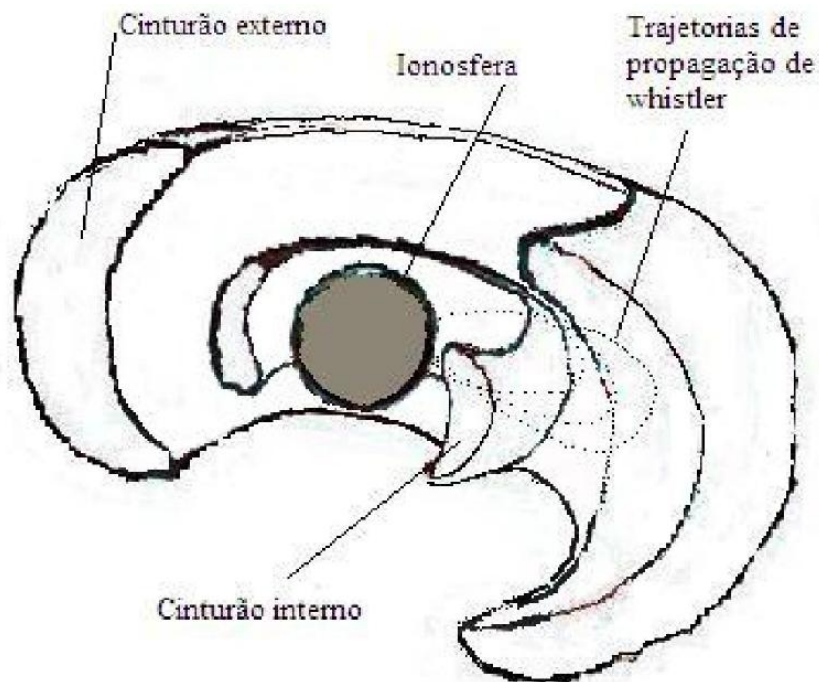
Contudo, não devemos analisar o meio ambiente eletromagnético do planeta Terra como se fosse comparado a dois circuitos elétricos. Há outros fenômenos que necessitam de mais atenção, como é o caso das emissões na faixa da irradiação visível, o chamado relâmpago, estudados por câmeras de alta velocidade, tanto em terra como a bordo de satélites. Ainda menos conhecida são as emissões de raios X e gama, que parecem estar associadas ao formato tortuoso ou fractal do canal de descarga e são rotulados com TGF, *Terrestrial Gamma Ray Flash*.

Outros fenômenos apresentam conexões com outras áreas de pesquisa como é o caso da precipitação de elétrons induzida por raios, LEP do Inglês *Lightning Elétron Precipitation*, que ocorre quando um *sferic* se propaga ao longo das linhas de força do campo magnético, quando passa a chamar-se *whistler*, atravessa a ionosfera e penetra nos cinturões de radiação onde interagem com elétrons de alta energia, reforçando a frente de onda original e são re-injetados na ionosfera, como simplificada mostra o desenho da Figura 8. Provavelmente, em função desses fenômenos, regiões de precipitação de elétrons aparecem acima de tempestades durante a duração destas. Pela análise desses processos podemos inferir dados sobre a estrutura e funcionamento da magnetosfera (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -ANEEL. Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001 – Estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia

elétrica em regime permanente. Brasília, DF. Novembro, 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 09 Nov 2004).

Conforme observado, as atividades elétricas estão intimamente ligadas aos fenômenos que ocorrem na magnetosfera, permitindo a inferência das estruturas dessas camadas. Não foi à toa que a descoberta da região batizada de **Plasmafera** e foi descoberta em 1919, por Barkhausen, através do estudo de detecção de radiações VLF, denominados *Whistles*, que são alterações de pulsos de uma descarga de raios que trafega pelos cinturões de irradiação ao longo das linhas de campo magnéticos do campo magnético terrestre.

Figura.6. Interações de LEP's entre a ionosfera e os cinturões de radiação mostrando um possível trajeto de propagação das ondas de um *whistler*.



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. ABNT, 2004, p.29).

2.3. FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

Antes de sabermos como se formam as descargas atmosféricas devemos analisar quem as forma, a saber, as nuvens. As nuvens formam-se a partir da condensação do vapor de água presente em correntes de ar que se elevam na atmosfera.

Quando partículas de ar, que contém vapor, são aquecidas próximas à superfície da terra, esta se expandirá e, como consequência, a densidade diminui e isso fará com que ela suba. À medida que o vapor sobe, encontra pequenas temperaturas, fazendo com que ele se condense. Essa condensação do vapor de água, também recebe influência de pequenas partículas existentes no ar, principalmente a poeira. O processo de condensação é acompanhado da liberação de calor, ou seja, do aumento da densidade, conhecido por calor latente que aquece uma parcela de ar, contribuindo assim para que ela suba. É a altura que determina quando a subida irá parar e à medida que esta aumenta, a temperatura varia. Pode acontecer de esse processo continuar até a tropopausa, onde o comportamento da temperatura muda de acordo com a altura, impedindo que o processo continue. É justamente aqui que o vapor condensado em gotas de água, juntamente com os diferentes tipos de partículas de gelo que se transformam, torna-se visível como sendo uma nuvem.

A maior parte dos relâmpagos ocorre em associação com nuvens de tempestades ou nuvens **Cumulonimbus**, embora outros tipos de nuvens, tais como estrato-cúmulos ou nimbo-estratos, também possam produzir relâmpagos ainda que raramente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA -ANEEL. Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000 – Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília, DF. Novembro, 2000b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 09 Nov 2015).

A maneira como as nuvens de tempestades se formam depende de muitos fatores, principalmente da umidade do ar e da instabilidade da atmosfera, que é a variação de temperatura com a altura. A temperatura na atmosfera, a partir do solo diminui até certa altura, denominada como tropopausa. A altura da tropopausa depende principalmente da latitude geográfica, próximo ao equador, que está situada cerca de 16 quilômetros de altura, em altas latitudes ela está por volta de 10 quilômetros. À medida que diminui a temperatura com a altura, mais estável fica a atmosfera. A atmosfera costuma ser considerada como instável quando a diminuição da temperatura, que está relacionada à altura, for igual ou maior do que 6 graus Celsius por quilômetro. Só que isso depende do aquecimento solar, das características do revelo e das frentes frias.

A nuvem de tempestade isolada tem uma duração média de uma a duas horas. Enquanto não há queda de água, ela passa por três fases diferentes, (desenvolvimento, maduro e dissipativo), e cada uma dessas fases tem uma duração de 20 a 40 minutos. Uma nuvem de tempestade isolada tem a sua constituição a partir da união de pequenas nuvens cúmulos, cujas nuvens brancas vão se aglomerando até 1 quilômetro de altura e com extensão horizontal de poucas centenas de metros.

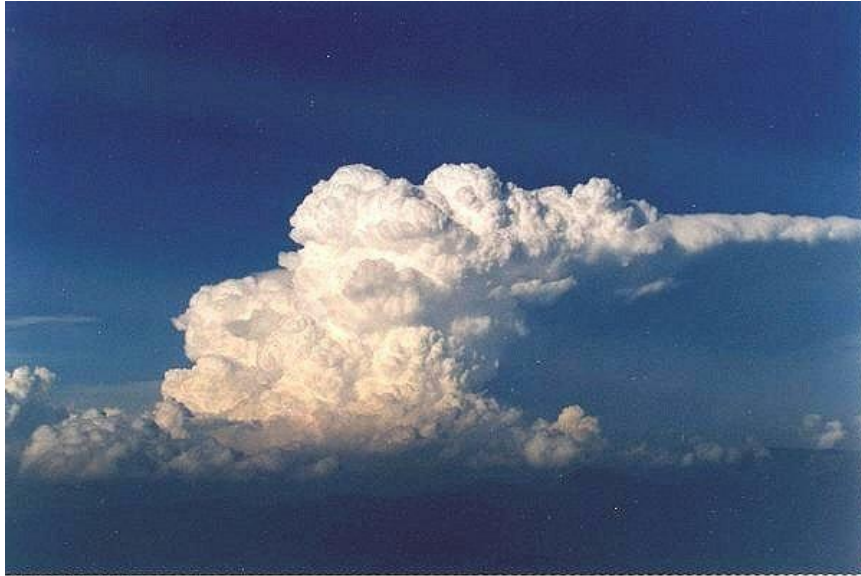
Essa aglomeração de centenas de nuvens cúmulos tem o seu desenvolvimento interrompido, não se transformando em uma nuvem de tempestade e desaparece sem apresentar relâmpagos. Mas se isso não acontece, ela continua o seu movimento ascendente ultrapassando o nível de congelamento, ou seja, até atingir a altura em que a temperatura é igual a zero grau Celsius. Temos, então, uma nuvem de tempestade em fase de desenvolvimento, conforme mostra a Figura 7.

Neste estágio a nuvem tem um diâmetro que varia entre 3 e 8 quilômetros e apresenta irregularidades devido às partículas de gelo. O ar que se movimenta dentro da nuvem é ascendente, arrastando gotículas de água e partículas de gelo para cima.

No estágio maduro (Figura 11), a nuvem de tempestade apresenta na parte inferior tanto movimentos ascendentes como descendentes. Os movimentos descendentes ocorrem devido às gotas de água e as das partículas de gelo que aumentam de tamanho não se sustentarem.

Neste estágio, os movimentos chegam a atingir velocidades de até 100 quilômetros por hora, e o diâmetro da nuvem é de 10 quilômetros, embora possa chegar a alguns casos até dezenas de quilômetros. A base da nuvem pode variar de 1 até 4 quilômetros, que depende da umidade, que costuma ser plana. O topo da nuvem pode atingir alturas de 8 a 20 quilômetros, alcançando e até mesmo ultrapassando em alguns casos a **Tropopausa**. O topo também pode apresentar uma forma de alargamento em relação ao diâmetro da nuvem, por causa da influência dos ventos.

Figura7. Nuvens cúmulos em estágio avançado de crescimento.



Fonte: BENETI, C. A. A.; JUSEVICIUS, M. A. R.; GIN, R. B. B.; PATSKO, C. H., 2005, p.6)

É neste estágio que costumam ocorrer chuvas intensas e a maioria dos relâmpagos. Os relâmpagos da nuvem para o solo são em geral precedidos por relâmpagos dentro da nuvem e podem ocorrer tanto antes quanto depois do início da chuva. Medidas também têm mostrado que, quanto mais alto for o topo da nuvem, maior será em geral a frequência de relâmpagos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Evolução do Desempenho dos Indicadores de Qualidade. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=80>>. Acesso em: 10 Jan 2016).

Figura 8. Nuvens cúmulos em estágio maduro.



Fonte: BENETI, C. A. A.; JUSEVICIUS, M. A. R.; GIN, R. B. B.; PATSKO, C. H., 2005, p.7).

No estágio dissipativo, o movimento do ar é quase que exclusivamente descendente, provocando um esfriamento da nuvem em relação a sua vizinhança. A altura do topo e o diâmetro da nuvem de tempestades neste estágio tendem a diminuir até que a nuvem seja completamente dissipada.

As alturas atingidas pelo topo das nuvens de tempestades nos diferentes estágios sofridos por ela dependem principalmente da latitude geográfica. Em regiões de médias para altas latitudes (acima de cerca de 50 graus), o topo da nuvem de tempestade dificilmente passa dos 8 quilômetros de altitude, já em regiões de médias para baixas latitudes (abaixo de 45 graus), o topo pode chegar a altitudes de 20 quilômetros ou até mais. Por volta de 50% dos casos o topo das nuvens de tempestades pode ultrapassar 15 quilômetros de altura. Como a estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade é bastante complexa, ainda não há consenso sobre o fator responsável pela eletrização das nuvens de tempestades. O que se sabe é que no interior da nuvem ocorrem processos microfísicos e macrofísicos (ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A. J. 2015, p.10).

Mesmo não havendo informações detalhadas, acredita-se que tanto dentro das nuvens isoladas quanto nas nuvens em grupo, a estrutura elétrica seja bem parecida. Com isso, as

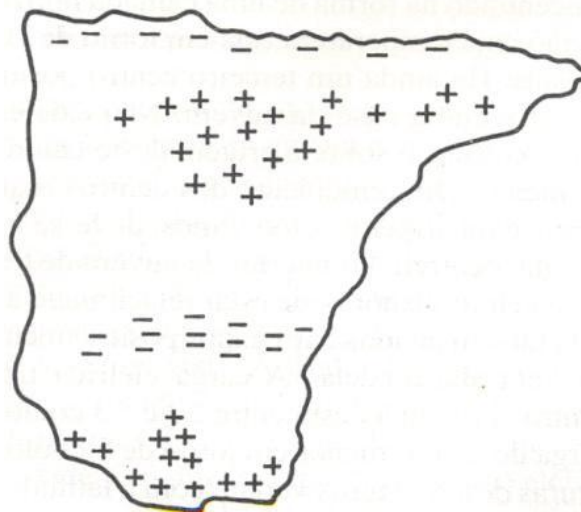
cargas que são produzidas no interior das nuvens são as grandes responsáveis pela origem dos relâmpagos, cargas essas que variam até no máximo duas centenas de coulombs.

Em termos macrofísicos, os principais processos estão relacionados com a gravidade e a convecção. O processo gravitacional assume que a força da gravidade influencia nas diferentes partículas de gelo de diversos tamanhos. Assim, partículas maiores tendem a permanecer na parte inferior da nuvem de tempestades, enquanto que as partículas menores tendem a permanecer na parte superior. Já no processo convectivo, as correntes de ar ascendentes e descendentes dentro das nuvens são responsáveis por transportar as partículas. São as correntes de ar que deixam as partículas menores suspensas na parte superior da nuvem. Acredita-se que ambos os processos tenham sua importância no transporte de cargas dentro das nuvens de tempestade.

Em termos microfísicos, o processo mais conhecido e, conseqüentemente, mais aceito é a teoria colisional. Esta teoria afirma que as colisões de partículas de gelo de diferentes tamanhos são responsáveis por haver transferências de cargas. Porém, não se sabe sobre a importância do campo elétrico e da temperatura ambiente na colisão. Se durante o processo de colisão o campo elétrico atmosférico tem um papel fundamental na separação de cargas por meio da polarização de partículas grandes (como o granizo), o processo é indutivo. Se o campo elétrico é atmosférico descendente, a colisão entre as partículas menores, como cristais de gelo, na parte inferior do granizo transferirá cargas positivas deste para os cristais, conforme ilustrado na figura 9.

Este processo foi o mais aceito durante muito tempo, mas tem sofrido sérias críticas nos últimos anos, devido a experimentos de laboratório indicarem que a intensidade do campo elétrico atmosférico não é o suficiente para que ele ocorra. Entre os processos não indutivos, o mais aceito é de natureza termoelétrica, onde afirma que a polaridade da carga transferida durante uma colisão vai depender da temperatura local. Se essa temperatura for maior que a temperatura de inversão de carga, que está por volta de -15 graus Celsius, o granizo irá transferir uma carga negativa para o cristal de gelo, caso contrário, transferirá uma carga positiva. No passado, vários processos foram sugeridos, entre eles que a separação de cargas ocorre devido ao tamanho das gotas de água em queda, ou ainda pode ocorrer durante a mudança de estado da água para o gelo. Outra sugestão assume que as cargas dentro das nuvens são geradas pela mera redistribuição das cargas contidas na atmosfera, sem a necessidade de considerar um processo microfísico, mas atualmente são menos aceitos.

Figura 9. Processo indutivo de separação de cargas dentro das nuvens de tempestades.



Fonte: BERGER, K.; ANDERSON, R.B.; KRÖNINGER, H.; PALVA, V. Parameters of lightning flashes. *Electra*, nº 41, p.23-37, July, 1975, p.25.

Basicamente, há dois centros principais de carga, um positivo relativamente espalhado na parte superior da nuvem e estendendo-se até próximo ao topo, e um negativo concentrado na forma de uma camada horizontal, na região cuja temperatura está em torno de -10 graus Celsius. Há ainda um terceiro centro positivo menor próximo à base da nuvem. Não existe, no entanto, consenso sobre a origem deste centro positivo menor. Diferentemente dos centros maiores de carga, cuja origem, deve-se a processos que ocorrem no interior da nuvem de tempestade, o centro menor pode estar relacionado à captura pela nuvem de íons carregados positivamente da atmosfera abaixo dela. A carga elétrica típica dos centros principais está entre 20 e 30 coulombs e a carga do centro menor em torno de 7 coulombs. As alturas destes centros variam com a latitude geográfica, sendo maiores em regiões de baixas latitudes (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Evolução do Desempenho dos Indicadores de Qualidade. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=80>>. Acesso em: 10 Jan 2016.)

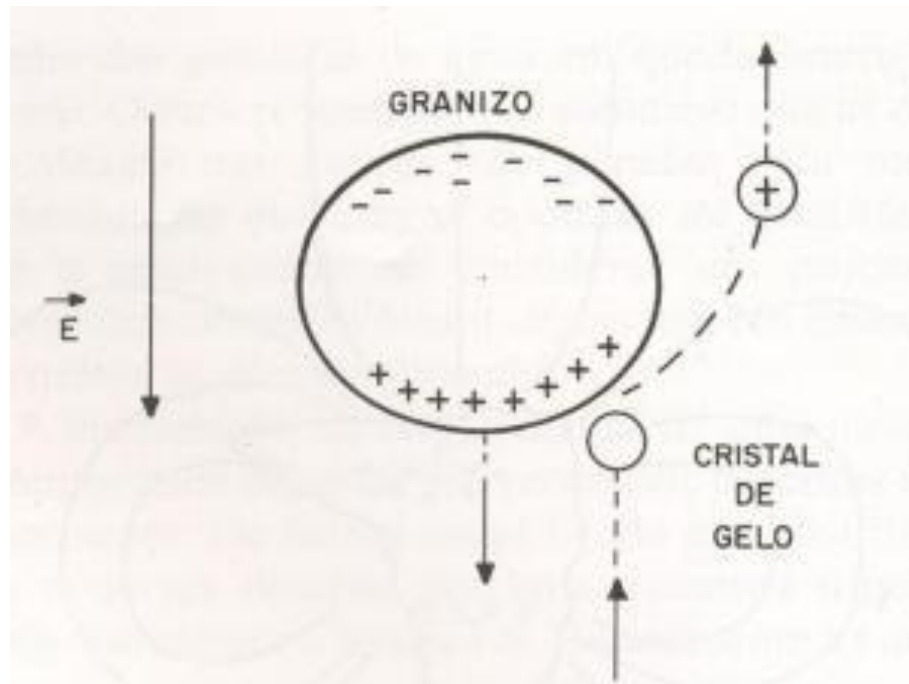
Além destes centros, em geral há finas camadas de cargas, formadas a partir da captura pela nuvem de íons da atmosfera, nas bordas superior e inferior da nuvem, denominadas camadas de blindagem. Estas camadas atuam de modo a blindar parcialmente a região externa da nuvem contra os campos internos. Dentro de uma nuvem tempestade, o campo elétrico pode atingir valores tão intensos quanto 1 milhão de volts por metro. No solo, apesar de

atenuado, este campo é ainda em torno de 1.000 volts por metro, o que equivale a dez vezes o valor em regiões sem nuvens.

A figura 10 ilustra as linhas de campo elétrico na atmosfera devido aos centros principais de carga contidos numa nuvem de tempestade. Em um dado ponto, o campo elétrico é tangente a estas linhas. Experimentos recentes utilizando balões que penetram as nuvens de tempestade medindo o campo elétrico gerado pelas cargas em seu interior têm mostrado, contudo, que estruturas elétricas mais complexas que a estrutura tripolar descrita anteriormente pode também existir.

Tem-se verificado que diversos centros de carga podem existir dentro da nuvem de tempestade. Também há evidências de que a estrutura elétrica da nuvem possa se alterar ao longo de sua vida. Em particular, tem-se verificado que durante a fase dissipativa parte da carga negativa contida na nuvem pode ser carregada para fora dela pela chuva, alterando a estrutura elétrica da nuvem. Todavia, estas medidas devem ser consideradas preliminares, devido à possibilidade de representar condições locais dentro da nuvem não necessariamente aplicáveis à nuvem de tempestade como um todo.

Figura 10. Modelo das linhas de campo elétrico na atmosfera devido aos centros principais de carga contidas numa nuvem de tempestade



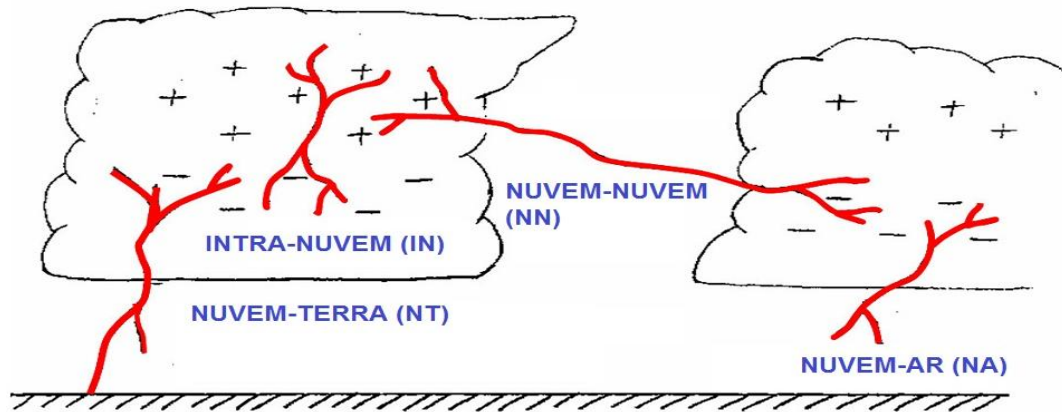
Fonte: BRASIL. LEI nº 8.078, de 11 de setembro de 1990. Código de Proteção e Defesa do Consumidor.

2.4. TIPOLOGIA DOS RAIOS E OS IMPACTOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Existem dois tipos fundamentais de descargas atmosféricas: (1) no céu e (2) que envolvem o solo. A diferença óbvia entre ambas está no fato de que as descargas atmosféricas no céu não alcançam o solo.

Entre as descargas atmosféricas no céu mostradas na Figura 11, pode-se identificar três tipos principais de raios: (1) raios intra-nuvem (IN), os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; (2) raios entre-nuvens (NN), que ocorrem entre nuvens diferentes; e, (3) raios no ar (NA), que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo. Bolsões de carga que se formam na atmosfera em torno das nuvens de tempestade seriam responsáveis por esse tipo de relâmpago.

Figura 11. Tipos de raios no céu.



Fonte: BRASIL. LEI nº 8.078, de 11 de setembro de 1990. Código de Proteção e Defesa do Consumidor.

Os raios que envolvem o solo são classificados em dois tipos básicos: (1) raios nuvem-solo (NS), caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra; (2) raios solo-nuvem (SN), que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem. Os raios NS e SN também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), originando aos raios os positivos (transferência de cargas positivas) e negativos (transferência de cargas negativas).

Os raios NS são em sua maioria negativos, representando em média 90% do total. A frequência dos relâmpagos positivos, entretanto, parece ser bastante variável, sendo em alguns casos até superior a dos negativos. Três fatores básicos parecem influir sobre o percentual de relâmpagos positivos:

1) A altitude das cargas positivas próximas ao topo da nuvem, que está relacionada com a latitude geográfica e com as estações do ano. Quanto menor a latitude, maior a altura do centro positivo, dificultando a ocorrência de raios positivos. O mesmo acontece no verão, quando as nuvens normalmente são mais altas;

2) A variação da velocidade horizontal dos ventos com a altura, associada diretamente às condições meteorológicas. Quanto maior for o gradiente dos ventos com a altura, maior será o deslocamento das cargas positivas em relação às negativas (cisalhamento da nuvem), facilitando assim aos raios positivos alcançarem o solo;

3) Dissipação da nuvem de tempestade. À medida que a chuva elimina os centros de carga negativa na base da nuvem, restam apenas os centros positivos nas partes mais altas.

Sem a blindagem dos centros de carga negativa, aumenta a possibilidade de ocorrerem raios positivos para o solo.

Um raio NS negativo inicia-se na nuvem e, eventualmente, transporta para a terra dezenas de coulombs de cargas negativas. Possui um tempo de duração médio entre 1/3 e meio segundo, sendo constituído por vários pulsos de alta corrente denominados *strokes* ou descargas individuais. O número de *strokes* que compõe uma descarga atmosférica é definido como sua multiplicidade, cujo valor típico varia entre três e quatro. Além disso, cada descarga individual dura cerca de centenas de μs e o tempo típico de separação entre elas é da ordem de dezenas de milissegundos. Visualmente, uma descarga atmosférica frequentemente parece “pisar” porque o olho humano tem a capacidade de perceber o pulso de luz individual associado a cada *stroke*.

As descargas atmosféricas são responsáveis, em todo o mundo, por causar perturbações em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além de serem alguns motivos alegados para pleito de indenização às seguradoras quanto ao ressarcimento pela perda de equipamentos elétricos e eletrônicos, ou até mesmo no comprometimento dos indicadores de qualidade da energia fornecida pelas concessionárias. Artigos mostram que entre 1992 e 1997, na Alemanha, 26% do pagamento de apólices de seguro foram devidas a surtos de origem atmosférica, e que entre 1993 e 1994, na Colômbia, foi registrado um aumento de 30% nos pagamentos de apólices por danos em equipamentos elétricos, que em 1994, chegou a um valor de US\$ 16 milhões. No Brasil, mais precisamente no estado de São Paulo, 40% dos PID's anuais estão concentrados nos meses de janeiro, fevereiro e março, período do ano coincidente com a época de chuva.

Os distúrbios provavelmente sempre estiveram presentes na rede de distribuição, mas não eram sentidos pelo fato dos equipamentos serem, normalmente, eletromecânicos, apresentando maior suportabilidade elétrica. Porém, atualmente, a maior parte dos aparelhos e equipamentos é produzida com dispositivos semicondutores que embora apresentem algumas vantagens em relação aos eletromecânicos, apresentam, por outro lado a desvantagem de serem mais sensíveis a distúrbios na energia fornecida, ou seja, são sensíveis à interferência e às interrupções de curta duração. Assim, tem-se buscado obter, cada vez mais, uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na questão e a determinação de soluções técnicas e economicamente viáveis, que proporcionem uma melhoria efetiva da energia fornecida.

O circuito primário de uma rede de distribuição convencional é muito exposto a descargas atmosféricas; logo, sobretensões surgem nesse circuito em decorrência de descargas diretas (que atingem os condutores fase), ou indiretas (quando ocorrem próximas à linha) e são transferidas para o circuito secundário através do transformador, podendo provocar danos às instalações consumidoras e, ocasionalmente, à queima do próprio transformador.

As sobretensões causadas por descargas atmosféricas podem ser originadas por: Descargas entre nuvens ou intranuvem; Descargas atmosféricas diretas na rede secundária; Tensões induzidas por descargas indiretas; Tensões transferidas devido a descargas diretas na rede primária; Tensões transferidas do primário pelo transformador e por Descargas diretas em edificações.

Embora as sobretensões decorrentes da incidência de descargas diretas atinjam amplitudes superiores, as tensões induzidas por descargas indiretas representam normalmente um problema maior, em virtude da sua alta frequência de ocorrência. Por essa razão, são consideradas as principais responsáveis pelas interrupções sofridas por linhas de classe igual ou inferior a 15 kV. A complexidade do mecanismo de indução das tensões no caso de descargas indiretas é consideravelmente maior que no caso de descargas diretas, e essa é, sem sombra de dúvidas, umas das razões para a existência de diferentes métodos de cálculo de tensões induzidas, tais como os modelos de Chowdhuri, Liew-Mar e o de Rusck. Este último foi modificado de modo a possibilitar levar em consideração os comprimentos finitos da linha e do canal da descarga atmosférica, bem como para considerar o caso de descargas em estruturas metálicas nas proximidades da linha e o efeito do líder ascendente. O novo modelo foi denominado ERM (*Extended Rusck Model*).

Nesse modelo, ao contrário do original, a linha não precisa ser retilínea e o efeito de condutores multiterrados (neutro ou cabo guarda) pode ser levado em conta, assim como a presença de equipamentos como transformadores e para-raios. Com base nas amplitudes e frequências de ocorrência das sobretensões, pode-se dizer que as mais importantes, nas redes de distribuição são aquelas causadas por descargas indiretas. Além das tensões induzidas na rede de baixa tensão, são também importantes aquelas transferidas ao secundário quando da incidência de descargas diretas no primário; essa transferência pode ocorrer pela disrupção dos isoladores, atuação dos para-raios e via transformador (ANDRADE, M. T.; LANDINI, L. A. R.; PRADO Jr, F. A. A. 2001, p.25). Para as áreas urbanas, o estudo das características das

tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de distribuição se torna necessário devido a três aspectos:

- a) grande número de falhas de transformadores atribuídas a descargas atmosféricas;
- b) quantidade considerável de desligamentos dos circuitos (alimentadores) aparentemente sem causa determinada em épocas de incidência de raios;
- c) presença de estruturas altas, próximas à linha de distribuição, em áreas urbanas, diminuindo a sua exposição às descargas diretas, contudo possibilitando a ocorrência de descargas muito próximas à rede (descargas indiretas), às quais podem induzir sobretensões de amplitude muito elevadas.

Um estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição em área urbana se torna muito complexo, pois além da presença de edificações em suas proximidades, as linhas possuem as características de vários ramais e uma densidade maior de pára-raios e transformadores quando comparados com uma linha de distribuição em área rural. Ou seja, um número muito maior de parâmetros começa a influenciar as sobretensões. Segundo Piantini e Janiszewski, cada ponto de conexão do tronco com os ramais representa um ponto de descontinuidade, enquanto que a presença de edificações altera o campo eletromagnético nas vizinhanças da linha. Ambos os efeitos afetam diretamente as tensões induzidas. A presença do neutro também contribui nesse sentido, visto que o mesmo tem efeito análogo ao do cabo guarda no caso de descargas indiretas, reduzindo em função do acoplamento as tensões induzidas nos condutores fase. A complexidade do problema é, portanto, ainda maior que no caso de linhas rurais.

Neste caso, houve a implementação, pelos autores, de um modelo em escala reduzida, com fator de escala para comprimentos igual a 1:50, para se avaliar então os efeitos dessas tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas.

Com fins investigativos, foi simulada uma linha urbana típica, trifásica, com neutro, transformadores e para-raios, além dos ramais. Foram consideradas diferentes configurações, tendo as tensões induzidas sido medidas nos terminais primários de modelos de transformadores situados tanto no alimentador como em finais de ramais. Apurou-se também que estruturas altas podem atrair descargas a distâncias muito curtas em relação à linha, de modo que sobretensões elevadas podem ser induzidas mesmo no caso de descargas com intensidades relativamente moderadas. A utilização de um bom modelo, adequado para

representação do comportamento dos transformadores, é de suma importância para o estudo dos fenômenos associados à transferência dos surtos do primário para o secundário.

Alguns estudos mostram que as tensões transferidas ao secundário do transformador apresentam características oscilatórias, com frequência superior à da rede. As amplitudes dessas tensões são fortemente dependentes da forma de onda da tensão no primário do transformador e podem frequentemente atingir valores da ordem de alguns quilovolts. No estudo, foram abordados aspectos importantes a respeito do cálculo das tensões, como por exemplo, a modelagem do transformador e das instalações elétricas dos consumidores e dos ramais de ligação e os casos de linhas com e sem dispositivos de proteção.

Quanto ao transformador de distribuição, verificou-se que a sua presença afeta as amplitudes e formas de onda das tensões induzidas na rede secundária. As amplitudes das tensões fase-terra na rede secundária podem apresentar valores elevados, chegando em alguns casos a valores da ordem de dezenas de quilovolts. Esses valores podem ser altos o suficiente para acarretar a queima de equipamentos e disrupções elétricas em pontos susceptíveis da rede. Os finais da rede são os pontos mais solicitados quando os DPS's (dispositivos de proteção contra surtos) são instalados somente no secundário do transformador.

A instalação de DPSs garante níveis baixos de tensão somente nos pontos em que os mesmos são instalados. Embora haja reduções nas tensões fase-neutro ao longo da rede com a instalação de DPSs no transformador e nos finais da linha, tal fato não assegura níveis baixos de tensão em pontos intermediários.

No caso de tensões transferidas devido a surtos de tensões induzidas no primário, os estudos mostram que a maior amplitude de tensão na rede secundária ocorre quando os para-raios atuam, sendo que esta parcela decorrente da elevação de potencial do neutro pela atuação dos para-raios dos transformadores é em geral maior que a parcela decorrente da “transferência direta” pelo transformador. Essas tensões, da ordem de alguns quilovolts, podem provocar danos aos consumidores. Porém, quando a amplitude do surto não é suficientemente elevada para provocar a atuação dos para-raios, praticamente toda a tensão transferida à rede secundária é proveniente da transferência via transformador. Estas tensões também podem chegar a alguns quilovolts, sendo, portanto, suficientes para provocar a queima de equipamentos do consumidor. Assim, a representação adequada do transformador tem grande importância para estudos de transferência de surtos.

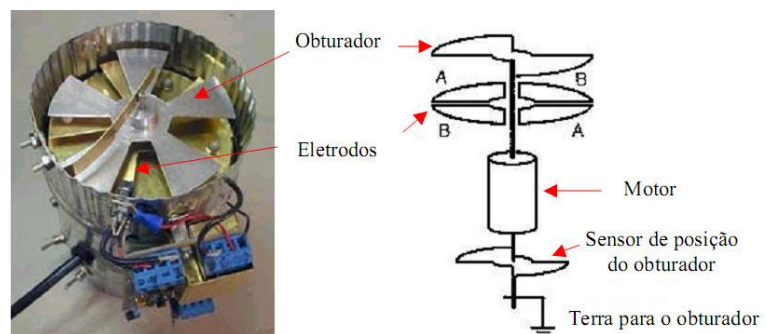
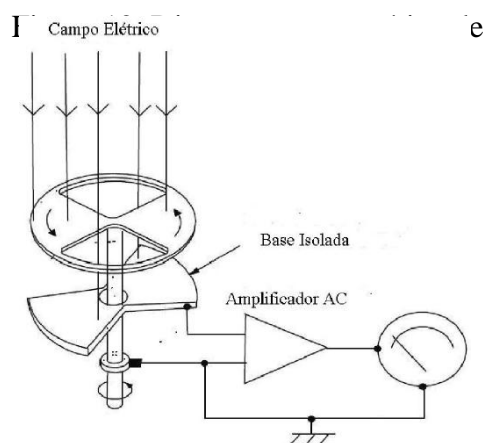
CAPITULO 3 - REDES DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Existem vários sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas utilizados no mundo. Para que se pudesse desenvolver o protótipo, aqui proposto, foi necessário apresentar um estudo do que já foi desenvolvido, como também, vantagens e desvantagens de cada forma de detecção. A seguir, serão mostrados alguns destes sistemas.

3.2 CAMPO ELETRICO FIELD MILL

Mesmo sem a existência de nuvens, em tempo firme, existe um campo elétrico estabelecido, que na superfície da terra atinge valores em torno de +100 V/m; em áreas mais poluídas esse valor pode subir para até +400 V/m. com a aproximação de nuvens de tempestade ocorrem inúmeras variações no campo medido. Embaixo das nuvens de tempestades ocorrem mudanças bruscas, durante as descargas de raios. Os campos medidos nessas circunstâncias podem ser maiores que 10 KV/m, e podem começar a ocorrer descargas com valores 2kV/m, embora o valor de quebra da rigidez dielétrica do ar seja de 3000KV/m. essas medições revelam razão de carga e descarga, polaridade e tempos de regeneração de campo elétrico, entre outros parâmetros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES (ABRADEE). CODI-2.2.12.03.0 Análise das Conseqüências das Interrupções do Fornecimento de Energia Elétrica. 81 Comitê de Distribuição. Rio de Janeiro, 1996, p.56.)



Fonte: BRASIL. LEI nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Regime de Concessão e Permissão da Prestação de Serviços Públicos

O campo elétrico de uma carga q a uma distância r da carga, é representado com o auxílio de uma função potencial V dado por:

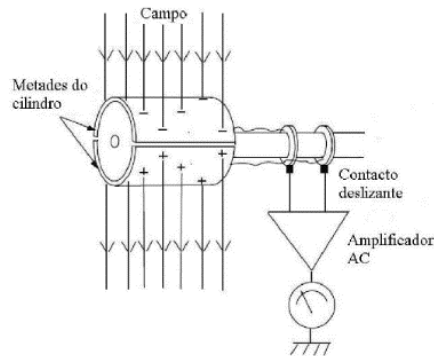
$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon r}$$

E o campo elétrico é dado pelo gradiente $E = -\nabla V$ ou $V = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$. O princípio de funcionamento do Field Mill ocorre da seguinte maneira: o obturador é montado acima dos eletrodos e rotacionado de modo a periodicamente cobrir e expor os eletrodos ao campo elétrico. O Rotor deve ser aterrado. Quando o eletrodo é exposto pelo obturador ao campo elétrico atmosférico, é induzida uma corrente em direção a terra ou oriunda da terra, dependendo da polaridade do campo elétrico atmosférico. Quando o eletrodo é blindado, estabelece-se uma corrente em relação a terra em sentido contrário, descarregando o capacitor formado pelo eletrodo e a terra. Esta corrente circula através de um amplificador de transcondutância, que a converte em uma tensão elétrica, a qual é amplificada e processada por um condicionador de sinais do tipo síncrono.

Os Field Mill são mecanicamente mais complexos que os sensores do tipo Flate Plate, mas são muito mais sensíveis, não necessitam ser zerados em regiões com ausência de campo elétrico e podem ser utilizados na presença de ar-ionizado. Podem realizar medidas de alguns V/m até campos na ordem de KV/m, com respostas temporais na ordem de milhe segundos e com exatidão na ordem de 1%. Os Field Mill apresentam algumas limitações também, como por exemplo, não é fácil fazer um contato do obturador para a terra com baixo nível de ruído, a falta de lubrificação pode causar danos às partes rotativas e o uso por longos períodos pode causar desgastes, ocasionando ruídos no sinal obtido.

Outro tipo de Field Mill como mostrado na Figura 18, usa um cilindro seccionado que gira expondo alternadamente as faces seccionadas na direção positiva e negativa do campo respectivamente. Este arranjo tem a vantagem de poder indicar a direção do campo.

Figura 13. Field Mill de cilindro seccionado

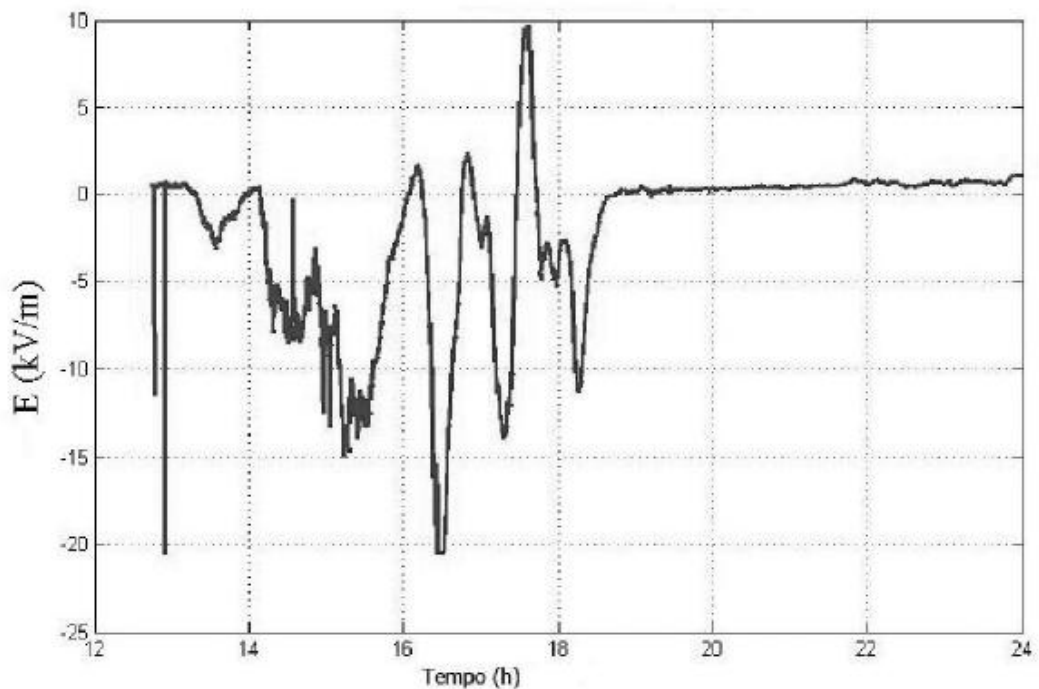


Fonte: BRASIL. LEI nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Regime de Concessão e Permissão da Prestação de Serviços Públicos

A Figura 14 mostra a variação do campo elétrico em Benevides, no Pará, medido durante o 1º Experimento de raios induzidos na Amazônia, no dia 15/03/2007, das 12 às 24hs, com um máximo positivo de 10KV/m e um máximo negativo de 20KV/m, onde os picos negativos abaixo de -5KV/m indicam ocorrência de raios na área de alcance do field mil, até cerca de 60 km do local de instalação.

As medições conjuntas de campo eletrostático nas nuvens e ocorrência de raios podem evidenciar mecanismos de iniciação dos líderes precursores das descargas de raios.

Figura 14. Variação do campo elétrico em Benevides-PA



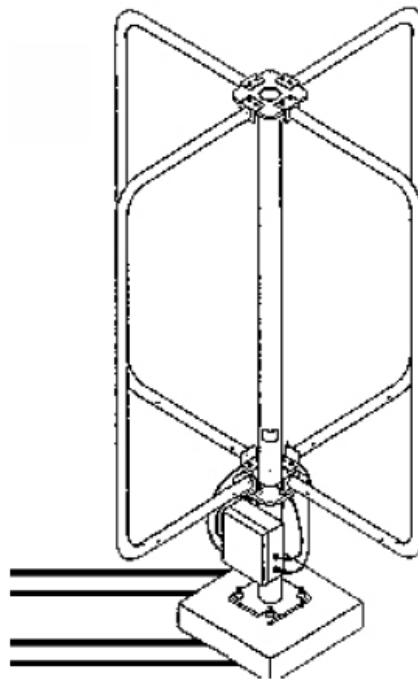
Fonte: BRASIL. LEI nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Regime de Concessão e Permissão da Prestação de Serviços Públicos

3.3 SISTEMAS DE DIREÇÃO (MAGNETIC DIRECTION FINDERS – MDF)

O método MDF (Magnetic Direction Finding) utiliza o campo magnético vertical emitido por uma descarga atmosférica para determinar sua localização, uma vez que o campo radial é nulo.

O sensor consiste de duas antenas loop cruzadas que medem o campo magnético (B), ou seja, dois círculos verticais dispostos perpendicularmente um do outro, sendo um orientado da direção Norte-Sul e a outra em Leste-Oeste, conforme Figura 15. Para realizar estas medidas, assume-se que o canal do relâmpago é vertical, pois o campo magnético produz apenas a componente azimutal, sendo, portanto, as componentes vertical e radial nulas.

Figura 15. Antenas loop cruzadas



Fonte: BRASIL. LEI nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Novo Código Civil Brasileiro. Brazil's Most Valuable Brands 2006. Disponível em: <<http://www.brandfinance.com/Uploads/pdfs/BrazilMVBrands06.pdf>>. Acesso em: 10 Jan 2016.

Para os receptores do tipo MDF, além das antenas “loop” para detecção do campo magnético é também utilizada uma antena de campo elétrico do tipo “Flat

plate”, a partir da qual a polaridade da corrente de descarga é determinada e também serve para levantar a ambiguidade de 180° na medição de azimuth. Um sensor que utiliza esse método de localização e detecção de descargas é o IMPACT, ilustrado na Figura 16.

Figura 16. Sensor IMPACT



Fonte: CAMARGO, P. T. Custo Social da Energia Elétrica. 1989, 203p. Tese (Mestrado) Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 1989, p.74

O sensor IMPACT possui uma alta eficiência e uma melhor discriminação nas DEA nuvem-solo, proporcionando informações mais precisas. Com apenas dois sensores deste tipo, é possível obter a localização das descargas de retorno. A eficiência de detecção deste sensor é de aproximadamente 70 a 90% de todas as DEA nuvem-solo, dentro do limite de 400km.

3.4 SISTEMA DE TEMPO DE CHEGADA (TIME OF ARRIVAL – TOA)

O método TOA, denominado de *Time Of Arrival-TOA* (Diferença dos tempos de chegada), neste trabalho foi usado para medir a diferença dos tempos de chegada de variáveis específicas. Este algoritmo destaca a importância da hipérbole (pertencente à família das curvas cônicas), dentro de uma aplicação de física atmosférica na detecção de descargas atmosféricas e favorece o campo da didática, demonstrando a importância do uso da matemática em problemas reais.

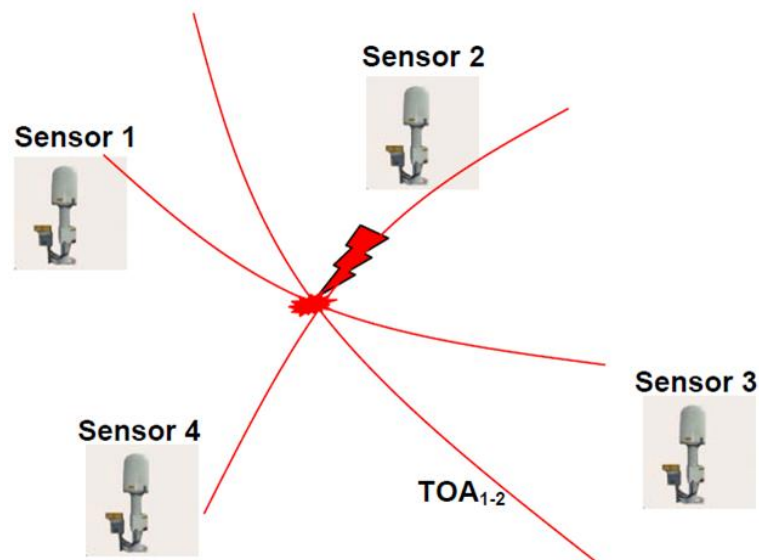
Os sensores desta rede são basicamente antenas capazes de captar e medir os impulsos eletromagnéticos criados pelas descargas atmosféricas. O sinal do campo elétrico emitido pela

descarga atmosférica demora certo tempo para atingir uma determinada antena da rede; se considerar R a distância entre a antena e o ponto atingido pelo raio, e T o intervalo de tempo para que a informação percorra R , podemos afirmar que $R=C_0T$, sendo C_0 a velocidade da luz. A análise do intervalo de tempo decorrido para a chegada do sinal do campo elétrico, a partir de duas antenas diferentes do sistema, nos permite determinar uma curva na forma de uma hipérbole, sobre a qual o ponto onde o raio foi detectado é situado.

Se as estações estiverem sincronizadas temporalmente é possível determinar o lugar geométrico de ocorrência do evento através da diferença entre os tempos de chegada de uma radiação em várias estações. Como as radiações se propagam com a velocidade da luz, a diferença constante no tempo de chegada entre duas estações define uma hipérbole. Com isso, várias estações dão origem a múltiplas hipérboles, cujas interseções definem a localização da fonte de radiação.

A técnica utilizada para mapear esses eventos é a diferença no tempo de chegada (Time of Arrival – TOA), também conhecida como método das hipérboles, mostrado na Figura 17.

Figura 17. Diagrama que representa as hipérboles formadas pela diferença de tempo de pares de estações.



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82

O cálculo do TOA é similar ao cálculo do ATD, técnica que será mostrada adiante, e é o foco deste trabalho, pois o protótipo aqui construído será baseado nesta técnica. Dessa forma, o cálculo para formação das hipérbolas e, por sua vez, o da localização das descargas, será mostrado posteriormente neste capítulo.

Estes sistemas possuem uma eficiência de detecção CG de 80-90% e 0.5 a 2 km de precisão, enquanto que os sistemas baseados apenas em VLF, possuem uma eficiência de detecção da ordem de 20 a 90% e um erro de localização entre 0.5 a 10 km. Esta diferença é devido a característica do sistema VLF/LF (chão) que mede até 400 km, enquanto que os VLF (céu) conseguem medir descargas até 4 mil quilômetros de distância.

Figura 18. Sensor *Lightning Position and Tracking System* (LPATS).



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82

O sensor LPATS, ilustrado na Figura 18, fornece a localização da descarga de retorno por meio da tecnologia *Time Of Arrival* (TOA) ou tempo de chegada. Esta tecnologia consiste em calcular o tempo em que o receptor leva para detectar uma descarga atmosférica.

3.5 SISTEMA DE RADIO VHF (VERY HIGH FREQUENCY)

A técnica que foi capaz de mapear a estrutura 3D do raio, utilizando a faixa de frequência de VHF, na faixa de 30 a 300 MHz, foi inicialmente desenvolvida por Oetzel e Pierce (1969). O alcance máximo destas medidas se restringe a 60 km, devido a atenuação característica do sinal de VHF e da topografia da terra (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410:2004 –Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. ABNT, 2004, p.15).

Os sistemas podem ser diferenciados de acordo com o espaçamento de suas antenas, sistemas com redes de espaçamento pequeno (1-100m) determinam somente a direção da fonte de rádio. Neste caso, o mapeamento só é possível se existir pelo menos 2 (duas) redes para realizar a triangulação. Sistemas com antenas mais espaçadas, na ordem de 10 km, são capazes de determinar a direção e a distância. Estas redes utilizam técnicas de localização por diferença de chegada (TOA), sendo que o sistema de base pequena utiliza também a interferometria.

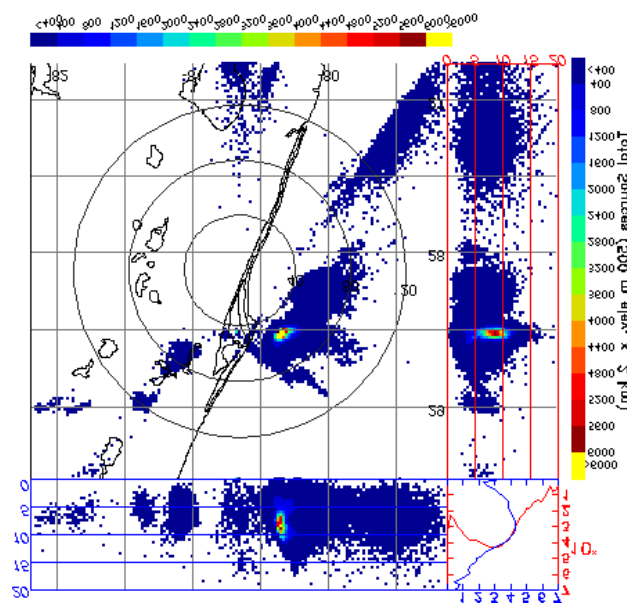
3.5.1 Linhas de base grande (Time of Arrival – TOA)

O primeiro sistema de localização de descargas atmosféricas por VHF em linhas de base grande foi desenvolvido por Proctor em 1971, porém este sistema não se mostrou muito eficiente, pois o mesmo demorou 6 meses para conseguir calcular apenas 250 ms de dados gravados. Até que Proctor (1983) desenvolveu um outro sistema constituído de 5 antenas polarizadas verticalmente, com uma banda larga, e dispostas em linhas cruzadas. Estas antenas foram ajustadas para receber sinais na ordem de 355 MHz e cada receptor transmite o sinal detectado para um computador central, a partir de uma portadora em micro-ondas e comprimento de 3 cm, para evitar interferências de ruídos.

Um outro sistema de linha de base grande foi desenvolvido pelo Centro Espacial Kennedy, denominado de *Lightning Detection and Ranging* (LDAR), para auxiliar nas operações de lançamento de foguetes. Este sistema consiste em duas redes independentes formadas por sete antenas cada, que detectam e localizam a fonte da descarga e enviam para uma estação central. Esta estação, por sua vez, compara os sinais recebidos das redes e apenas os aceita como descarga se os mesmos coincidirem nas duas redes de antenas. Este sistema funcionou em uma frequência central de 63 MHz, não tinha velocidade de processamento para conseguir processar e localizar os sinais das descargas em tempo real. Uma nova versão do sistema LDAR alterou a original e consiste em sete receptores constituídos por uma antena, um filtro passa banda, que se comunica com o computador central através de um link de micro-ondas. As antenas estão dispostas nos vértices de um hexágono com a sétima no centro. O sistema tem uma largura de banda de 6 MHz e pode operar nas faixas de frequências de 60-66 MHz ou 222-228 MHz e pode processar um máximo de 10000 sinais por segundo. Para que a descarga seja localizada o sistema utiliza um grupo de 4 (quatro) antenas, assim as setes antenas formam mais de 20 (vinte) soluções redundantes. Inicialmente, o sistema utiliza apenas dois grupos que tem a melhor distribuição de localização de erro e verifica se as duas

localizações coincidem em um erro máximo de 5%, ou 350 m. Se não estiver nesta faixa o sistema compara todas as 20 soluções de localização e as compara entre si. Assim, a estação que apresentar maior número de par com erro menor ou igual a 5%, será a localização aceita. O LDAR foi comparado com sinais de uma aeronave sincronizado com um GPS em 1995, e mostrou que o atraso temporal foi da ordem de 50 ns e o erro de localização variou de 50 a 100 m, para descargas que aconteceram dentro da rede (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419:2001 – Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. ABNT, 2001, p.20).

Figura 19. Distribuição de descargas elétricas observadas pelo LDAR



Fonte: CAMARGO. 1989, p.21.

3.6 SISTEMAS DE DETECÇÃO EM VLF(ATD)

Como foi visto anteriormente, descargas elétricas produzem um ruído de rádio na frequência de VLF (5-15 kHz) denominado de *Sferics*. Os *Sferics* se propagam sobre grandes distâncias (milhares de quilômetros) entre o guia de onda formado pela superfície terrestre e a ionosfera. Pierce (1977, p.45) descreveu a física dos *Sferics* baseado em medidas conduzidas, a partir da Segunda Guerra Mundial, sendo que, nas últimas décadas, Lee (1986, p.67) desenvolveu um sistema operacional de detecção *Sferics* sobre a Europa, que é limitado pela baixa transmissão de dados do sistema de comunicação utilizado. Mais recentemente, Morales (2001, p.34) apresenta um sistema de detecção de *Sferics* experimental sobre a América do Norte e do Sul. Este utiliza os mais recentes avanços de tecnologia como a internet, o Global Positioning

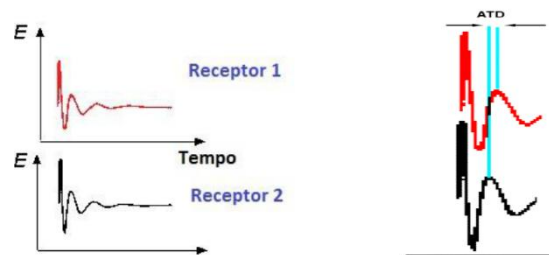
System (GPS) e computadores pessoais (PC). Ele foi denominado Sferics Timing and Raining Network (STARNET). Este sistema vem funcionando operacionalmente na Europa e um projeto da National Science Foundation (NSF) dos Estados Unidos financiou a instalação de mais 4 sensores sobre o continente Africano, com o objetivo de monitorar as descargas atmosféricas no continente Europeu, Africano e oceano Atlântico (BENETI, C. A. A.; JUSEVICIUS, M. A. R.; GIN, R. B. B.; PATSKO, C. H. 2005, p.78).

O conceito principal do sistema de VLF baseia-se no trabalho desenvolvido por LEE (1986). Neste sistema, o campo elétrico vertical é medido continuamente. A diferença entre o tempo de chegada dos Sferics (Arrival Time Difference - ATD) em duas estações define regiões sobre a superfície terrestre com a mesma diferença de tempo. Estas regiões são caracterizadas como hipérboles sobre o globo terrestre. A combinação de várias ATD, obtidas a partir de medidas de mais sensores, define a posição de um Sferics. No trabalho apresentado por Morales (2001, p.33), o campo elétrico é sincronizado com o tempo do GPS, que tem uma resolução de 1 micro segundo.

Dessa maneira, a série temporal do campo elétrico vertical define uma forma de onda de Sferics, que é compactada em janelas temporais de 13.1 ms. Estes pacotes de onda são então transmitidos para o computador central via internet. A configuração da STARNET permite a aquisição de 70 sferics por segundo. Uma vez que as formas de onda de cada receptor de rádio estejam no computador central, um algoritmo de processamento de sinal calculará as ATDs para cada combinação dos diversos sensores instalados. No caso da STARNET, este sistema possui 5 receptores de rádio VLF, o que permite estimar 10 combinações. O cálculo da ATD baseia-se na maximização da correlação de tempo entre duas formas de onda. Desta maneira, a diferença de tempo entre a máxima correlação define uma ATD. Um exemplo do campo elétrico vertical medido por dois receptores de rádio VLF para um mesmo Sferics é apresentado na Figura 20a. Enquanto que a definição de uma ATD a partir da correlação máxima temporal é ilustrada na Figura 20b.

A determinação da posição de um raio pelo método de ATD definido por Lee (1986, p.12) consiste em minimizar uma função de resíduos das ATDs. As ATDs definem posições sobre uma região que tem a mesma diferença de tempo entre duas estações que observam o mesmo raio.

Figura 20 (a) série temporal do campo elétrico vertical observado por dois receptores de rádio VLF; (b) definição de uma ATD.



Fonte: CAMARGO, 1989, p.76.

3.7 SISTEMAS ÓTICOS DE LOCALIZAÇÃO

Os instrumentos de sistemas óticos são representados pelo Operational Linescan System (OLS), Optical Transient Detector (OTD) o Lightning Imaging Sensor (LIS) e o Onorbit Recording of Transient Events (FORTE), os quais são capazes de detectar as variações de luminosidade em nuvens durante o dia e a noite. Na sequência são detalhadas as técnicas utilizadas nestes sistemas óticos de localização de descargas atmosféricas.

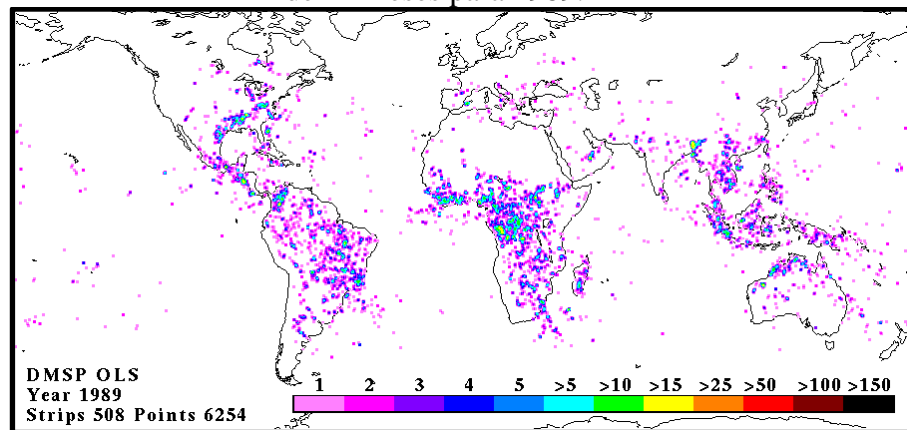
3.7.1 Operational Linescan System – OLS:

Lançado a bordo do Titan 2 em janeiro de 1973, conforme ilustra a figura 27, e operando nos satélites do programa de defesa meteorológico norte-americano (DMPS – Defense Meteorological Satellite Program), este instrumento consiste em monitorar a distribuição global de nuvens de tempestades durante a noite e a temperatura do topo destas nuvens. Portanto, o OLS permite a identificação de fontes de baixa emissão de energia luminosa, de acordo com as imagens na figura 21.

O mapeamento total do globo é realizado a cada 24 horas por dois radiômetros (Photo Diode Detector– PDD) de varredura oscilatória e um tubo foto-multiplicador. O OLS está a bordo de um satélite que efetua medidas num período orbital de 101 minutos (~ 1,6 horas) e suas atividades cessaram em 31 de janeiro de 1991 (BERGER, K.; ANDERSON, R.B.; KRÖNINGER, H.; PALVA, V. 1975, p.45).

A distribuição de descargas atmosféricas observadas pelo OLS é mostrada pela Figura 26 e o período compreendido é de 12 meses que, sobrepostos, resultou em uma distribuição de descargas atmosféricas sobre o globo.

Figura. 21 – Distribuição de descargas atmosféricas observadas pelo OLS referente ao período de 12 meses para 1989.

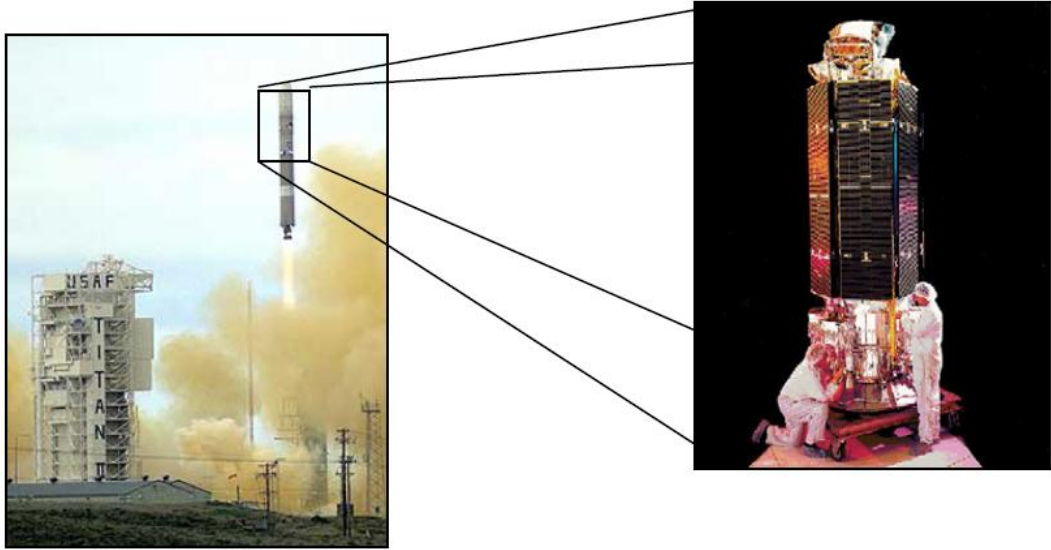


Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82.

Um dos radiômetros é utilizado para medir a temperatura do topo da nuvem observada pelo canal do infravermelho termal (10.5 a 12.5 μm). O outro radiômetro era utilizado para medir a luminosidade dos objetos na faixa do visível (0.4 a 0.1 μm) e estava acoplado a um tubo foto-multiplicador que aumentava em 4 vezes a sensibilidade do sensor (BERGER, K.; ANDERSON, R.B.; KRÖNINGER, H.; PALVA, V. 1975, p.28).

O OLS orbitava a uma altitude de 830 km, o que possibilitava uma cobertura espacial de 1300 km com uma resolução de 2.7 km na superfície. Como o foto-multiplicador aumenta em 4 vezes a sensibilidade do sensor, é possível que no instante da observação ocorram descargas atmosféricas que eventualmente saturam a imagem feita. Neste caso, há a necessidade de um tempo para que a imagem adquirida seja reconstituída de forma a obter uma resolução mais adequada da luminosidade da descarga.

Figura. 22 – Operational Linescan System – OLS lançado a bordo do Titan 2.



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82.

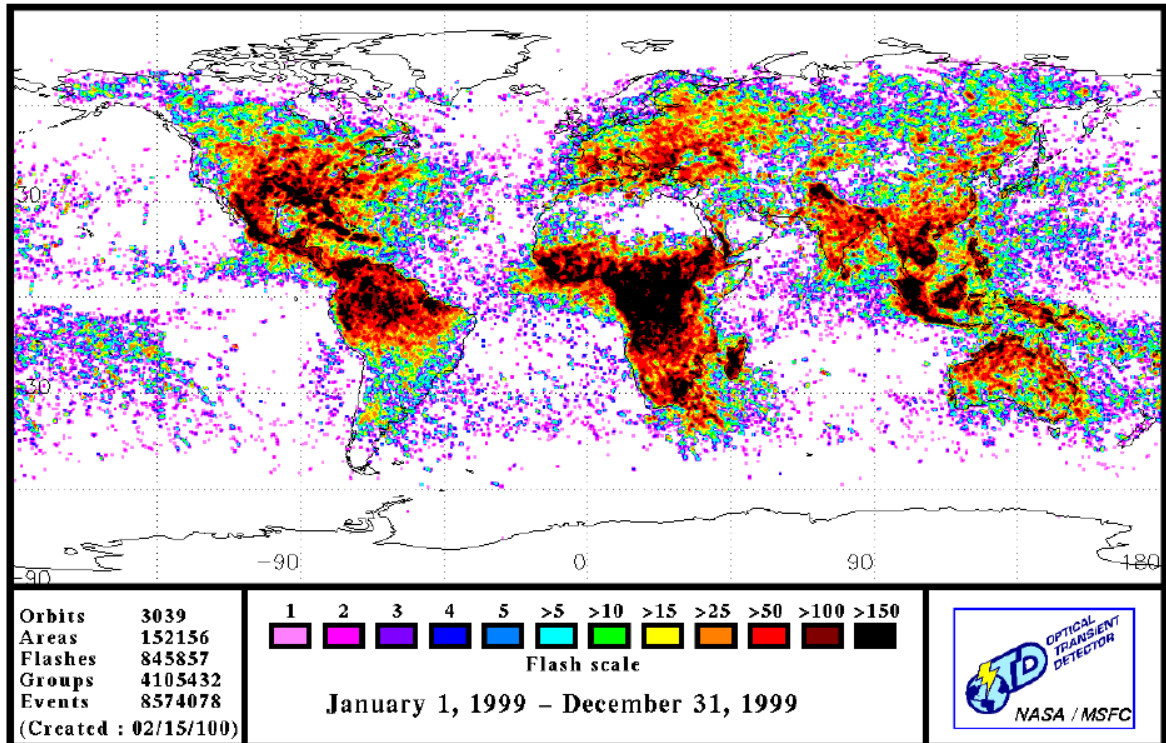
3.7.2 Optical Transiente Detector – OTD:

Lançado em 3 de abril de 1995 a bordo do Microlab-1 e admitindo uma órbita circular com um ângulo de inclinação de 65° , este sistema possuía a capacidade de detectar mudanças momentâneas de luminosidades nas nuvens, indicando a ocorrência de relâmpagos (intra-nuvens, nuvem-solo durante o dia e a noite) a aproximadamente 710 km de altura (Figura.2.10). Os dados foram coletados até abril de 2000, quando o satélite finalizou suas atividades. O OTD é composto por um dispositivo denominado de CCD (Charge Coupled device), cuja lente é capaz de filtrar as interferências no comprimento de onda de 777 nm . O satélite cobre uma área de 1300 x 1300 km com cobertura espacial de 10 km e resolução temporal de 2ms

O OTD orbitava a Terra a cada 100 minutos (equivalente há 1,6 horas) e por este motivo não realiza um monitoramento contínuo temporal das tempestades e sua eficiência de detecção não ultrapassava os 46% - 69% (15). A identificação de uma descarga era feita através da apresentação sequencial da diferença de brilho observado nas sobreposições de aproximadamente 500 imagens por segundo obtidas pelo satélite e adquiridas sobre uma mesma área. A figura 23 apresenta a distribuição de descargas atmosféricas feita pelo OTD

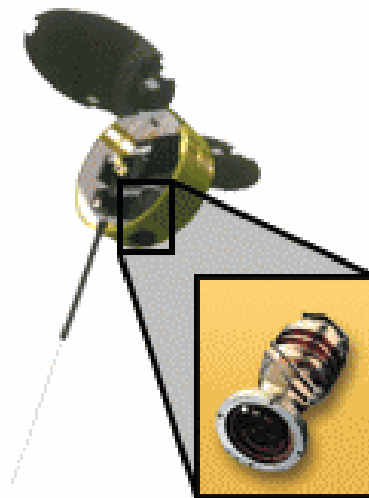
entre os períodos de janeiro a dezembro de 1999, e é possível observar, conforme uma alta densidade anual de descargas atmosféricas sobre a região dos Trópicos.

Figura. 23 – Distribuição de descargas atmosféricas observadas pelo OTD referente ao período entre janeiro/dezembro de 1999



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82

Figura. 24 –Optical Transient Detector – OTD a bordo do satélite microlab.



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82.

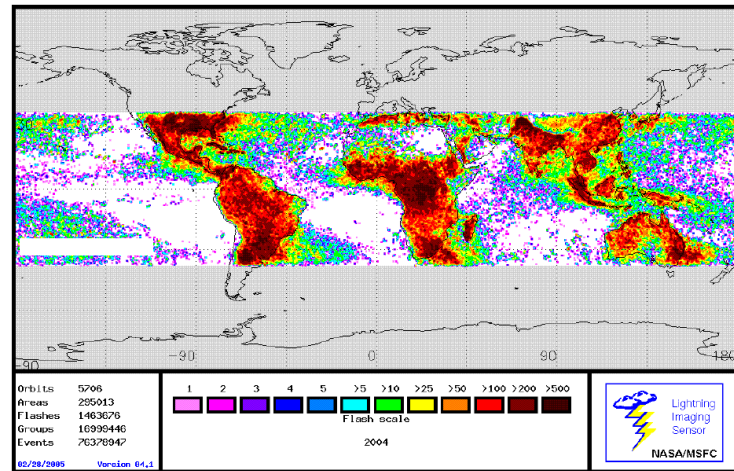
3.7.3 Lightning Imaging Sensor – LIS:

Abordo do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), lançado em 28 novembro de 1997 do Tanegashima Space Center no Japão, o LIS é um instrumento capaz de localizar descargas atmosféricas acima da superfície da Terra, a partir da luminosidade produzida pelas tempestades, sendo que este sistema é uma evolução do sistema OTD. O TRMM está a uma altura de 350 km com ângulo de inclinação de 35°. O LIS observa relâmpagos sobre as regiões tropicais do globo numa região que corresponde a 35°N - 35°S da linha do Equador (BOCCUZZI, 1986, p.36)

O LIS teve sua eficiência de detecção estimada em 90 % com uma resolução espacial de 10 km e uma área de 600X600 km (BRASIL. LEI nº 8.078, de 11 de setembro de 1990. Código de Proteção e Defesa do Consumidor). O satélite TRMM viaja aproximadamente a uma velocidade de 7 km por segundo, permitindo assim observar uma tempestade por quase 90 segundos. A obtenção das imagens é feita da mesma forma que o satélite OTD, ou seja, através da apresentação sequencial de 500 imagens por segundo e a diferença de brilho observado nas sobreposições de imagens, que do mesmo ponto produzem a localização da descarga atmosférica.

A figura 25 apresenta a distribuição de descargas atmosféricas observadas pelo LIS, para o ano de 2004, e como apresentado na figura 28, a região de maior incidência de descargas atmosféricas é a região Tropical. Além destas regiões, nota-se que as regiões sobre influência de Monção apresentam grande intensidade de relâmpagos, ou seja, México, Sul do EUA Índia e China. Adicionalmente, estas distribuições de descargas atmosféricas destacam que a maior incidência de relâmpagos se encontra sobre o continente, o que reforça o efeito da convecção ser mais intensa sobre as regiões continentais.

Figura. 25 – Distribuição de descargas anual observadas pelo LIS para 2004.



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82

Figura. 26 –Lightning Imaging Sensor – LIS a bordo do satélite TRMM



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82

3.7.4 Fast On-orbit Recording of Transient Events – FORTE:

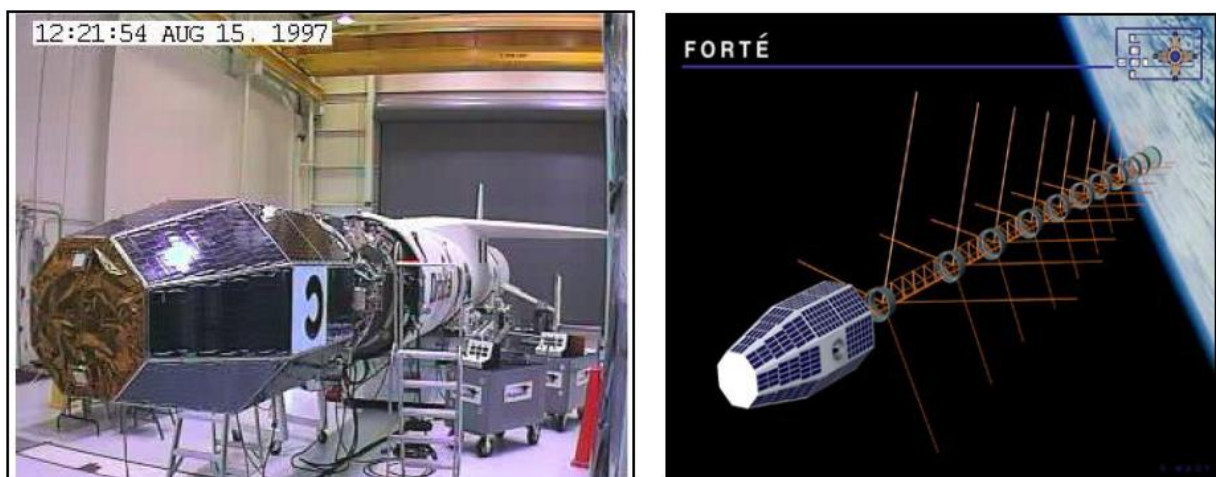
Desenvolvido pela parceria entre o Laboratório Nacional de Los Alamos e o Laboratório nacional Sadia no Novo México, foi lançado em 29 de agosto de 1997 da Base da Força Aérea de Vandenberg a bordo do satélite Pegasus XL. O Forte cobre uma região de 1300 x 1300 km e consiste de três instrumentos: um sistema de RF (rádio frequência), um sistema ótico e um classificador de eventos (Figura. 32). Sua inclinação de 70.0° e órbita de aproximadamente 799 km de altitude, permite detectar e fazer correlação entre uma descarga elétrica no espectro ótico e as emissões no espectro do VHF.

O sistema RF detém três receptores de RF no espectro de frequência de 30-300 MHz (VHF) que analisam a forma de onda das descargas atmosféricas.

O sistema ótico consiste em um sensor de varredura (Lightning Location System - LLS) de 10 x10 km, com capacidade de detectar 500 amostras/segundo (e localizar geograficamente um relâmpago) e um fotodetector (Optical Lightning System) e uma câmera de CCD para fornecer a definição espacial e temporal das descargas atmosféricas.

O classificador de eventos, baseado na tecnologia de processamento de sinal digital, fornece as características das formas de onda dos sinais eletromagnéticos provindos dos relâmpagos.

Figura. 27. Fast On-orbit Recording of Transient Events – FORTE a bordo do satellite PegasusXL.



Fonte: DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82

CAPITULO 4 - REDES E SENSORES NA REGIÃO AMAZÔNICA

4.1 INTRODUÇÃO

Pesquisas sobre relâmpagos no Brasil tiveram início em meados da década de 80 pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), em São Paulo, e pelas Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG). Em 1995, a Universidade Federal do Pará (UFPA) e em 1996 o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) começaram também as pesquisas nesta área. E como um estudo mais recente, o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) é um programa de estudo sobre raios do INPE, que visa estudar sua origem, suas características, bem como seus efeitos locais e globais sobre a atmosfera, o meio ambiente e o homem. A ênfase é dada sobre o estudo dos Relâmpagos no Brasil. Para atingir os objetivos acima, a Linha dispõe de laboratório, programas de mestrado e doutoramento, e mantém várias colaborações no Brasil e no exterior.

Atualmente, existem três atividades de pesquisa na ELAT, que são: Descargas Atmosféricas, Modelagem de Fenômenos Elétricos e Eletrodinâmica da Atmosfera Superior. Várias Publicações (científicas e de divulgação) são disponíveis das pesquisas da ELAT. A precipitação associada a raios nuvem-solo, em torno de Belém-PA, utilizando dados pluviométricos fornecidos pela estação do Aeroporto de Belém, referentes aos anos de 1998 e 1999, o LLP funcionou 77 dias nesses dois anos, sendo 34 em 1998 (correspondente aos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro) e 43 dias em 1999 (correspondente aos meses setembro, outubro, novembro e dezembro) a partir da posse desses dados foram realizados os estudos da sua correspondência com descargas atmosféricas de nuvem-solo em uma área correspondente a 840 km² conjugados com os dados pluviométricos.

Observações de raios CG e precipitação pluviométrica devem estar relacionadas de maneira direta, dado o fato de que ambas se originam das mesmas fontes que são as nuvens cumulonimbus. E percebeu-se que no período menos chuvoso a regressão linear entre essas variáveis indicou um baixo fator de correspondência em torno de 0.3. Espera-se, no entanto que no período chuvoso em que a cobertura de Cb's na área é mais uniforme, tal fator aumente consideravelmente. Assim, o autor chegou à conclusão de que é necessário obter

uma base de dados de maior período de observações e uma cobertura pluviométrica mais representativa da área. Entretanto, esse estudo mostra que a metodologia adotada é promissora para geração de informações sobre precipitação, a partir de dados de raios CG coletados em tempo real.

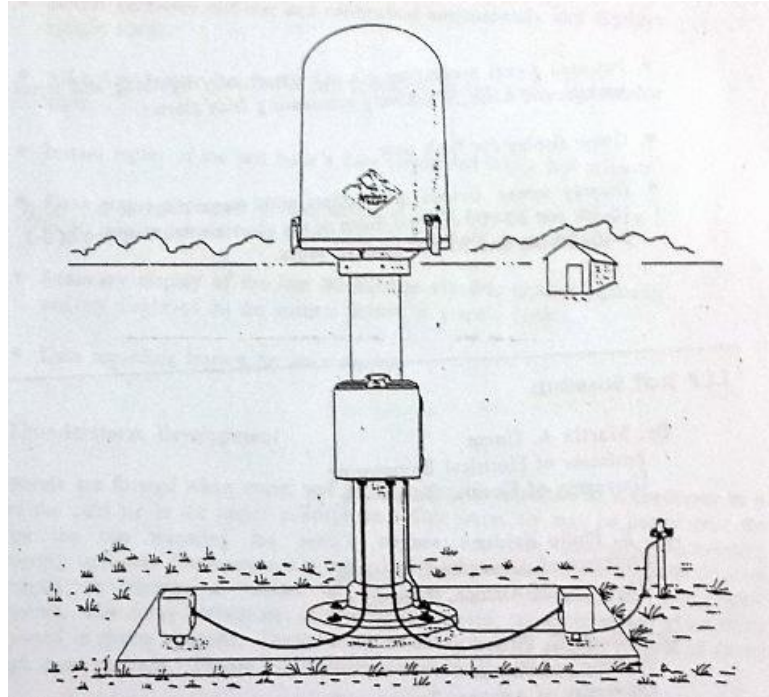
No Estado do Pará, já funcionaram dois sistemas de localização e detecção de descargas atmosféricas, a saber, o LLP que funcionou na década de 90 e a Rede do SIPAM que ficou em funcionamento entre 2004 e 2009.

Atualmente, o único sistema de detecção de raios cobrindo toda a região amazônica é a STARNET (Sferics Timing And Ranging NETWORK), que tem um de seus sensores instalado na cidade de Belém.

4.2 LIGHTNING LOCATION AND PROTECTION – LLP

O sensor LLP Modelo 430 TSS foi produzido em 1990 pela empresa Lightning Location and Protection inc, e pode ser visualizado na figura 33. O LLP funcionou 77 dias, sendo 34 dias em 1998 (correspondente aos meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro) e 43 dias em 1999, correspondente aos meses setembro, outubro, novembro e dezembro (BRASIL. LEI nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Regime de Concessão e Permissão da Prestação de Serviços Públicos).

Figura 28. Sensor LLP Modelo 430 TSS

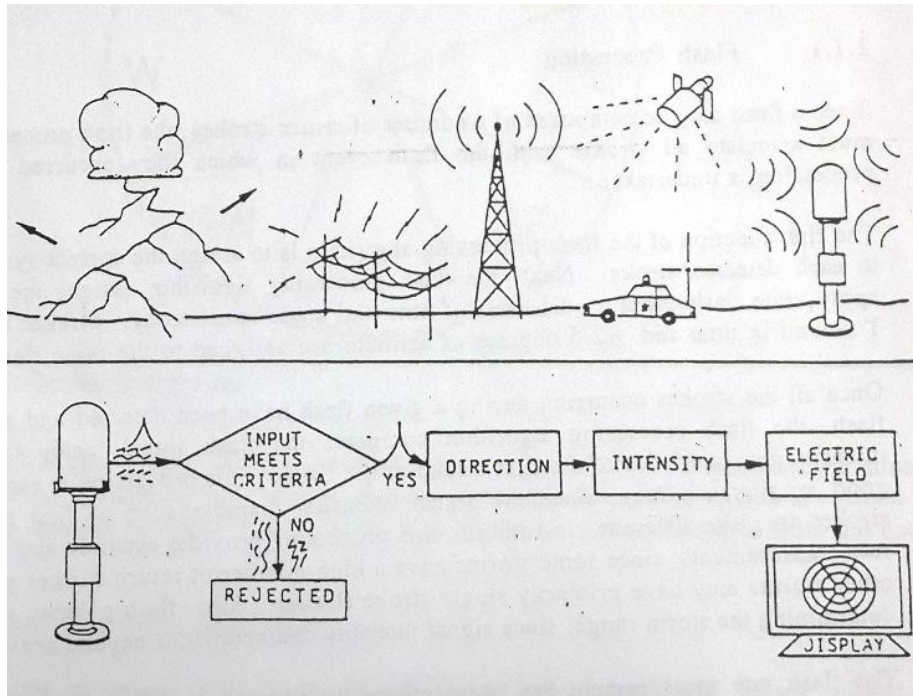


Fonte: ELETROBRÁS. Relatório da Pesquisa Sobre Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica. Março, 1991.

4.2.1 Funcionamento do Sensor

O Processo de detecção deste sensor se inicia quando o sensor detecta a energia produzida por uma onda de rádio frequência proveniente de uma descarga de retorno, a detecção é feita por antenas e receptores eletrônicos com uma largura de banda entre 1KHz e 350KHz. Os sinais na entrada do sensor são analisados e processados, aqueles sinais cuja a forma de onda não se parece com a de uma descarga de retorno são descartados.

Figura 29. Operação Básica do sensor.



Fonte: Fonte: ELETROBRÁS. Relatório da Pesquisa Sobre Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica. Março, 1991.

Este processo discriminatório da forma de onda da descarga de retorno foi uma grande inovação para época e foi patenteada pela LLP; tal método é essencial para não ocorrer falsos alertas de descargas.

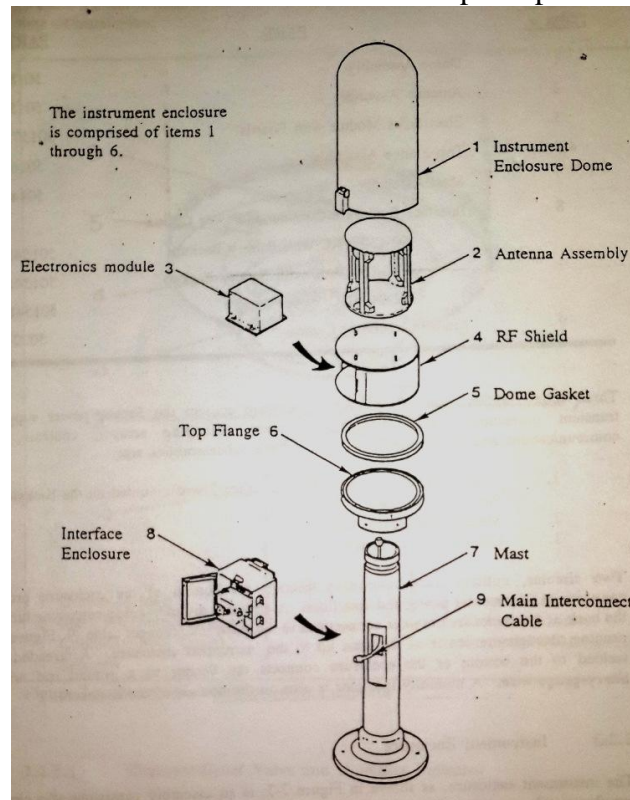
Sabe-se que um raio ou relâmpago pode ser composto de diversas descargas de retorno, assim o processamento do algoritmo dos raios deve associar todas as descargas com o evento (Raio) que as ocasionaram. Uma vez que todas as descargas ocorreram, o relâmpago é detectado e o algoritmo de processamento estabelece a direção e a proximidade do raio, mostrando o raio em um octante no display do dispositivo, conforme ilustrado na figura 34.

A direção do raio NT é determinada pelo campo magnético captado por uma antena formada por dois loops ortogonais. A proximidade do raio é determinada baseado tanto na distribuição estatística da intensidade de campo magnético quanto na propriedade das variações do campo elétrico detectadas pela antena Flat Plate. A polaridade do raio (positiva ou negativa) é considerada para determinadas distâncias e são processados separadamente.

Para otimizar a precisão da estimativa da direção do raio, a detecção do campo magnético é determinada no mesmo instante em que a descarga de retorno atinge seu pico inicial. Neste instante, a descarga está aproximadamente 100m do chão e se propaga verticalmente. Tal processo resulta em uma precisão angular de (+ ou -) 1 grau.

Na figura 30 podemos ver a estrutura interna deste equipamento.

Figura 30. Estrutura interna do sensor e seus principais componentes.



Fonte: Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf. Acesso em: 15 jan 2007.

Os dados obtidos no período de instalação deste sensor permitiram a primeira caracterização da atividade elétrica na região: campos elétricos e magnéticos produzidos pelas descargas, distribuições espaciais e temporais de ocorrências, intensidades e polaridades das descargas (BRASIL. LEI nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Novo Código Civil Brasileiro. Brazil's Most Valuable Brands 2006. Disponível em: <http://www.brandfinance.com/Uploads/pdfs/BrazilMVBrands06.pdf>. Acesso em: 10 Jan 2016)

A partir destes primeiros estudos, a região de Belém foi identificada como uma das zonas do planeta de maior densidade de raios e com intensidades de correntes muito elevadas. Os primeiros mapas de densidades de raios calculadas a partir daquelas observações foram de baixa resolução e limitadas para a região de Belém.

Vários estudos já utilizaram os dados deste sensor para a análise dos impactos das descargas atmosféricas na Amazônia: por exemplo, as correlações entre raios e desligamentos no

sistema telefônico de Belém ou os efeitos das descargas no sistema de distribuição de energia elétrica em torno de Belém (BRASIL. LEI nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Novo Código Civil Brasileiro. Brazil's Most Valuable Brands 2006. Disponível em: <<http://www.brandfinance.com/Uploads/pdfs/BrazilMVBrands06.pdf>>. Acesso em: 10 Jan 2016.)

4.3 GLOBAL ATMOSPHERIC

O Sensor LPATS-IV consiste em um gabinete de abertura frontal contendo três placas de circuito impresso. Também contém um módulo de suprimento de energia, uma placa de regulação de força e dois exaustores internos. Este receptor é de uso interno, as antenas de GPS e de descargas devem ser instaladas ao tempo e interligadas ao receptor por cabos coaxiais.

Basicamente, o receptor é composto por 5 subsistemas.

- Suprimento de energia
- Regulador de baixa tensão
- Receptor de Descargas
- Temporização e sincronização
- Processador principal.

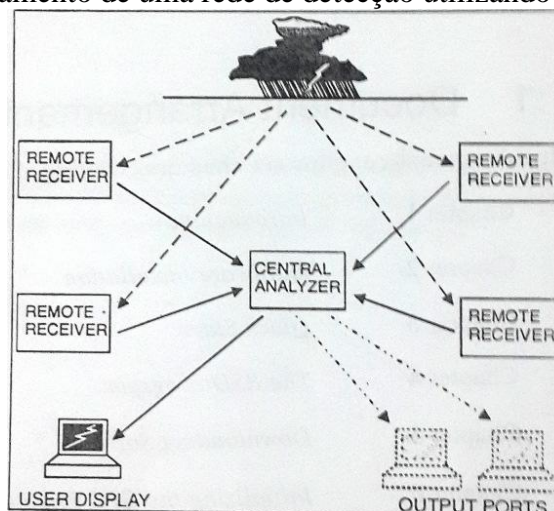
Figura 31. Sensor LPATS-IV.



Fonte: Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf. Acesso em: 15 jan 2007.

Uma rede de localização de raios utilizando o sensor LPATS-IV é configurada conforme a figura 31 ou a figura 32. Os receptores remotos adquirem as informações necessárias para a unidade central de análise, que calculará a localização do raio e disponibilizará esta informação para os usuários da rede.

Figura 32. Funcionamento de uma rede de detecção utilizando sensores LPATS-IV.



Fonte: Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf. Acesso em: 15 jan 2007.

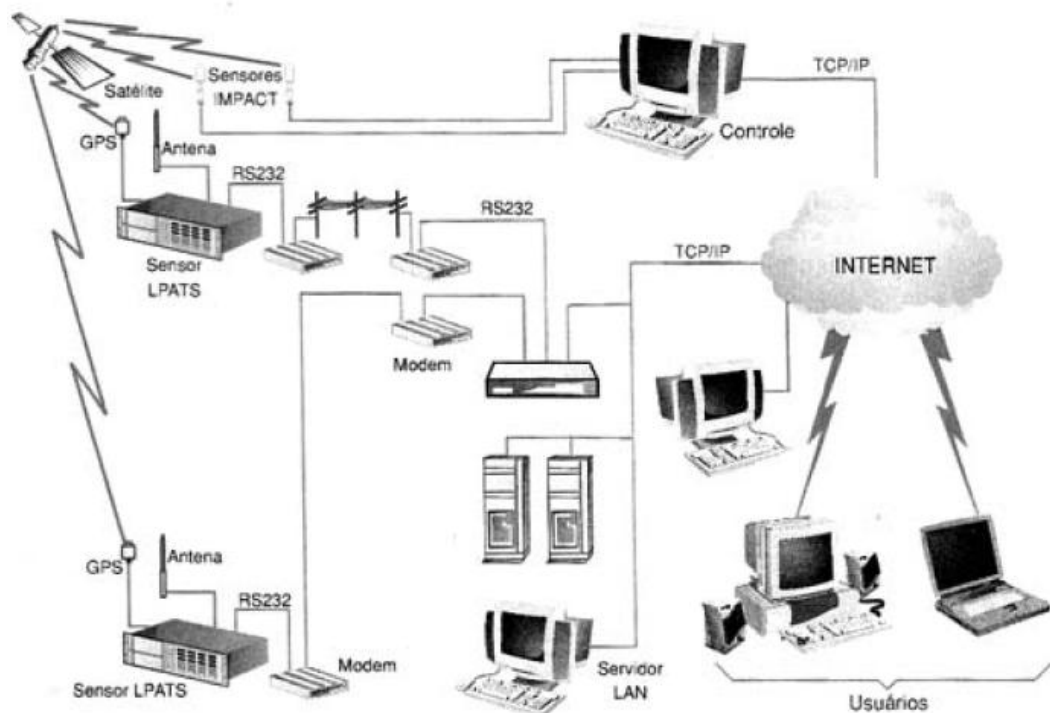
Com os sensores LPATS-IV, a rede deve ter uma distância entre os receptores remotos entre 160 e 320 Km. A precisão do sistema está entre 80 e 160 metros, para descargas a 480

Km do centro da rede. Esta excelente precisão para a época de lançamento do sensor se deve ao uso do método TOA.

Cada sensor contém um GPS que disponibiliza um sinal de clock com resolução de 50 nano segundos. Todos os clocks dos receptores são sincronizados por uma mesma referência externa, oriunda do GPS. Quando um raio é detectado por um sensor, o tempo exato de ocorrência do pico da forma de onda é enviado para a central de processamento.

A central correlaciona o tempo enviado de 3 ou mais sensores e calcula as diferenças TOA, usando estes resultados para resolver uma série de complexas equações hiperbólicas, a fim de determinar a exata localização em (latitude e longitude) do raio. A solução é obtida no mesmo tempo em que o sinal chega a central. Para informações adicionais sobre as descargas que ocorrem, cada receptor também envia para a central a amplitude e a polaridade de cada descarga detectada. Uma vez que a descarga é localizada, a central usa as informações recebidas para estimar o pico de corrente. Estes dados são: localização, polaridade, pico de corrente e forma de onda gravados em uma base de dados para estudos futuros.

Figura 33. Funcionamento da rede do SIPAM



Fonte: Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf>.

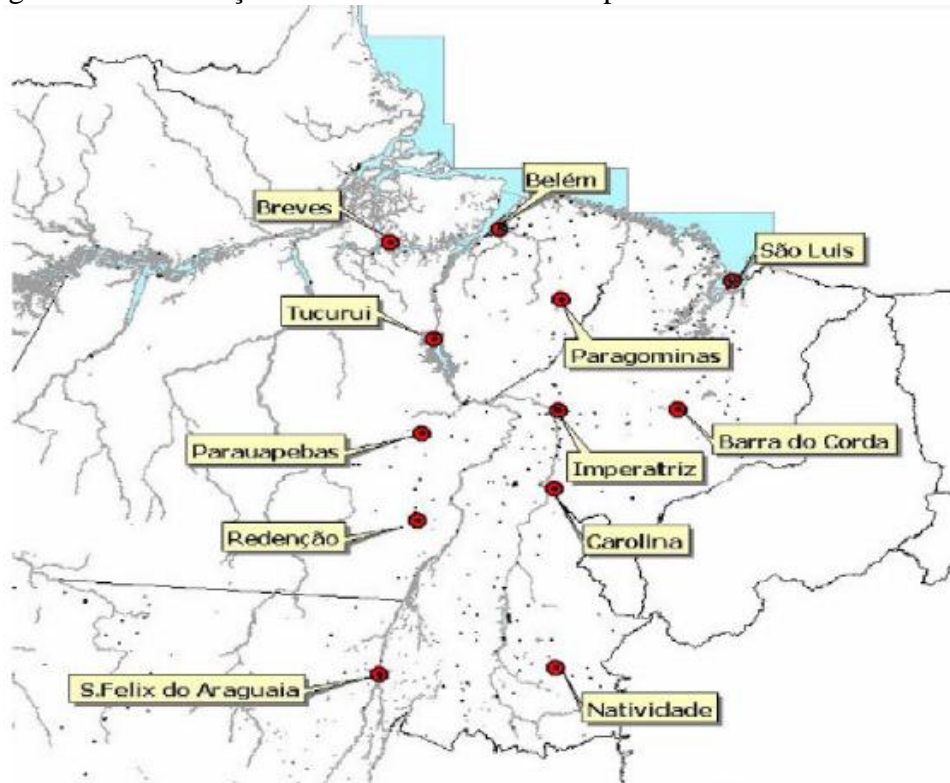
Acesso em: 15 jan 2007.

A partir de 2004, o SIPAM instalou e passou a operar uma Rede de Detecção de Raios, centralizada em Belém, composta por 12 (doze) sensores do tipo LPATSIV, instalados

na Amazônia Oriental, nas cidades de Belém, Breves, Tucuruí, Paragominas, São Luis, Imperatriz, Barra do Corda, Parauapebas, Carolina, Redenção, São Félix do Araguaia e Natividade, conforme mostra a figura 39 (DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402- 408 / 86-90. Atlas. 82).

Estes sensores foram distribuídos a uma distância que varia entre 160 e 320 km. A rede permitiu o monitoramento dos eventos de raio ao longo das linhas de transmissão de energia elétrica norte-sul da Eletronorte e Rede Celpa, empresas essas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como a caracterização das descargas na região (densidade, polaridade, intensidade de corrente). Esta rede ficou em operação até 2009.

Figura 34. Localização dos sensores LPATS-IV pertencentes a rede do SIPAM.



Fonte: FOLHA DE SÃO PAULO. Anel define regras para ressarcir danos a aparelhos. Caderno Dinheiro, Seção Energia, p.B3, 01 de maio de 2004. São Paulo. FÜHRER, M. C. A. Resumo de Direito Civil. São Paulo, 2002. 26ª edição, Malheiros Editores Ltda

4.4 STARNET

A rede STARNET ("Sferics Timing And Ranging NETwork" em português "Rede Experimental De Detecção De Descargas Atmosférica A Longa Distância") surge em 1997. A STARNET foi concebida pela Resolution Display Inc. (RDI), a partir do programa de desenvolvimento e inovação de pequenas empresas da NASA.

Em 2006, foi implantada a rede STARNET na América do Sul, a partir do projeto de P&D da Coelce (Companhia Energética do Ceará) com a UECE (Universidade Estadual do Ceará) e a USP (Universidade de São Paulo) com a instalação de 2 sensores no Brasil (em Fortaleza e Cachoeira Paulista), 1 no Caribe (em Guadalupe, França) e 1 sensor de teste em São Paulo. Depois, 6 novos sensores foram instalados no Brasil: Campo Grande, em 2007; Curitiba e São Martinho da Serra, em 2008, em parceria com o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR); Brasília e Manaus em parceria com o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), em 2009 (o sensor de Curitiba foi deslocado para Brasília); São Paulo, em 2010; e Belém, em 2012, também em parceria com o SIPAM.

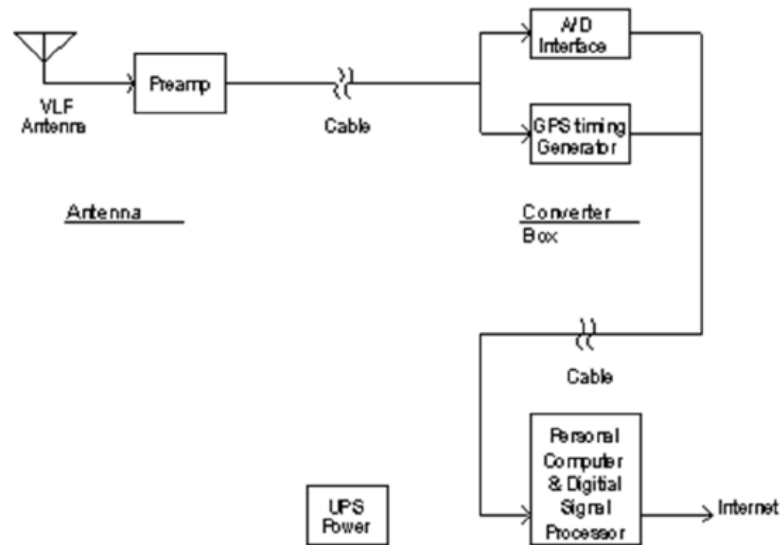
Figura 35. Localização dos sensores da STARNET no Brasil.



Fonte: FOLHA DE SÃO PAULO. Anel define regras para ressarcir danos a aparelhos. Caderno Dinheiro, Seção Energia, p.B3, 01 de maio de 2004. São Paulo. FÜHRER, M. C. A. Resumo de Direito Civil. São Paulo, 2002. 26ª edição, Malheiros Editores Ltda

Os sensores da rede STARNET são fabricados pela empresa Resolution Displays Inc. Cada estação é formada por uma antena rádio receptora de tipo vertical similar a um monopólio, acompanhada de um pré-amplificador, uma sala de operação incluindo um sistema de aquisição (conversor Analógico/Digital) e um computador ligado a Internet (Figura 41).

Figura 36. Diagrama de blocos da antena e receptor.



Fonte: FOLHA DE SÃO PAULO. Aneel define regras para ressarcir danos a aparelhos. Caderno Dinheiro, Seção Energia, p.B3, 01 de maio de 2004. São Paulo. FÜHRER, M. C. A. Resumo de Direito Civil. São Paulo, 2002. 26ª edição, Malheiros Editores Ltda.

Os sensores medem continuamente o campo elétrico vertical emitido pelas descargas atmosféricas na faixa de frequência entre 7 e 15 kHz e identifica no sinal as formas de onda das Sferics. Os algoritmos de processamento do sinal do receptor são otimizados para separar as Sferics fracas e distantes das interferências próximas do sensor. Um controle de qualidade do sinal é integrado dentro do sistema, de forma a eliminar as Sferics com baixa qualidade, os quais podem causar falsos alarmes. A presente versão do software é capaz de detectar 130 Sferics por segundo. A banda de recepção do sensor é definida por um filtro-impulsivo-finito (FIR), filtro digital que se estende por 4,1 kHz acima e abaixo da frequência central de 11 kHz. Cada forma de onda dos Sferics é capturada em janelas de 4,4 milissegundos .

Os sinais captados pelos sensores são enviados pela internet para o centro de processamento, situado na Universidade de São Paulo (USP), cada forma de onda de Sferics é identificada, os sinais captados estão sincronizados por um GPS (Sistema de Posicionamento Global) com uma precisão de 1 μ s. São necessários um mínimo de detecção de 4 formas de onda de Sferics para calcular a localização da descarga atmosférica, usando um método de diferença de tempo de chegada (ATD).

4.5 FUTURO DAS MEDIÇÕES

A eletricidade estática na atmosférica não apresenta muitos valores práticos, mas vem intrigando muitos pesquisadores no decorrer dos anos. Não existe escassez de tempestades ou de raios, mas o atual problema é como penetrar nas tempestades de forma segura e estudar suas microestruturas. Alguns dos problemas no estudo da eletricidade atmosférica e da formação das descargas pode ser resolvido com a instalação de laboratórios espaciais. As tempestades e a distribuição de raios no planeta podem ser monitoradas no mundo todo através do espaço (satélites) e podem ser correlacionadas com medições realizadas em solo. Isto pode ajudar a esclarecer muitas questões importantes, por exemplo: como a dinâmica de como o campo elétrico de tempo bom é mantido pelas tempestades de raios e comprovar técnicas de modelagem computacional da atmosfera.

Logo, o futuro é aprimorar os equipamentos de medidas de solo e projetar Equipamentos para realizar medidas do espaço, assim relacionando os dados obtidos para formular modelos cada vez mais realísticos.

CAPITULO 5 - ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO DADOS TEMPORAIS

5.1 INTRODUÇÃO

O projeto a ser analisado e descrito neste estudo trata de um sistema de detecção de descargas atmosféricas implementado através de algoritmo de localização com o auxílio de um software de geoprocessamento. O projeto tem como objetivo detectar o local de incidência da descarga atmosférica com suas respectivas coordenadas geográficas, informar quais sensores são de fato utilizados para o aprimoramento da detecção e se é possível calcular o erro geográfico, com um possível ruído externo, para uma determinada região. A idealização do projeto é para que ele seja usado por qualquer pessoa, e seja utilizado em qualquer região da Amazônia onde é escasso a utilização de detectores de descarga.

O algoritmo desenvolvido neste estudo aborda toda a teoria sobre o método TOA, conforme descrito no tópico 3.4 (redes de detecção descargas atmosféricas), levando em conta os efeitos associados à propagação do ruído, analisando o efeito sobre a localização da descarga sobre a superfície terrestre.

O algoritmo é composto por sub-rotinas, entre elas, a rotina que calcula a distância entre dois pontos sobre a superfície, com e sem os efeitos do ruído, além das sub-rotinas que calculam e articulam os tempos de detecção de cada sensor empregado na rede, longitude e latitude de um dado ponto. Este algoritmo foi elaborado com a intenção de detectar o local de incidência da descarga atmosférica com erros médios de localização, em virtude dos ruídos, através das simulações de interação com o tempo de cada sensor, conhecido como o modelo das diferenças dos tempos de chegada.

5.2 RUÍDOS

Ruídos podem ser definidos como sinais indesejados detectados pelo circuito. Existem várias fontes de ruídos, dos quais podemos dividi-los em: internos, gerados pelo próprio circuito devido a reatâncias capacitivas e indutivas; e externos, como os da atmosfera, sendo as descargas atmosféricas uma das principais fontes, os irradiados pelos sistemas de

fornecimento e distribuição de energias, bem como os irradiadores de ondas eletromagnéticas, como rádios-transmissores e motores de corrente alternada.

Para se combater os ruídos é imprescindível reconhecer as fontes de ruídos que estão presentes no sistema, bem como identificar os tipos de ruídos presentes. Os ruídos podem ser divididos em: ruído branco, de impulso e de interferência. O ruído branco é um tipo de ruído que pode ser facilmente identificado, pois ele estará presente em todo o espectro de frequência, daí a analogia do nome do ruído em relação ao espectro da luz branca; ruído de impulso não é tão fácil de ser identificado, devido a sua característica intermitente. Neste caso, a solução mais adequada é criar proteção à sua fonte geradora. As interferências são ruídos de frequências muito mais altas que o sinal, a qual se pretende medir, e estão modulados nos mesmos. A melhor forma de solucionar este ruído é utilizar um filtro para eliminá-lo do sinal.

Em 2008, foi proposto um modelo que ajuda a entender os efeitos dos ruídos em um dado circuito. Na figura 42 é mostrado um circuito que representa um sistema com ruído acoplado a partir das capacitâncias parasitas, onde V_r é a fonte do ruído, C_p representa as capacitâncias parasitas que acoplam o ruído e $Z_{entrada}$, representa a impedância de entrada do circuito.

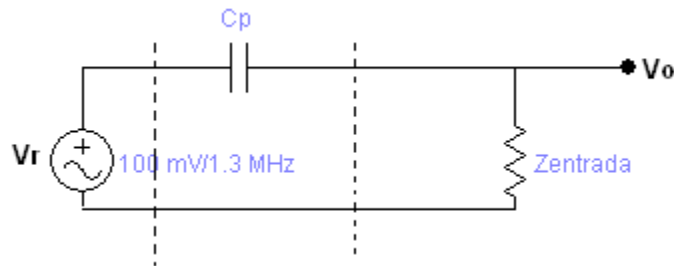
Assim, percebe-se que:

$$i_n = \frac{V_r}{Z_{entrada} + Z_{cp}} \quad (2)$$

$$v_0 = \frac{V_r}{\left(1 + \frac{Z_{cp}}{Z_{entrada}}\right)} \quad (3)$$

Se um circuito acoplar, através de uma capacitância parasita de 1 pF, um ruído de 50 mV e frequência de 1 MHz, este circuito com uma impedância de entrada de 50 M Ω terá um ruído de aproximadamente 49,8 mV sobre ele. O que se pode notar é que, praticamente, todo o ruído estará interferindo no circuito.

Figura 37. Mostra o modelo de um ruído acoplado a um sinal a partir de capacitâncias parasitas.



Fonte: GOMES, P.; ZANI, C. R.; SCHILLING M. Th.; CALDAS, G. P.; CAFÉ, F. F. Determinação dos custos de interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica. Eletricidade Moderna, nº 268, p. 146-152, Julho, 1996. São Paulo.

Uma das formas mais eficazes de se evitar os ruídos é a colocação de blindagem nos circuitos. Porém, para fazer isto, deve-se tomar alguns cuidados importantes, como, perceber que apesar desta forma de proteção ser eficiente, e com efeitos perceptíveis, a solução não pode ser tomada como uma única receita para todos os problemas. Por isto, é importante identificar a fonte, o receptor e o acoplamento médio do ruído, antes de propor uma solução para o problema ou pode-se propor algo que piore ainda mais a qualidade do sinal que se pretende medir (Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf>. Acesso em: 15 jan 2007).

Deve-se utilizar a blindagem com dois propósitos. O primeiro tem o objetivo de confinar o ruído em um ponto do circuito que não seja susceptível ao mesmo. Porém, esta técnica tem o risco de o ruído capturado não ser escoado corretamente para o aterramento, devido o ponto de terra não está adequado ou apresente problemas de conexão. O segundo é blindar o circuito que apresente sensibilidade ao ruído, evitando assim que o mesmo sofra com influências indesejadas.

Para se realizar este tipo de blindagem serão sugeridos alguns procedimentos que procuram garantir uma boa prática no processo de blindagem dos circuitos, assegurando assim, uma blindagem correta do sistema.

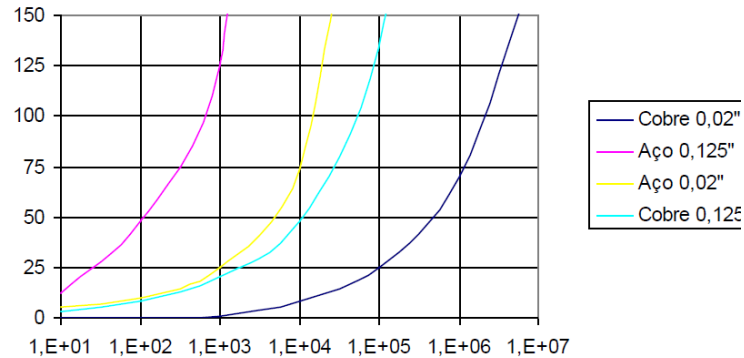
- A blindagem deve ser conectada à referência do circuito que se pretende blindar; se o circuito for aterrado, deve-se conectar a blindagem a este terra. Caso contrário, a blindagem deve ser conectado neste ponto de referência do circuito;
- Se a blindagem é dividida em vários pontos no decorrer do caminho do mesmo sinal, estas devem ser conectadas, entre si, formando um caminho único para o ruído, e ligadas à referência do sinal, em apenas um ponto;
- Não conecte ambas as extremidades da blindagem ao terra, pois uma diferença de potencial entre terras, causará uma corrente na blindagem. Corrente na blindagem causará interferência no sinal, através de acoplamento magnético.

5.2.1 Ruídos causados por campo magnético

Os ruídos causados por campo magnético são muito mais difíceis de serem evitados que os causados pelos campos elétricos, pois o campo magnético consegue penetrar em um condutor. Desta forma, uma simples blindagem em um condutor, conectada a uma referência, tem pouca, senão nenhuma eficácia na proteção de um ruído gerado por campo magnético. Quando o campo magnético penetra um material, ele decai proporcional a espessura deste material. A espessura do material da blindagem deve ser definida, para que o campo decaia a um valor de 37% (e^{-1}) do valor que o campo teria ao ar livre. Os materiais são mais eficientes para blindar campos de alta frequência, pois a espessura do material diminui com o aumento da frequência. A figura 43 mostra a curva de atenuação, de duas espessuras de aço e cobre, em relação a frequência do campo magnético que penetra por eles. Pode-se perceber que nenhum destes materiais têm eficiência para realizar blindagem eletromagnética em campos de baixa frequências (60 Hz), que é a maior fonte de ruídos magnéticos encontrados. Para realizar uma blindagem que seja eficaz aos campos magnéticos de 60 Hz, deve-se utilizar materiais paramagnéticos, que não são uma opção economicamente viável

Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf>. Acesso em: 15 jan 2007)

Figura 38. Curva - atenuação pela frequência do cobre e do aço em 02 espessuras diferentes.



Fonte: GOMES, P.; ZANI, C. R.; SCHILLING M. Th.; CALDAS, G. P.; CAFÉ, F. F. 1996, 32.

Como se pode perceber, blindar um circuito contra ruído magnético não é uma tarefa fácil. Assim, o que se sugere é localizar a fonte geradora para se manter distante, ou realizar algumas minimizações do acoplamento através de algumas mudanças na estrutura físicas do circuito e de suas fiações. Abaixo seguem algumas sugestões para minimizar os acoplamentos por campo magnéticos:

- Posicione o circuito o mais longe possível das fontes de campo magnético;
- Evite linhas de campo em paralelo com o fio; ao invés disto, cruze as linhas de campo fazendo um ângulo reto em relação aos fios do circuito;
- Use um cabo com par trançado para transmitir o sinal que se pretende proteger do campo magnético, transmita em cada cabo uma corrente de mesma magnitude e simetricamente oposta, pois assim, o campo em qualquer direção será zero em cada elo da trança. Nesta configuração, a corrente não pode ser compartilhada com outro circuito, como por exemplo, ligada ao terra;
- Ruídos induzidos magneticamente dependem da área do circuito fechado, para reduzir o acoplamento de ruídos por campo magnético, deve-se diminuir a área do circuito fechado, visto que a fonte do sinal e a carga estão ligadas através de um circuito formado por um par de fios que vai da fonte até a carga e volta, formando um circuito fechado. O comprimento deste cabo e a distância entre eles formam uma área onde, o campo magnético irá induzir uma tensão proporcional a esta área e ao cosseno do ângulo do circuito com o campo. Assim, para reduzir a tensão induzida, deve-se reduzir as distâncias entre os cabos e colocá-los ortogonal ao campo. Os cabos de par trançado são ótimos para esta aplicação.

5.2.2 Singularidades dos Ruídos

5.2.2.1 Latência

A latência pode ser dita como o atraso na troca de mensagens de ida e volta, ou seja, tanto o envio como a confirmação do recebimento do pacote têm de ser semelhantes.

- Quando ocorre uma diferença entre ambos, podemos dizer que está ocorrendo a latência.
- Quando ocorre muita latência na rede ocorre também colisões de pacotes. Estas inconsistências são em face à solicitação de reenvio dos pacotes pelos hosts.

5.2.2.2 Diafonia ou Crosstalk

É a interferência indesejada que um canal de transmissão causa em outro.

- A diafonia ocorre quando um sinal transmitido em um fio interfere ou até mesmo corrompe o sinal que está sendo transmitido no fio adjacente.
- Ocorre porque quando um dado está sendo transmitido em um fio, ele gera um campo eletromagnético ao seu redor e um fio posicionado dentro deste campo eletromagnético funciona como uma antena, capturando o sinal do outro e, assim, modificando as características do sinal que estava sendo transmitido por este fio.

5.2.2.3 Atenuação

A atenuação é o enfraquecimento do sinal durante a propagação. Para transmitir sinais à distância, vencendo a atenuação e o ruído, usam-se dois processos básicos: modulação e amplificação. Nenhum meio de transmissão é capaz de transmitir sinais sem que parte da energia desses se perca durante o processo. A essa perda de energia dá-se o nome de **Atenuação**. A atenuação (L) de um sinal é medida em decibéis (dB).

Modulação é o processo de inserção de informação numa onda de frequência maior, denominada **Portadora**. O sinal de informação é utilizado para variar uma das características da portadora: Amplitude ou frequência.

- Amplificação: É o aumento da amplitude do sinal. Tem como funções amplificar um sinal a ser transmitido, para que ele possa se propagar no espaço, e amplificar o sinal recebido.

5.3 GEOPROCESSAMENTO

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas.

Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, o que impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados.

Com o desenvolvimento simultâneo, na segunda metade deste século, da tecnologia de Informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento.

Nesse contexto, o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (GIS1), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados geo-referenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Pode-se dizer, de forma genérica, “onde é importante para seu negócio, Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho”. Sempre que o “onde” aparece, dentre as questões e problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um SIG.

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o Geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias

de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente. Na figura 44 abaixo, temos a ilustração dos passos para se obter um geoprocessamento adequado as características desejadas (FOLHA DE SÃO PAULO. Aneel define regras para ressarcir danos a aparelhos. Caderno Dinheiro, Seção Energia, p.B3, 01 de maio de 2004. São Paulo. FÜHRER, M. C. A. Resumo de Direito Civil. São Paulo, 2002. 26ª edição, Malheiros Editores Ltda.)

Figura 39. Passos para se obter um geoprocessamento adequado as características desejadas



Fonte: GOMES. P.; SCHILLING M. Th. Custo de Interrupção: Conceituação, Metodologia de Avaliação, Valores Existentes e Aplicações. In: XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belém. Pará, 1997.

5.3.1 Breve histórico do geoprocessamento

5.3.1.1 Evolução internacional

As primeiras tentativas de automatizar parte do processamento de dados com características espaciais aconteceram na Inglaterra e nos Estados Unidos, nos anos 50, com o objetivo principal de reduzir os custos de produção e manutenção de mapas. Dada a precariedade da informática na época, e a especificidade das aplicações desenvolvidas (pesquisa em botânica, na Inglaterra, e estudos de volume de tráfego, nos Estados Unidos), estes sistemas ainda não podem ser classificados como “sistemas de informação”.

Os primeiros Sistemas de Informação Geográfica surgiram na década de 60, no Canadá, como parte de um programa governamental para criar um inventário de recursos naturais. Estes sistemas, no entanto, eram muito difíceis de usar: não existiam monitores gráficos de alta resolução, os computadores necessários eram excessivamente caros e a mão de obra tinha que ser altamente especializada e caríssima. Não existiam soluções comerciais prontas para uso e cada interessado precisava desenvolver seus próprios programas, o que demandava muito tempo e, naturalmente, muito dinheiro.

Além disto, a capacidade de armazenamento e a velocidade de processamento eram muito baixas. Ao longo dos anos 70 foram desenvolvidos novos e mais acessíveis recursos de hardware, tornando viável o desenvolvimento de sistemas comerciais. Foi então que a expressão Geographic Information System foi criada. Foi também nesta época que começaram a surgir os primeiros sistemas comerciais de CAD (Computer Aided Design, ou projeto assistido por computador), que melhoraram em muito as condições para a produção de desenhos e plantas para engenharia, e serviram de base para os primeiros sistemas de cartografia automatizada. Também nesta década foram desenvolvidos alguns fundamentos matemáticos voltados para a cartografia, incluindo questões de geometria computacional. No entanto, devido aos custos e ao fato destes proto-sistemas ainda utilizarem exclusivamente computadores de grande porte, apenas grandes organizações tinham acesso à tecnologia.

A década de 80 representa o momento quando a tecnologia de sistemas de informação geográfica inicia um período de acelerado crescimento que dura até os dias de hoje. Até então limitados pelo alto custo do hardware e pela pouca quantidade de pesquisa específica sobre o tema, os GIS se beneficiaram grandemente da massificação causada pelos avanços da microinformática e do estabelecimento de centros de estudos sobre o assunto. Nos EUA, a criação dos centros de pesquisa, que formam o NCGIA - National Centre for Geographical Information and Analysis, marca o estabelecimento do Geoprocessamento como disciplina científica independente.

No decorrer dos anos 80, com a grande popularização e barateamento das estações de trabalho gráficas, além do surgimento e evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados relacionais, ocorreu uma grande difusão do uso de GIS. A incorporação de muitas funções de análise espacial proporcionou também um alargamento do leque de aplicações de GIS. Na década atual, observa-se um grande crescimento do ritmo de penetração do GIS nas organizações, sempre alavancado pelos custos decrescentes do hardware e do software, e também pelo surgimento de alternativas menos custosas para a construção de bases de dados geográficas.

5.3.1.2 Desenvolvimentos no Brasil

A introdução do Geoprocessamento no Brasil inicia-se a partir do esforço de divulgação e formação de pessoal feito pelo prof. Jorge Xavier da Silva (UFRJ), no início dos anos 80. A vinda ao Brasil, em 1982, do Dr. Roger Tomlinson, responsável pela criação do primeiro SIG (o Canadian Geographical Information System), incentivou o aparecimento de vários grupos interessados em desenvolver tecnologia, entre os quais, podemos citar:

- UFRJ: O grupo do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geografia da UFRJ, sob a orientação do professor Jorge Xavier, desenvolveu o SAGA (Sistema de Análise Geo-Ambiental). O SAGA tem seu forte na capacidade de análise geográfica e vem sendo utilizado com sucesso enquanto veículo de estudos e pesquisas.
- MaxiDATA: os então responsáveis pelo setor de informática da empresa de aerolevanteamento AeroSul criaram, em meados dos anos 80, um sistema para automatização de processos cartográficos. Posteriormente, constituíram empresa MaxiDATA e lançaram o MaxiCAD, software largamente utilizado no Brasil, principalmente em aplicações de Mapeamento por Computador. Mais recentemente, o produto dbMapa permitiu a junção de bancos de dados relacionais a arquivos gráficos MaxiCAD, produzindo uma solução para "desktop mapping" para aplicações cadastrais.
- INPE: Em 1984, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) estabeleceu um grupo específico para o desenvolvimento de tecnologia de geoprocessamento e sensoriamento remoto (a Divisão de Processamento de Imagens - DPI). De 1984 a 1990, a DPI desenvolveu o SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens) e o SGI (Sistema de Informações Geográficas), para ambiente PC/DOS; e, a partir de 1991, o SPRING (Sistema para Processamento de Informações Geográficas) foi desenvolvido para ambientes UNIX e MS/Windows.

O SITIM/SGI foi o suporte de um conjunto significativo de projetos ambientais, podendo-se citar: (a) o levantamento dos remanescentes da Mata Atlântica Brasileira (cerca de 100 cartas), desenvolvido pela IMAGEM Sensoriamento Remoto, sob contrato do SOS Mata Atlântica; (b) a cartografia fito-ecológica de Fernando de Noronha, realizada pelo NMA/EMBRAPA; (c) o mapeamento das áreas de risco para plantio para toda a Região Sul

do Brasil, para as culturas de milho, trigo e soja, realizado pelo CPAC/EMBRAPA; (d) o estudo das características geológicas da bacia do Recôncavo, através da integração de dados geofísicos, altimétricos e de sensoriamento remoto, conduzido pelo CENPES/Petrobrás. Assad e Sano (1998, p.45) apresentam um conjunto significativo de resultados do SITIM/SGI na área agrícola. O SPRING unifica o tratamento de imagens de Sensoriamento Remoto (ópticas e microondas), mapas temáticos, mapas cadastrais, redes e modelos numéricos de terreno. A partir de 1997, o SPRING passou a ser distribuído via Internet e pode ser obtido através do website <http://www.dpi.inpe.br/spring>.

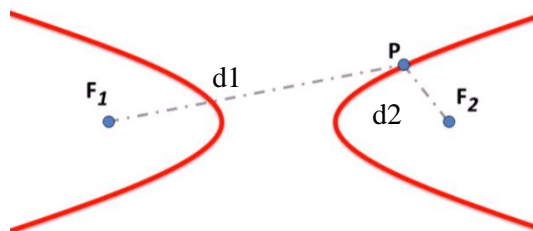
5.4 HIPÉRBOLES

Consideremos fixados no plano dois pontos no plano cartesiano, F_1 e F_2 .

A hipérbole é o lugar geométrico dos pontos do plano, cujo valor absoluto da diferença das distâncias aos pontos F_1 e F_2 é uma constante positiva menor do que a distância entre os pontos F_1 e F_2 , caracterizado na figura 45. Escrevendo esta constante como $2a$, temos:

$$\text{Hipérbole} = (|d(P, F_1) - d(P, F_2)| = 2a) \quad (4)$$

Figura 40- Hipérbole com lugar geométrico no plano: $|d_1 - d_2| = 2a$.



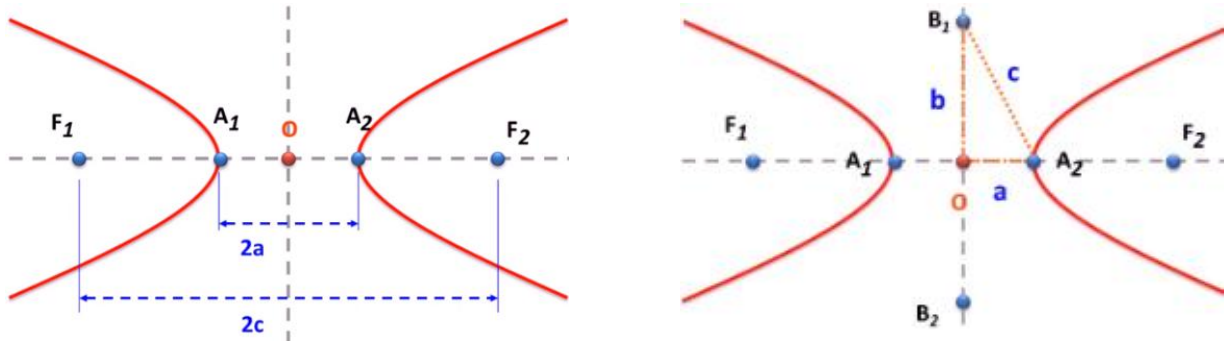
Fonte: GOUVÊA. M. R.; RIBEIRO. J. A.; PACHECO NETO. S.; MARTINS. M. J.; DOMANESCHI. M. Análise de Taxas de Falha em Transformadores de Distribuição. Relatório CED – 052 / EQPT 001 / RL 001 / OR. Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica. IEE/USP – ELETROPAULO – CESP – CPFL. São Paulo, 1992.

Os pontos F_1 e F_2 no plano cartesiano são chamados focos da hipérbole.

Para encontrar a equação da hipérbole, vamos fixar um sistema de coordenadas. Consideramos o eixo x como o eixo focal, a reta passando por F_1 e F_2 , com a origem O situada no ponto médio do segmento F_1F_2 , e o eixo y sendo a reta perpendicular a este

segmento passando por O. A orientação do eixo x é de O para F_2 e o eixo y tem a sua orientação fixada, conforme figura 41. Onde $c^2 = b^2 + a^2$.

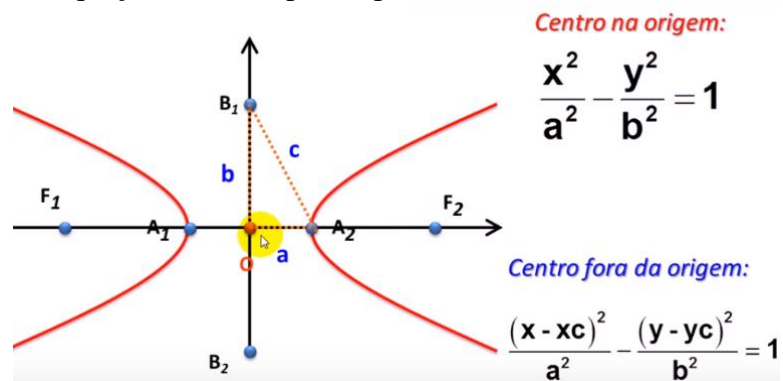
Figura 41- Construção de um sistema de coordenadas



Fonte: GOUVÊA. M. R.; RIBEIRO. J. A.; PACHECO NETO. S.; MARTINS. M. J.; DOMANESCHI. M. Análise de Taxas de Falha em Transformadores de Distribuição. Relatório CED – 052 / EQPT 001 / RL 001 / OR. Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica. IEE/USP – ELETROPAULO – CESP – CPFL. São Paulo, 1992.

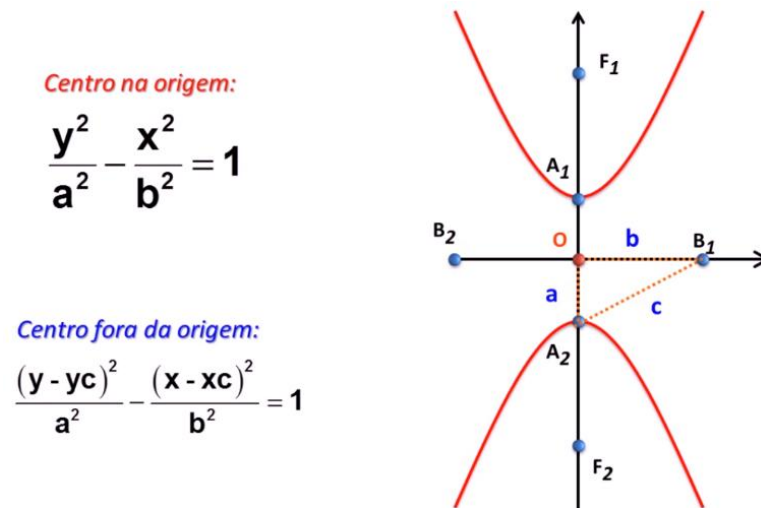
As figuras 42 e 43 mostram as equações reduzidas das hipérbolas.

Figura 42. Equação reduzida para hipérbole: o eixo real está sobre o eixo X.



Fonte: Do autor

Figura 43. Equação reduzida para hipérbole: o eixo real está sobre o eixo Y.



Fonte: Do autor

5.5 ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO A PARTIR DO MÉTODO TOA.

O método mais utilizado atualmente baseia-se na determinação da Diferença de Tempo de Chegada dos pulsos eletromagnético de descargas atmosféricas até as diversas estações de um sistema de detecção de raios. Essa técnica é relacionada a propagação das ondas de solo (o *ground wave*). Após a ocorrência de uma descarga, o sinal eletromagnético emitido desloca-se até atingir as estações de monitoramento, que estão localizadas em diferentes pontos. O TOA usa apenas o componente impulsivo da descarga atmosférica, gerada pelo pico de corrente da Descarga de retorno. Admitindo-se uma propagação da onda a velocidade da luz c , o tempo de chegada até uma estação, partindo do local de incidência, será:

$$t_i = \frac{D_i}{c} \quad (5)$$

Onde: t_i = tempo de chegada do sinal na estação i ; D_i = distância da estação i ao local de incidência da descarga atmosférica; c = velocidade de propagação da onda eletromagnética (velocidade da luz c).

Após a identificação da chegada, a diferença de tempo de chegada, entre pares de antenas, é usada para produzir um conjunto de localizações possíveis de incidência do raio que formam uma Hipérbole. Nesta técnica são necessárias pelo menos três estações para a localização de um evento. O método TOA precisa de uma sincronização temporal dos sensores de alta resolução com um GPS (*Global Positioning System*). Devido à ambiguidade da intersecção de duas hipérbolas, no caso geral, são necessárias quatro medições de hora de chegada. Hoje, o método de TOA-3D na faixa VHF permite o mapeamento mais completo do

desenvolvimento espacial e temporal dos canais de raios, tornando possível inferir as estruturas complexas de carga em nuvens.

O método TOA é denominado de Time Of Arrival-TOA (Diferença dos tempos de chegada). Neste trabalho, o método TOA é usado para medir a diferença dos tempos de chegada de variáveis específicas. Tal algoritmo destaca a importância da hipérbole (pertencente à família das curvas cônicas), dentro de uma aplicação de física atmosférica na detecção de descargas atmosféricas e favorece o campo da didática, demonstrando a importância do uso da matemática em problemas reais.

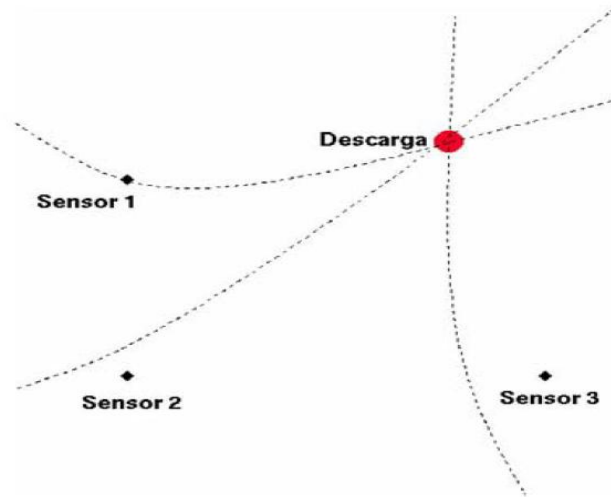
Os sensores desta rede são basicamente antenas que são capazes de captar e medir os impulsos eletromagnéticos criados pelas descargas atmosféricas. O sinal do campo elétrico emitido pela descarga atmosférica demora certo tempo para atingir uma determinada antena da rede; se considerar R a distância entre a antena e o ponto atingido pelo raio, e T o intervalo de tempo para que a informação percorra R , podemos afirmar que $R=C_0.T$, sendo C_0 a velocidade da luz. A análise do intervalo de tempo decorrido para a chegada do sinal do campo elétrico, a partir de duas antenas diferentes do sistema, nos permite determinar uma curva na forma de uma hipérbole, sobre a qual o ponto onde o raio foi detectado é situado (FOLHA DE SÃO PAULO. Aneel define regras para ressarcir danos a aparelhos. Caderno Dinheiro, Seção Energia, p.B3, 01 de maio de 2004. São Paulo. FÜHRER, M. C. A. Resumo de Direito Civil. São Paulo, 2002. 26ª edição, Malheiros Editores Ltda.)

Descarga atmosférica (raio, relâmpago) é o fenômeno pelo qual uma grande quantidade de cargas elétricas adquire energia suficiente para superar a rigidez dielétrica do ar. Uma descarga atmosférica gera um campo eletromagnético que gasta tempos diferentes para atingir as estações detectoras situadas a diferentes distâncias em relação ao ponto de incidência.

Se as estações estiverem sincronizadas temporalmente é possível determinar o lugar geométrico de ocorrência do evento através da diferença entre os tempos de chegada de uma radiação em várias estações. Como as radiações propagam-se com a velocidade da luz, a diferença constante no tempo de chegada entre duas estações define uma hipérbole. Com isso, várias estações dão origem a múltiplas hipérbolas, cujas interseções definem a localização da fonte de radiação.

A técnica utilizada para mapear esses eventos é a diferença no tempo de chegada (Time of Arrival – TOA), também conhecida como método das hipérbolas, apresentado na figura 44.

Figura 44- Método das hipérbolas para detecção de descargas atmosféricas



Fonte: GOUVÊA. M. R.; RIBEIRO. J. A.; PACHECO NETO. S.; MARTINS. M. J.; DOMANESCHI. M. Análise de Taxas de Falha em Transformadores de Distribuição. Relatório CED – 052 / EQPT 001 / RL 001 / OR. Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica. IEE/USP – ELETROPAULO – CESP – CPFL. São Paulo, 1992.

De acordo com a Figura 44, quando ocorre um raio, os três sensores detectam a radiação emitida pelo evento. Considerando que o sensor 1 foi o primeiro a registrar o pulso de radiação, as diferenças de caminhos percorridos pela radiação entre os sensores 1 e 2 (d_{12}) e os sensores 1 e 3 (d_{13}) são calculadas conforme as equações 6 e 7.

$$d_{12} = c (t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$d_{13} = c (t_3 - t_1) \quad (7)$$

Porém, como é possível conhecer a localização de instalação de cada sensor, nota-se que essa diferença de caminho corresponde as seguintes equações, que utiliza a diferença dos pontos da descarga atmosférica:

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2} - \sqrt{(x_2 - x_r)^2 + (y_2 - y_r)^2} \quad (3)$$

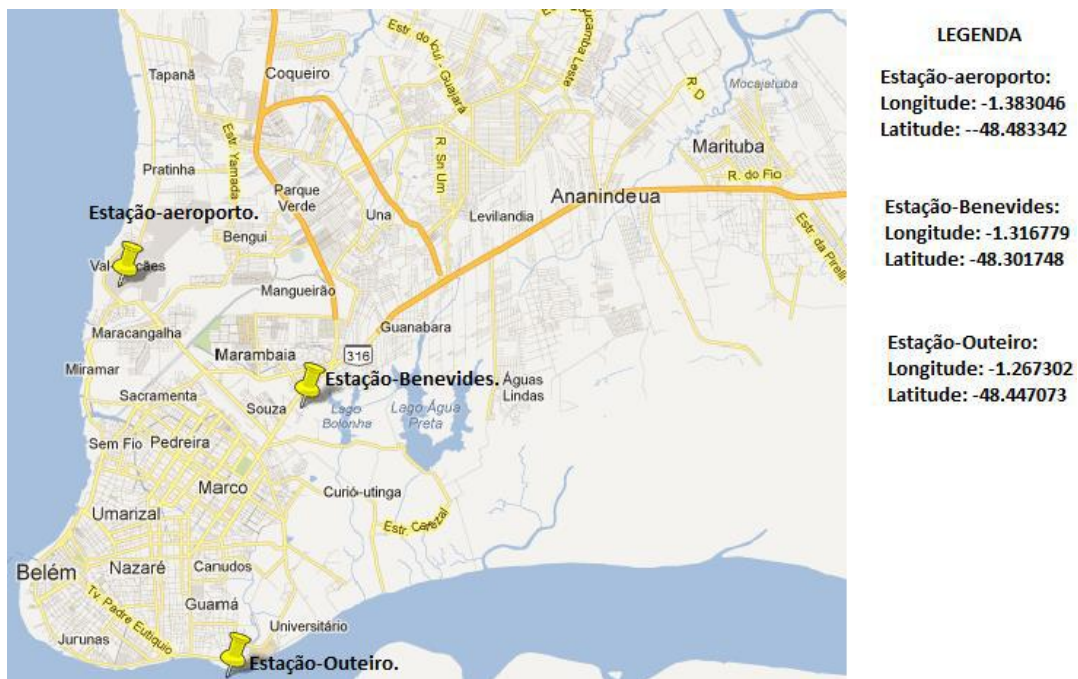
$$d_{13} = \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2} - \sqrt{(x_3 - x_r)^2 + (y_3 - y_r)^2} \quad (4)$$

Nas equações 8 e 9, x_r , e y_r são os locais de ocorrência do raio; x_1 , x_2 e x_3 são os focos dos sensores 1, 2 e 3 respectivamente; ou seja, onde os sensores estão e d_{12} e d_{13} são as diferenças dos tempos de chegada para cada par de sensor. As equações 8 e 9 são equações de hipérbolas, portanto a localização da descarga é determinada pelo ponto de cruzamento entre as hipérbolas associadas às diferenças de caminho da radiação. Note que os focos das hipérbolas correspondem às posições dos sensores, assim cada dois sensores definem duas

hipérboles. O cruzamento das hipérboles representa uma solução, em que a diferença de caminho percorrido pela radiação corresponde ao tempo de detecção em cada sensor. Quando ocorre mais de um cruzamento entre as hipérboles, é considerado o ponto de cruzamento mais próximo ao sensor que identificou a descarga com o menor tempo.

Agora veremos uma breve simulação do algoritmo de localização geográfica, em que serão testados e avaliados alguns dados responsáveis por detectar o local da descarga atmosférica, como local dos sensores, o tempo de chegada em cada sensor, a interseção das hipérboles e o posicionamento do raio no plano geográfico. Na figura 45, são apresentados os sensores com as suas longitudes e latitudes no plano geográfico.

Figura 45- Localização dos sensores com suas longitudes e latitudes.



Fonte: Do autor

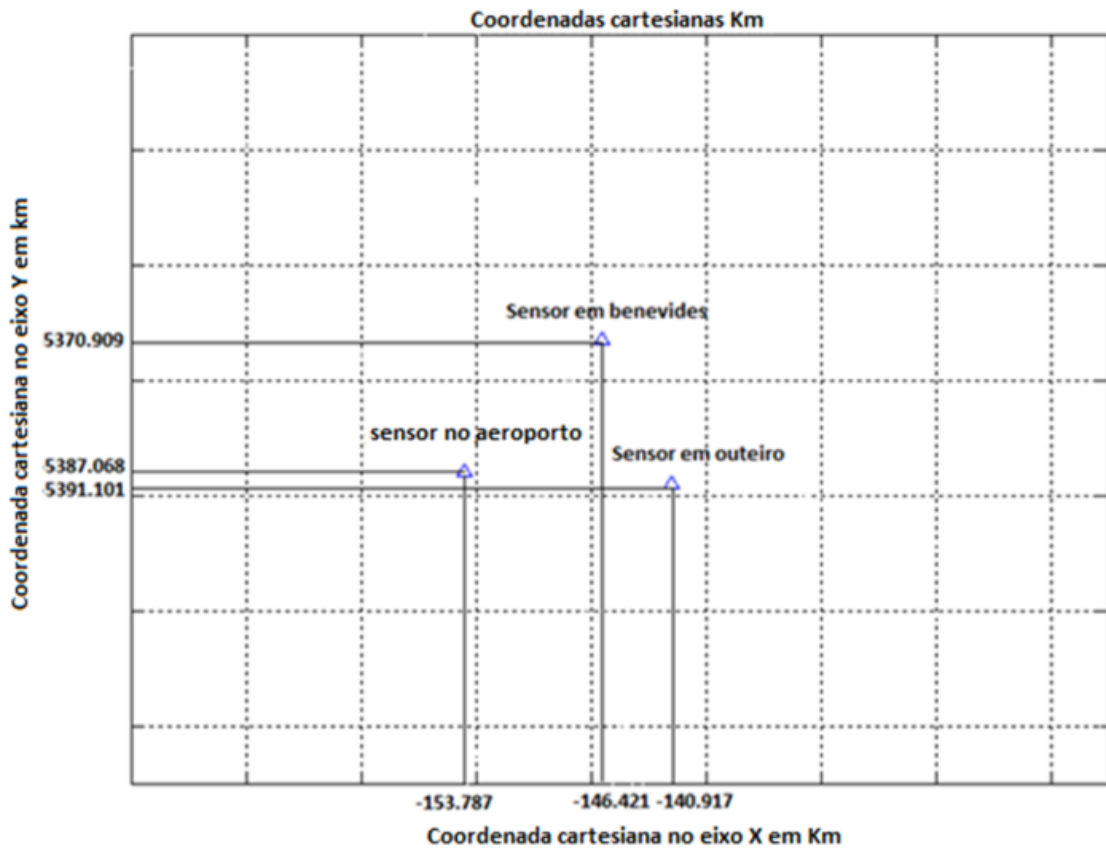
Na figura 46 são apresentados os respectivos sensores no plano cartesiano, visto que a relação entre coordenadas geográficas e coordenadas cartesianas é bem simples. Neste caso, temos:

$$L = \alpha \cdot R \quad (10)$$

Onde L representa a coordenada cartesiana em quilômetros, α representa a coordenada geográfica em radianos e R equivale ao raio da terra, ou seja, aproximadamente 6371 km. Transformando o α de grau para radiano, temos a seguinte fórmula:

$$L = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot 6371}{180} \quad (11)$$

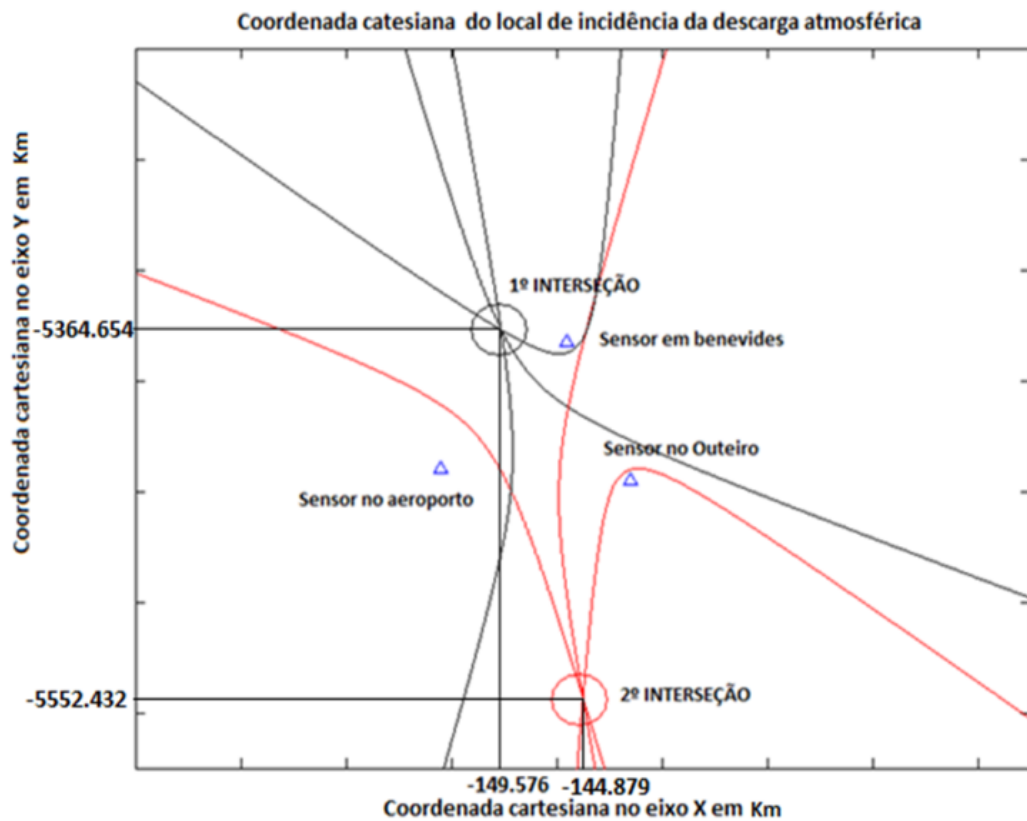
Figura 46- Ilustração dos sensores no plano cartesiano



Fonte: Do autor.

Analisando os dados de tempo de chegada para cada sensor, a localização de cada sensor e o cálculo da diferença dos tempos de chegada, é possível traçar a interseção das hipérboles. Conhecendo o local de interseção das hipérboles, é conhecido o local de incidência da descarga atmosférica, conforme mostra a figura 47.

Figura 47- Locais de interseção de hipérboles.



Fonte: Do Autor.

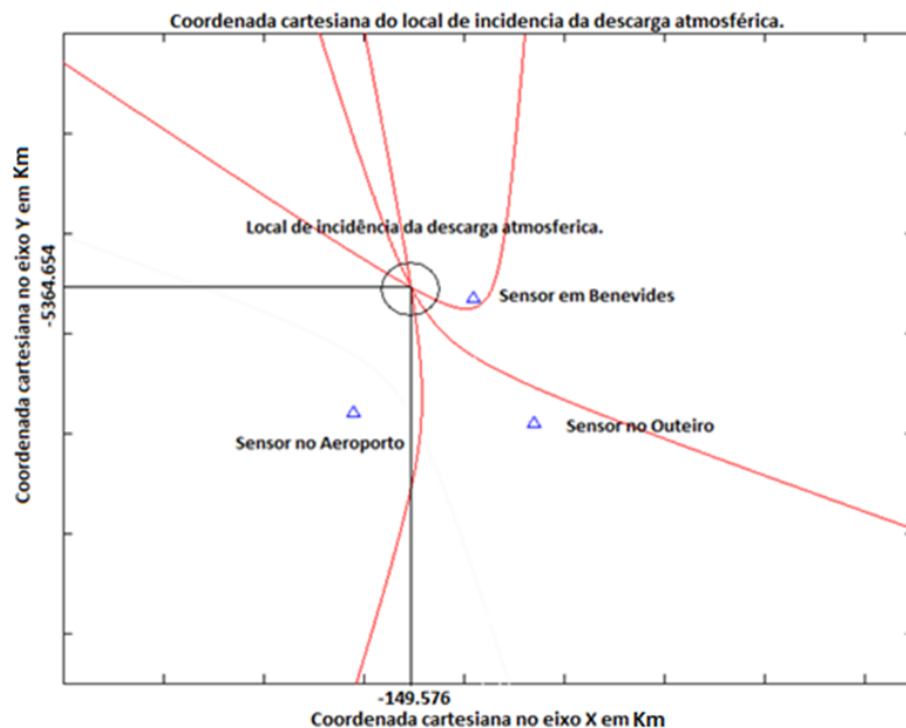
Tabela 1. Longitude, latitude e tempo de detecção dos sensores 1, 2 e 3.

	LONGITUDE	LATITUDE	TEMPO DE DETECÇÃO DA PERTURBAÇÃO
Sensor-Benevides	-1.316779	-48.30174	50 μ s
Sensor-Outeiro	-1.267302	-48.44707	10 μ s
Sensor-Belém (Aeroporto)	-1.383046	-48.48334	25 μ s

Fonte: Do autor.

Na figura 47 ocorre mais de um cruzamento de hipérboles, em virtude de cada hipérbole ter uma parte positiva e uma negativa. Nesses casos, é considerado o ponto de cruzamento mais próximo ao sensor que identificou a descarga com o menor tempo, ou seja, o sensor que identificou a descarga com menor tempo foi o sensor localizado na estação de Outeiro; 1º interseção, conforme aponta a figura 48.

Figura 48- Local de incidência da descarga atmosférica



Fonte: Do autor.

Na figura 48 é apresentado o local de incidência da descarga atmosférica em coordenadas cartesianas. Quando as coordenadas cartesianas são substituídas por coordenadas geográficas, o gráfico final do possível local de incidência do raio com sua longitude e latitude é ilustrado na figura 54. Então, para efeito de localização da perturbação, é necessário apenas ter a localização de cada sensor e o tempo em que cada sensor detectou a descarga atmosférica.

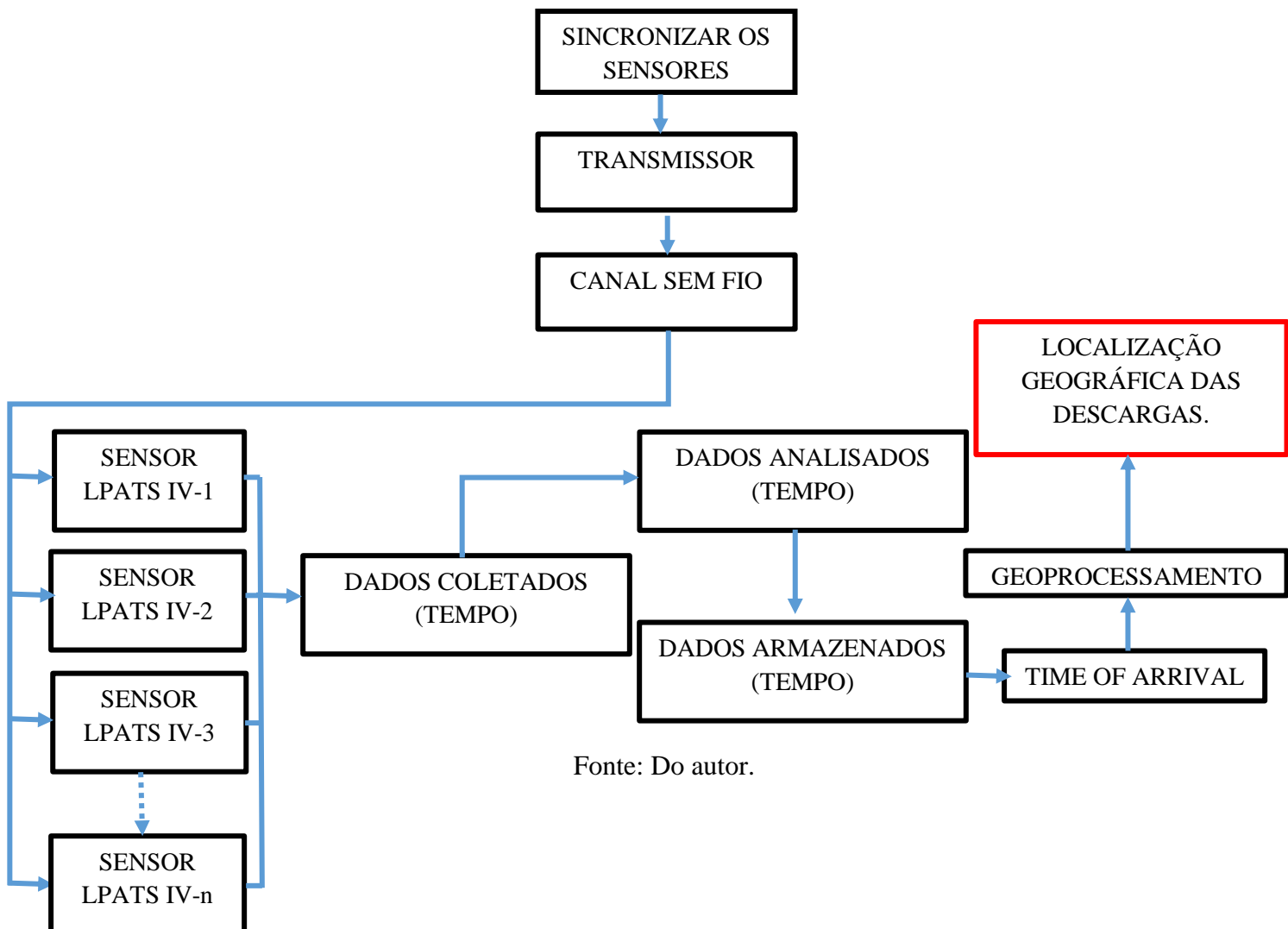
Figura 49- Local de incidência do raio



Fonte: Do autor.

A figura 50 ilustra os passos em ordem cronológica do algoritmo para localização das descargas atmosférica.

Figura 50. Passo a passo do algoritmo TOA.



Fonte: Do autor.

5.6 REGIÃO DE ESTUDO

As regiões e o banco de dados temporais utilizados para a simulação deste trabalho foram analisados com extrema delicadeza, pois para cada tempo de detecção do evento de relâmpagos nuvem-solo similares aos tempos dos sensores da rede LPTAS IV, haverá uma adequada região para cada sensor da rede. Neste capítulo, além de definidos a região de estudo, serão apresentados e discutidos a avaliação das simulações com dados observacionais de superfície. Ao final da última análise, índices estatísticos foram calculados, a fim de ratificar a escolha das parametrizações a respeito da localização geográfica dos raios.

Para o estudo da tese, foram escolhidos cinco sensores com localização geográficas hipotéticas e uma base de dados temporais simulados, similares aos dos sensores da rede LPATS IV.

5.7 LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES PARA ESTUDO

Uma configuração da rede é definida como a combinação das estações em operação (o número e a localização).

Define-se primeiro K_0 , o conjunto dos nk , número de **sensores disponíveis** kn da rede: $K_0 = \{k_1, k_2, \dots, k_{nk}\}$. Um sensor é definido por sua posição geográfica em latitude e longitude. Define-se também uma configuração de sensores ativos da rede, K como um conjunto de naK , número **sensores ativos**: $K = \{k_1, k_2, \dots, k_{nak}\}$.

Depois, se define S , o conjunto de ns , número de **configurações possíveis** K da rede, incluindo K_0 como a configuração que tem todos os sensores disponíveis da rede ativos: $S = \{K_0, K_1, K_2, \dots, K_{ns}\}$; A matriz $ak(K, kn)$ de dimensão $(ns \times nk)$ é formada pelos **Flags de ativação** dos sensores disponíveis kn da rede:

– Se o sensor kn é ativo, logo $ak(K, kn) = 1$

– Se o sensor k_n não ativo, logo $ak(K,k_n) = 0$

Então,

$$K = \{ k_n / ak(K,k_n) = 1 \} \text{ e } nak = \sum_n ak(K,k_n) \quad (12)$$

Em seguida, a identificação das várias configurações da rede é baseada nos Diagramas de Operação e em uma **hipótese**: uma estação é assumida não ativa (ou sem participação na solução de localização) se, somente ela, não registra *Sferics* durante um dado período.

A localização geográfica dos cinco sensores da rede de detecção será ilustrada na figura 51, em que cada sensor tem sua localização geográfica bem definida, com suas respectivas coordenadas geográficas. Entre cada sensor há uma distância equivalente a 7,3Km, sendo que o valor desta distância será justificado no decorrer do capítulo.

Figura 51. Localização geográfica dos cinco sensores da rede



Fonte: Do autor.

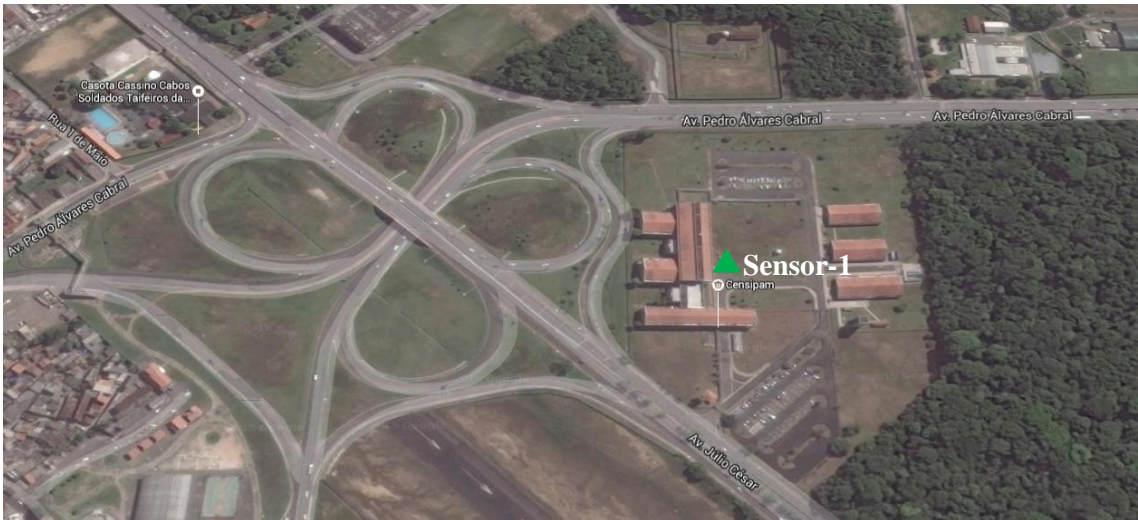
Tabela 2. Localização geográfica dos sensores (longitude e latitude) em graus decimais.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	LONGITUDE	LATITUDE
SENSOR-1	-48.462252	-1.409216
SENSOR-2	-48.450520	-1.473810
SENSOR-3	-48.401136	-1.428246
SENSOR-4	-48.505694	-1.459877
SENSOR-5	-48.415578	-1.358762

Fonte: Do autor.

A localização geográfica dos sensores 1,2,3,4 5 é ilustrada nas figuras 52,53,54, 55e 56, respectivamente.

Figura 52. Sensor-1, long.: -48.462252, lat.: -1.409216, Av. Júlio César; Souza



Fonte: Do autor.

Figura 53. Sensor-2, long.: -48.450520, lat.: -1.473810, Rua Augusto Correa; Guamá.



Fonte: Do autor.

Figura 54. Sensor-3, long.: -48.401136, lat.: -1.428246, Rua Fazenda.



Fonte: Do autor.

Figura 55. Sensor-4, long: -48.505694, lat: -1.459877, Tv. Gurupa com Rua São Boaventura; Cidade Velha



Fonte: Do autor.

Figura 56. Sensor-5, long: -48.415578, lat: -1.358762, Tv. We trinta e quatro; coqueiro



Fonte: Do autor

Considerando que agora já temos todas as localizações dos sensores em coordenadas geográficas, para determinar o local de incidência das descargas atmosféricas, faz-se necessário o tempo de ocorrência do evento que cada sensor identificou. A tabela 3 abaixo mostra que cada sensor identificou a perturbação em específicos tempos.

Tabela 3. Tempo de detecção da perturbação para cada sensor.

	T1			T2			T3			T4			T5	
H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)
0	46	53921	0	46	53926	0	46	53918	0	46	53920	0	46	53927
0	17	18884	0	17	18881	0	17	18886	0	17	18883	0	17	18882
0	15	58691	0	15	58689	0	15	58697	0	15	58690	0	15	58690
0	59	33872	0	59	33873	0	59	33870	0	59	33871	0	59	33874
0	9	56218	0	9	56219	0	9	56216	0	9	56217	0	9	56220
0	49	47561	0	49	47557	0	49	47562	0	49	47560	0	49	47558
0	44	14772	0	44	14771	0	44	14776	0	44	14771	0	44	14772
0	42	23097	0	42	23093	0	42	23099	0	42	23096	0	42	23094
0	12	38591	0	12	38586	0	12	38595	0	12	38590	0	12	38587
0	51	3041	0	51	3039	0	51	3045	0	51	3040	0	51	3040
0	54	53600	0	54	53596	0	54	53604	0	54	53599	0	54	53597
0	56	47750	0	56	47745	0	56	47752	0	56	47749	0	56	47746
0	39	49788	0	39	49790	0	39	49786	0	39	49787	0	39	49791

Fonte: Do autor.

Em virtude desses tempos de detecção, já é possível determinar, em parceria com a localização de cada sensor, o local de incidência de cada descarga atmosférica. Agora, qual a distância entre cada sensor para a localização de um raio? Neste ínterim, qual a máxima distância entre cada sensor para localizar uma descarga?

Para determinar a distância mínima entre cada sensor, é preciso verificar qual a menor diferença de tempos entre um par de sensores, levando em consideração que os tempos T₁ para o sensor 1 e o tempo T₂ para o sensor 2 sejam diferentes, pois se foram iguais o algoritmo vai contabilizar como se fosse apenas um sensor, pois não haverá diferença dos tempos de chegada da descarga atmosférica.

Para a resolução temporal de 1ms, ou seja, a menor diferença entre os tempos de um par de sensores que equivale a 0,001s, o software gerou uma distância mínima entre os sensores de 7km. Para calcular a maior distância entre os sensores, se faz necessário ter em mente qual a máxima. A figura 57 mostra a área de abrangência que os cinco sensores vão estabelecer se forem colocados em suas mínimas distâncias, tendo como centro a sede do CESIPAM.

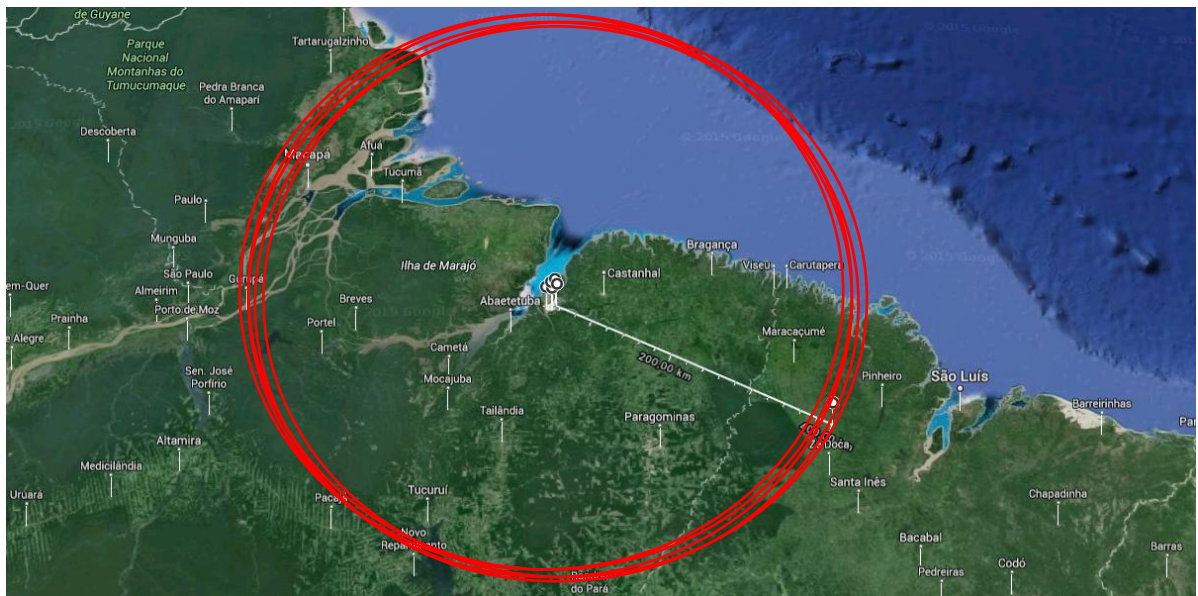
Figura 57. Rede de detecção com cinco sensores em suas distancias mínimas entre eles de 7km.



Fonte: Do autor.

A figura 58 mostra a máxima amplitude da rede para a distância mínima entre os sensores de 7km. A área de amplitude da rede equivale a 167, 000.00 km².

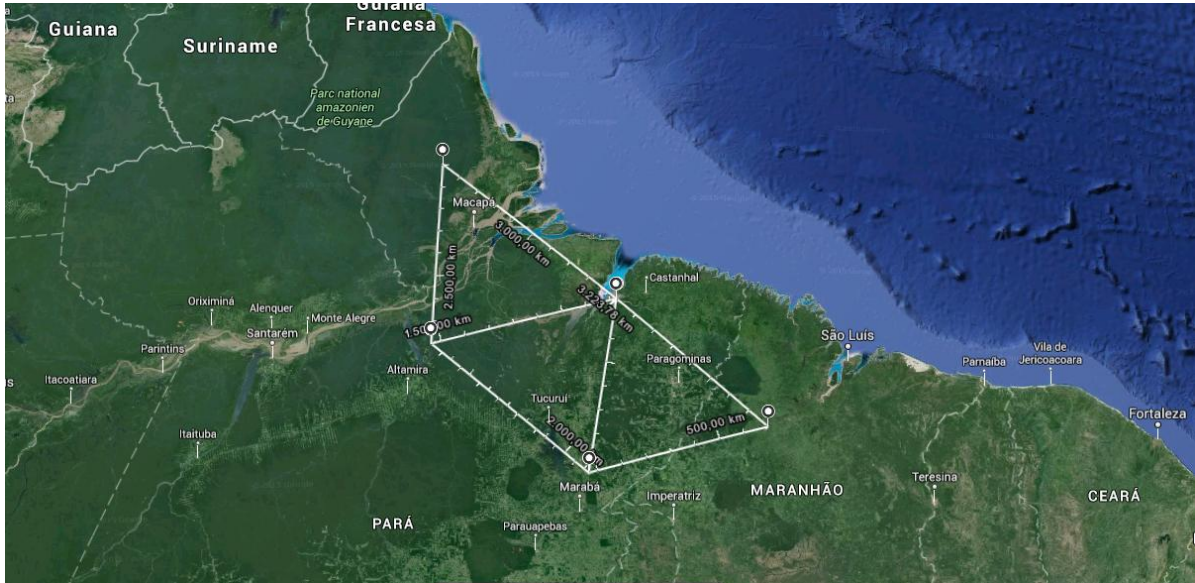
Figura 58. Máxima amplitude da rede, considerando a distância mínima dos sensores de 7km



Fonte: Do autor.

A figura 59 mostra a área de abrangência que os cinco sensores vão estabelecer se forem colocados em suas máximas distâncias, tendo como centro a sede do CESIPAM. Os outros dois sensores serão localizados no estado de Maranhão e Macapá; um perto do município de Marabá e outro perto do município de Altamira.

Figura 59. Área de abrangência dos sensores para a distância máxima (400km) entre eles.



Fonte: Do autor.

A figura 60 mostra a máxima amplitude da rede para a distância mínima entre os sensores de 400km. A área de amplitude da rede equivale a 485,205.00 km².

Figura 60. Eficiência máxima da rede; 485,205.00km²



Fonte: Do autor.

CAPITULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

A confiabilidade de produtos gerados a partir de uma base de dados de descargas atmosféricas, como mapas de densidade, depende do desempenho e avaliação do sistema. Tal desempenho e avaliação é principalmente caracterizado por sua Eficiência de Detecção absoluta, seu Erro de Localização e a cobertura de rede. Portanto, o desempenho e a avaliação se aplica a qualquer sistema de detecção terrestre ou espacial, onde a eficiência de detecção absoluta é levada em consideração, dado um número de descargas atmosféricas, definindo-se como a relação percentual entre o número de descargas atmosféricas detectadas e o número total de descargas atmosféricas ocorridas no mesmo período.

Seu erro de localização define-se como a diferença entre o local verdadeiro de ocorrência da descarga atmosférica e o local apontado pelo sistema de detecção. A localização é definida para raios nuvem-solo, uma vez que os demais (NN, IN, NA) não atingem o solo. Falsas localizações ocorrem devido a ruídos de medição e erros de calibração, entre outros fatores. E a cobertura define-se como a área total, onde a rede de detecção é capaz de localizar descargas atmosféricas. A Cobertura da rede pode também ser quantificada em termos do número de sensores que detectam raios numa zona geográfica. Para que os produtos sejam confiáveis, a detecção precisa também ser espacialmente e temporalmente uniforme.

Uma configuração da rede é definida como a combinação das estações em operação. Ela é caracterizada pelo número e a localização das estações. O objetivo deste estudo é de avaliar o desempenho de cada configuração da rede em relação a localização geográfica das descargas atmosféricas, utilizando o algoritmo TOA, para afirmar com alta precisão o local exato da descarga atmosférica e melhorar a confiabilidade dos produtos associados.

Este capítulo também avaliará os locais de incidência das descargas atmosféricas, para uma rede de detecção com três, quatro e cinco sensores com seus respectivos tempos de detecção da perturbação. Posteriormente, será adicionado o ruído em cada configuração de redes e assim verificar o quanto esse ruído influencia no local de incidência da descarga. Depois, será adicionado a localidade da descarga atmosférica e verificar-se-á se os tempos de detecção de cada sensor estão de acordo com esta localidade.

1º SIMULAÇÃO: ADIÇÃO GRADUAL DE SENSORES NA REDE DE DETECÇÃO DE DESCARGAS

Todas as simulações terão como base, os tempos de detecção simulados da tabela 4 para cada sensor, similares aos dos sensores LPATS IV.

Tabela 4. Tempo de detecção da perturbação para cada sensor.

T1			T2			T3			T4			T5		
H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)
0	46	53921	0	46	53926	0	46	53918	0	46	53920	0	46	53927
0	17	18884	0	17	18881	0	17	18886	0	17	18883	0	17	18882
0	15	58691	0	15	58689	0	15	58697	0	15	58690	0	15	58690
0	59	33872	0	59	33873	0	59	33870	0	59	33871	0	59	33874
0	9	56218	0	9	56219	0	9	56216	0	9	56217	0	9	56220
0	49	47561	0	49	47557	0	49	47562	0	49	47560	0	49	47558
0	44	14772	0	44	14771	0	44	14776	0	44	14771	0	44	14772
0	42	23097	0	42	23093	0	42	23099	0	42	23096	0	42	23094
0	12	38591	0	12	38586	0	12	38595	0	12	38590	0	12	38587
0	51	3041	0	51	3039	0	51	3045	0	51	3040	0	51	3040
0	54	53600	0	54	53596	0	54	53604	0	54	53599	0	54	53597
0	56	47750	0	56	47745	0	56	47752	0	56	47749	0	56	47746
0	39	49788	0	39	49790	0	39	49786	0	39	49787	0	39	49791

Fonte: Do autor.

A primeira simulação aplicará os tempos de detecção em cada sensor utilizando uma rede com três sensores, com uma distância de 7,3km entre eles, como mostra a figura 61.

Figura 61. Ilustração da rede com três sensores.



Fonte: Do autor.

Tabela 5. Localização geográfica dos sensores (longitude e latitude) em graus decimais.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	LONGITUDE	LATITUDE
SENSOR-1	-48.462252	-1.409216

SENSOR-2	-48.450520	-1.473810
SENSOR-3	-48.401136	-1.428246

Fonte: Do autor

A rede de detecção deve ter no mínimo três sensores, para não ocorrer a ambiguidade de localização da descarga. Agora utilizando os tempos de detecção de cada sensor, como mostra a tabela 4, a localização geográfica de cada sensor, como mostra a tabela 5, e o software de localização, é possível determinar os pontos geográficos onde as descargas atmosféricas incidiram, que será ilustrado na figura 62.

Figura 62. Localização geográfica das descargas atmosféricas para uma rede com três sensores.



Fonte: Do autor.

Podemos levar ainda em consideração, se a rede for implanta com sensores LPATS IV, antigo sensor que a rede de detecção do SIPAM possuía, a um erro médio de 80m do local de incidência da descarga.

Tabela 6. Localização geográfica das descargas atmosféricas para três sensores.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS DESCARGAS	LONGITUDE	LATITUDE
DESCARGA-1	-48.462456	-1.409445
DESCARGA-2	-48.450657	-1.473520
DESCARGA-3	-48.401008	-1.428897
DESCARGA-4	-48.401564	-1.428778
DESCARGA-5	-48.401981	-1.428456
DESCARGA-6	-48.401783	-1.428234
DESCARGA-7	-48.401442	-1.428132
DESCARGA-8	-48.401589	-1.428558
DESCARGA-9	-48.401110	-1.428891
DESCARGA-10	-48.401785	-1.428453
DESCARGA-11	-48.401756	-1.428129

DESCARGA-12	-48.401003	-1.428019
DESCARGA-13	-48.401345	-1.428547

Fonte: Do autor.

A rede de detecção utilizando três sensores localizou, para determinados tempos de incidência de cada descarga atmosférica, suas coordenadas no espaço geográfico, ou seja, suas longitudes e latitudes. Agora, a rede será composta por mais um sensor, ficando esta com quatro sensores de localização, com a mesma característica dos demais. A nova rede simulara os mesmos tempos de detecção, só que agora adicionara um novo tempo da perturbação. A figura 63 mostra a localização geográfica das novas descargas atmosféricas na cor amarela.

Figura 63. Localização das descargas atmosféricas com quatro sensores na rede.



Fonte: Do autor.

A nova localização das descargas atmosféricas, é ilustrada pelas circunferências de cor amarelada. Percebemos que há um leve afastamento das descargas atmosféricas de cor vermelha, que foram localizadas com a rede contendo três sensores. Esse afastamento é de 236m da localização das descargas da rede com três sensores, provando que houve uma nova localização da descarga atmosférica, evidenciando que a rede ficou mais precisa com quatro sensores na rede. A tabela 7 informa a nova localização geográfica das descargas atmosféricas para uma rede com quatro sensores.

Tabela 7. Localização geográfica das descargas atmosféricas para quatro sensores.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS DESCARGAS	LONGITUDE	LATITUDE
DESCARGA-1	-48.462445	-1.409446

DESCARGA-2	-48.450667	-1.473525
DESCARGA-3	-48.401009	-1.428801
DESCARGA-4	-48.401562	-1.428780
DESCARGA-5	-48.401934	-1.428458
DESCARGA-6	-48.401775	-1.428236
DESCARGA-7	-48.401446	-1.428134
DESCARGA-8	-48.401592	-1.428562
DESCARGA-9	-48.401113	-1.428897
DESCARGA-10	-48.401776	-1.428457
DESCARGA-11	-48.401759	-1.428133
DESCARGA-12	-48.401006	-1.428023
DESCARGA-13	-48.401349	-1.428550

Fonte: Do autor.

A próxima simulação utiliza uma rede com cinco sensores na rede de detecção e usufrui os mesmos tempos de detecção de cada sensor. A análise consiste em adicionar um quinto sensor e verificar o quanto ele interfere na posição geográfica da descarga atmosférica. A figura 64 ilustra a rede de detecção com cinco sensores e a localização geográfica de cada raio.

Figura 64. Localização das descargas atmosféricas com cinco sensores na rede.



Fonte: Do autor.

A localização geográfica das descargas atmosféricas para uma rede com cinco sensores é e será igual a uma rede contendo quatro sensores, então ela possuirá o mesmo afastamento geográfico de 236m, em comparação a rede com três sensores. A tabela 8 mostra a localização geográfica das descargas para uma rede com cinco sensores.

Tabela 8. Localização geográfica das descargas atmosféricas para cinco sensores.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS DESCARGAS	LONGITUDE	LATITUDE
DESCARGA-1	-48.462445	-1.409446
DESCARGA-2	-48.450667	-1.473525
DESCARGA-3	-48.401009	-1.428801
DESCARGA-4	-48.401562	-1.428780
DESCARGA-5	-48.401934	-1.428458
DESCARGA-6	-48.401775	-1.428236
DESCARGA-7	-48.401446	-1.428134
DESCARGA-8	-48.401592	-1.428562
DESCARGA-9	-48.401113	-1.428897
DESCARGA-10	-48.401776	-1.428457
DESCARGA-11	-48.401759	-1.428133
DESCARGA-12	-48.401006	-1.428023
DESCARGA-13	-48.401349	-1.428550

Fonte: Do autor

A tabela 8 constata que, utilizando os mesmos tempos de detecção e adicionado mais um sensor na rede, ficando agora com cinco sensores, a localização geográfica das descargas atmosféricas foi a mesma, evidenciando que não haverá um afastamento da descarga atmosférica.

2º SIMULAÇÃO: ADIÇÃO DE RUÍDO PARA UMA REDE COM CINCO SENSORES

A capacidade de detectar um raio depende da amplitude do sinal, o qual deve estar dentro da gama dinâmica do sistema de recepção. A amplitude do sinal de raio deve ser suficientemente elevada para ser perceptível dentro do ruído interno e externo. O fator ruído pode causar erros de localização, que é definido como a diferença entre o local verdadeiro de ocorrência da descarga atmosférica e o local apontado pelo sistema de detecção. A localização é definida para raios nuvem-solo, uma vez que os demais (NN, IN, NA) não atingem o solo.

Neste contexto, a Eficiência de Detecção dos sensores sofre provavelmente variações no tempo devido às interferências ou ruído eletromagnético. Nos resultados classificados por sensores aparecem algumas divergências entre o cálculo do local estimado e o local real da descarga atmosférica. Assim, a rede precisa ter uma elevada robustez, para que a interferência

externa não influencie de maneira significativa no local de ocorrência da descarga atmosférica.

Nessas simulações, será utilizada a rede contendo cinco sensores na sua estrutura, pois não ocorrerá a ambiguidade, recorrente de redes com dois sensores, não ocorrendo o afastamento de localização de 236m, recorrente de rede com três sensores e esta terá uma cobertura máxima para a localização das descargas atmosféricas, visto que a sua amplitude será a máxima para os cinco sensores. A tabela 9 ilustra o formato dos ruídos que influenciarão no comportamento da rede e por consequência no local da descarga atmosférica.

Tabela 9. Formato dos ruídos.

	Rede1 (ms)		Rede2 (ms)			Rede3 (ms)			Rede4(ms)			Rede5 (ms)			
	Transp.	Proc.	Total	Transp.	Proc.	Total	Transp.	Proc.	Total	Transp.	Proc.	Total	Transp.	Proc.	Total
539	4		543	543	19	562	588	8	596	543	19	562	588	8	596
578	13		591	526	5	531	610	15	625	526	5	531	610	15	625
517	16		533	503	2	505	548	16	564	503	2	505	548	16	564
511	11		522	604	16	620	635	15	650	604	16	620	635	15	650
575	7		582	553	7	560	593	17	610	553	7	560	593	17	610
502	2		504	506	13	519	585	18	603	506	13	519	585	18	603
626	13		639	603	20	623	618	2	620	603	20	623	618	2	620
551	12		563	552	9	561	507	6	513	552	9	561	507	6	513
619	3		622	550	18	568	525	6	531	550	18	568	525	6	531
522	7		529	633	20	653	562	16	578	633	20	653	562	16	578
544	10		554	513	7	520	633	8	641	513	7	520	633	8	641
606	20		626	561	3	564	573	10	583	561	3	564	573	10	583

Fonte: Do autor

Visualizando a tabela 9, cada sensor tem um atraso temporal que depende do transporte dos dados do sensor e do processamento dos dados nele, o atraso total será contabilizado pela soma das duas variáveis. A soma será descrita logo abaixo:

$$\text{Total} = \text{Trans.} + \text{proc.}$$

Onde Trans., significa o transporte do dado ao sensor; o proc. é o atrasado pelo processamento dos dados; e o Total é a somatória dos dois atrasos calculados em milissegundos. Percebemos que para cada tempo de detecção há diferentes tempos de transporte e processamentos, logo cada sensor deverá subtrair o total dos atrasos de cada tempo de detecção. Então, o tempo real de processamento que o software precisará para calcular a descarga atmosférica, será o tempo em que o sensor detectou a descarga atmosférica subtraído pelo tempo do ruído interno.

$$\text{Tempo real de processamento} = \text{Tempo de detecção} - \text{tempo de ruído.}$$

$$\text{Tempo real de processamento} = \text{Tempo de detecção} - \text{Total}$$

A figura 65 mostra a nova localização das descargas atmosféricas, com a adição do ruído. Para cada sensor ativo na rede, há um atraso com relação ao processamento e o transporte dos dados. Esta adição do ruído tornará a rede mais perto da realidade, visto que todo o sistema de detecção de raios é composto por variáveis aleatórias que desejamos excluí-las.

Figura 65. Local de incidência das descargas atmosféricas na presença do ruído interno.



Fonte: Do autor.

Tabela 10. Localização geográfica das descargas atmosféricas para cinco sensores na presença do ruído.

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS DESCARGAS	LONGITUDE	LATITUDE
DESCARGA-1	-48.462456	-1.409452
DESCARGA-2	-48.450678	-1.473533
DESCARGA-3	-48.401013	-1.428809
DESCARGA-4	-48.401568	-1.428785
DESCARGA-5	-48.401938	-1.428462
DESCARGA-6	-48.401781	-1.428240
DESCARGA-7	-48.401449	-1.428136
DESCARGA-8	-48.401596	-1.428566
DESCARGA-9	-48.401115	-1.428892
DESCARGA-10	-48.401780	-1.428462
DESCARGA-11	-48.401763	-1.428137
DESCARGA-12	-48.401011	-1.428026
DESCARGA-13	-48.401352	-1.428554

Fonte: Do autor.

É notável que quando se adiciona uma perturbação na rede de detecção, o algoritmo recalcula a posição da descarga atmosférica, para uma posição diferente da atual; logo, ele elimina a interferência do ruído como um todo.

A tabela 11 ilustra o quanto cada descarga atmosférica se distanciou do ponto em que a rede tinha calculado sem a presença do ruído.

Tabela 11. Distanciamento da descarga atmosférica na presença do ruído

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS DESCARGAS NA PRESENÇA DO RUIDO	DISTANCIAMENTO (m)
DESCARGA-1	871
DESCARGA-2	656
DESCARGA-3	1289
DESCARGA-4	687
DESCARGA-5	987
DESCARGA-6	1005
DESCARGA-7	504
DESCARGA-8	378
DESCARGA-9	876
DESCARGA-10	205
DESCARGA-11	786
DESCARGA-12	1305
DESCARGA-13	675

Fonte: Do autor.

3º SIMULAÇÃO: DETERMINAR O TEMPO DE LOCALIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA DESCARGA.

A terceira simulação nada mais é que uma espécie de validação do software. Tal validação consistira em determinar os tempos de detecção para cada sensor, tendo como entrada do sistema a localização geográfica da descarga atmosférica com suas longitudes e latitudes. Logo, a variável de entrada agora é a localização do raio e a variável desejada será os tempos de detecção para cada sensor.

Nesta simulação serão utilizados dados de cem descargas atmosféricas, ou seja, cem localizações em que a rede de detecção foi capaz de solucionar; mas antes de simular temos que ter com antecedência os tempos de detecção das descargas, para que depois da simulação, os resultados estejam de acordo. Os tempos de detecção estão na tabela 12. Lembrando que estes tempos de detecção já estão sendo simulados com o ruído.

Tabela 12. Tempos de detecção para cem descargas atmosféricas.

	SENSOR-T1			SENSOR-T2			SENSOR-T3			SENSOR-T4			SENSOR-T5
H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	M (min)	S (ms)	H (h)	
0	46	53921	0	46	53926	0	46	53918	0	46	53920	0	
0	17	18884	0	17	18881	0	17	18886	0	17	18883	0	
0	15	58691	0	15	58689	0	15	58697	0	15	58690	0	
0	59	33872	0	59	33873	0	59	33870	0	59	33871	0	
0	9	56218	0	9	56219	0	9	56216	0	9	56217	0	
0	49	47561	0	49	47557	0	49	47562	0	49	47560	0	
0	44	14772	0	44	14771	0	44	14776	0	44	14771	0	
0	42	23097	0	42	23093	0	42	23099	0	42	23096	0	
0	12	38591	0	12	38586	0	12	38595	0	12	38590	0	
0	51	3041	0	51	3039	0	51	3045	0	51	3040	0	
0	54	53600	0	54	53596	0	54	53604	0	54	53599	0	
0	56	47750	0	56	47745	0	56	47752	0	56	47749	0	
0	39	49788	0	39	49790	0	39	49786	0	39	49787	0	
0	23	52506	0	23	52508	0	23	52505	0	23	52505	0	
0	42	19162	0	42	19161	0	42	19163	0	42	19161	0	
0	38	27006	0	38	27005	0	38	27007	0	38	27005	0	
0	46	4846	0	46	4850	0	46	4844	0	46	4845	0	
1	42	36028	1	42	36034	1	42	36027	1	42	36027	1	
1	23	54345	1	23	54343	1	23	54348	1	23	54344	1	
1	50	26883	1	50	26880	1	50	26889	1	50	26882	1	
1	48	52774	1	48	52773	1	48	52779	1	48	52773	1	
1	4	15668	1	4	15671	1	4	15664	1	4	15667	1	
1	12	16613	1	12	16615	1	12	16612	1	12	16612	1	
1	43	16391	1	43	16393	1	43	16390	1	43	16390	1	
1	27	12234	1	27	12229	1	27	12235	1	27	12233	1	
1	53	56407	1	53	56405	1	53	56409	1	53	56406	1	
1	19	33632	1	19	33629	1	19	33636	1	19	33631	1	
1	23	47258	1	23	47255	1	23	47259	1	23	47257	1	
1	11	13265	1	11	13263	1	11	13269	1	11	13264	1	
1	42	42231	1	42	42227	1	42	42232	1	42	42230	1	
1	29	7787	1	29	7788	1	29	7784	1	29	7786	1	
1	38	20829	1	38	20827	1	38	20831	1	38	20828	1	
1	27	22293	1	27	22291	1	27	22295	1	27	22292	1	
2	43	49534	2	43	49531	2	43	49538	2	43	49533	2	
2	54	11677	2	54	11675	2	54	11683	2	54	11676	2	
2	31	53231	2	31	53229	2	31	53232	2	31	53230	2	

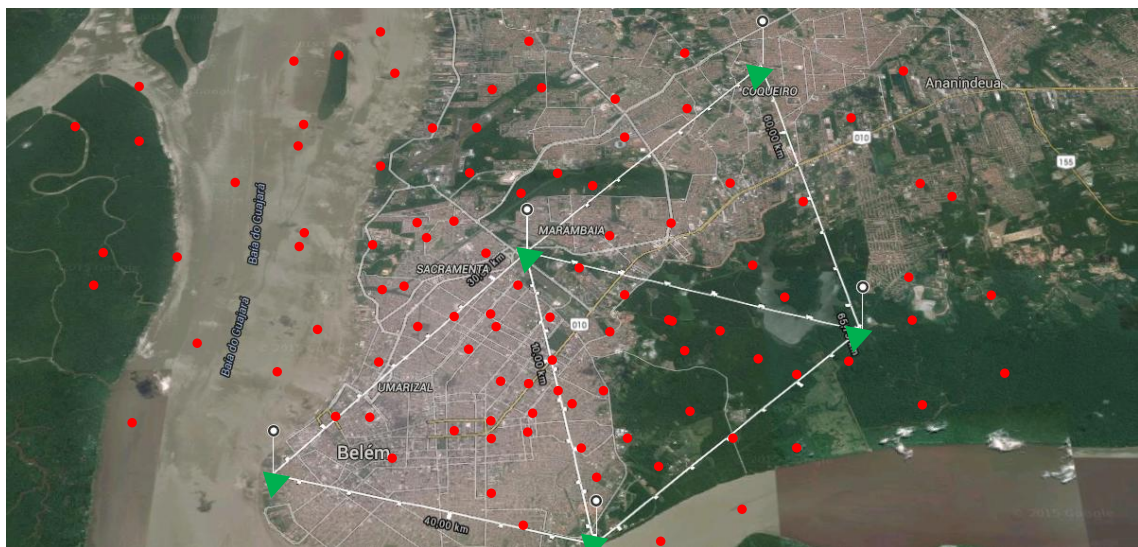
2	12	20419	2	12	20417	2	12	20424	2	12	20418	2
2	29	2162	2	29	2161	2	29	2165	2	29	2161	2
2	40	32290	2	40	32291	2	40	32284	2	40	32289	2
2	10	29417	2	10	29420	2	10	29411	2	10	29416	2
2	27	18539	2	27	18542	2	27	18538	2	27	18538	2
2	18	6226	2	18	6222	2	18	6228	2	18	6225	2
2	13	8835	2	13	8830	2	13	8838	2	13	8834	2
2	37	26679	2	37	26674	2	37	26682	2	37	26678	2
2	6	27727	2	6	27722	2	6	27730	2	6	27726	2
2	22	727	2	22	728	2	22	724	2	22	726	2
2	24	36353	2	24	36355	2	24	36349	2	24	36352	2
2	24	35345	2	24	35346	2	24	35341	2	24	35344	2
2	8	25420	2	8	25421	2	8	25416	2	8	25419	2
2	8	7751	2	8	7752	2	8	7749	2	8	7750	2
3	29	19508	3	29	19507	3	29	19514	3	29	19507	3
3	54	44315	3	54	44312	3	54	44316	3	54	44314	3
3	16	33767	3	16	33768	3	16	33765	3	16	33766	3
3	16	32565	3	16	32567	3	16	32561	3	16	32564	3
3	40	1532	3	40	1534	3	40	1526	3	40	1531	3
3	46	28011	3	46	28013	3	46	28009	3	46	28010	3
3	32	41585	3	32	41586	3	32	41581	3	32	41584	3
3	2	6595	3	2	6593	3	2	6598	3	2	6594	3
3	41	19820	3	41	19816	3	41	19824	3	41	19819	3
3	24	28274	3	24	28273	3	24	28278	3	24	28273	3
3	57	51361	3	57	51363	3	57	51360	3	57	51360	3
3	48	51220	3	48	51221	3	48	51219	3	48	51219	3
3	21	11991	3	21	11989	3	21	11993	3	21	11990	3
3	29	56355	3	29	56353	3	29	56356	3	29	56354	3
3	39	21640	3	39	21641	3	39	21638	3	39	21639	3
4	58	23702	4	58	23700	4	58	23706	4	58	23701	4
4	42	8180	4	42	8177	4	42	8186	4	42	8179	4
4	41	58705	4	41	58703	4	41	58711	4	41	58704	4
4	5	28622	4	5	28621	4	5	28628	4	5	28621	4
4	37	34694	4	37	34696	4	37	34688	4	37	34693	4
4	9	42597	4	9	42599	4	9	42593	4	9	42596	4
4	57	881	4	57	876	4	57	882	4	57	880	4
4	36	33066	4	36	33064	4	36	33069	4	36	33065	4
4	19	20109	4	19	20104	4	19	20113	4	19	20108	4
4	43	6489	4	43	6485	4	43	6492	4	43	6488	4
4	55	20771	4	55	20766	4	55	20774	4	55	20770	4
4	32	8614	4	32	8611	4	32	8615	4	32	8613	4
4	10	15599	4	10	15598	4	10	15601	4	10	15598	4
4	23	58056	4	23	58057	4	23	58053	4	23	58055	4
4	39	49881	4	39	49883	4	39	49878	4	39	49880	4
4	40	17183	4	40	17185	4	40	17182	4	40	17182	4

4	13	44938	4	13	44940	4	13	44934	4	13	44937	4
4	15	44765	4	15	44766	4	15	44763	4	15	44764	4
4	3	52692	4	3	52695	4	3	52690	4	3	52691	4
5	42	36891	5	42	36888	5	42	36897	5	42	36890	5
5	49	34709	5	49	34707	5	49	34714	5	49	34708	5
5	20	20467	5	20	20464	5	20	20470	5	20	20466	5
5	41	24971	5	41	24970	5	41	24976	5	41	24970	5
5	44	24843	5	44	24841	5	44	24847	5	44	24842	5
5	45	360	5	45	359	5	45	361	5	45	359	5
5	48	24372	5	48	24369	5	48	24376	5	48	24371	5
5	15	19865	5	15	19864	5	15	19871	5	15	19864	5
5	45	9315	5	45	9314	5	45	9318	5	45	9314	5
5	7	19514	5	7	19516	5	7	19508	5	7	19513	5
5	48	50819	5	48	50822	5	48	50818	5	48	50818	5
5	34	8937	5	34	8938	5	34	8935	5	34	8936	5
5	58	49932	5	58	49929	5	58	49935	5	58	49931	5
5	38	32673	5	38	32669	5	38	32676	5	38	32672	5

. Fonte: Do autor.

Agora entraremos com a localização geográfica das cem descargas atmosféricas, com a adição de seus ruídos, ilustrada na figura 66, e desejaremos os tempos de detecção da tabela 12.

Figura 66. Localização geográfica de cem raios.



Fonte: Do autor.

A localização em termos de longitude e latitude está na tabela13 a seguir.

Tabela 13. Longitude e latitude das descargas atmosféricas.

LOCALIZAÇÃO GEOGRAFICA DAS DESCARGAS	LONGITUDE	LATITUDE
DESCARGA-1	-48.462445	-1.409456
DESCARGA-2	-48.462467	-1.409596
DESCARGA-3	-48.462440	-1.409460
DESCARGA-4	-48.462402	-1.409220
DESCARGA-5	-48.462434	-1.409349
DESCARGA-6	-48.462405	-1.409290
DESCARGA-7	-48.462447	-1.409110
DESCARGA-8	-48.462434	-1.409229
DESCARGA-9	-48.462409	-1.409336
DESCARGA-10	-48.462430	-1.409887
DESCARGA-11	-48.462431	-1.409996
DESCARGA-12	-48.462546	-1.409003
DESCARGA-13	-48.462567	-1.409678
DESCARGA-14	-48.462468	-1.409330
DESCARGA-15	-48.462470	-1.409129
DESCARGA-16	-48.462475	-1.409390
DESCARGA-17	-48.462443	-1.409209
DESCARGA-18	-48.462445	-1.408932
DESCARGA-19	-48.462478	-1.400098
DESCARGA-10	-48.462490	-1.402109
DESCARGA-20	-48.462400	-1.409452
DESCARGA-21	-48.462421	-1.402109
DESCARGA-22	-48.462424	-1.403206
DESCARGA-23	-48.462432	-1.409110
DESCARGA-24	-48.462446	-1.401198
DESCARGA-25	-48.462476	-1.405638
DESCARGA-26	-48.462487	-1.402341
DESCARGA-27	-48.462490	-1.467894
DESCARGA-28	-48.462456	-1.438945
DESCARGA-29	-48.462430	-1.406781

DESCARGA-30	-48.462471	-1.400087
DESCARGA-31	-48.462483	-1.405682
DESCARGA-32	-48.462494	-1.409023
DESCARGA-33	-48.462459	-1.403567
DESCARGA-34	-48.462407	-1.401897
DESCARGA-35	-48.462490	-1.402301
DESCARGA-36	-48.46243	-1.401209
DESCARGA-37	-48.462467	-1.406754
DESCARGA-38	-48.462438	-1.403492
DESCARGA-39	-48.462487	-1.401090
DESCARGA-40	-48.462421	-1.409408
DESCARGA-41	-48.462456	-1.404572
DESCARGA-42	-48.462876	-1.400987
DESCARGA-43	-48.462364	-1.401234
DESCARGA-44	-48.462364	-1.406745
DESCARGA-45	-48.462398	-1.403098
DESCARGA-46	-48.462201	-1.401209
DESCARGA-47	-48.462398	-1.403451
DESCARGA-48	-48.462364	-1.402908
DESCARGA-49	-48.462567	-1.403989
DESCARGA-50	-48.462394	-1.400097
DESCARGA-51	-48.462546	-1.402143
DESCARGA-52	-48.462401	-1.403675
DESCARGA-53	-48.462329	-1.400098
DESCARGA-54	-48.462547	-1.401242
DESCARGA-55	-48.462980	-1.402451
DESCARGA-56	-48.462453	-1.404675
DESCARGA-57	-48.462981	-1.403894
DESCARGA-58	-48.462001	-1.403298
DESCARGA-59	-48.462989	-1.401109
DESCARGA-60	-48.462087	-1.402309
DESCARGA-61	-48.462340	-1.401209
DESCARGA-62	-48.462200	-1.401214

DESCARGA-63	-48.462328	-1.400945
DESCARGA-64	-48.462546	-1.402385
DESCARGA-65	-48.462230	-1.404589
DESCARGA-66	-48.462228	-1.402819
DESCARGA-67	-48.462876	-1.400092
DESCARGA-68	-48.462003	-1.403745
DESCARGA-69	-48.462723	-1.402314
DESCARGA-70	-48.462876	-1.408964
DESCARGA-71	-48.462298	-1.408934
DESCARGA-72	-48.462071	-1.407834
DESCARGA-73	-48.462339	-1.400921
DESCARGA-74	-48.462200	-1.403745
DESCARGA-75	-48.462310	-1.404098
DESCARGA-76	-48.449894	-1.406574
DESCARGA-77	-48.467528	-1.401987
DESCARGA-78	-48.462574	-1.400954
DESCARGA-79	-48.462998	-1.402874
DESCARGA-80	-48.464352	-1.408954
DESCARGA-81	-48.460908	-1.402987
DESCARGA-82	-48.468475	-1.405462
DESCARGA-83	-48.465602	-1.408965
DESCARGA-84	-48.434872	-1.402098
DESCARGA-85	-48.498264	-1.402198
DESCARGA-86	-48.498789	-1.404571
DESCARGA-87	-48.424420	-1.400963
DESCARGA-88	-48.409423	-1.402187
DESCARGA-89	-48.412099	-1.438742
DESCARGA-90	-48.423958	-1.403245
DESCARGA-91	-48.477564	-1.409846
DESCARGA-92	-48.482747	-1.402238
DESCARGA-93	-48.400945	-1.403894
DESCARGA-94	-48.982205	-1.400987
DESCARGA-95	-48.409901	-1.402038

DESCARGA-96	-48.409030	-1.402845
DESCARGA-97	-48.487832	-1.407854
DESCARGA-98	-48.460034	-1.400036
DESCARGA-99	-48.424356	-1.404785
DESCARGA-100	-48.598349	-1.405642

A tabela 13 e a figura 71 ilustram a entrada que será utilizada pelo algoritmo de detecção de descargas, mas a variável que se quer determinar é o tempo de localização. A saída com os tempos de localização para cada sensor não divergem em nada do esperado, isto é, os tempos de detecção para cada sensor foram de acordo com o previsto, assim validando o software no critério da linearidade.

4º SIMULAÇÃO: TEMPOS DE DETECÇÃO IDÊNTICOS PARA CONFIGURAÇÕES DE REDES REGULARES.

Esta última simulação trata-se de uma validação, que levará em consideração tempos de detecção iguais para cada sensor e configurações de redes com formatos regulares. Como esta simulação leva tempos iguais, a localização será sempre no centro das figuras regulares, pois terá distâncias iguais para cada sensor. As configurações das redes triangulares, quadradas e pentagonais são ilustradas nas figuras 67, 68 e 69, respectivamente.

Figura 67. Ilustração da rede de detecção triangular.



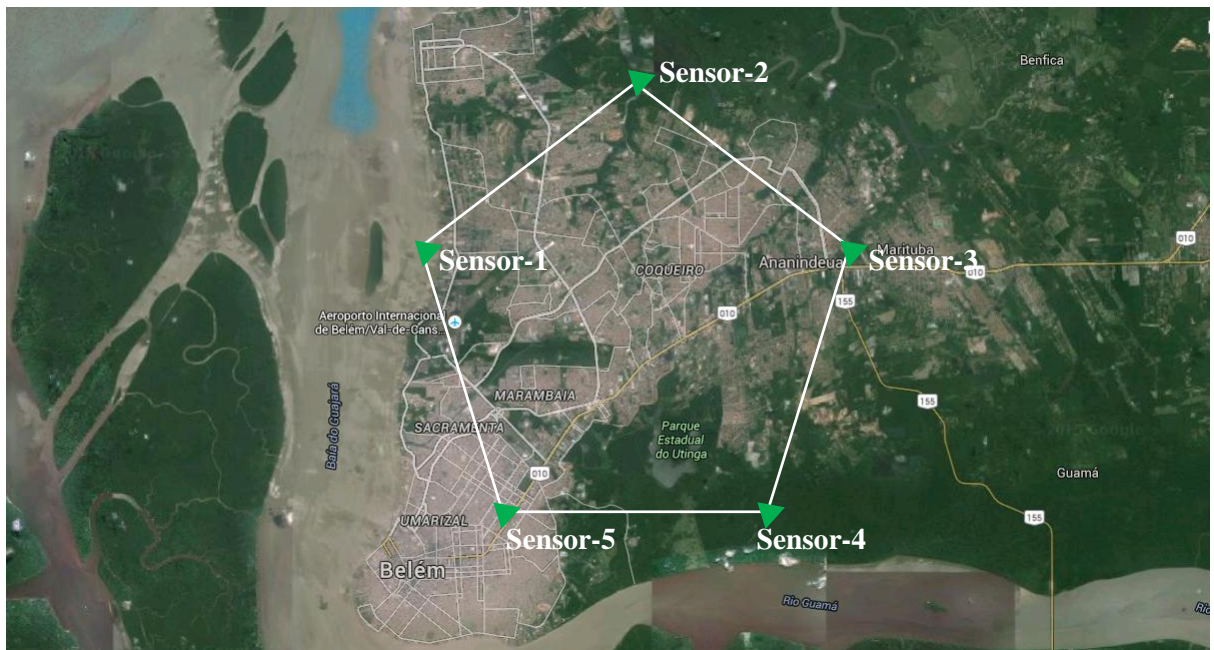
Fonte: Do autor.

Figura 68. Ilustração da rede de detecção quadrada.



Fonte: Do autor.

Figura 69. Ilustração da rede de detecção pentagonal.



Fonte: Do autor.

O formato das redes de detecção em conjunto com o software de localização de descargas atmosféricas mostrará em qual posição geográfica as descargas atmosféricas

incidiram, para tempos de detecção iguais. As figuras 70, 71 e 72 ilustram para cada configuração da rede o local de incidência da descarga atmosférica.

Figura 70. Ilustração da rede de detecção triangular.



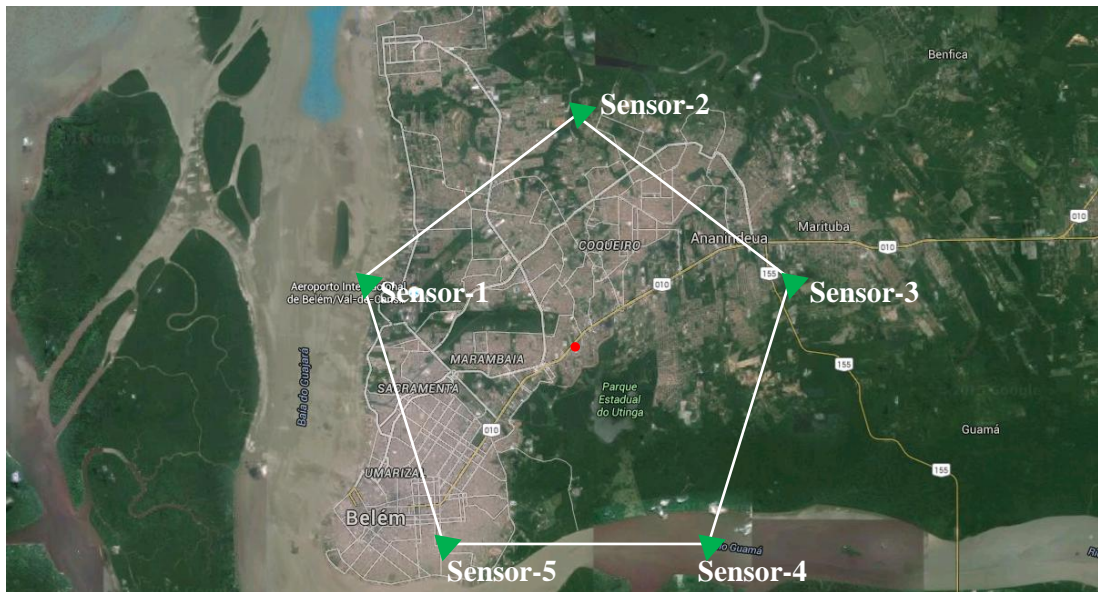
Fonte: Do autor.

Figura 71. Ilustração da rede de detecção quadrada.



Fonte: Do autor.

Figura 72. Ilustração da rede de detecção pentagonal.



Fonte: Do autor.

As figuras 70, 71 e 72 ilustram que, para quaisquer que sejam as localizações dos sensores, com distâncias iguais e com tempos de localização idênticos, o local de incidência da descarga atmosférica será no centro da configuração da rede regular. Esta análise é uma espécie de validação do algoritmo TOA, utilizando como configurações, redes com três, quatro e cinco sensores.

CONCLUSÃO

Este é um estudo inédito no Brasil que aborda a análise e a localização geográfica das descargas, levando em consideração o tempo de detecção de cada sensor de sua rede. Não menos importante foi escolher uma região de estudo que favorecesse e estimulasse a aplicação da metodologia definida. O caráter multidisciplinar envolvido na realização deste trabalho representou um desafio frente aos conhecimentos de meteorologia, física de nuvens, eletricidade atmosférica e análise numérica que se fizeram necessários a fim de que os objetivos propostos fossem alcançados. A possibilidade de reconhecer o local de incidência do raio de tempestades em uma região é uma informação bastante valiosa, mesmo que nela esteja adicionado algum percentual de erro.

O método comprova, por meio de simulação de tempos iguais e distâncias iguais, que se as estações estiverem sincronizadas temporalmente, é possível determinar o local geométrico de ocorrência do raio através da diferença entre os tempos de chegada de uma radiação em várias estações.

Com base nesses dados temporais de sensores foi possível elaborar um algoritmo baseado no sistema TOA, capaz de identificar com precisão o local de incidência do raio. Posteriormente, foi possível realizar comparações com adições de sensores, verificando a diminuição de erro geográfico da descarga atmosférica e realizar comparações entre configurações de redes. Percebemos que o ruído da rede é devido ao atraso do processamento e ao tempo que o dado precisa para ser processado; logo se fez possível a eliminação desse ruído interno, sendo possível validar o algoritmo e realizar comparações entre descargas atmosféricas.

Os mapas de índice ceráunico e densidade de raios mostram os padrões de descargas atmosféricas na Amazônia. Tais padrões mudam com os fenômenos climáticos de grande escala como a temperatura dos oceanos. Contudo, existem regiões da Amazônia que sempre apresentam irregularidade na densidade de raios como as regiões de Belém, Manaus e Tocantins. Tais características climáticas permitem a avaliação do nível de proteção a ser considerado para as linhas de transmissões planejadas na região.

A robustez e flexibilidade do software, no que diz respeito à inserção de estações e ao desempenho na presença de sinais indesejados, abrem as portas para elaboração de diversos projetos futuros utilizando o mesmo algoritmo, sem aumentar os custos da elaboração. Tendo em vista a futura instalação da primeira torre instrumentada para a medição de descargas

atmosféricas na Amazônia, este projeto poderá gerar dados mais confiáveis, baseados em dados reais de raios captados pela torre instrumentada.

Por fim, este trabalho atendeu as expectativas iniciais, apesar das dificuldades encontradas durante sua elaboração, dificuldades estas com a programação do algoritmo, com o domínio da interface de desenvolvimento e com o domínio da teoria sobre as descargas. O software é facilitado e possibilita a implementação de sistemas bastante complexos.

REFERÊNCIAS

AAKER D. A. Marcas: Brand Equity Gerenciando o Valor da Marca. Negócio Editora. São Paulo, 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução nº 24 de 27 de janeiro de 2000 – Estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras. Brasília, DF. Janeiro, 2000a. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 20 Fev 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 61, de 29 de abril de 2004 – Estabelece as disposições relativas ao ressarcimento de danos elétricos em equipamentos elétricos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbações ocorrida no sistema elétrico. Brasília, DF. Abril, 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 10 Jan 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001 – Estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente. Brasília, DF. Novembro, 2001. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 09 Nov 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000 – Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília, DF. Novembro, 2000b. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/legislacao>>. Acesso em: 09 Nov 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Evolução do Desempenho dos Indicadores de Qualidade. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=80>>. Acesso em: 10 Jan 2016.

ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A. J. A Summary of lightning parameters for engineering application. In: CIGRE, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRÈ 1980 Session, Paris, August 27 – September 4, 2015.

ANDRADE, M. T.; LANDINI, L. A. R.; PRADO Jr, F. A. A. Ressarcimento de Consumidores Relativos a Danos Decorrentes da Prestação dos Serviços Concedidos – Uniformização de Procedimentos. XVI SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Campinas, São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES (ABRADEE). CODI-2.2.12.03.0 Análise das Conseqüências das Interrupções do Fornecimento de Energia Elétrica. 81 Comitê de Distribuição. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410:2004 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419:2001 – Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. ABNT, 2001.

BENETI, C. A. A.; JUSEVICIUS, M. A. R.; GIN, R. B. B.; PATSKO, C. H. Identificação de áreas críticas de ocorrência de descargas atmosféricas na área de concessão da Eletropaulo. Instituto Tecnológico SIMEPAR, Curitiba, Paraná. 2005.

BERGER, K.; ANDERSON, R.B.; KRÖNINGER, H.; PALVA, V. Parameters of lightning flashes. *Electra*, nº 41, p.23-37, July, 1975.

BOCCUZZI, C. V. Análise e Estabelecimento de Índices de Continuidade de Fornecimento para as Regiões da Área de Concessão da Eletropaulo. II Seminário Interno de Distribuição de Energia Elétrica. Eletropaulo. São Paulo, 1986. BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil, de 5 de outubro de 1988. BRASIL. DECRETO nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Código de Águas.

BRASIL. LEI nº 8.078, de 11 de setembro de 1990. Código de Proteção e Defesa do Consumidor.

BRASIL. LEI nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Regime de Concessão e Permissão da Prestação de Serviços Públicos.

BRASIL. LEI nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Novo Código Civil Brasileiro. Brazil's Most Valuable Brands 2006. Disponível em: <<http://www.brandfinance.com/Uploads/pdfs/BrazilMVBrands06.pdf>>. Acesso em: 10 Jan 2016.

CAMARGO, P. T. Custo Social da Energia Elétrica. 1989, 203p. Tese (Mestrado) Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 1989.

DI PIETRO, M. S. Z. Direito Administrativo. São Paulo, 2004. 17ª edição, p. 554-555 / 402-408 / 86-90. Atlas. 82

ELETROBRÁS. Relatório da Pesquisa Sobre Custo de Interrupção no Fornecimento de Energia Elétrica. Março, 1991.

Faturamento Anual da Eletropaulo. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias_area/arquivos/48500002120200623_1.pdf>. Acesso em: 15 jan 2007.

FOLHA DE SÃO PAULO. Aneel define regras para ressarcir danos a aparelhos. Caderno Dinheiro, Seção Energia, p.B3, 01 de maio de 2004. São Paulo. FÜHRER, M. C. A. Resumo de Direito Civil. São Paulo, 2002. 26ª edição, Malheiros Editores Ltda.

GOMES, P.; ZANI, C. R.; SCHILLING M. Th.; CALDAS, G. P.; CAFÉ, F. F. Determinação dos custos de interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica. Eletricidade Moderna, nº 268, p. 146-152, Julho, 1996. São Paulo.

GOMES. P.; SCHILLING M. Th. Custo de Interrupção: Conceituação, Metodologia de Avaliação, Valores Existentes e Aplicações. In: XIV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belém. Pará, 1997.

GOUVÊA. M. R.; RIBEIRO. J. A.; PACHECO NETO. S.; MARTINS. M. J.; DOMANESCHI. M. Análise de Taxas de Falha em Transformadores de Distribuição. Relatório CED – 052 / EQPT 001 / RL 001 / OR. Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica. IEE/USP – ELETROPAULO – CESP – CPFL. São Paulo, 1992.

GUIMARÃES, L. C. S. O Custo da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Informativo CODI – Comitê de Distribuição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro. Janeiro, 1986.

Happy 300th Birthday, Benjamin Franklin! Disponível em: <<http://www.carnetdevol.org/actualite/franklin/benjamin.htm>>. Acesso em: 09 Nov 2016.

IBÁÑEZ, H. F.; AVENDAÑO, C. A.; ORTIZ, H. E. Correlation Between Keraunic Level and Losses of Electrical and Electronic Equipment for the City of Bogotá (Colômbia). In: VIII SIPDA – International Symposium on Lightning Protection. São Paulo, 2005.

IBÁÑEZ, H. F.; AVENDAÑO, C. A.; ORTIZ, H. E. Correlação entre nível cerâmico e danos em aparelhos eletroeletrônicos. Eletricidade Moderna, nº 390, p. 72-79, Setembro, 2006. São Paulo.83

IEEE Std 1346-1998 – IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment. New York. USA. 1998.

Impostos e Outros Encargos. Disponível em: <http://www.eletropaulo.com.br/portal/page.cfm?Conteudo_ID=668&desc=Impostos%20e%20outros%20encargos>. Acesso em: 27 jan 2016.

JUCÁ, A. S. Avaliação do Relacionamento Entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de Adequação. 2003. 178p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

KAGAN, N. Sistema Computacional para Suporte à Decisão no PID. In: Congresso ENERSHOW, 2003. São Paulo. Anais, 2003.

KANASHIRO, A.G.; PIANTINI, A. The effect of the secondary loads on the voltage surges transferred through distribution transformers. In: XIII ISH – International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, the Netherlands, August 2003.

KINDERMANN, G. Descargas Atmosféricas. Sagra-DC Luzzatto. Rio Grande do Sul, 1992.

MAGALHÃES, C. H. N.; GOUVÊA, M. R.; SILVA, F. A. T.; TAHAN, C. M. V.; ARAÚJOFILHO, L. G. C. Avaliação do Custo Social de Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica do Lado da Demanda no Estado de São Paulo. In: XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Campinas. São Paulo, 2001.

MASSAUD, A. G.; SCHILLING, M. Th.; HERNANDEZ, J. P. Electricity restriction costs. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, vol. 141, nº 4, p. 299 – 304, Julho, 1994. MORTON, A. UTM Grid Zones of the World. Disponível em: <<http://www.dmap.co.uk/utmworld.htm>>. Acesso em: 10 jan 2016.

MESQUITA, C R; “ Investigação de sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas”; Orientador: Silverio Visacro Filho. Dissertação de Mestrado, programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, junho de 2001. P 17.

NACCARATO, K. P.; PINTO Jr, O; PINTO, I. R. C. A. A Detection Efficiency Model for the Brazilian Lightning Detection Network (RINDAT). In: 19th International Lightning Detection Conference & 1st International Lightning Meteorology Conference. Tucson, Arizona, USA. Abril, 2006.

NOSAKI, S.; PINTO Jr, O.; PINTO, I.R.C.A.; FERRAZ, E. C. Estudo dos Efeitos das Descargas Atmosféricas no Sistema de Distribuição da Elektro. In: I CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. Brasília. DF. 2001.

NUNES FILHO, F. B. De que Reclama o Consumidor de uma Concessionária de Energia 84 Elétrica? In: X CBE – Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro, 2004.

NUNES G. Gestão Estratégica da Marca. Revista FAE BUSINESS, nº 7, p. 36-39, novembro, 2003.

ORVILLE, R.E. Cloud-to-Ground Lightning flash Characteristics in Contiguous United States:
1989-1991. Journal of Geophysical Research, v.99, n.D5 p.1, 1994.