

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

ANÁLISE DE SENSORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: PROTÓTIPO DE UM
DETECTOR DE RAIOS COM ESTIMATIVA DE DENSIDADE DE RAIOS PARA
REGIÃO AMAZÔNICA UTILIZANDO PSOC.

ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

DM 04 /2014

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

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

ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

ANÁLISE DE SENSORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: PROTÓTIPO DE UM
DETECTOR DE RAIOS COM ESTIMATIVA DE DENSIDADE DE RAIOS PARA
REGIÃO AMAZÔNICA UTILIZANDO PSOC.

DM 04 /2014

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

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

ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

ANÁLISE DE SENSORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: PROTÓTIPO DE UM
DETECTOR DE RAIOS COM ESTIMATIVA DE DENSIDADE DE RAIOS PARA
REGIÃO AMAZÔNICA UTILIZANDO PSOC.

Dissertação submetida à Banca Examinadora do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia.

DM 04 /2014

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Leal, Adônis Ferreira Raiol, 1989-
Análise de sensores de descargas
atmosféricas: protótipo de um detector de raios
com estimativa de densidade de raios para
região amazônica utilizando PSOC / Adônis
Ferreira Raiol Leal. - 2014.

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

1. Eletricidade atmosférica. 2. Descargas
elétricas. 3. Detectores. 4. Métodos de
simulação. I. Título.

CDD 22. ed. 551563

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

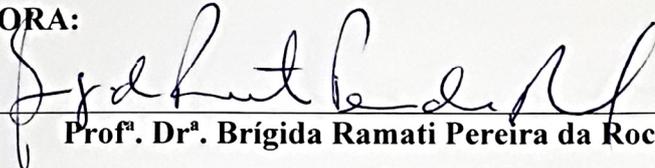
**“ANÁLISE DE SENSORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:
PROTÓTIPO DE UM DETECTOR DE RAIOS COM ESTIMATIVA DE
DENSIDADE DE RAIOS PARA A REGIÃO AMAZÔNICA UTILIZANDO
PSoC.”**

AUTORA: **ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL**

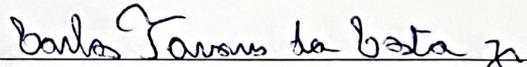
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: / /

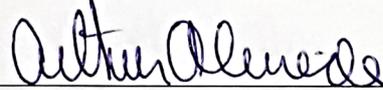
BANCA EXAMINADORA:



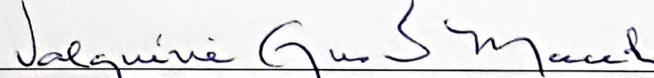
Prof. Dr. Brígida Ramati Pereira da Rocha
(Orientadora – PPGEE/UFPA)



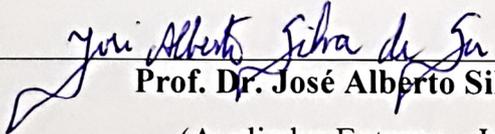
Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



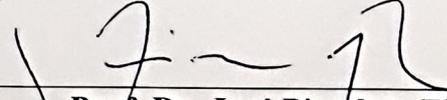
Prof. Dr. Arthur da Costa Almeida
(Avaliador Externo ao Programa – UFPA/Castanhal)



Prof. Dr. Valquíria Gusmão Macedo
(Avaliadora Externa ao Programa – FEEC/UFPA)



Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá
(Avaliador Externo – UEPA)



Prof. Dr. José Pissolato Filho
(Avaliador Externo – UNICAMP)

VISTO:

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

**Dedico este trabalho aos meus pais e avós que me
incentivaram continuamente na busca do
conhecimento.**

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado força e sabedoria para enfrentar essa jornada que é a vida.

A minha família pelo apoio.

A minha esposa por aturar uma antena durante um ano em nosso quarto.

A minha orientadora por sua dedicação.

Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições neste trabalho.

Aos professores do PPGEE, pela dedicação e conhecimentos adquiridos.

RESUMO

Este trabalho propõe o projeto de um protótipo de um sensor de descargas atmosféricas, que irá; contabilizar o número de descargas detectadas, calcular a densidade de raios para a área de atuação do sensor e estimar o pico da variação do campo elétrico para o instante de ocorrência da descarga. 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 protótipo desenvolvido. O protótipo é constituído por duas antenas, uma antena Loop e uma antena Flat plate, e por circuitos eletrônicos, os quais são implementados em sua maioria no dispositivo PSoC (Programmable System-on-Chip), que trabalha com sinais analógicos e digitais e ainda conta com uma CPU para realizar o processamento destes sinais. A validação dos dados obtidos e a estimativa da área de abrangência do sensor, foram baseados em dados da rede STARNET (Sferics Timing And Ranging NETwork). O protótipo foi idealizado para ser de baixo custo, ter uma interface simples e poder ser instalado na região amazônica.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas. Contador de descargas atmosféricas. Protótipo. Densidade de raios. PSoC

ABSTRACT

This work proposes the design of a prototype for detect lightning, which will, count the number of lightning detected, calculate the density of lightning to the area of operation of the sensor and to estimate the peak of the variation of the electric field for the instant occurrence of discharge. A study of atmospheric electricity, types of lightning, emission of electromagnetic waves during the occurrence of the lightning , types of electromagnetic sensors and lightning detection networks gave subsidy to the design of the prototype . The prototype consists of two antennas, one loop antenna and a flat plate antenna , and electronic circuits , these electronic circuits are implemented mostly in PSoC device (Programmable System -on - Chip) , which is a relatively new technology that works with analog and digital signals and also has a CPU to perform the processing of these signals . The validation of the data obtained and estimated coverage area of the sensor, were based on data from STARNET network (sferics Timing And Ranging NETwork). The prototype was designed to be low cost, have a simple and straightforward interface and can be installed in the Amazon region.

Keywords: Lightning. Counter lightning. Prototype. Lightning density. PSoC

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EXPERIMENTO DE BENJAMIM FRANKLIN.....	6
FIGURA 2. CAMADAS DA ATMOSFERA TERRESTRE.....	8
FIGURA 3. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE (MAGNETOSFERA).....	9
FIGURA 4. CONDIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO DE TEMPO BOM.....	10
FIGURA 5. CIRCUITO ELÉTRICO GLOBAL.....	11
FIGURA 6. TEORIA DA PRECIPITAÇÃO.....	14
FIGURA 7. ALGUNS TIPO DE RAIOS.....	15
FIGURA 8. TIPOS DE RAIOS QUE ENVOLVEM O SOLO: (A) NT POSITIVO; (B) NT NEGATIVO;(C) TN POSITIVO; (D) TN NEGATIVO.....	16
FIGURA 9. (A) O LÍDER ESCALONADO (SALTANDO E PARANDO EM INTERVALOS), (B) DESCARGA CONECTANTE DEVIDO À PROXIMIDADE DO LÍDER ESCALONADO DESCARGA DE RETORNO. (C) DESCARGA DE RETORNO.....	17
FIGURA 10. ESPECTRO DE POTÊNCIA (WATT) VERSUS FREQUÊNCIA (KHz), PARA OS USUAIS ESPECTROS ELETROMAGNÉTICOS PROVENIENTES DE UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	18
FIGURA 11. ONDAS DE SUPERFÍCIE.....	19
FIGURA 12. ONDAS CÉU.....	20
FIGURA 13. CANAIS DE PLASMA QUE EMITEM LUZ DURANTE UMA DESCARGA.....	21
FIGURA 14. ASPECTOS SONOROS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	22
FIGURA 15. ANTENA FLATE PLATE.....	25
FIGURA 16. MODOS DE MEDIÇÃO.....	25
FIGURA 17. ESTRUTURA INTERNA DE UM FIELD MILL.....	28
FIGURA 18. EXEMPLO DO QUE É O COMPRIMENTO DE UMA ANTENA LOOP.....	29
FIGURA 19. DIAGRAMA DE CAMPO BIDIMENSIONAL DE UM ANTENA LOOP.....	30
FIGURA 20. DIAGRAMA DE CAMPO TRIDIMENSIONAL DE UM ANTENA LOOP (ELETRICAMENTE PEQUENA).....	31
FIGURA 21. ANTENA LOOP COM CAPACITOR DE RESSONÂNCIA CR.....	31
FIGURA 22. ANTENAS LOOP CRUZADAS.....	33
FIGURA 23. SENSOR IMPACT, UTILIZA OS MÉTODOS MDF E TOA PARA LOCALIZAR E DETECTAR DESCARGAS.....	34
FIGURA 24. EXEMPLO DO USO DO TOA EM BELEM-PA.....	35
FIGURA 25. IMAGEM DA DENSIDADE DE DESCARGAS NO GLOBO UTILIZANDO O MÉTODO TOGA NA REDE WWLL.....	37
FIGURA 26. CONCEITO PARA DETERMINAR AO DIFERENÇA DO TEMPO DE CHEGADA (ATD).....	38
FIGURA 27. LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PELO MÉTODO ATD.....	39
FIGURA 28. SISTEMAS ÓTICOS PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS.....	40
FIGURA 29. ÚLTIMA IMAGEM DISPONÍVEL DO SENSOR OLS.....	41
FIGURA 30. COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS DO SENSOR OLS E OTD.....	42
FIGURA 31. SENSOR DO OTD.....	43
FIGURA 32. HISTÓRICO DE RAIOS PARA O DIA 12/01/1997 PELO OTD.....	44
FIGURA 33. IMAGEM PROCESSADA DO LIS.....	46
FIGURA 34. SENSOR FORTE.....	46
FIGURA 35 DIAGRAMA DE BLOCOS DO FORTE.....	47
FIGURA 36. SENSOR LLP MODELO 430 TSS.....	50
FIGURA 37. OPERAÇÃO BÁSICA DO SENSOR.....	51
FIGURA 38. ESTRUTURA INTERNA DO SENSOR E SEUS PRINCIPAIS COMPONENTES.....	52
FIGURA 39. SENSOR LPATS-IV.....	54
FIGURA 40. FUNCIONAMENTO DE UMA REDE DE DETECÇÃO UTILIZANDO SENSORES LPATS-IV.....	54
FIGURA 41. FUNCIONAMENTO DA REDE DO SIPAM.....	56
FIGURA 42. LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES LPATS-IV PERTENCENTES A REDE DO SIPAM.....	57
FIGURA 43. LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DA STANET NO BRASIL.....	58
FIGURA 44. DIAGRAMA DE BLOCOS DA ANTENA E RECEPTOR.....	58

FIGURA 45. DIAGRAMA DO SISTEMA PROJETADO.....	61
FIGURA 46. DIAGRAMA DE ENTRADA DOS SINAIS E MOSTRADOR LCD.....	61
FIGURA 47. INTERFACE DO PSoC DESIGNER 5.1.....	63
FIGURA 48. SUBSISTEMAS DO PSoC.....	65
FIGURA 49. ANTENA FLAT PLATE CONSTRUÍDA.....	67
FIGURA 50. ANTENA LOOP QUADRADA COM 7 VOLTAS.....	69
FIGURA 51. DIAGRAMA DE BLOCOS DO PGA.....	69
FIGURA 52. TESTE DO AMPLIFICADOR COM GANHO DE 24.....	70
FIGURA 53. TESTE DOS DOIS ESTÁGIOS DE AMPLIFICAÇÃO DO SINAL ORIUNDO DA ANTENA LOOP.....	71
FIGURA 54. DIAGRAMA DO FILTRO PASSA FAIXA DE 2ª ORDEM.....	72
FIGURA 55. APLICATIVO BPF2 CONFIGURATION WIZARD.....	73
FIGURA 56. COMPARADOR.....	74
FIGURA 57. DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL.....	75
FIGURA 58. DIAGRAMA DE INTERCONEXÕES DO LCD.....	75
FIGURA 59. DISPLAY DE LCD.....	76
FIGURA 60. ALGORITMO CONTADOR.....	77
FIGURA 61. ALGORITMO DENSIDADE DE RAIOS.....	77
FIGURA 62. ALGORITMO DE DIGITALIZAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO.....	78
FIGURA 63. OSCILOSCÓPIO LIGADO AO SEGUNDO ESTÁGIO DE AMPLIFICAÇÃO DO CIRCUITO DE ELETRÔNICO.....	81
FIGURA 64. CENTELHADOR ATLAS 4B.....	81
FIGURA 65. SINAIS OBTIDOS NOS TESTES COM FAISCADOR.....	81
FIGURA 66. DETECÇÃO DO PICO POSITIVO DE CAMPO ELÉTRICO.....	82
FIGURA 67. REDE STARNET ATUALIZADO AS 18:50 DO DIA 16/01/2014.....	83
FIGURA 68. SINAIS OBSERVADOS NO OSCILOSCÓPIO DURANTE A TEMPESTADE DE RAIOS DO DIA 16/01/2014, UTILIZANDO A CONFIGURAÇÃO INICIAL DO DISPOSITIVO. OSCILOSCÓPIO ESTAVA NA ESCALA DE 0,125V.....	84
FIGURA 69. SINAIS OBSERVADOS NO OSCILOSCÓPIO DURANTE A TEMPESTADE DE RAIOS DO DIA 16/01/2014, APÓS AS MODIFICAÇÕES DAS CONFIGURAÇÕES INICIAIS. OSCILOSCÓPIO ESTAVA NA ESCALA DE 0,5V.....	85
FIGURA 70. IMAGENS DA REDE STARNET OBTIDAS NO ENDEREÇO ELETRÔNICO (47) NO INTERVALO ENTRE AS 19:10 E 19:24 DO DIA 16/01/2014.....	86
FIGURA 71. FOTO DO DISPLAY LCD APÓS 1MIN QUE O SENSOR FOI LIGADO.....	87
FIGURA 72. FOTO DO DISPLAY LCD AS 19:24H.....	87
FIGURA 73. LOCALIZAÇÃO DOS RAIOS DETECTADOS E NÃO DETECTADOS E DO SENSOR.....	87
FIGURA 74. DISTANCIAS ENTRE O SENSOR E O RAIOS MAIS DISTANTE DO SENSOR QUE FOI DETECTADO, E DISTÂNCIA ENTRE ESSE RAIOS E O RAIOS MAIS PERTO DO SENSOR QUE NÃO FOI DETECTADO.....	88
FIGURA 75. ESTIMATIVA DA ÁREA DE ABRANGÊNCIA DO SENSOR.....	88
FIGURA 76. CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES ATIVOS DA REDE STAENET.....	89

LISTA DE SIGLAS

PSOC - Programmable system-on-chip

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TOA - Time Of Arrival

MDF - Magnetic Direction Finding

ATD – Diferença do Tempo de Chegada

STARNET - Sferics Timing And Ranging NETwork

TOGA - Time of Group Arrival

OTD - Optical Transiente Detector

OLS - Operational Linescan System

LIS - Lightning Imaging Sensor

FORTE - Fast On-orbit Recording of Transient Events

LLP - Lightning Location and Protection

SUMÁRIO

1.CAPÍTULO - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESE.....	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
CAPÍTULO 2 - ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA E ASPECTOS FÍSICOS E DE PROPAGAÇÃO DOS RAIOS	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 A NATUREZA ELÉTRICA DA ATMOSFERA.....	7
2.2.1 Campo elétrico de tempo bom.....	9
2.2.2 Circuito elétrico atmosférico global	11
2.3 ELETRIFICAÇÃO DAS NUVENS.....	12
2.3.1 Teoria da convecção	12
2.3.2 Teoria da precipitação	13
2.4 TIPOS DE RAIOS	14
2.5 PROCESSOS COMPONENTES DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	16
2.6 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EMITIDOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SFERICS)	18
2.7 PROPAGAÇÕES DOS SFERICS NO GUIA DE ONDA TERRA-IONOSFERA...	18
2.8 ASPECTOS VISÍVEIS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	20
2.9 ASPECTOS SONOROS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	21
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS DO SENSORES E REDES DE DETECÇÃO	23
3.1 INTRODUÇÃO	23
3.2 SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO E ELÉTRICO.....	23
3.2.1 Sensores de campo elétrico.....	24
3.2.2 Sensores de campo magnético.....	29
3.3 REDES E SISTEMAS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	32

3.4 O FUTURO DAS MEDIÇÕES	48
CAPÍTULO 4 – SENSORES E REDES INSTALADOS NO PARÁ	49
4.1 INTRODUÇÃO	49
4.2 LLP- LIGHTNING LOCATION AND PROTECTION (MODELO 430 TSS)	49
4.3 GLOBAL ATMOSPHERIC, INC (SENSOR LPATS-IV) (45)	53
4.4 STARNET	57
CAPÍTULO 5 – PROTÓTIPO DE UM SENSOR DE DESCARGA ATMOSFÉRICA UTILIZANDO PSOC.....	60
5.1 INTRODUÇÃO	60
5.2 O PSoC	62
5.3 ANTENA FLATE PLATE	67
5.4 ANTENA LOOP	68
5.5 AMPLIFICADORES.....	69
5. 6 FILTRO.....	71
5.7 COMPARADOR	74
5.8 CONVERSOR AD	74
5.9 LCD	75
5.10 ALGORITMOS.	76
5.10.1 Algoritmo Contador.....	76
5.10.2 Programa Densidade De Raios	77
5.10.3 Algoritmo De Digitalização Do Campo Elétrico	78
5.11 CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO.....	78
5.12 QUADRO DE COMPARAÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO E O ADQUIRIDO PELO CEPEL.....	79
CAPÍTULO 6 –TESTES E RESULTADOS	80
6.1 INTRODUÇÃO	80
6.2 TESTE COM GERADOR DE SINAL	80
6.3 TESTE COM CENTELHADOR ATLAS 4B.....	80
6.4 TESTE DURANTE TEMPESTADES.....	82
CONCLUSÃO	91

1. CAPÍTULO - INTRODUÇÃO

Os estudos sobre as descargas atmosféricas são realizados desde o período de Benjamin Franklin, e até os dias atuais a comunidade acadêmica se sente motivada para elucidar os mecanismos que as desencadeiam. Entretanto, existe outro fator motivador para investigar este fenômeno, são as catástrofes naturais causadas por seu imenso poder de destruição.

As descargas atmosféricas são estudadas a partir de medidas realizadas por sensores de campos eletromagnéticos emitidos por elas. Estes sensores possuem a capacidade de detectar as ondas eletromagnéticas e de localizar a ocorrência das descargas. Assim, tendo em vista que todos os sensores comercializados mundialmente não são de origem nacional, torna-se importante o domínio tecnológico deste segmento para a realização de pesquisas de ponta na área de descargas atmosféricas no Brasil.

Ao obtermos conhecimento sobre este problema, na disciplina de Descarga Atmosférica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, nos chamou a atenção dois aspectos relevantes; o estudo dos sensores, os mecanismos de detecção e localização de raios e a existência de um monopólio desta tecnologia por determinadas empresas.

Neste sentido, tendo em vista o alto custo de importação destes equipamentos e a atual conjuntura do sistema elétrico brasileiro, torna-se fundamental a criação de um instrumento tecnológico que atenda às necessidades singulares do sistema elétrico do país.

Sabe-se que o setor elétrico brasileiro está em plena expansão, principalmente na região Norte, por isso atualmente se encontram em processo de construção algumas usinas hidroelétricas na região amazônica, como: Usina Hidrelétrica de Belo Monte, Usina Hidrelétrica Santo Antônio, Usina Hidrelétrica de Jirau e Usina Hidrelétrica Teles Pires. Outras se encontram em fase de planejamento e licitação, o caso das usinas do complexo do Tapajós.

Estas usinas hidrelétricas estão distantes tanto dos grandes centros de consumo do país como entre elas, além de estarem localizadas dentro da floresta amazônica. Por estes motivos altas torres de transmissão de energia tornam-se

necessárias, para transpor rios e florestas sem impactar muito a fauna e flora local, podendo atingir alturas de até 295m segundo a ELETRONORTE. Portanto, as torres a esta altura tornam vulneráveis as descargas, propiciando danos ao setor elétrico.

Logo, é fundamental o planejamento e a perfeita operação das linhas de transmissão, que levam energia para estes centros de consumo e interligam as usinas geradoras, tornando o mapeamento da ocorrência de descargas atmosféricas, sobre a área de instalação destas linhas de transmissão, de suma importância para se projetar sistemas mais robustos contra esse fenômeno natural.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESE

A partir do exposto acima, como podemos obter dados confiáveis de densidade de raios, para melhor planejamento dos sistemas de proteção destas novas usinas hidroelétricas? E como podemos obter as características das descargas que ocorrem na região amazônica?

Para responder essas duas questões, levantamos as seguintes hipóteses: Com a elaboração de um protótipo de um sensor que atenda às necessidades da região será possível contabilizar a densidade de raios na localidade de operação destas usinas, assim como teremos dados mais precisos sobre o comportamento das descargas atmosféricas na região. O registro do campo elétrico emitido por uma descarga, traz informações sobre sua intensidade, com isso podendo caracterizar as descargas que ocorrem na Amazônia.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo geral: O objetivo desta pesquisa foi propor um protótipo de detecção de descargas atmosféricas com estimativa de densidade de raios e estimativa de pico de campo elétrico. O protótipo será similar aos contadores de descargas do padrão CIGRE 10KHz, porém com algumas particularidades.

Objetivos Específicos:

- 1- Abordar por meio teórico as características das descargas atmosféricas, assim como os métodos de detecção e de sua localização;

- 2- Enunciar as pesquisas desenvolvidas sobre descargas atmosféricas realizadas no estado do Pará a partir dos dados de alguns sensores que estiveram em funcionamento;
- 3- Elaborar um sistema de detecção de raios com base nos circuitos integrados do PSoC;
- 4- Analisar e comparar os dados obtidos nos seguintes testes: Teste em laboratório, teste com centelhador e teste durante tempestades.

1.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico abordado nessa pesquisa é quantitativo, tendo como base o método experimental. Foi elaborado para o desenvolvimento desta pesquisa as seguintes etapas.

- Pesquisa de fontes bibliográficas para embasamento teórico conceitual sobre o que é e como são estudadas as descargas atmosféricas.
- Foi realizado um estudo sobre o funcionamento dos detectores de descargas e sobre os seus métodos de localização.
- Estudamos o funcionamento dos sensores da rede do SIPAM, por meio de seus manuais.
- Elaboração de um protótipo para detecção de raios.
- Análise dos dados obtidos com os testes realizados com o protótipo.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No primeiro capítulo deste trabalho é apresentada a motivação para a realização do mesmo, o objetivo e sua organização.

No segundo capítulo abordam-se os conceitos teóricos sobre eletricidade atmosférica, os aspectos físicos dos raios falando sobre suas principais características e tipologias.

No terceiro capítulo é descrito o funcionamento dos sensores de campo elétrico e magnético utilizados para detectar, localizar e estudar as descargas

atmosféricas, assim como é abordado o funcionamento das redes mundiais de localização de descargas.

No quarto capítulo é apresentado os sensores e a rede de localização e detecção de descargas instaladas no estado do Pará, abordando suas funcionalidades, seu modo de funcionamento e sua importância para o estudo do fenômeno raio na região amazônica.

No quinto capítulo apresentam-se o projeto do protótipo desenvolvido abordando o projeto e funcionamento de cada sub- sistema do protótipo.

O sexto capítulo é composto pelos testes e resultados obtidos com o protótipo em funcionamento. Primeiramente são abordados testes com gerador de sinal, em seguida é abordado testes com centelhador Atlas 4B e por fim testes durante tempestades.

O sétimo capítulo é composto pelas conclusões obtidas na realização deste trabalho, e pelas propostas de trabalhos futuros visando o aperfeiçoamento do protótipo e implementação de novas funcionalidades.

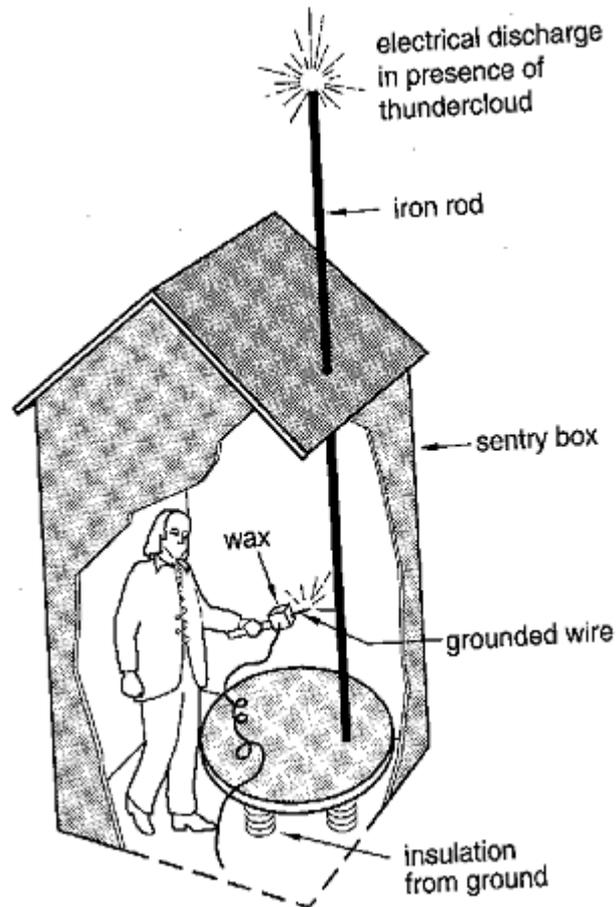
CAPÍTULO 2 - ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA E ASPECTOS FÍSICOS E DE PROPAGAÇÃO DOS RAIOS

2.1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas sempre causaram fascinação e temor nas civilizações antigas. O medo que se tinha de sua intensa luminosidade e principalmente do estrondo que as acompanham fez com que nossos ancestrais, por não conseguirem explicá-los, os associassem a manifestações divinas. A mitologia nórdica, por exemplo, dizia que Thor era o deus dos relâmpagos. Em seus momentos de ira, usava um martelo mágico, para golpear todos os corpos celestes, o que resultava num grande estrondo. Essa era a origem do trovão para aquele povo, sempre precedendo as tempestades. Do mesmo modo, os gregos acreditavam que os Ciclopes, faziam raios para Zeus, o deus do céu, para que ele os lançassem sobre os mortais. E foram muitos outros deuses cultuados, como a versão Romana de Zeus, Júpiter que lançava seus raios em advertência a comportamentos reprováveis.

Foi no início do século XVIII após a descoberta da eletricidade que a natureza elétrica da atmosfera da Terra começou a ser estudada e desvendada. Neste início observou-se que um relâmpago era parecido com uma faísca que saía de um pedaço de âmbar carregado eletricamente. Benjamin Franklin foi o primeiro a projetar um experimento para tentar provar a natureza elétrica do relâmpago. Em julho de 1750, Franklin propôs que a eletricidade poderia ser drenada de uma nuvem por um mastro metálico. Se este mastro estivesse isolado da terra e aproximássemos algum objeto metálico que estivesse aterrado, um arco voltaico (ou uma faísca) saltaria da haste metálica para esse objeto aterrado, caso uma nuvem eletrificada estivesse por perto.

Figura 1. Experimento de Benjamim Franklin.



Fonte: (1)

Em 1752, L. G. Lemonnier verificou que mesmo com a ausência de nuvens existia uma fraca eletrificação da atmosfera, que hoje conhecemos como condição de tempo bom, mais tarde em 1775, G. Beccaria confirmou a existência da variação da eletrificação durante o dia e a noite na condição de tempo bom e determinou que a polaridade da carga elétrica na atmosfera nestas condições era positiva e que ela mudava para negativa quando havia tempestades próximas, em concordância com as observações de Franklin.(2)

Em 1785, C. A. Coulomb descobriu que o ar é condutor de eletricidade, porém sua descoberta não foi muito bem compreendida na época e foi esquecida, mais de 100 anos depois W. Linss chegou aos mesmos resultados obtidos por Coulomb, então, estimou que a Terra perderia quase toda a sua carga para a atmosfera condutora em menos de uma hora, a menos que a fonte de cargas fosse restabelecida. Este fato deu origem ao que se tornou conhecido como problema

fundamental da eletricidade atmosférica, isto é, como a carga negativa da Terra é mantida. (2)

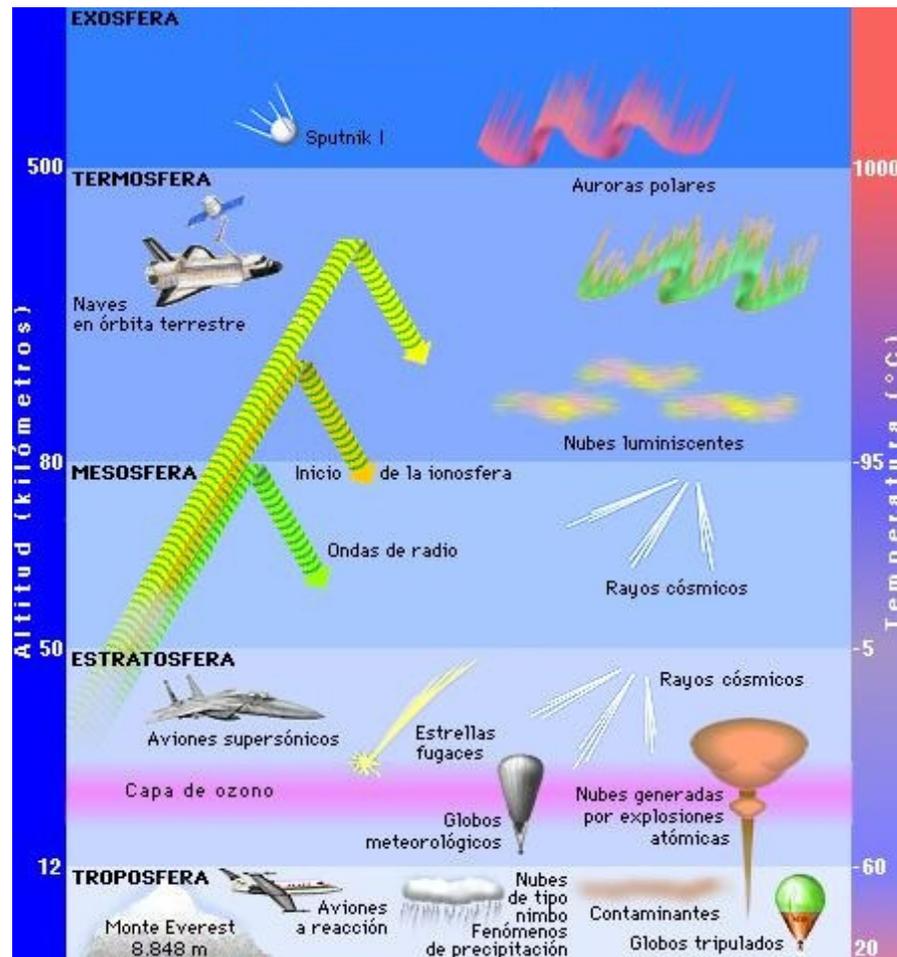
Atualmente as descobertas sobre a eletrificação da atmosfera e descargas atmosféricas são feitas com ajuda de equipamentos de ponta, como câmeras super-rápidas, osciloscópios e sensores de campos eletromagnéticos.

2.2 A NATUREZA ELÉTRICA DA ATMOSFERA

Antes de entendermos o que é, e como funciona a eletricidade da atmosfera precisamos saber o que é a atmosfera terrestre. A atmosfera terrestre é uma camada de gases que envolvem o planeta e não se dispersa devido a força gravitacional que a terra impõem sobre os gases. A Atmosfera é de extrema importância para a manutenção da vida na terra, ela absorve a radiação ultravioleta solar, aquecendo a superfície terrestre por meio da retenção de calor, e reduzindo as variações bruscas de temperatura entre o dia e a noite, assim como protege nosso planeta das radiações cósmicas, e tempestades solares.

O termo eletricidade atmosférica surgiu do esforço de se estudar a componente eletrostática do campo geoeletromagnético da Terra. (3) Na atmosfera Terrestre podemos encontrar diferentes regiões com base em diferentes parâmetros. Com base no parâmetro temperatura, a atmosfera é dividida a partir da superfície da Terra nas seguintes regiões: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. Do ponto de vista dos íons e da condutividade, a atmosfera pode ser dividida em: atmosfera inferior (correspondente à troposfera), média atmosfera (correspondente à estratosfera e mesosfera) e atmosfera superior (acima de 80 km, correspondente à termosfera).

Figura 2. Camadas da Atmosfera Terrestre.



Fonte: (4)

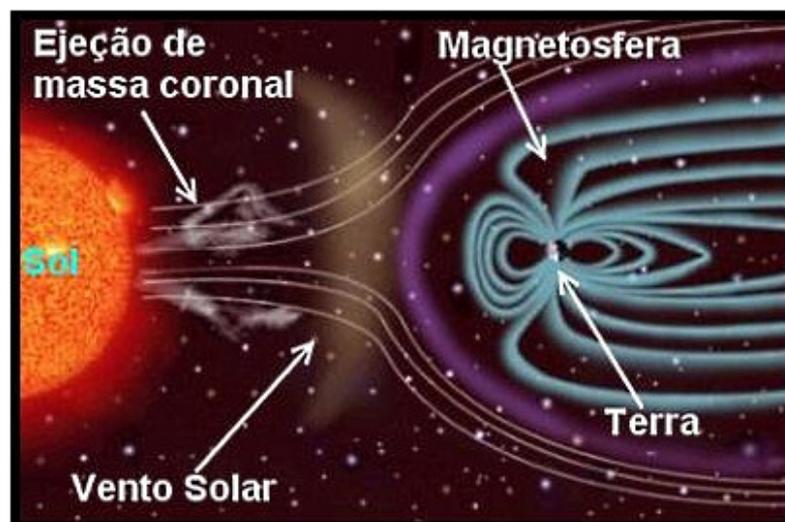
A atmosfera inferior e a média atmosfera são fracamente condutoras devido à baixa concentração de íons. Nestas regiões, os íons são criados pela ionização de moléculas neutras do ar, geralmente moléculas de nitrogênio e oxigênio, por raios cósmicos primários e secundários, e por partículas e radiação produzida pelo decaimento radioativo de substâncias no solo como urânio e tório, e no ar como gás radônio. A produção de íons por raios cósmicos varia com a altitude e a latitude e a produção de íons devido ao decaimento de substâncias radioativas depende das características do solo.

Diferentemente da atmosfera inferior e da média atmosfera, na atmosfera superior existem além dos íons negativos e positivos uma considerável quantidade de elétrons livres produzidos pela absorção da radiação solar por átomos e moléculas. Este processo é chamado de fotoionização. Os elétrons podem então se

unir às moléculas neutras criando íons negativos. Os elétrons e íons criados por este processo tornam a atmosfera um razoável condutor, formando uma região chamada ionosfera.

A próxima camada é a magnetosfera, ela se inicia na parte superior da ionosfera e continua para cima, nesta região a dinâmica das partículas é governada pelo campo magnético da Terra. Os íons, prótons e elétrons nesta região são originários da ionosfera e do vento solar, um fluxo de partículas carregadas provenientes do sol que atinge a atmosfera da Terra. Na parte interna da magnetosfera, partículas carregadas são aprisionadas pelo campo magnético formando cinturões de radiação ao redor da Terra.

Figura 3. Campo Magnético terrestre (Magnetosfera).



Fonte: (5)

2.2.1 Campo elétrico de tempo bom.

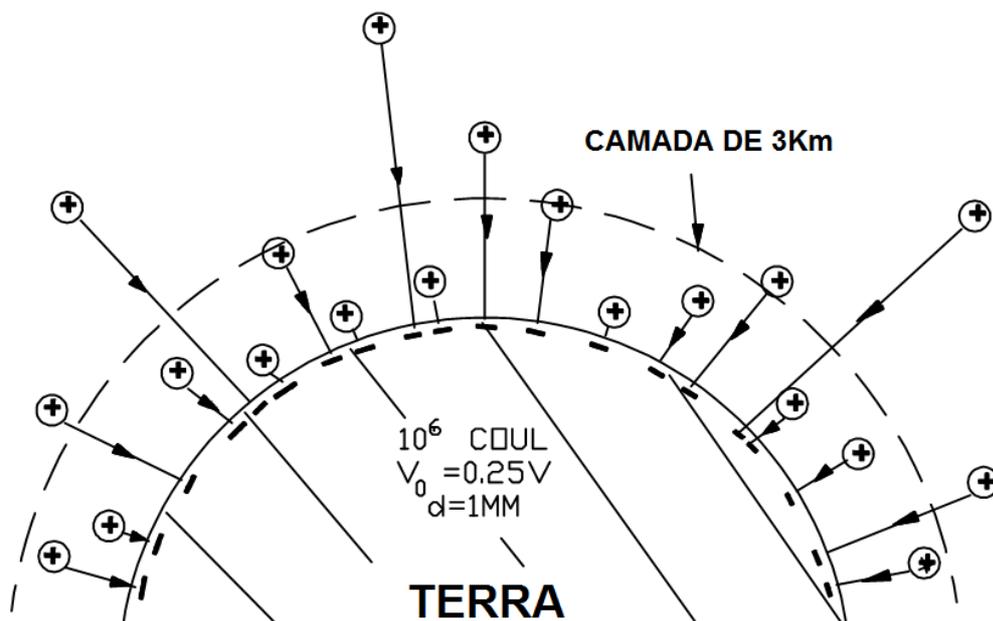
O campo elétrico de tempo bom foi descoberto por Lemonner e Beccaria, este campo ocorre quase que totalmente devido ao excesso de íons positivos sobre íons negativos na atmosfera.

Para melhor compreensão do campo elétrico de tempo bom devemos assumir que a superfície terrestre absorve uma certa quantidade de íons negativos, isso irá acarretar em um ligeiro excesso de cargas negativas na superfície. Esse excesso irá

fazer com que se forme um excesso de cargas de sinal oposto, ou seja, a atmosfera ficara com um ligeiro excesso de cargas positivas.

Se imaginarmos que cada carga negativa capturada pela superfície terrestre irá produzir uma linha de campo elétrico que irá terminar no íon positivo deixado na atmosfera, teremos a condição de tempo bom, mostrado na Figura 4. Essa uniformidade no campo elétrico pode ser verificada até uma altitude de 3Km. (6)

Figura 4. Condição de campo elétrico de tempo bom.



Fonte: Adaptado de (6)

O número de linhas de campo produzidas pelas cargas positivas acima da superfície terrestre dividido por uma unidade de área desta superfície é também conhecido como Campo Elétrico. Obviamente o campo é máximo na superfície, pois contém o maior número de linhas de campo por unidade de área. A média desse campo na superfície é de cerca de 100V por metro e para altitude superior a 3Km cai cerca de 10V/m. (6)

Se integramos o campo elétrico em função da altitude podemos determinar a diferença de potencial para diferentes altitudes, um valor típico para a altitude de 3Km é 200KV (6). Atribui-se as nuvens cumulonimbus, ocorrendo em várias regiões do globo terrestre, a razão para a manutenção dessa diferença constante de

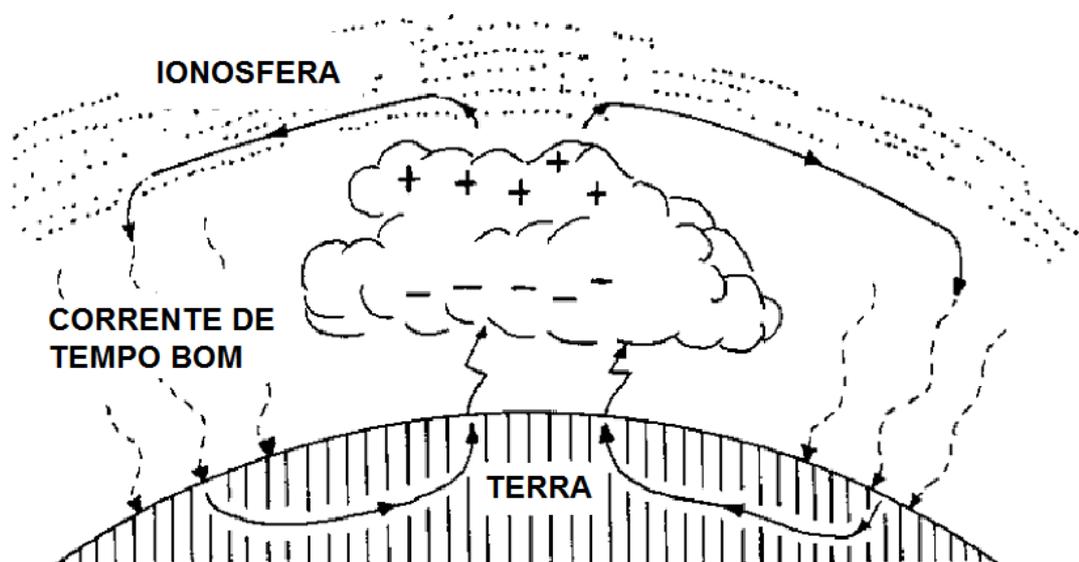
potencial. As Cumulonimbus são nuvens que se apresentam como estruturas elétricas intrínsecas, podendo conter cargas elétricas de elevado valor. Essa compreensão física leva ao conceito de um circuito elétrico atmosférico global.

2.2.2 Circuito elétrico atmosférico global

O conceito de que as nuvens de tempestade ao redor do mundo geram carga elétrica para a ionosfera terrestre foi primeiro sugerido por C.T.R Wilson em 1920.

De acordo com C.T.R Wilson, existem linhas de campo do topo das nuvens para a ionosfera, presume-se que por essas linhas de campo, cargas são escoadas das nuvens para a ionosfera. Note na Figura 5, que as linhas de campo também saem do topo das nuvens para a terra, escoando cargas positivas. Cargas Negativas são conduzidas para a terra, muitas da vezes, por descargas atmosféricas. (6)

Figura 5. Circuito elétrico Global.



Fonte: Adaptado de (6)

Um ponto fundamental no estudo do circuito elétrico global é a determinação do número de linhas de campo entre o topo da nuvem e a ionosfera e do topo da nuvem para a terra.

2.3 ELETRIFICAÇÃO DAS NUVENS

Atualmente não se sabe ao certo como as nuvens de tempestades se tornam carregadas. Em parte, isto se deve ao fato de que a estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade pode ser bastante complexa, sendo o resultado de processos microfísicos, que atuam em escalas de quilômetros, e processos microfísicos, que atuam em escalas de milímetros, ambos ocorrendo simultaneamente dentro e fora da nuvem. Existem duas teorias que são mais aceitas no meio científico, a teoria da convecção e a teoria da precipitação, estas duas teorias serão abordadas nos itens a seguir.

2.3.1 Teoria da convecção

Esta teoria consiste em afirmar que a ionosfera é carregada negativamente, devido à influência dos raios cósmicos. Com isso a terra libera facilmente íons positivos, que são transportados pelas partículas que sobem, devido aos movimentos convectivos no momento da formação da nuvem.

O processo de carregamento inicia-se quando uma parcela de ar quente começa a se elevar e íons positivos próximos à superfície são levados junto desta parcela de ar quente. Conseqüentemente, a parcela de ar se satura e existe a formação de gotículas de nuvem. Estas gotículas então tornam-se carregadas positivamente. À medida que a nuvem se desenvolve verticalmente ela penetra em níveis mais altos na troposfera e começa a atrair os íons negativos, gerados pela ionização das moléculas de ar, que tem maior mobilidade naquela altura.

Com isso os íons negativos começam a formar uma camada na periferia da nuvem. Com o desenvolvimento da tempestade, ou seja, estabelecimento dos movimentos ascendentes e descendentes, os íons negativos começam a entranhar dentro da nuvem e regiões ou centros de cargas começam a ser formar no interior da nuvem.

Esta nuvem que se forma por partículas majoritariamente constituídas por íons positivos irá atrair, da ionosfera para o topo da nuvem, íons negativos tornando a nuvem eletricamente equilibrada. (7)

2.3.2 Teoria da precipitação

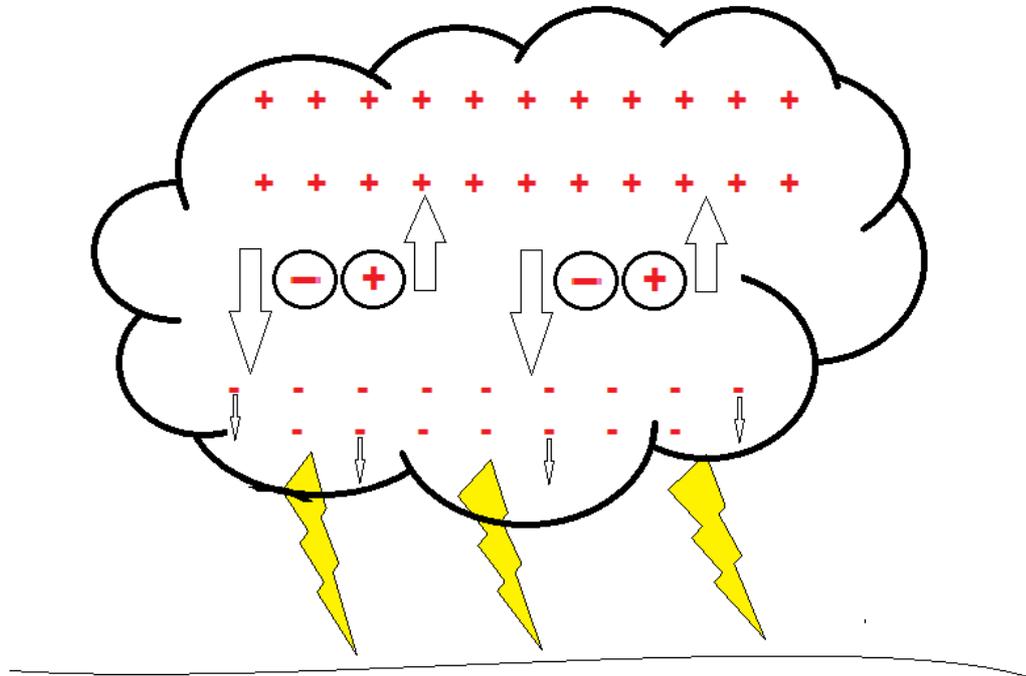
A teoria da precipitação é sustentada por dois processos, o processo de indução e o de formação e colisões entre cristais de gelo. A hipótese do processo de indução diz que as partículas suspensas na nuvem estão inicialmente equilibradas eletricamente, porém polarizadas com cargas positivas na parte inferior e negativas na parte superior. Assim, no momento da precipitação as partículas maiores que estão em queda irão se chocar com as partículas menores e, neste choque, capturar as cargas negativas presentes na parte superior, deixando as partículas menores carregadas positivamente. Como as partículas menores estarão sob o efeito do movimento de ascensão o topo da nuvem se carregará positivamente, enquanto que a parte inferior da nuvem ficará negativa, formando um dipolo.

Já a hipótese do processo de formação por colisões entre cristais de gelo consiste em que as gotículas de água são elevadas, resfriando-se e atingindo um estado de super-resfriamento, com isso atingindo a formação de cristais de gelo. Da colisão desses cristais com as gotículas de água super-congeladas, cargas elétricas são geradas: trata-se de eletrificação por contato, onde os cristais de gelo perdem elétrons, tornando-se positivos e as gotículas de água super-congeladas ganham elétrons tornando-se negativas. (9)

Em temperaturas abaixo de um limiar as polaridades são revertidas, explicando a existência de região de cargas positivas na base das nuvens, e na área de precipitação tem a predominância de cargas negativas. (8)

A água super-congelada, sendo mais pesada acaba se acumulando na base da nuvem, enquanto os cristais de gelo sendo mais leves, acumulam-se no topo da nuvem, formando um dipolo.

Figura 6. Teoria da Precipitação.



Fonte: Do Autor

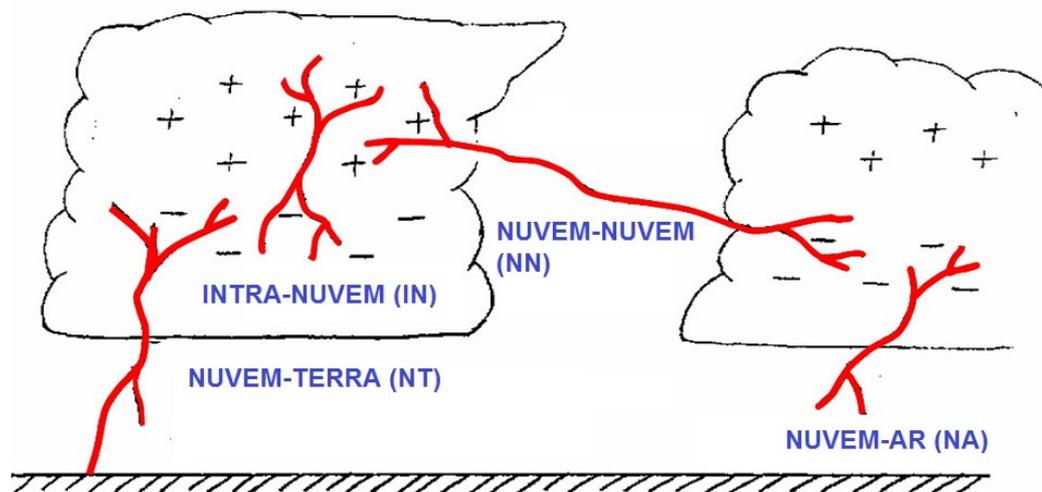
2.4 TIPOS DE RAIOS

Os tipos de descargas mais relatadas são, nuvem-terra (NT), intra-nuvem (IN), nuvem-nuvem (NN), nuvem-ar (NA) e terra-nuvem (TN). Outros tipos de raios são também observados, porém com menos intensidade, como os jatos azuis, os Sprites vermelhos, e os raios bola. Na Figura 7 apresenta-se alguns tipos de descargas atmosféricas. Os raios do tipo NT são os que mais despertam interesse, devido a sua característica destruidora.

Os raios intra-nuvem (IN), ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; os nuvem-nuvem (NN), ocorrem entre nuvens diferentes; os nuvem-ar (NA), partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo, os nuvem-terra (NT), são caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra e os terra-nuvem (TN), ocorrem a partir do solo em direção à nuvem.

Os raios NT e TN 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), conforme apresentado na Figura 8.

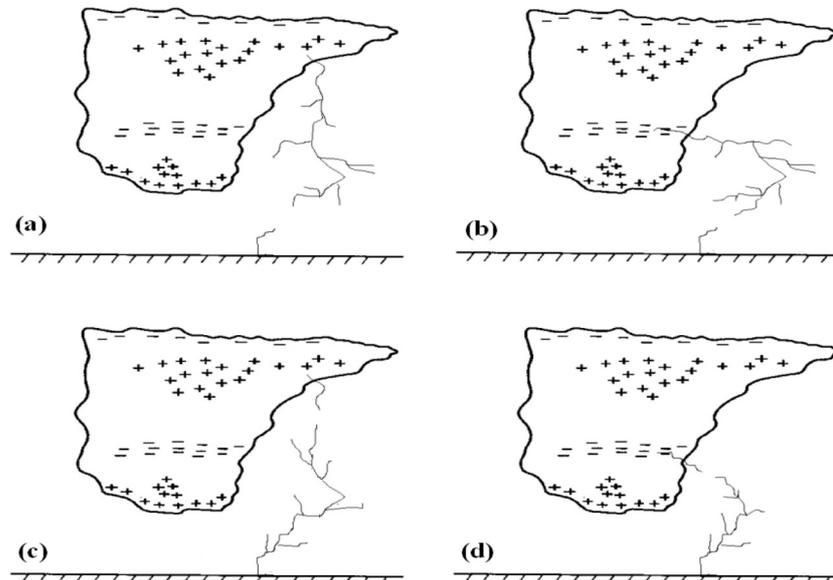
Figura 7. Alguns tipo de Raios.



Fonte: Adaptado de (10)

Os raios NT são em sua maioria negativos, representando em média 90% do total (11). A frequência dos relâmpagos positivos, entretanto, parece ser bastante variável, de acordo com a altitude, velocidade dos ventos e dissipação das nuvens de tempestade, sendo em alguns casos até superior à dos negativos.

Figura 8. Tipos de raios que envolvem o solo: (a) NT positivo; (b) NT negativo; (c) TN positivo; (d) TN negativo.



Fonte (12)

2.5 PROCESSOS COMPONENTES DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

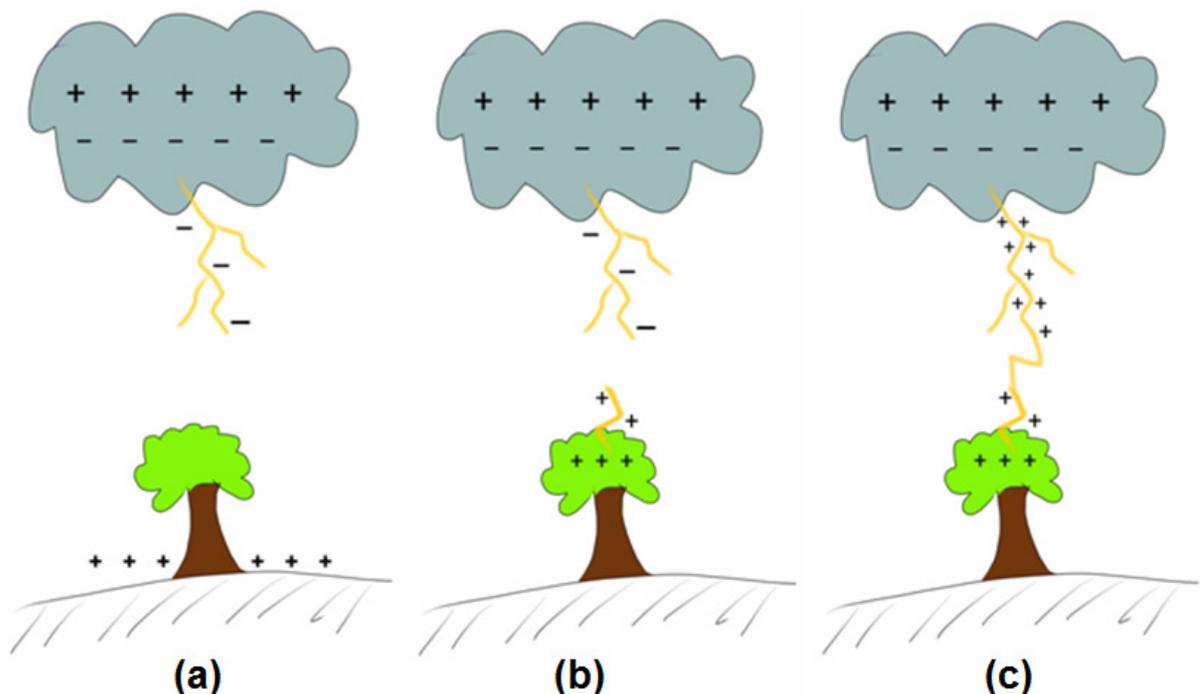
Em uma descarga nuvem-terra, o relâmpago inicia-se através da quebra de rigidez dielétrica do ar dentro da nuvem, assim uma descarga atmosférica é desencadeada quando o campo elétrico supera a capacidade isolante do ar, cujo campo elétrico necessário para quebrar sua rigidez dielétrica é de cerca de 3MV/m, enquanto no interior da nuvem o campo elétrico necessário está entre 100-400 kV/m.(13)

No processo inicial de um relâmpago, um raio desce em pequenos caminhos e para, após um intervalo de tempo pequeno menor que 1micro segundo, então um novo raio se propaga para baixo utilizando o mesmo caminho do raio anterior, e assim se estende mais um pouco. Este processo continua até que o raio chegue ao chão. Este tipo de descarga atmosférica é conhecida como “stepped leader” ou líder escalonado. Uma vez que o raio líder escalonado está próximo ao chão aproximadamente entre 5 e 50 metros um raio se propaga do chão para o raio,

denominado "raio conectante", formando o raio de retorno que é mais luminoso, sendo que ele é conhecido como "return stroke" ou descarga de retorno. (1)

Sobre a influência do intenso campo elétrico estabelecido entre a nuvem e o solo as cargas negativas então movem-se em direção ao solo. Ao longo do caminho, algumas cargas seguem outros rumos devido à influência de cargas na atmosfera ao redor do canal, formando ramificações. As cargas no canal movem-se rumo ao solo com velocidade média de cerca de 100 km/s produzindo uma fraca luminosidade em uma região com diâmetro entre 1 e 10 metros ao longo do qual a carga é depositada. Frequentemente os processos de líderes e descargas repetem-se no mesmo canal ionizado em diferentes intervalos de tempo por que encontram um canal que se mantêm ionizado e pronto para descargas subsequentes por algum tempo. O Líder Subsequente ou Dart Leader move-se pelo mesmo canal como o líder escalonado original que em geral não possui ramificações. Devido à resistência elétrica do canal agora ser baixa, o líder contínuo desce rapidamente e quando se aproxima do solo, normalmente ocorre uma descarga de retorno para a nuvem. Esse mecanismo ocorrem até que o centro de cargas seja completamente neutralizado, ou seja, até que ocorra o fechamento do canal. (14)

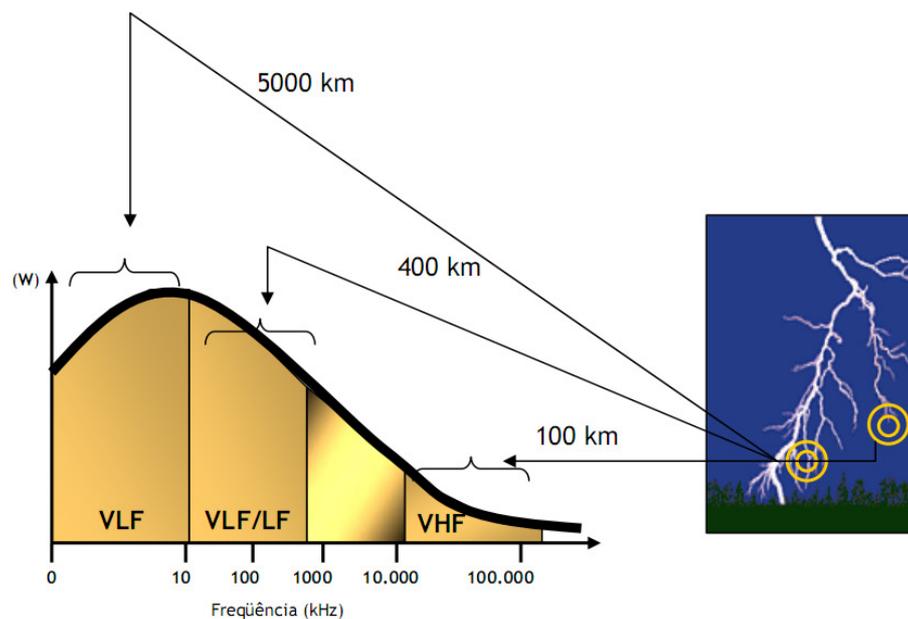
Figura 9. (a) o líder escalonado (saltando e parando em intervalos), (b) descarga conectante devido à proximidade do líder escalonado descarga de retorno. (c) descarga de retorno.



2.6 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EMITIDOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SFERICS)

Como foi visto no item anterior no momento em que o raio líder toca a terra, ocorre o que é chamado de descarga de retorno. Durante este processo os campos elétricos e magnéticos produzidos pela descarga sofrem variações, tanto no tempo como no espaço, com esta variação é emitido um tipo de ruído eletromagnético conhecido como Radio Atmospherics, conhecido também como Sferics. Estes sinais eletromagnéticos estão situados em uma banda larga no espectro inclusive na luz visível, mas, possuem a maior parte de sua energia irradiada na faixa de Very Low Frequency (VLF)(3KHz a 30KHz) e Extremely Low Frequency (ELF)(3Hz a 3KHz).

Figura 10. Espectro de Potência (Watt) versus Frequência (kHz), para os usuais Espectros eletromagnéticos provenientes de uma descarga atmosférica.



Fonte: (12).

2.7 PROPAGACÕES DOS SFERICS NO GUIA DE ONDA TERRA-IONOSFERA

O sferic se propaga por grandes distâncias através do guia de onda formado pela terra e a ionosfera. Veremos adiante como se dá essa propagação.

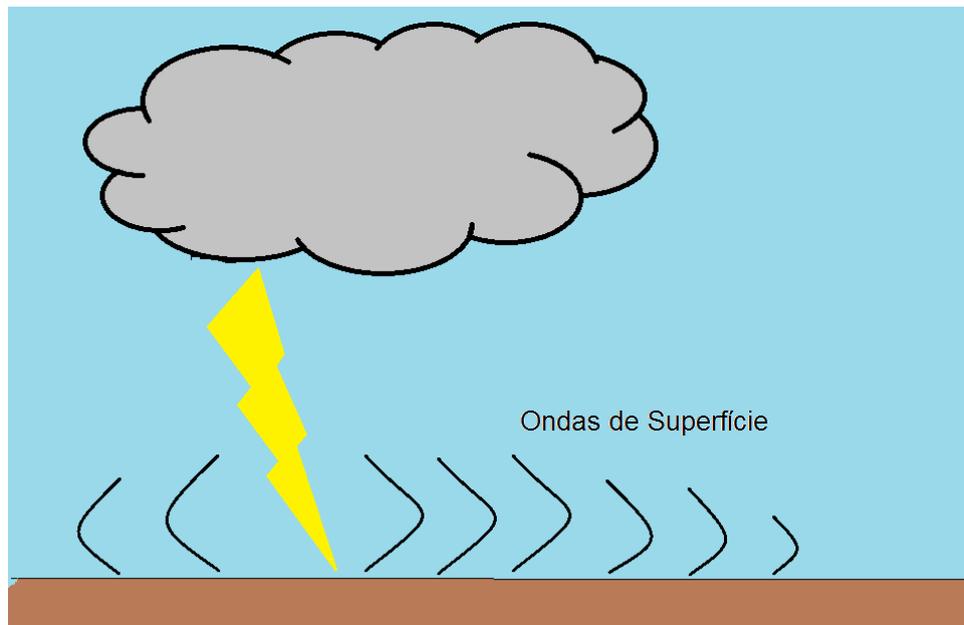
Os fenômenos mais importantes associados à propagação das ondas VLF consequentemente dos Sferics são as atenuações do espaço livre e da ionosfera, reflexão na superfície do solo e efeitos resultantes da anisotropia da ionosfera.

A propagação em VLF a longas distâncias, muitas vezes apresenta-se como uma combinação entre os dois tipos de ondas (de superfície e de céu), podendo ocorrer interferência pela combinação destrutiva das duas ondas.

Ondas de superfície.

Esta onda representa a parcela do campo irradiado por uma descarga atmosférica, que se propaga ao longo do contorno da Terra. Admite-se que a superfície induza uma corrente no solo devido à presença de um campo elétrico local, que induzem novos campos, numa sucessão que tende a se difundir em toda região. Como o terreno possui condutividades finitas, as correntes induzidas implicam em efeitos que tendem a diminuir as amplitudes das componentes do campo magnético. (15)

Figura 11. Ondas de Superfície.

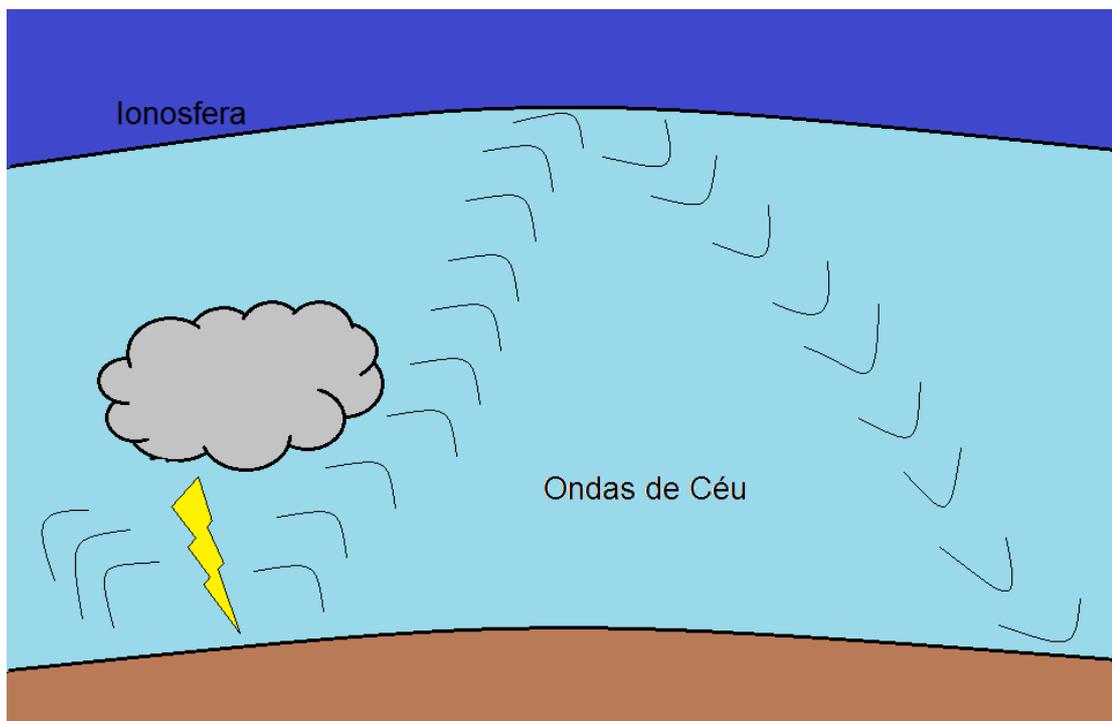


Fonte: Do autor.

Ondas de céu

A partir de múltiplas reflexões entre o guia de onda formado pela superfície terrestre e a ionosfera, a onda de céu pode se propagar até 5.000 km ou mais, através da reflexão ou difração na ionosfera. Contudo, os sinais estão restritos a banda de frequências de VLF e ELF. No período noturno, uma onda de céu pode retornar a Terra, percorrendo uma distância maior.

Figura 12. Ondas Céu.



Fonte: Do autor.

Quando uma onda de superfície e uma onda de céu chegam ao mesmo tempo a um receptor, o sinal total é a soma vetorial das duas ondas. Se os sinais estão em fase, uma onda reforça a outra, produzindo um sinal mais forte. Se há diferença de fase, os sinais tendem a cancelar-se mutuamente.

2.8 ASPECTOS VISÍVEIS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A intensidade e a frequência da luz emitida pelo raio dependem da pressão, temperatura e densidade de corrente do canal no ar formado pela descarga. Testes

realizados em descargas de retorno, através da análise espectral do nitrogênio no canal ionizado, estimou que a temperatura deste canal alcança 30.000 K, durante os primeiros 10 μs e cai para 20.000 K, nos 20 μs posteriores. A densidade de elétrons, durante os primeiros 5 μs , chegam a ordem de e decrescem a após os 20 a 30 μs posteriores. A pressão estimada para este canal é de 8 atm, nos primeiros 5 μs , como esta pressão é muito maior que a do ambiente 1 atm, o canal irá se expandir rapidamente. Segundo UMAN (1987), ensaios experimentais realizados por Guo e Krider em 1983, mostraram que a potência da primeira descarga de retorno, na faixa do comprimento de onda compreendido entre 0,4 a 1,1 μm , chegaram a um pico de e para os subsequentes. Estes testes também estimaram que a radiação média da luz das primeiras descargas de retorno é de. A intensidade relativa da luz permanece constante durante os 30 μs iniciais e tendo uma amplitude de 15 a 30% da inicial próximo a terra (11). Podemos visualizar na Figura 13 este aspecto das descargas.

Figura 13. Canais de plasma que emitem luz durante uma descarga.



Fonte: (16)

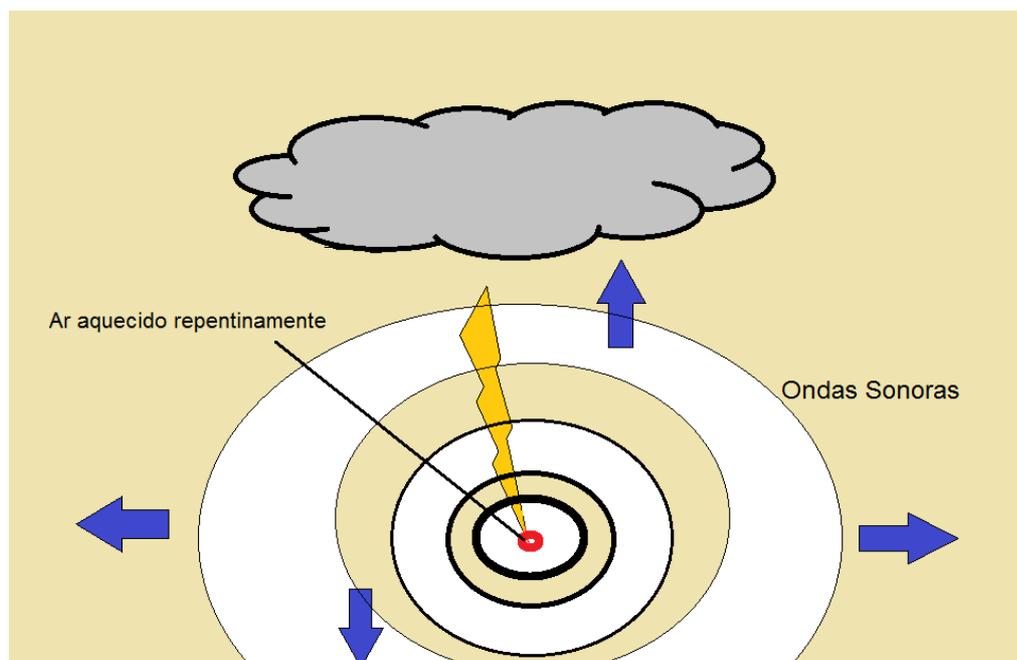
2.9 ASPECTOS SONOROS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Os trovões que ouvimos quando ocorre uma descarga atmosférica nada mais são que ondas sonoras. Essas ondas sonoras são formadas quando o ar ao redor

do relâmpago é aquecido repentinamente com temperaturas na ordem de 20 mil a 30 mil graus Celsius. Quando o ar é aquecido ele se expande, e esta expansão gera uma onda de choque supersônica próxima ao canal do raio e, em distâncias maiores uma onda sonora intensa que se afasta do canal em todas as direções. Trovões produzidos por raios NT tem tipicamente, um máximo de intensidade em torno de 50-100 Hz, enquanto que aqueles produzidos por relâmpagos NN têm um máximo de intensidade em torno de 20-30 Hz. Próximo do relâmpago, o som assemelha-se a intenso estalo e pode causar danos ao ouvido humano. Distante do relâmpago, o som assemelha-se a um estrondo grave relativamente fraco.

A duração do trovão é uma medida da diferença entre as distâncias do ponto mais próximo e do ponto mais distante do canal ao observador. A duração típica de um trovão é de 5 a 20 segundos. O trovão pode ser usado para calcular qual a distância de um relâmpago. A partir do momento que você enxergar o clarão, conta-se os segundos até escutar o trovão. Divide-se o número de segundos por três e você terá a distância aproximada do relâmpago em quilômetros. Finalmente, se você enxergar o clarão e não escutar o trovão, o relâmpago provavelmente está a mais de 20 quilômetros de você. (2) Na Figura 14 está apresentado este aspecto sonoro das descargas.

Figura 14. Aspectos sonoros das descargas atmosféricas.



Fonte: Do autor.

CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS DO SENSORES E REDES DE DETECÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

A medição é necessária para mostrar as condições eletrostáticas em tempo real, para ajudar a esclarecer o porquê destas condições e para comprovar os modelos teóricos desenvolvidos ao decorrer dos anos.

Em muitos casos, as medições são usadas apenas como algo informativo, mas elas podem ser utilizadas para fins de segurança e principalmente de pesquisa.

Com a utilização de um ou mais sensores para medição de parâmetros como campo elétrico e campo magnético emitidos por descargas atmosféricas, temos as denominadas redes de detecção de descargas atmosféricas.

A seguir será descrito os instrumentos básicos para medida de campo eletrostático e campos eletromagnéticos antes e durante a ocorrência de descargas atmosféricas, assim como o funcionamento de algumas redes de detecção e localização de descargas.

3.2 SENSORES DE CAMPO MAGNÉTICO E ELÉTRICO

Atualmente com o avanço tecnológico temos instrumentos com ótima precisão e rápida resposta temporal, podendo-se obter dados para a melhor investigação dos fenômenos atmosféricos. Hoje conseguimos construir simples medidores de campo elétrico e magnético utilizando circuitos eletrônicos, porém é necessário um grande embasamento teórico para calibração e comprovação dos dados obtidos.

3.2.1 Sensores de campo elétrico

Para a eletricidade estática temos como parâmetro básico a 'carga elétrica'. Em alguns casos práticos esta carga pode ser medida diretamente, porém é a partir do campo elétrico gerado pelas cargas elétricas que é feita a maioria das medições na prática.

A medição do campo elétrico geralmente é aplicada para detectar, localizar e quantificar fontes de carga estática e para avaliar a influência destas cargas. Medição de campo elétrico também fornece a base para medição de outros parâmetros de interesse em eletrostática, como: tensões sobre superfícies, pessoas e volumes, densidade de carga em superfícies e em volumes, quantidades de carga em objetos e a capacidade dos materiais em dissipar uma carga estática.

A abordagem mais prática para medir o campo eletrostático consiste em medir a carga induzida sobre a superfície de detecção.

Um campo elétrico é associado a uma distribuição de carga em uma superfície condutora, conforme equação abaixo.

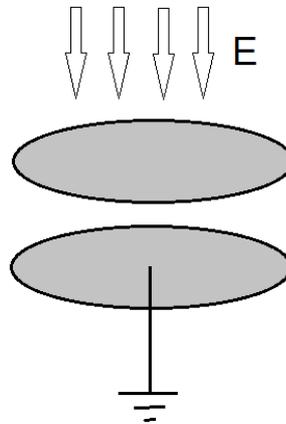
$$E = \sigma / \epsilon_0$$

Onde E é o campo elétrico (V/m), σ é a densidade de carga (C/m²) e ϵ_0 é a permissividade do espaço livre (8,854 10⁻¹²). Esta relação é a base para todos Instrumentos de medição de campos elétricos. (11)

Flat Plate

A forma mais simples de se medir o campo eletrostático atmosférico, é a partir da antena flate plate. Esta antena tem uma superfície condutora exposta ao campo elétrico, onde este campo ira induzir cargas nesta superfície. Como a chapa plana é muito menor que o comprimento de onda do campo elétrico podemos considerar que as cargas na superfície da chapa encontram-se uniformemente distribuídas (Figura 15).

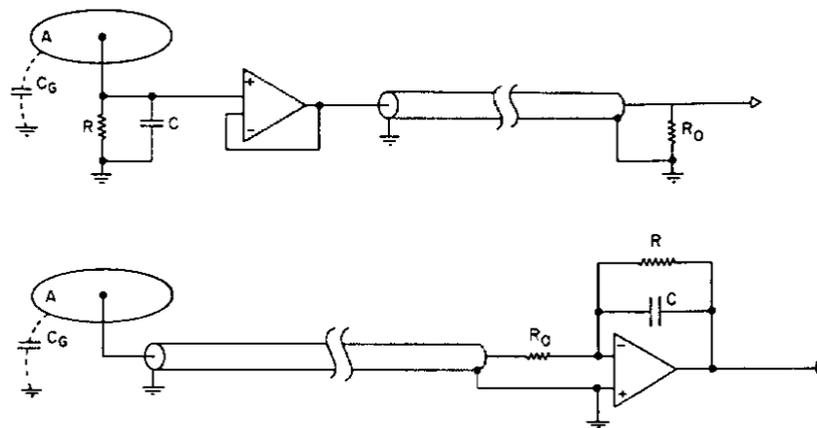
Figura 15. Antena Flete Plate.



Fonte: Do autor.

A quantidade de cargas induzidas nesta área pode ser medida basicamente de duas formas, por um circuito integrador formado por um circuito RC paralelo, ou por um integrador construído por um amplificador operacional conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16. Modos de medição.



Fonte: (11),pg 347

O integrador irá integrar a corrente $\frac{dQ}{dt}$ que flui pela antena. A componente de densidade de fluxo elétrico normal a superfície da antena é dada por:

$$\vec{D} = \epsilon_0 E_n = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Onde:

A - Área da chapa plana

E_n - Intensidade de campo elétrico normal a superfície da antena.

ϵ_0 - Permissividade do Vácuo

Q - Carga induzida

Assim temos que:

$$E_n = \frac{Q}{A\epsilon_0} \quad (2)$$

A tensão de saída nos terminais do circuito integrador então será:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (3)$$

Substituindo 2 e 3 temos:

$$V = \frac{A\epsilon_0 E_n}{C} \quad (4)$$

ou

$$E_n = \frac{VC}{A\epsilon_0} \quad (5)$$

onde:

C - É a capacitância do capacitor integrador.

V - Tensão no terminal de saída do integrador.

O resistor R em paralelo com o capacitor integrador é responsável pela constante de tempo (τ) do sistema. Normalmente utiliza-se duas topologias para R, uma para medições de variações rápidas com τ por volta de 10ms e outra para variações lentas com τ por volta de 1s.[17]

O cálculo da constante de tempo é dado pela seguinte equação:

$$\tau = R (C + C_g) \quad (6)$$

Onde C_g é a capacitância da antena.

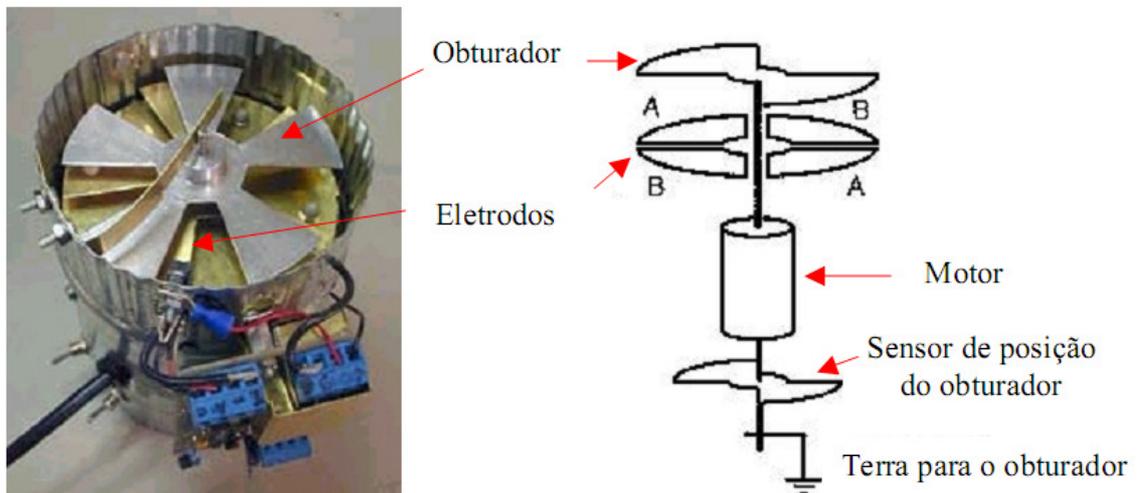
A maior limitação para este tipo de medição é que ela não pode ser feita por longos períodos de tempo e não é muito sensível. Se a antena for exposta a uma função degrau de campo elétrico sua saída irá responder proporcionalmente a variação deste campo, porém irá decair de forma diferente da constante de tempo (RC) do circuito integrador de entrada. Sensibilidades mais elevadas podem ser alcançados com tempos de observação mais curtos. Existe também influências negativas devido as tensões e correntes de offset devido aos estágios de amplificação. [6]

Este tipo de sensor deve ser zerado em um local livre de campo elétrico. Caso isto não seja feito a saída para o nível zero irá corresponder ao nível de campo onde o instrumento foi zerado. Ele não é adequado para realizar medidas na presença de ar ionizado, pois o ar ionizado irá criar um fluxo de cargas na superfície da chapa plana que tentará neutralizar o efeito do campo elétrico, criando uma resistência de fuga entre a superfície da chapa e a terra.

Field Mill

Os Field Mill vieram para superar as limitações dos sensores explanados no item anterior. As limitações foram superadas com o uso de obturador aterrado para modular a indução de cargas na placa sensora devido a um campo elétrico incidente. As cargas induzidas na superfície sensora podem ser medidas utilizando os mesmos circuitos utilizados para medir os sinais oriundos das antenas flate plate. O sinal alternado na saída dos eletrodos (ou placas sensoras) pode ser amplificado com detecção de fase para prover um sinal de saída com a mesma polaridade e intensidade proporcional ao campo incidente. [18] A estrutura do Field Mill está apresentada na Figura 17.

Figura 17. Estrutura interna de um Field Mill.



Fonte: (19)

O princípio de funcionamento do Field Mill ocorre da seguinte forma, 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 à terra ou oriunda da terra, dependendo da polaridade do campo elétrico atmosférico. Quando o eletrodo é blindado, estabelece-se uma corrente em relação à 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 as partes rotativas e o uso por longos períodos pode causar desgastes ocasionando ruídos no sinal obtido.

3.2.2 Sensores de campo magnético

A radiação magnética radiada pelos raios é mais forte na faixa de frequência que vai de aproximadamente 10Khz até 300Khz, pois é a faixa do espectro onde o sinal eletromagnético radiado tem mais energia. É também de interesse sinais radiados na faixa de 10 a 30Mhz que estão relacionados ao efeito corona e a rápidas mudanças do campo elétrico.

Um ponto importante para a medição e detecção dessas ondas radiadas pelos raios, é que elas se propagam por longas distancias, podendo ser captadas por antenas e receptores de rádio para determinar a posição e o movimento das tempestades.

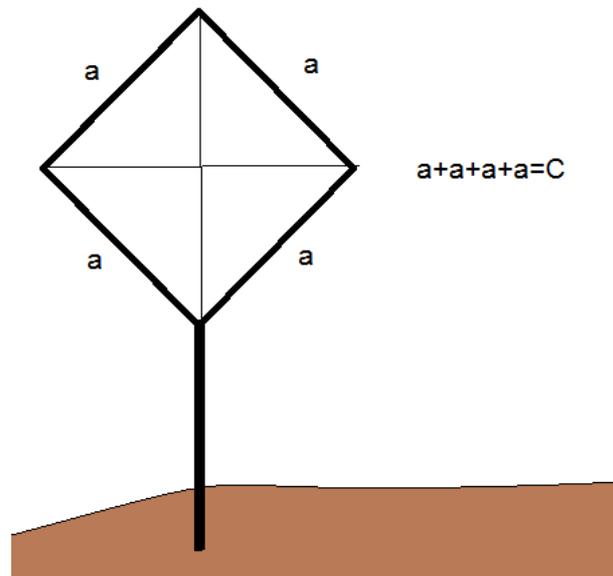
As antenas Loop são as mais utilizadas para esse tipo de medição e detecção.

Antenas Loop (20)

As antenas Loop podem assumir diversas formas: quadrado, circular, losango, triângulos e etc. Devido sua simplicidade de análise e fácil construção o loop circular é o mais utilizado. Os campos elétricos e magnéticos radiados por um loop pequeno (ou eletricamente pequeno) tem a mesma forma matemática que os radiados por um dipolo infinitesimal, por isso sua análise é simplificada.

As antenas loop podem ser classificadas em duas categorias, as eletricamente pequenas e as eletricamente grandes. Considera-se uma antena loop eletricamente pequena aquela que o comprimento do loop (ou perímetro) for menor que um décimo do comprimento de onda. ($C < \lambda/10$). Já o loop eletricamente grande tem seu comprimento aproximado do comprimento de onda ($C \sim \lambda$). O conceito de comprimento de uma antena loop está apresentado na Figura 18.

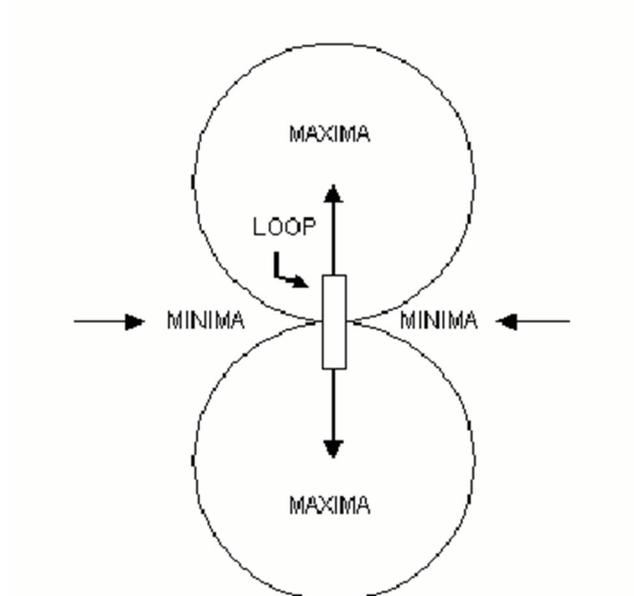
Figura 18. Exemplo do que é o comprimento de uma antena loop.



Fonte: Do autor.

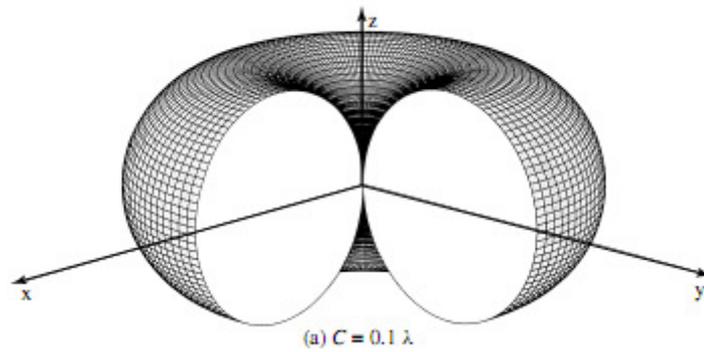
O diagrama de campo de antenas loop eletricamente pequenas, independentemente de sua forma, é similar à de um dipolo infinitesimal, com o nulo perpendicular ao plano do loop e com o máximo ao longo do plano do loop. Conforme Figuras 19 e 20.

Figura 19. Diagrama de Campo Bidimensional de um Antena Loop



Fonte: Do autor.

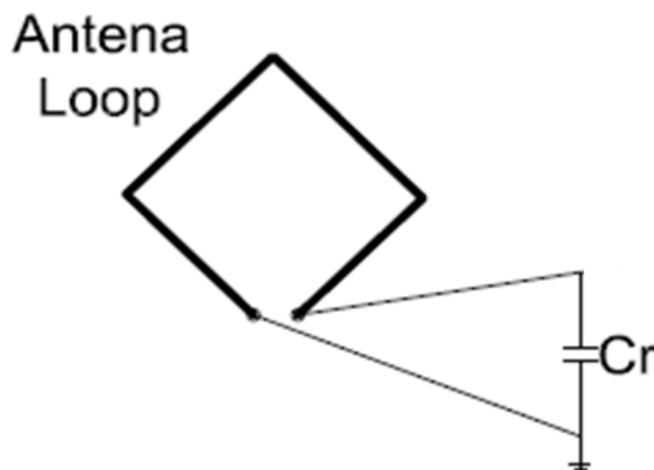
Figura 20. Diagrama de Campo Tridimensional de um Antena Loop (eletricamente pequena).



Fonte: (20)

O ganho da antena loop é menor do que uma dipolo para a mesma frequência, e deve-se esperar normalmente baixos níveis de tensão nos terminais de saída para qualquer intensidade de campo. A tensão de saída poderá ser aumentada significativamente se a antena loop for sintonizada através de um capacitor em paralelo com bobina que compõe a antena loop. Na Figura 21, observamos o capacitor C_r utilizado para sintonizar a antena dentro da faixa de operação desejada.

Figura 21. Antena Loop com Capacitor de ressonância C_r



Fonte: Do autor.

Estudos mostram que a forma de onda do pulso eletromagnético recebido por este tipo de medição varia com a distância, logo possibilita a estimativa da distância entre a antena e a descarga atmosférica. (18)

3.3 REDES E SISTEMAS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Existem vários sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas espalhados pelo globo terrestre. Algumas redes de detecção são globais outras estão instaladas somente para detectar e localizar em um único país.

A localização exata dos raios é importante para a segurança pública. Assim como os perigos que podem vir junto de sua ocorrência como: tempestades com precipitação intensa; formação de gelo severa; cisalhamento do vento; turbulência e fortes rajadas de vento. Todos esses itens são de interesse para a avaliação de riscos, na indústria da construção, serviços de utilidade pública e da defesa civil.

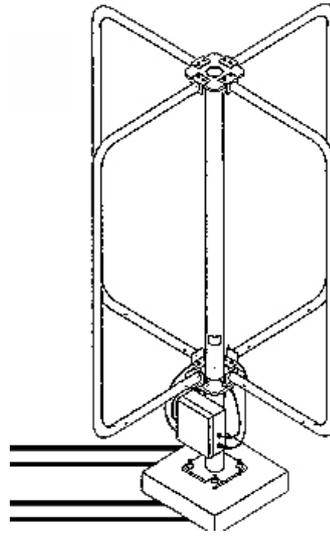
Neste momento serão mostrados alguns destes sistemas e algumas redes instaladas ao redor do globo terrestre.

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 22. Para realizar estas medidas, assume-se que o canal do relâmpago é vertical, pois o campo magnético produz apenas a componente azimutal, ou seja, as componentes vertical e radial são nulas.

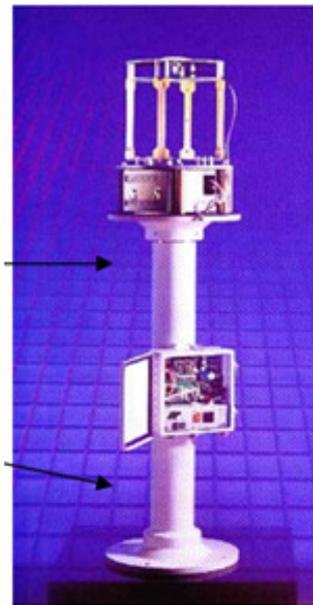
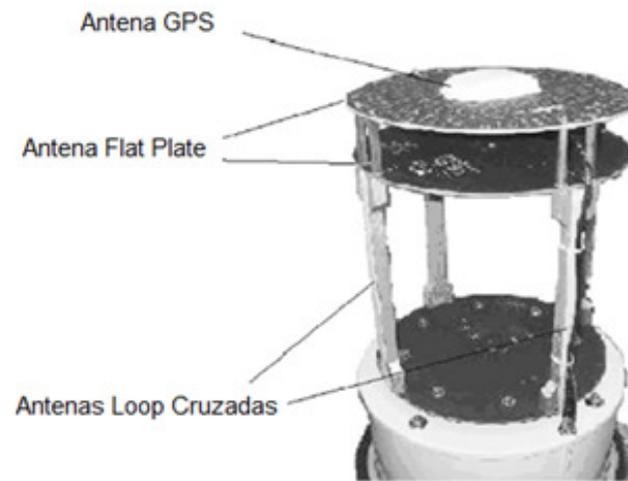
Figura 22. Antenas loop cruzadas.



Fonte:

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 azimute. Um sensor que utiliza esse método de localização e detecção de descargas é o IMPACT, ilustrado na Figura 23.

Figura 23. Sensor IMPACT, utiliza os métodos MDF e TOA para localizar e detectar descargas.



Fonte: (21)

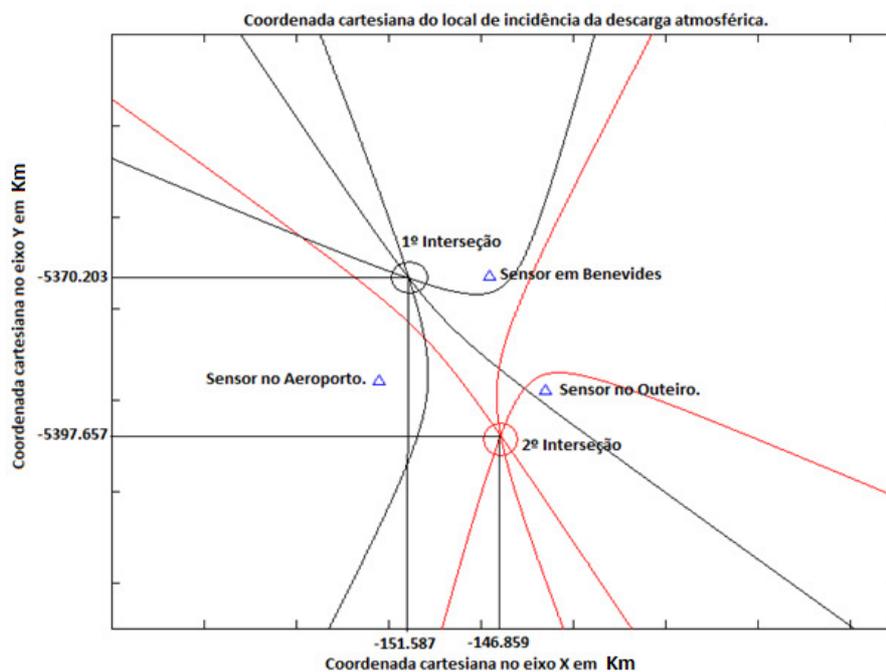
TOA

O sistema TOA foi desenvolvido no início dos anos 80 pela Atlantic Scientific Corporation, a qual mais tarde se uniu a Global Atmospheric Inc. e desenvolveram o sistema de detecção e mapeamento de descargas denominados, Lightning Position and Tracking System (LPATS) que utiliza a tecnologia TOA, mais tarde foi desenvolvido o IMPACT. O sistema TOA é composto de uma estação de rádio na faixa de frequência de VLF e LF (5 a 100 kHz) acoplado

com um sistema de tempo absoluto(GPS), e uma pequena antena para medir o campo elétrico vertical. O sistema deve ser formado por uma rede de no mínimo 04 estações. (22)

Neste método cada sensor identifica o tempo de chegada do campo elétrico polarizado verticalmente (ondas de superfície) de uma descarga atmosférica. O princípio básico do método TOA é calcular a diferença do tempo de chegada das descargas entre as estações de uma rede de detecção. Os tempos de chegada calculados por cada par de sensor produzem regiões na forma de hipérbolas, a interseção destas hipérbolas são os possíveis locais de ocorrência da descarga atmosférica. Estas hipérbolas podem se interceptarem em mais de um ponto, para resolver este problema utiliza-se uma quarta estação que servirá para encontrar outra hipérbole que interceptará o ponto de localização do raio e evitará qualquer redundância. (23)

Figura 24. Exemplo do uso do TOA em Belem-PA



Fonte: (23)

TOGA

O método do Time of Group Arrival –TOGA, analisa o tempo de chegada de grupo do sinal eletromagnético de uma descarga de retorno, no espectro do VLF (6-20 kHz).

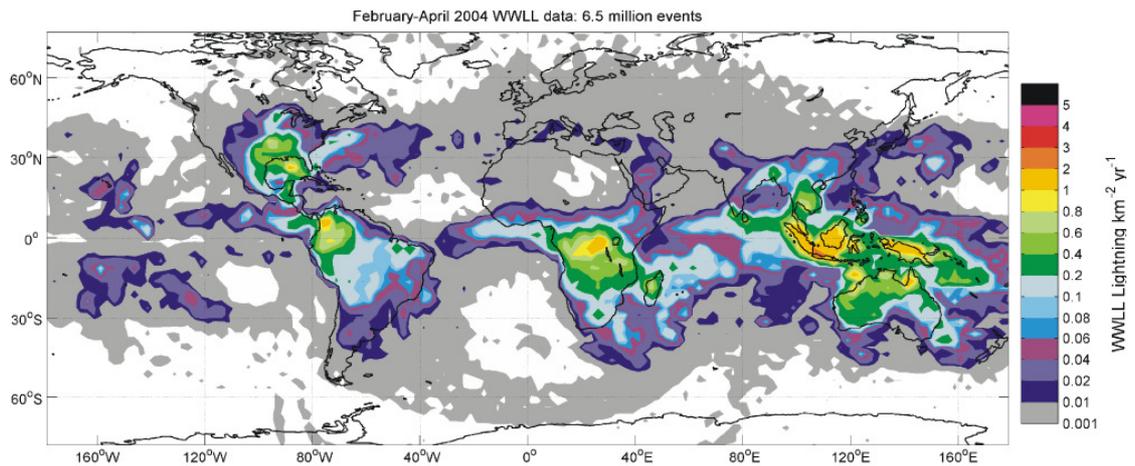
Uma onda eletromagnética é composta por diversas frequências muito próximas entre si, admite uma resultante destas componentes. Portanto, tomando o valor de amplitude como referência e como esse valor desloca-se na região como função do tempo é possível observar o deslocamento por unidade de tempo, conhecido como velocidade de grupo. O tempo de chegada de grupo define-se a partir da consideração de que a ionosfera e a superfície terrestre são homogêneas e desta forma podemos admitir uma velocidade de fase. Considerando que o tempo que o sinal proveniente de uma descarga atmosférica leva para atingir um dos sensores é simbolizado por (t_g) e que este sinal está numa determinada frequência (ω) , pode-se inferir que este tempo de grupo é função da frequência, definido, portanto como $t_g(\omega)$. Toma-se o valor médio deste tempo de grupo, assim tem-se $\overline{t_g(\omega)}$. A relação para o tempo de chegada de grupo é feita fazendo uma adição do valor médio do tempo de grupo com o tempo absoluto do GPS, simbolizado como (t_s) que é o tempo que o sinal levou para se propagar do evento até o sensor, conforme é definido: (24)

$$\text{TOGA} = t_s + \overline{t_g(\omega)}$$

O sistema consiste num sensor de VLF e uma estação central cronometrado com um GPS. Cada sensor de VLF determina uma forma de onda característica para o candidato a sferic. Se um mínimo de quatro sensores consegue observar um mesmo evento os dados em tempo real são enviados a uma central de processamento, situado na Nova Zelândia e tomando a equação anterior que considera a diferença de grupo entre duas estações, utiliza uma função residual de minimização para estimar a localização da descarga atmosférica. A função residual de minimização é a mesma proposta por Lee (1986) e que será considerada a seguir. Alguns sensores podem obter informações saturadas da forma de onda, devido a intensas fontes de campo elétrico, neste caso um algoritmo define quais e

quantos sensores participam das medidas e indica as relações de sensores que definem a localização do sferic.(25)

Figura 25. Imagem da densidade de descargas no Globo utilizando o método TOGA na rede WWLL.

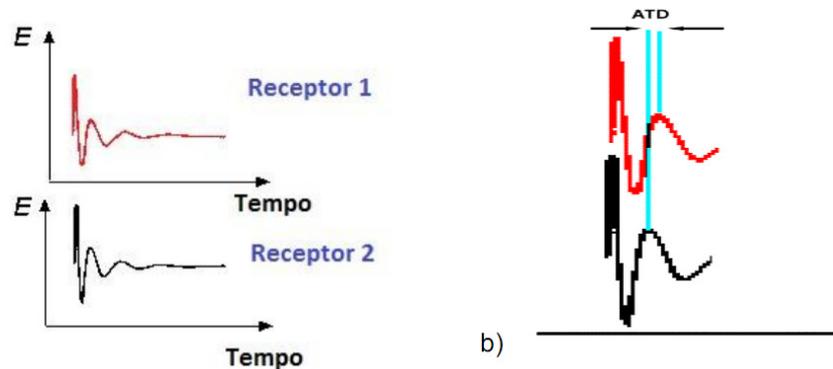


Fonte:(24)

ATD

O sistema de localização de raios pelo método ATD consiste na detecção de sferics gerados por descargas atmosféricas, este sinal é detectado por cada sensor da rede e são utilizadas para o cálculo da diferença do tempo de chegada (ATD) dos sferics a partir da correlação temporal entre os diversos receptores de rádio. Cada ATD representa posições sobre a superfície terrestre com a mesma diferença de tempo de chegada, e são representadas por hipérboles. A intersecção destas curvas representa a localização de uma descarga atmosférica.

Figura 26. Conceito para determinar a diferença do tempo de chegada (ATD)



Fonte: (26).

Os sensores em todas as estações detectam continuamente as ondas de rádio geradas por raios ("sferics"). Uma estação na rede é então designada como estação "Seletora". Os sferics recebidos nesta estação são selecionados individualmente e, em seguida, qualquer sferic observado no mesmo instante de tempo por outras estações são solicitados e encaminhados para a estação de controle. Cada sferic tem uma única forma de onda, sua própria "impressão digital" será a mesma para todas as estações que o recebem. A estação de controle é capaz de igualar as formas de onda dos sferics recebidos nas estações com o sferic especial da estação "Seletora". (26)

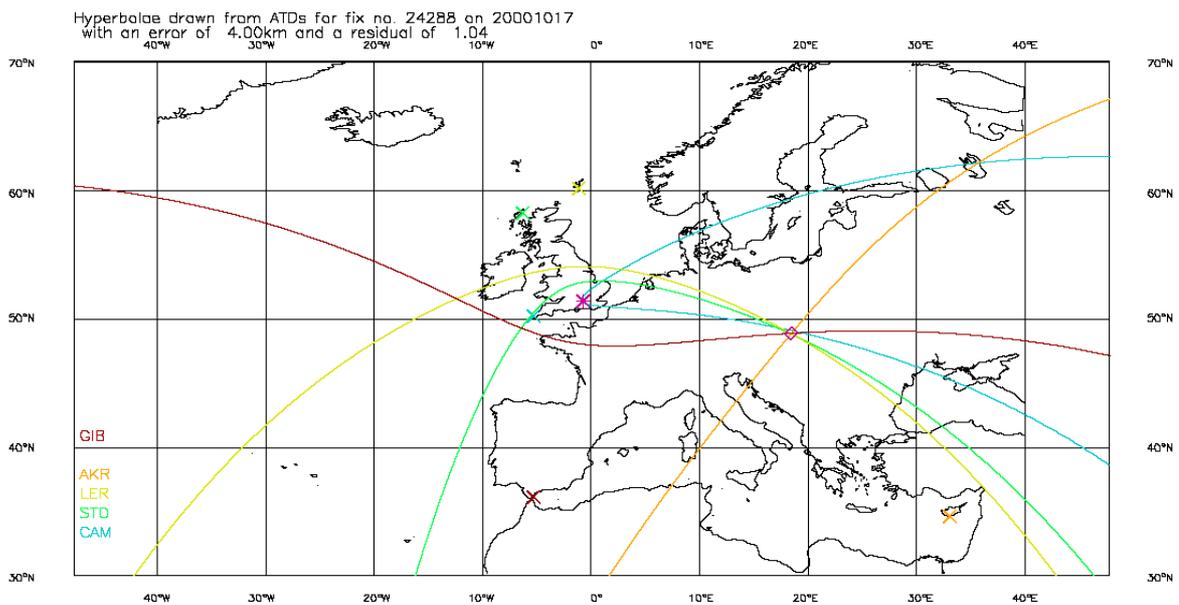
A estação de controle, em seguida, designa uma estação de referência para este raio. Nesta estação de referência é atribuído uma diferença de tempo de chegada de zero. O tempo de chegada deste sferic especial na outra estação que o recebeu, em relação à estação de referência, é calculado. Em seguida, através do cálculo de todas as diferenças de tempo de chegada entre as estações e a referência, uma linha pode ser traçada representando todos os locais teóricos com a mesma diferença de tempo de chegada entre duas estações que não seja a de referência. Essa linha irá representar uma hipérbole. (26)

Se este mesmo processo é então repetido entre a mesma estação de referência e outras estações que receberam o sferic, outras hipérbolas podem ser desenhadas, interceptando a primeira. Repetindo esse processo com todas as estações que receberam o mesmo sferic a estação de controle poderá determinar o local de ocorrência do raio. Se um sferic foi recebido por 4 ou mais estações então

uma ambiguidade na localização pode ser definida. Isto será então o local onde todas as hipérbolas se interceptam.

A velocidade com que a estação de controle processa os dados é o que determina a quantidade de raios detectados e localizados por hora.

Figura 27. Localização de descargas pelo método ATD.

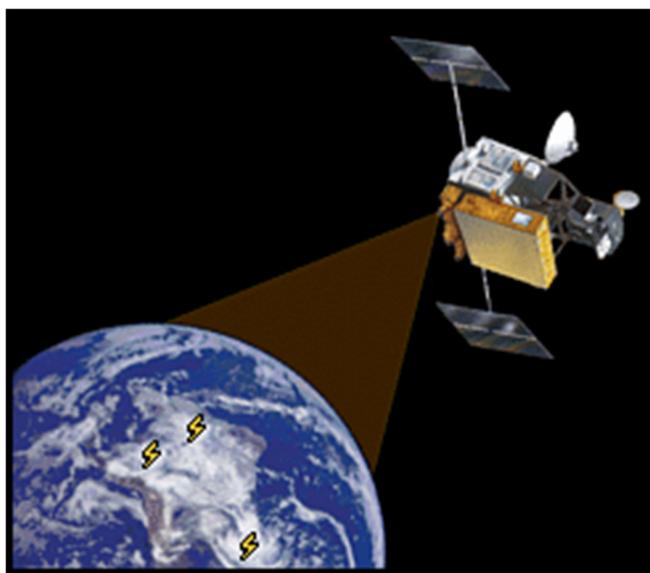


Fonte: (26)

Sistemas Óticos

Os sistemas óticos detectam as mudanças da intensidade luminosa das nuvens, as quais são iluminadas por descargas elétricas. Estes sistemas detectam os relâmpagos do tipo NT, IN e NN produzem eventos luminosos visíveis do espaço. Estes instrumentos medem o tempo do evento, a energia irradiada e a sua localização.

Figura 28. Sistemas óticos para detecção e localização de descargas.



Fonte: (27)

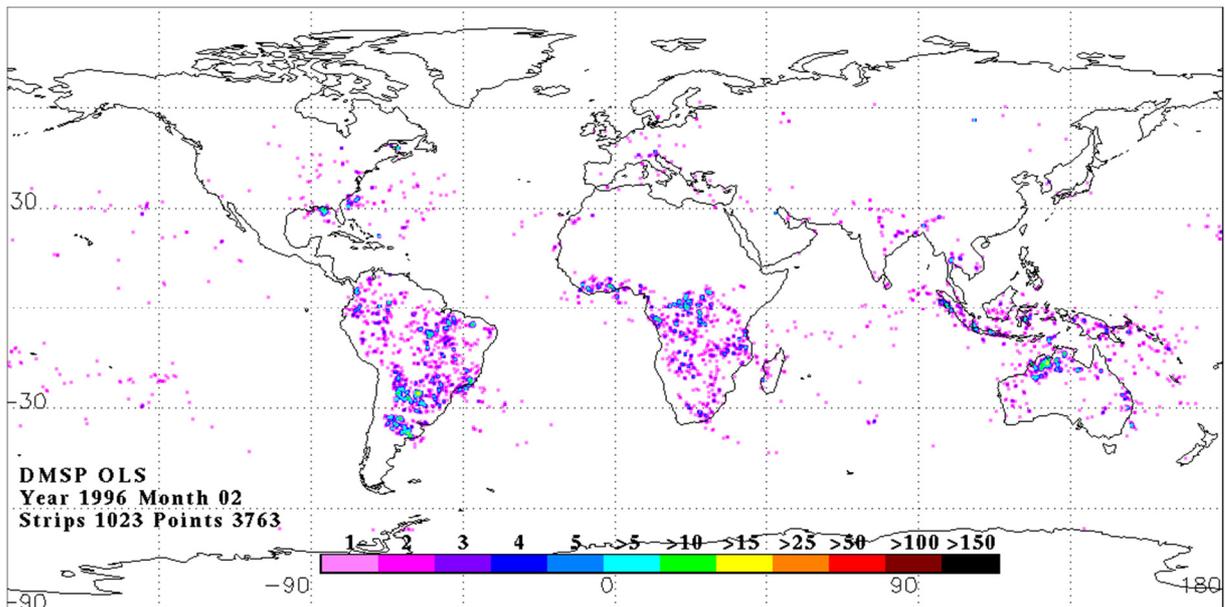
OLS (28)

O Operational Linescan System – OLS foi lançado a bordo do Titan 2 em janeiro de 1973, e é operando nos satélites do programa de defesa meteorológico norte-americano (DMPS – Defense Meteorological Satellite Program), este instrumento consiste num instrumento usado para 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 nas imagens.

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 fotomultiplicador 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.

Na Figura 29 podemos ver a distribuição de descargas atmosféricas do mês de fevereiro de 1996.

Figura 29. Última imagem disponível do sensor OLS.

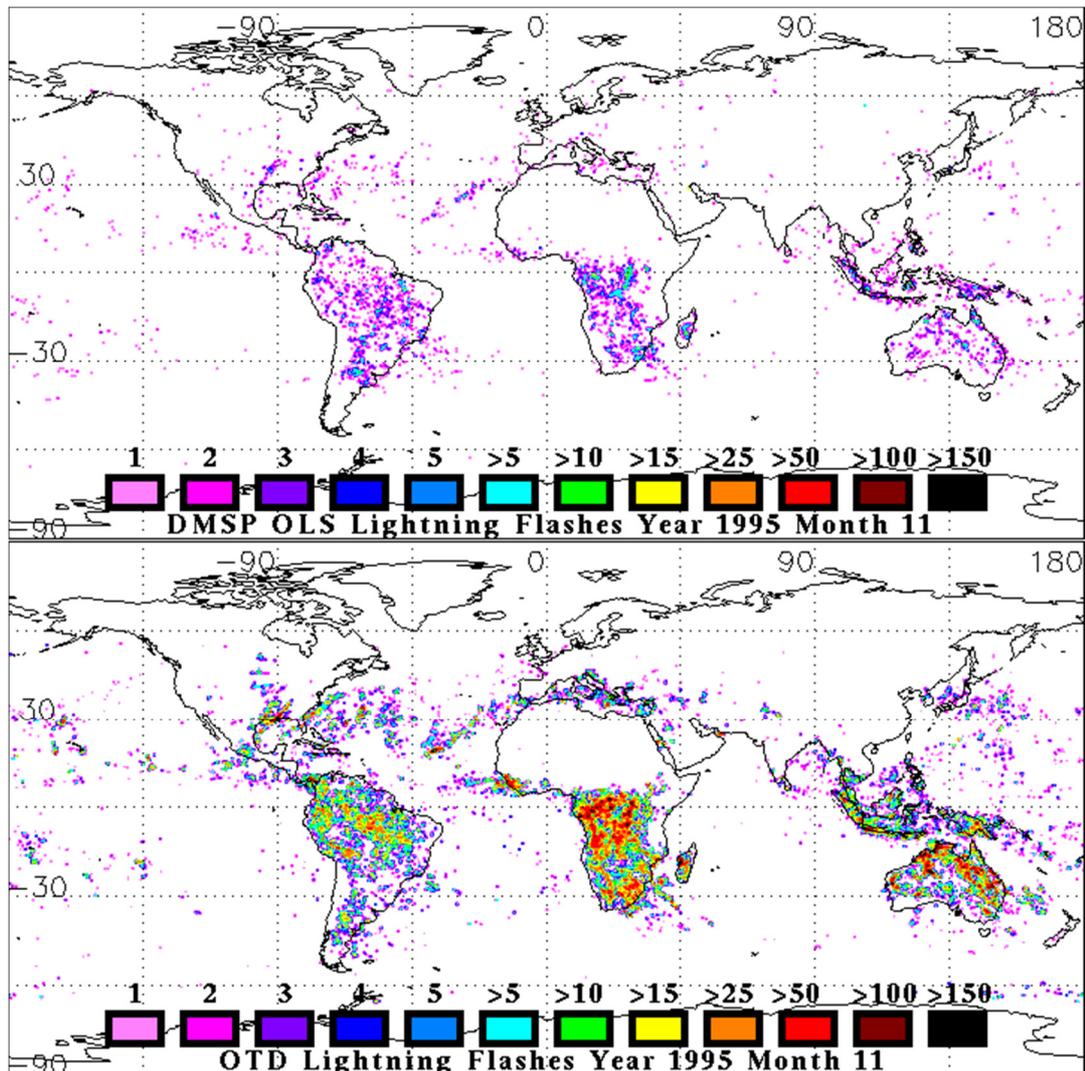


Fonte: (29)

Inicialmente, utilizou-se com o OLS as tiras de filmes analógicos no Snow National and Ice Data Center localizado na Universidade de Colorado. Os raios apareciam como listras suaves horizontais nas imagens da banda visível no período noturno. Um analista então iria digitalizar esses filmes analógicos e registrar a latitude, longitude e altura da descarga atmosférica.

De 1991 a 1992 fez-se a transição do filme analógico para o digital, também localizado na Universidade do Colorado e no Centro Nacional de Dados Geofísicos (NGDC). Recentemente, conseguiu-se desenvolver e implementar um algoritmo de reconhecimento baseado em rede neural onde se extrai automaticamente a hora de ocorrência da descarga atmosférica e sua localização. O Lightning and Atmospheric Electricity Research Group está fazendo comparação dos dados obtidos pelo OLS e comparando com outros sistemas.

Figura 30. Comparação entre imagens do sensor OLS e OTD.



Fonte: (30)

OTD (31),(32)

O Optical Transiente Detector – OTD foi Lançado em 3 de abril de 1995 a bordo do Microlab-1. Ele foi uma espécie de protótipo para o Lightning Imaging Sensor (LIS). O sensor consegue detectar raios (intra-nuvens e Nuvem-terra) tanto de noite como de dia a uma altitude de aproximadamente 735Km e admitindo uma órbita circular com um ângulo de inclinação de 70°. Com essa órbita, e amplo campo do OTD, ele examina praticamente todas as áreas do globo onde normalmente ocorre raios. A combinação da lente e um grande campo de visão e uma boa altitude da órbita permite o OTD observar uma área de terra equivalente a 1300x1300 quilômetros quadrados.

No coração do sistema existe um sensor óptico de estado sólido semelhante em alguns aspectos a uma câmara de TV. No entanto, em sua concepção teve de ser concebido exclusivamente para o trabalho de observação e medição relâmpago do espaço. Como em uma câmara, o OTD tem um sistema de lentes (que funciona parecido com à retina no olho humano), e também tem um circuito eletrônico para converter a saída do detector para um sistema de dados úteis.

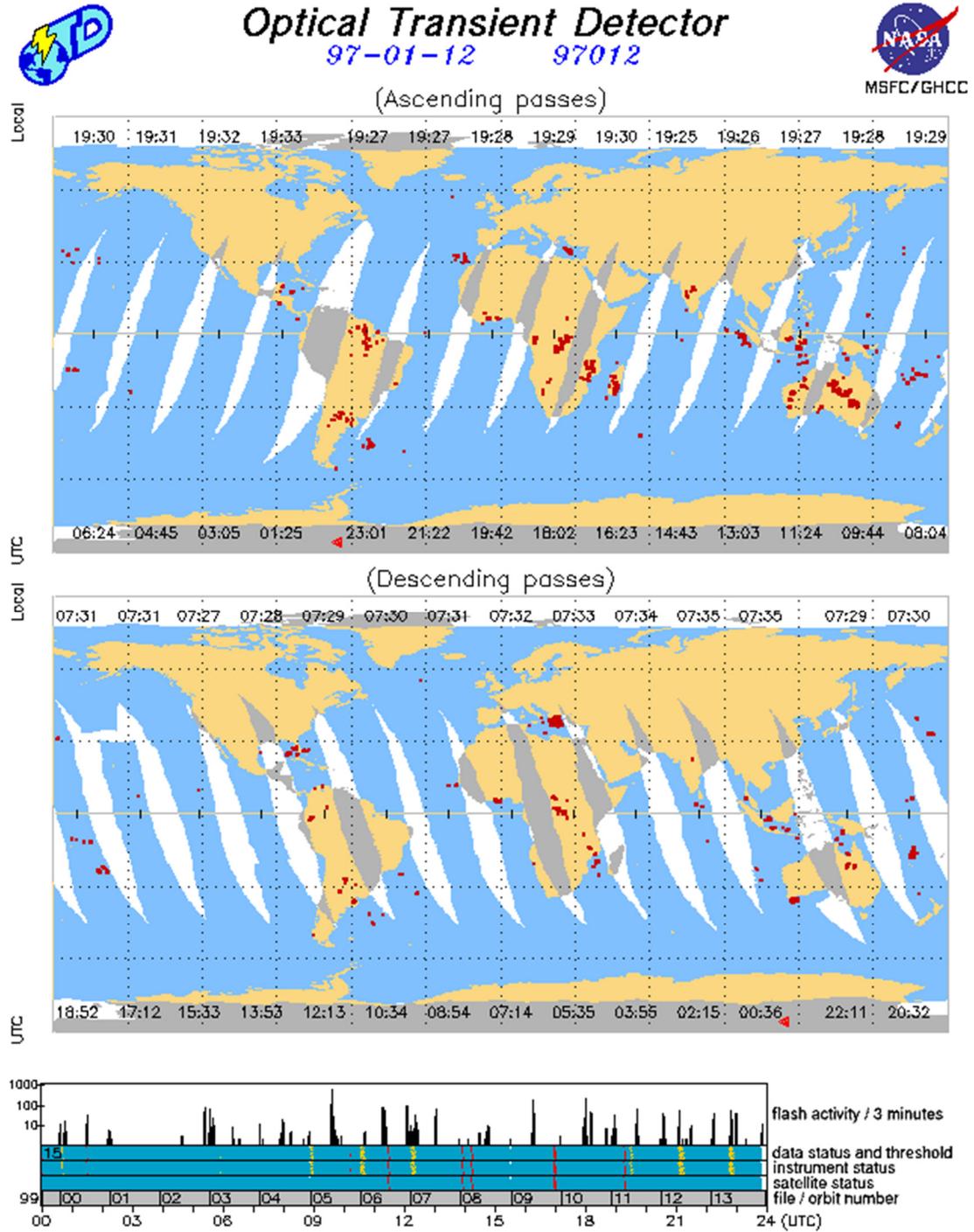
O sistema do sensor é de cerca de 8 polegadas de diâmetro e 15 cm de altura, enquanto os circuitos eletrônicos de apoio é aproximadamente do tamanho de uma máquina de escrever normal. Juntos, os dois módulos pesam aproximadamente 18 kg. O peso total do satélite colocado em órbita é 75 kg.

Figura 31. Sensor do OTD.



Fonte: (31)

Figura 32. Histórico de raios para o dia 12/01/1997 pelo OTD.



Fonte: (33)

LIS (34)

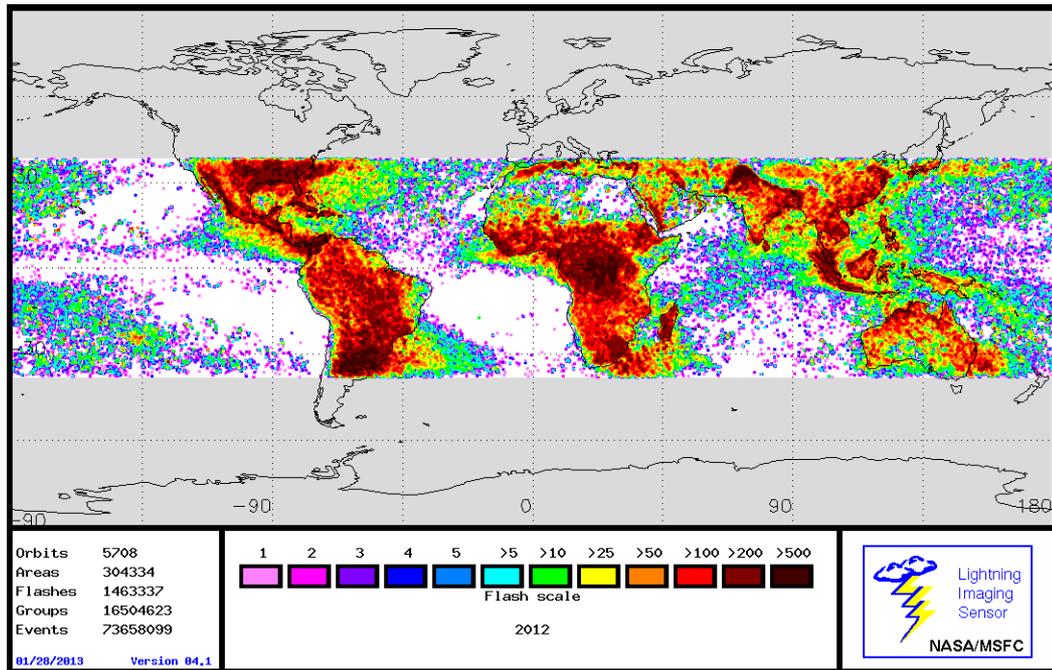
O Lightning Imaging Sensor (LIS), é um instrumento localizado no espaço usado para detectar a distribuição e variabilidade dos raios (nuvem-nuvem, intra-nuvem e nuvem-terra) que ocorre nas regiões tropicais do mundo. O LIS é um instrumento da ciência, a bordo do Observatório TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), que foi lançado em 28 de Novembro de 1997 do Centro Espacial Tanegashima, no Japão.

Este sensor de raios consiste em um fixo gerador de imagens que é otimizado para localizar e detectar raios e tempestades com uma resolução de (4 a 7 km) ao longo de uma região de (600 x 600 km) da superfície da Terra. O satélite TRMM percorre uma distância de sete quilômetros em um segundo, uma vez que orbita a Terra, permitindo assim que o LIS observe um mesmo ponto na Terra ou uma mesma nuvem a cada 90 segundos. Apesar da curta duração de uma observação, é tempo suficiente para estimar a luminosidade dos raios na maioria das tempestades. O instrumento registra o instante de ocorrência, mede a energia radiante, e determina a localização de eventos de raios dentro de seu campo de visão.

Este sensor de raios usa uma lente óptica de campo de visão expandido com um filtro de banda estreita, em conjunto com uma matriz de detecção de carga acoplada de alta velocidade. O Real Time Event Processor (RTEP), no interior da unidade eletrônica, é usado para determinar quando ocorre um relâmpago, mesmo na presença de nuvens iluminadas pelo sol.

Sinais fracos raios que ocorrem durante o dia são difíceis de detectar por causa da iluminação de fundo. O RTEP irá remover o sinal de fundo, permitindo, assim, que o sistema detecte um raio fraco e atinja uma eficiência de detecção de 90%.

Figura 33. Imagem processada do LIS.

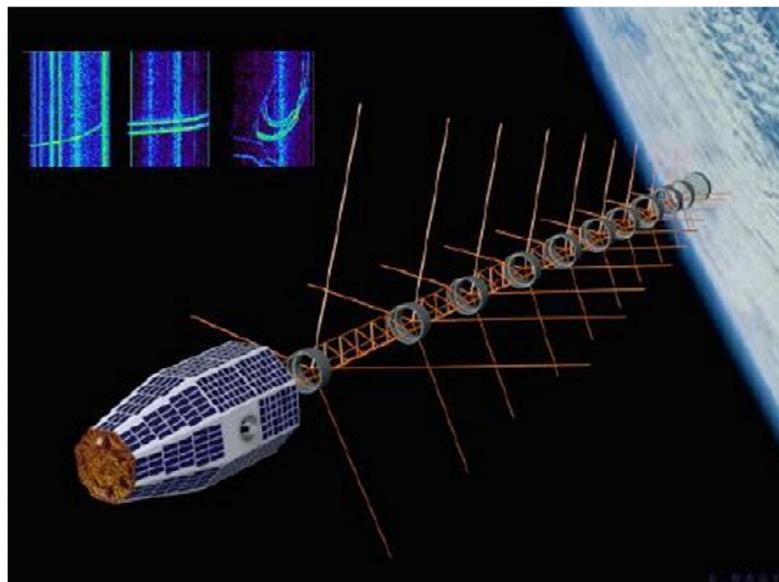


Fonte: (35)

FORTE (36)

O FORTE (Fast On-orbit Recording of Transient Events) foi lançado em 29 de agosto de 1997 e está em operação contínua desde então. Seu lançamento bem sucedido e sua robustez foram resultado de vários anos de trabalho dedicado pelo Los Alamos Laboratório e Sandia National Laboratories.

Figura 34. Sensor FORTE.



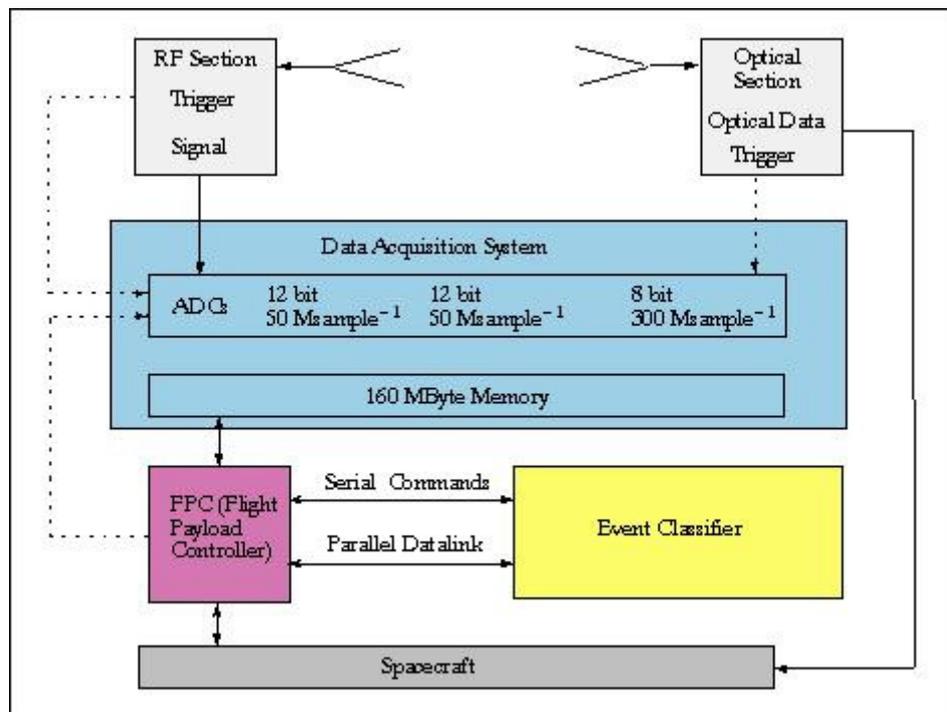
Fonte [36]

O FORTE está em uma órbita circular a 800 km de altitude inclinado a 70 graus. O FORTE tem um conjunto de instrumentos, que individualmente são muito uteis, mas juntos são extremamente uteis para o estudo de raios.

O sensor óptico, construído pela Sandia, compreende de um detector a fotodiodo com resposta temporal rápida (PDD). Amostras com um angulo de abertura de 80° são feitos sobre todo o espectro visível e o infravermelho próximo a cada 15 microssegundos, cada pixel de 128 x 128 inscrito na imagem PDD é filtrado na banda estreita de emissão brilhante de 0,77 mícrons de comprimento de onda.

O sensor de radio frequência, construído pelo Los Alamos, compreende em um disparador multi-banda, este sensor tem três receptores de RF no espectro de frequência de 30-300 MHz (VHF) que analisam a forma de onda das descargas atmosféricas.

Figura 35 Diagrama de blocos do FORTE.



Fonte: (36)

Os sensores ópticos e de RF, são projetados para capturar o mesmo raio tanto no espectro visível como sua forma de onda a partir dos receptores de RF, então pode-se analisar essa relação a partir de um classificador.

3.4 O FUTURO DAS MEDIÇÕES

A eletricidade estática na atmosférica não apresenta muitos valores práticos, mas vem intrigando muitos pesquisadores ao 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 micro estruturas. 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 equipamento de medidas de solo e projetar equipamentos para realizar medidas do espaço, assim relacionando os dados obtidos para formular modelos cada vez mais realísticos.

CAPÍTULO 4 – SENSORES E REDES INSTALADOS NO PARÁ

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. (37)

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

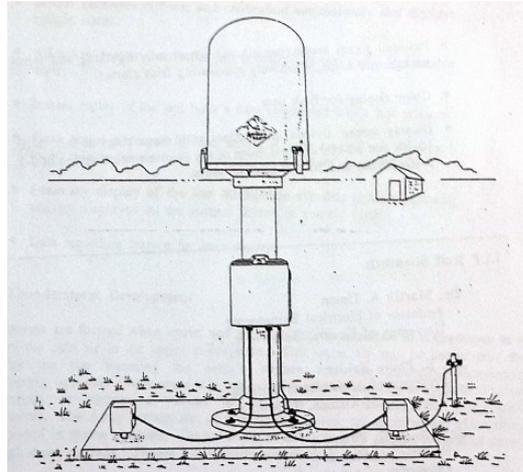
Atualmente o único sistema de detecção de raios cobrindo toda a região amazônica é a STARNET (Sferics Timing And Ranging NETwork), que tem um de seus sensores instalado na cidade de Belém.

4.2 LLP- LIGHTNING LOCATION AND PROTECTION (MODELO 430 TSS)

O sensor LLP Modelo 430 TSS, foi produzido em 1990 pela empresa Lightning Location and Protection, inc, e pode ser visualizado na Figura 37.

O LLP funcionou 77 dias, 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). (38)

Figura 36. Sensor LLP Modelo 430 TSS.

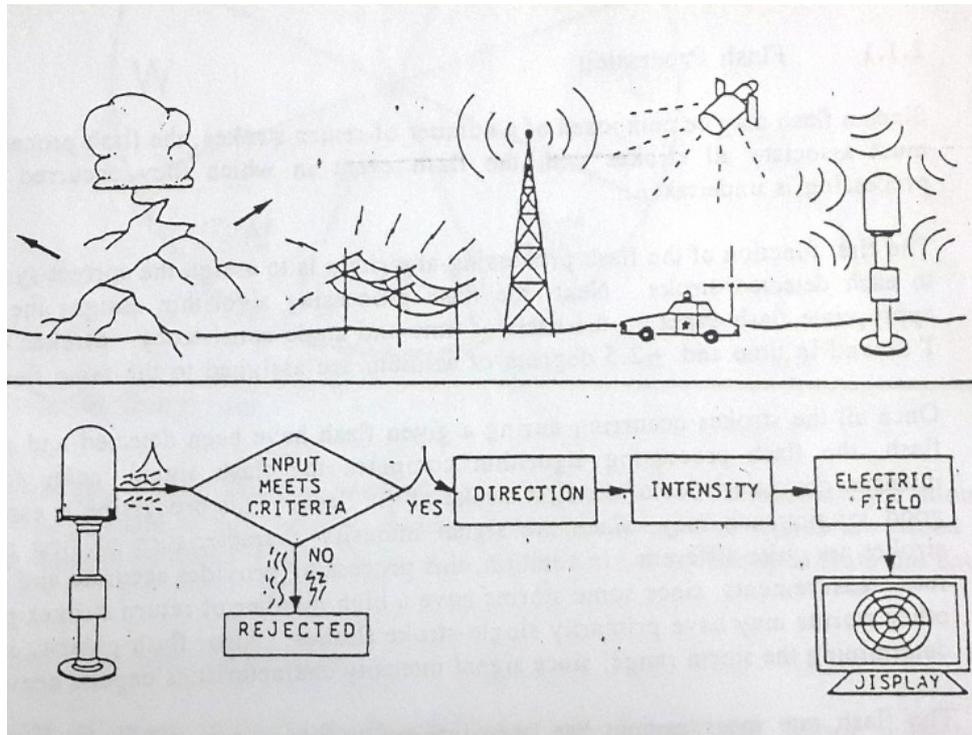


Fonte: (39)

Funcionamento do Sensor. (39)

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 37. Operação Básica do sensor.



Fonte: (39)

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

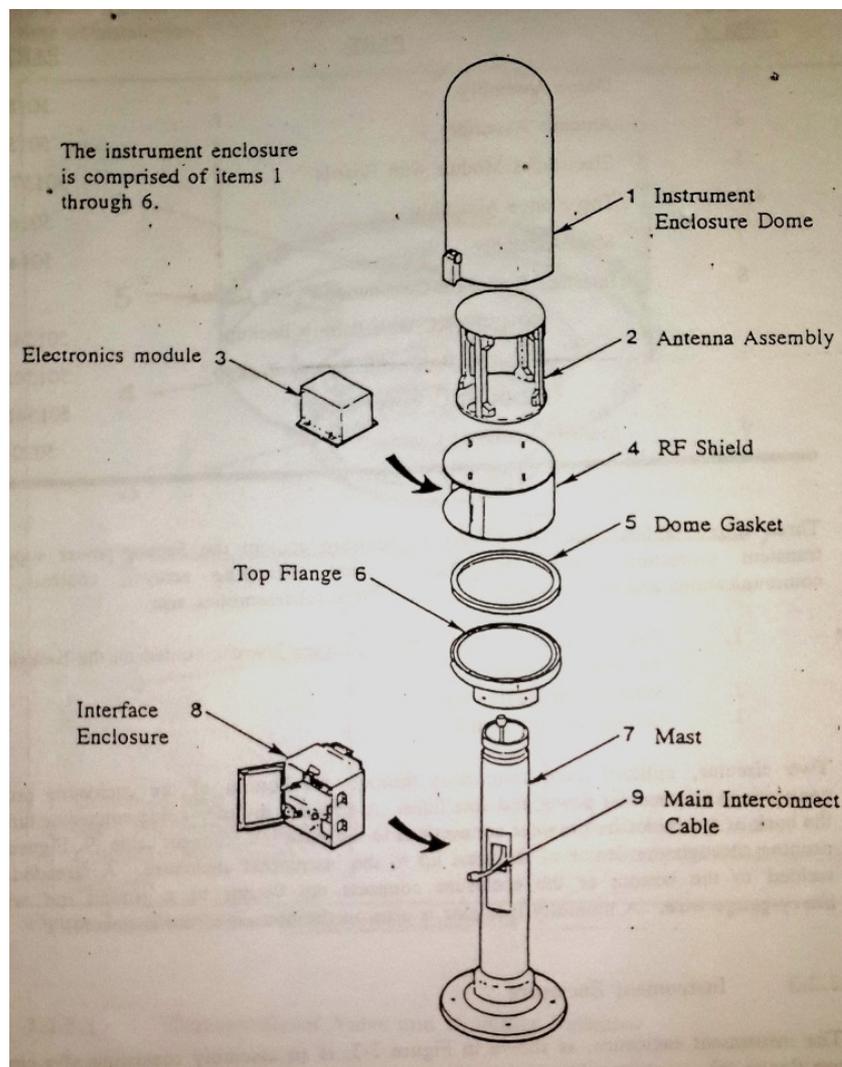
Sabe-se que um raio ou relâmpago pode ser composto de diversas descargas de retorno, assim o processamento do algoritmo dos raios deve associar todas as descargas com o evento (Raio) que as ocasionaram. Uma vez que todas as descargas ocorreram, o relâmpago é detectado e o algoritmo de processamento estabelece a direção e a proximidade do raio, e mostra o raio em um octante no display do dispositivo, conforme está ilustrado na Figura 37.

A direção do raio NT é determinado 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 distancias 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. Este processo resulta em uma precisão angular de (+ ou -) 1 grau.

Na Figura 38 podemos ver a estrutura interna deste equipamento.

Figura 38. Estrutura interna do sensor e seus principais componentes.



Fonte: (39)

Os dados obtidos no período de instalação desse 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. (40),(42),(43)

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. (40),(42),(43)

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 (41), ou os efeitos das descargas no sistema de distribuição de energia elétrica em torno de Belém. (44)

4.3 GLOBAL ATMOSPHERIC, INC (SENSOR LPATS-IV) (45)

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 "indoor", 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.

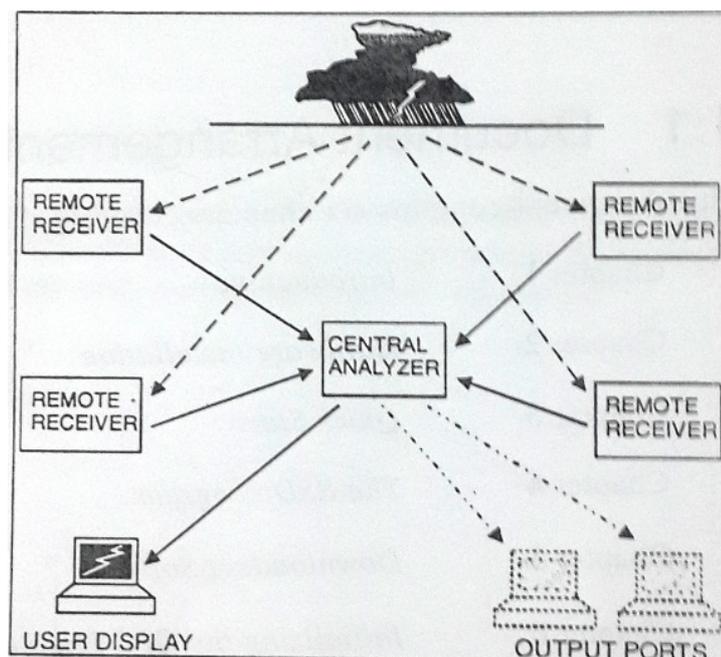
Figura 39. Sensor LPATS-IV.



Fonte: (46)

Uma rede de localização de raios utilizando o sensor LPATS-IV, é configurada conforme a Figura 40 ou Figura 41. Os receptores remotos, adquirem as informações necessárias para a unidade central de análise, que irá calcular a localização do raio e disponibilizará esta informação para os usuários da rede.

Figura 40. Funcionamento de uma rede de detecção utilizando sensores LPATS-IV.



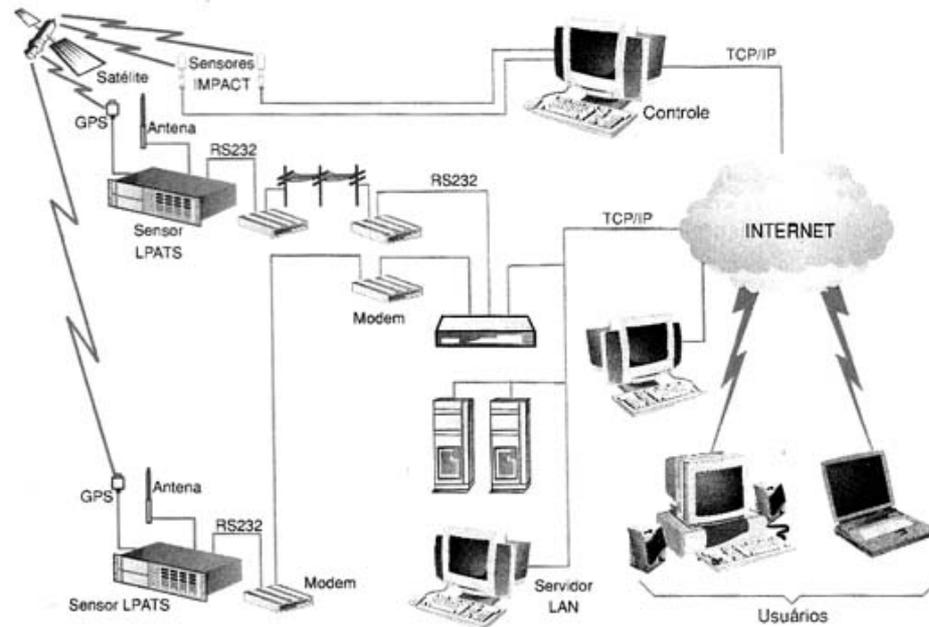
Fonte (45).

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, e usa estes resultados para resolver uma série de complexas equações hiperbólicas, para 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. Todos esses dados, localização; polaridade, pico de corrente e forma de onda são gravados em uma base de dados para estudos futuros.

Figura 41. Funcionamento da rede do SIPAM

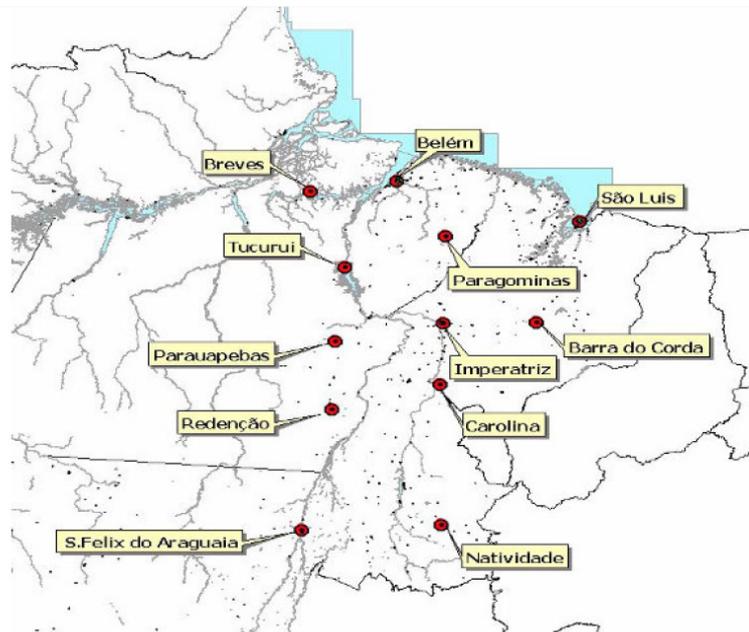


Fonte: (47)

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 LPATS-IV, 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 42. [48]

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



Fonte: (48)

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 um 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.

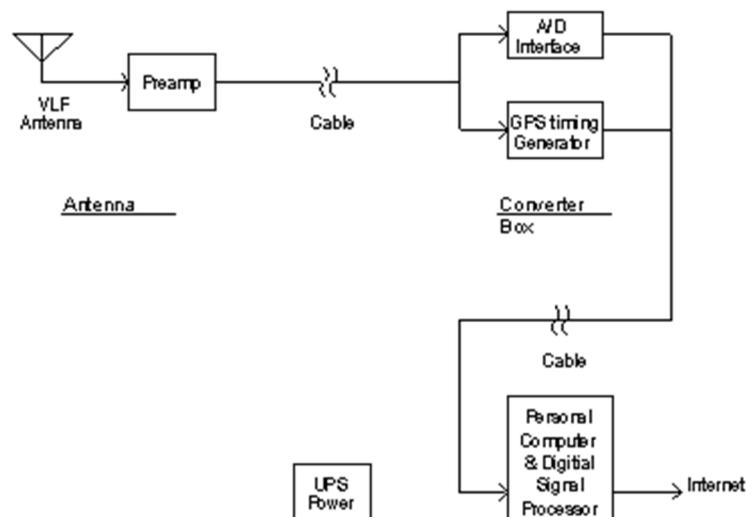
Figura 43. Localização dos sensores da STANET no Brasil.



Fonte: (49)

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 monopolo acompanhada de um pré-amplificador, uma sala de operação incluindo um sistema de aquisição (conversor Analógico/Digital) e um computador ligado a Internet (Figura 44).

Figura 44. Diagrama de blocos da antena e receptor.



Fonte: (49)

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 sincronizado 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).

CAPÍTULO 5 – PROTÓTIPO DE UM SENSOR DE DESCARGA ATMOSFÉRICA UTILIZANDO PSoC

5.1 INTRODUÇÃO

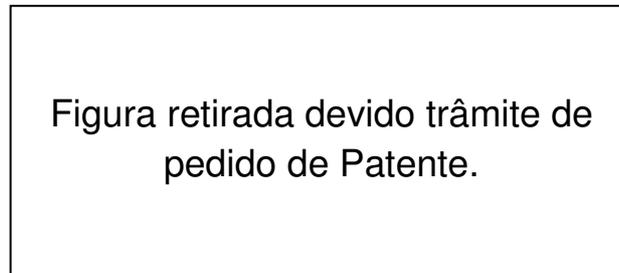
Neste capítulo será apresentado o projeto de um sistema de detecção de descargas atmosféricas implementado com o PSoC-1 CY8C27443-24PI. O protótipo tem como objetivo detectar, quantificar e estimar a densidade raios para uma determinada região. A idealização do projeto é para que ele seja usado por qualquer pessoa, com uma interface simples de apenas um LCD, e seja utilizado em qualquer região da Amazônia onde é escasso a utilização de detectores de descarga.

Os dispositivos mais parecidos com o protótipo desenvolvido neste trabalho são os contadores de descarga do padrão CIGRE 500Hz e 10KHz. CIGRE é uma associação internacional não-governamental sediada na França, que objetiva facilitar e desenvolver o conhecimento e a informação entre os engenheiros e especialistas técnicos em geração, transmissão e distribuição de energia, e demais atividades do Sistema Elétrico de Potência (SEP). O CIGRE 10KHz é uma evolução do CIGRE 500HZ, onde apresenta uma melhoria na discriminação das descargas nuvem-solo e nuvem-nuvem. O alcance médio de cada contador é de aproximadamente 20Km. (50)

Recentemente, em 2012 o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), que faz parte do grupo Eletrobrás e tem mais de 30 anos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) relacionado a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e é considerado o maior centro de pesquisas em energia elétrica do hemisfério Sul, abriu pregão eletrônico para aquisição de um equipamento denominado " Sistema Ininterrupto de Contagem de Descargas Atmosféricas Padrão Cigré 10kHz, com Transmissão Automática dos Dados Registrados" .[51] [52] Ao fim deste capítulo será apresentado uma tabela com algumas comparações entre o protótipo desenvolvido e o adquirido pelo CEPEL.

O sistema projetado está ilustrado na Figura 45 em forma de diagrama de blocos.

Figura 45. Diagrama do sistema projetado.



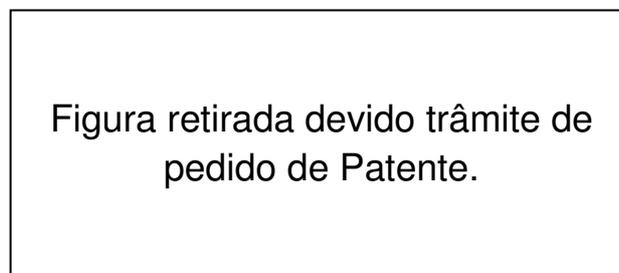
Fonte: Do autor.

Os sensores serão duas antenas, uma antena Loop para captar os Sferics e uma antena Flat Plate para o campo elétrico.

A Antena Flat Plate será conectada a um circuito RC paralelo que servira como integrador e a Antena Loop será conectada em paralelo com o capacitor Cr, que funcionara como capacitor de ressonância.

As saídas do circuito RC e do capacitor Cr, irão ser conectadas a um primeiro PSoC que realizara o pré-condicionamento dos sinais, em seguida esses sinais pré-condicionados iram ser guiados por um cabo UTP até um segundo PSOC que irá tratar novamente dos sinais e fazer o processamento necessário.

Figura 46. Diagrama de entrada dos sinais e mostrador LCD.



Fonte: Do autor.

Após o processamento do sinal são mostrados 3 dados em um LCD, conforme Figura 46. O primeiro dado é o número de Raios detectados (NR), o segundo é a Densidade de raios (DR) para a região de atuação do sensor e o terceiro dado é o resultado da conversão analógico - digital proveniente da antena Flat Plate.

5.2 O PSoC

O PSoC surge como uma inovação no mercado lançado pela empresa Cypress, onde une a tecnologia digital e analógica em um único dispositivo.

O PSoC é um microcontrolador constituído por um conjunto de subsistemas em um único chip, que pode ser configurado para formar um sistema complexo. Nele existe módulos analógicos e digitais que possibilitam uma infinidade de configurações.(53)

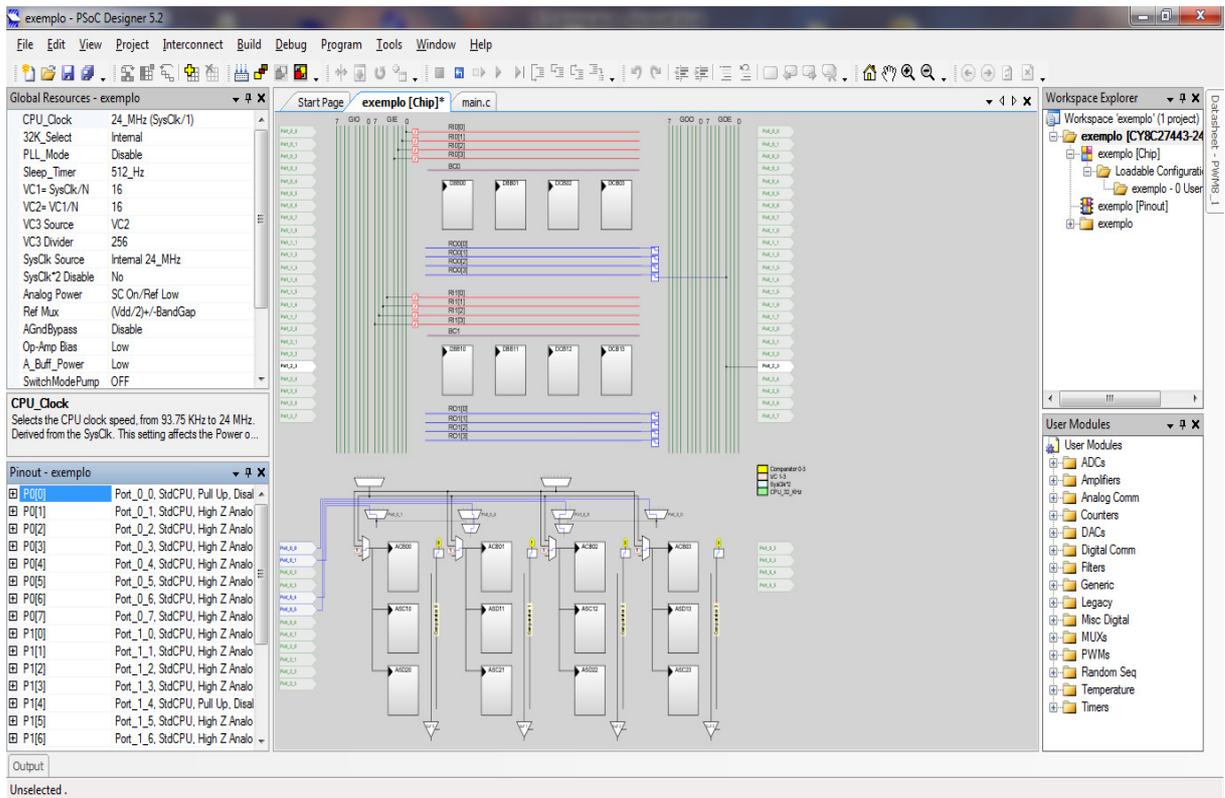
Esses módulos permitem concentrar grande parte do projeto dentro do dispositivo, diminuindo a necessidade de componentes externos e o tamanho da placa de circuito impresso.

Além da praticidade dos dispositivos, o PSoC possui um ambiente de desenvolvimento inovador chamado IDE-PSoC Designer, sendo o primeiro software para configuração e programação do PSoC. Ele trabalha somente com a família do PSoC 1, para se trabalhar com os microcontroladores PSoC 3 e 5 é necessário o PSoC Creator.

PSoC Designer

Este é o primeiro software IDE para projetar, depurar e programar os dispositivos PSoC 1. Ele introduziu características únicas, incluindo uma biblioteca de pré-caracterização analógica e periféricos digitais em um ambiente de projeto de “arrastar-e-soltar”, que possibilita a adaptação às necessidades específicas de projeto, gerando dinamicamente os códigos. (54)

Figura 47. Interface do PSoC Designer 5.1.



Fonte: Do autor.

PSoC Creator

PSoC Criador é o IDE da segunda geração de software para projetar, depurar e programar os dispositivos PSoC 3 e PSoC 5. O IDE é a combinação de um fácil editor gráfico para formar um poderoso ambiente hardware/software. PSoC Creator consiste em dois blocos básicos de construção. O programa permite ao usuário selecionar, configurar e conectar os circuitos existentes no chip. O que faz do PSoC um dispositivo brilhante é a possibilidade de criar aplicativos próprios e periféricos específicos em hardware. A Cypress publica pacotes de componentes várias vezes por ano, basicamente usuários PSoC obtêm novos periféricos para seu hardware existente, sem pagar nada ou ter que comprar um novo hardware. PSoC Creator também permite aos usuários conectar qualquer periférico para qualquer pino (exceto pinos de alimentação). (54)

Abaixo temos uma visão geral dos dispositivos PsoC

PSoC 1	PSoC 3	PSoC 5	Tools
Performance optimized 8-bit M8C Up to 24 MHz, 4 MIPS Flash 4 KB to 32 KB SRAM 256B to 2 KB Operation 1.7V to 5.25V 1 Delta-Sigma ADC (6 to 14-bit) 131 ksps @ 8-bit Voltage Precision $\pm 1.53\%$ Up to 2 DACs (6- to 8-bit) Active: 2 mA, Sleep: 3 μ A FS USB 2.0, I2C, SPI, UART, LIN Requires ICE Cube and FlexPods Up to 64 I/O View PSoC Designer User Module Datasheets to learn more	High-performance 8-bit 8051 CPU(1CPI) Up to 67 MHz, 33 MIPS Flash 8 KB to 64 KB SRAM 2 KB to 8 KB Operation 0.5V to 5.5V 1 Delta-Sigma ADC (8 to 20-bit) 192 ksps @ 12-bit Voltage Precision $\pm 0.1\%$ Up to 4 dedicated DACs (8-bit) Active: 0.8 mA, Sleep: 1 μ A, Hibernate: 200 nA FS USB 2.0, I2C, SPI, UART, CAN, LIN, I2S On-chip JTAG, Debug and Trace; SWD, SWV Up to 72 I/O View PSoC Creator Component Datasheets to learn more	High-performance 32-bit ARM Cortex- M3 Up to 67 MHz, 84 MIPS Flash 32 KB to 256 KB SRAM 16 KB to 64 KB Operation 2.7V to 5.5V 1 Delta-Sigma ADC (8 to 20 bit); 192ksps @12-bit 2 SAR ADCs (8-12 bit); 700Ksps @12-bit Voltage Precision $\pm 1.0\%$ Up to 4 dedicated DACs (8-bit) Active: 6 mA @ 6 MHz Hibernate: 0.3 μ A FS USB 2.0, I2C, SPI, UART, LIN, I2S On-chip Debug and Trace; SWD, SWV Up to 70 I/O View PSoC Creator Component Datasheets to learn more	PSoC Creator Drag-n-drop based free IDE for PSoC 3 and PSoC 5 PSoC Designer Drag-n-drop based free IDE for PSoC 1 PSoC 3 Featured Kits CY8CKIT-001 Kit CY8CKIT-030 Analog Kit All PSoC 3 kits PSoC 5 Featured Kits CY8CKIT-001 Kit CY8CKIT-050 Analog Kit All PSoC 5 kits PSoC 1 Kits CY8CKIT-001 Kit All PSoC 1 kits

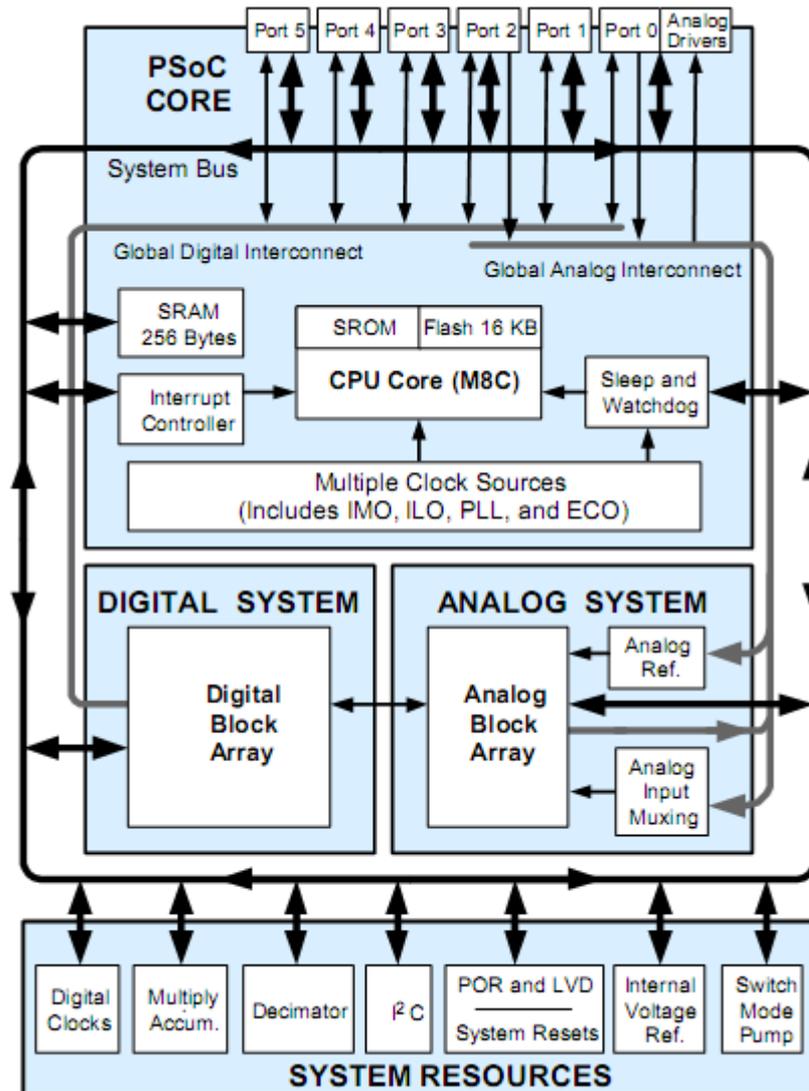
Fonte: (54)

Recursos presentes no PSoC (55)

O conteúdo deste tópico pode ser encontrado no Data Sheet CY8C27xxx disponível no site da Cypress.

A arquitetura PSoC, tal como ilustrado na Figura 48, consiste em quatro áreas principais: Núcleo PSoC, sistema digital, sistema analógico e sistema de recursos. As configurações globais permitem que todos os recursos do dispositivo possam ser combinados em um completo sistema personalizado.

Figura 48. Subsistemas do PSoC.



Fonte: Do autor.

Núcleo PSoC

O núcleo PSoC é uma engrenagem poderosa que suporta muitos recursos. O núcleo inclui uma CPU, memória, relógios, e configurável GPIO.

O M8C é o núcleo da CPU, é um processador poderoso com velocidades de até 24MHz. A CPU utiliza um controlador de interrupção com 17 vetores, para simplificar a programação de eventos em tempo real.

A memória abrange 16 KB de memória flash para armazenamento de programa, 256bytes de SRAM para armazenamento de dados, e até 2KB de EEPROM emulado usando a memória flash.

Sistema Digital

O sistema digital é composto por 8 blocos digitais do PsoC. Cada bloco é uma fonte de 8 bits que podem ser usados sozinhos ou combinados com outros blocos de modo a formar 8 -, 16 -, 24 -, e 32-bits periféricos, que são chamados de módulos do usuário.

As configurações de periféricos digitais são:

- PWMs (8 - e 16-bit)
- PWMs com banda morta (8 - e 16-bit)
- Contadores (8 - a 32-bit)
- Temporizadores (8 - 32-bit)
- UART de 8 bits com paridade selecionável (até dois)
- SPI escravo e mestre (até dois)
- I2C escravo e multi-master (um disponível como um sistema recurso)
- CRC / gerador (8 - a 32-bit)
- IrDA (até dois)
- Gerador de sequência pseudo aleatória (PRS) (8 - 32-bit)

Sistema Analógico

O sistema analógico é composto por 12 blocos configuráveis, cada um composto por um circuito op-amp permitindo a criação de complexos fluxos de sinais analógicos. Periféricos analógicos são muito flexíveis e podem ser personalizados para atender às exigências de aplicações específicas. Algumas das funções analógicas mais comuns no PSoC são as seguintes:

- ADCs (até 4, com 6 - a 14 bits de resolução, como selecionável incremental, delta sigma, e SAR)
- Filtros (2, 4, 6, e 8 pólos, passa-baixa, passa-faixa, notch)
- Amplificadores (até 4, com ganho selecionável até 48x)

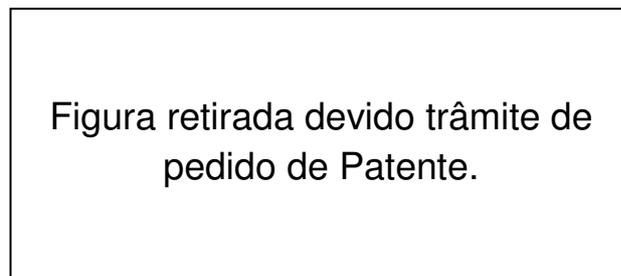
- Amplificadores de instrumentação (até dois, com ganho selecionável até 93x)
- Comparadores (até quatro, com 16 limiares selecionáveis)
- DACs (até quatro, com 6 - a 9-bit)
- DACs Multiplicando (até quatro, com 6 - a 9-bit)
- Drivers de saída de alta corrente (quatro com 30 mA)
- 1,3 V de referência (como um recurso do sistema)
- DTMF discador
- Moduladores
- Correlacionadores
- Detectores de pico
- Muitas outras topologias possíveis

5.3 ANTENA FLATE PLATE

A Antena Flate Plate é constituída de duas placas paralelas de ferro galvanizado, com dimensões de 32 X 35 cm.

Para determinar o Campo Elétrico incidente na placa superior utilizou um circuito RC paralelo para funcionar como integrador da corrente $\frac{dQ}{dt}$ que flui pela antena.

Figura 49. Antena Flat Plate construída.



Fonte: Do autor.

5.4 ANTENA LOOP

Para sintonizar a antena na frequência desejada de 10Khz, utilizou um capacitor de ressonância em paralelo com as saídas da antena. Para calcular qual seria a capacitância necessária para sintonizar nesta frequência foi utilizada as equações abaixo. [56],[57]

$$L_{\mu H} = K1N^2 A \left[\text{Ln} \left(\frac{K2 A N}{(N + 1)B} \right) + K3 + \left(\frac{K4(N + 1)B}{A N} \right) \right]$$

Onde:

$L_{\mu H}$ é a indutância do loop em micro henrys

A é o comprimento de um dos lados do loop em centímetros (cm)

B é o espaçamento entra cada loop em centímetros (cm)

N é o número de voltas do loop

K1, K2, K3 e K4 são fatores que variam de acordo com a geometria da antena.

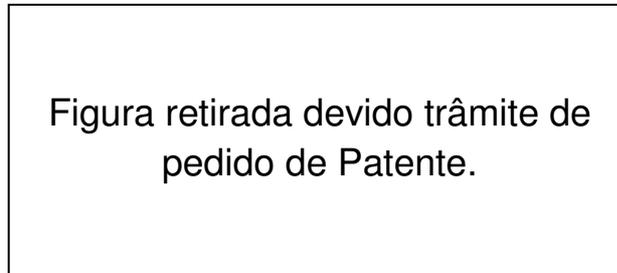
Geometria da antena	K1	K2	K3	K4
Quadrada	0.008	14.142	0.37942	0.3333
Hexagonal	0.012	2	0.65533	0.1348
Octogonal	0.016	2.613	0.75143	0.0715
Triangular	0.006	11.547	0.65533	0.1348

$$C_{pF} = \frac{1 \times 10^{18}}{4\pi^2 f^2 L_{\mu H}}$$

Primeiramente foi calculado a indutância do loop, e com esse resultado calculamos o capacitor de ressonância de acordo com a frequência desejada. Para a frequência de 10KHz foi calculado um capacitor de 1,418749 μF porem como não existe comercialmente esse valor foi adotado um capacitor de 1 μF que deixaria a

antena ressonante em torno de 12KHz, que por sua vez atende as necessidades desse projeto.

Figura 50. Antena Loop Quadrada com 7 voltas.



Fonte: Do autor.

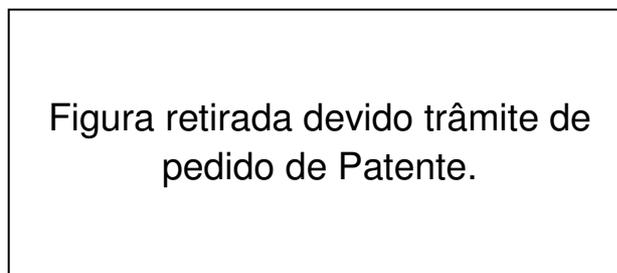
5.5 AMPLIFICADORES

Os estágios de amplificação são fundamentais para que se possa visualizar o sinal desejado em uma escala confortável. No total foram implementados 4 amplificadores de ganho programável (PGA) nos PSoC's, 2 amplificadores no PSoC de pré condicionamento e outros dois no outro.

Para a entrada da antena Loop foi utilizado no primeiro estágio um amplificador com ganho de 24, e no segundo estágio ganho de 2. Já para a antena flat plate foi utilizado dois amplificadores com ganho unitário.

Os amplificadores implementados, estão representados na forma de diagrama de blocos na Figura 51.

Figura 51. Diagrama de blocos do PGA.



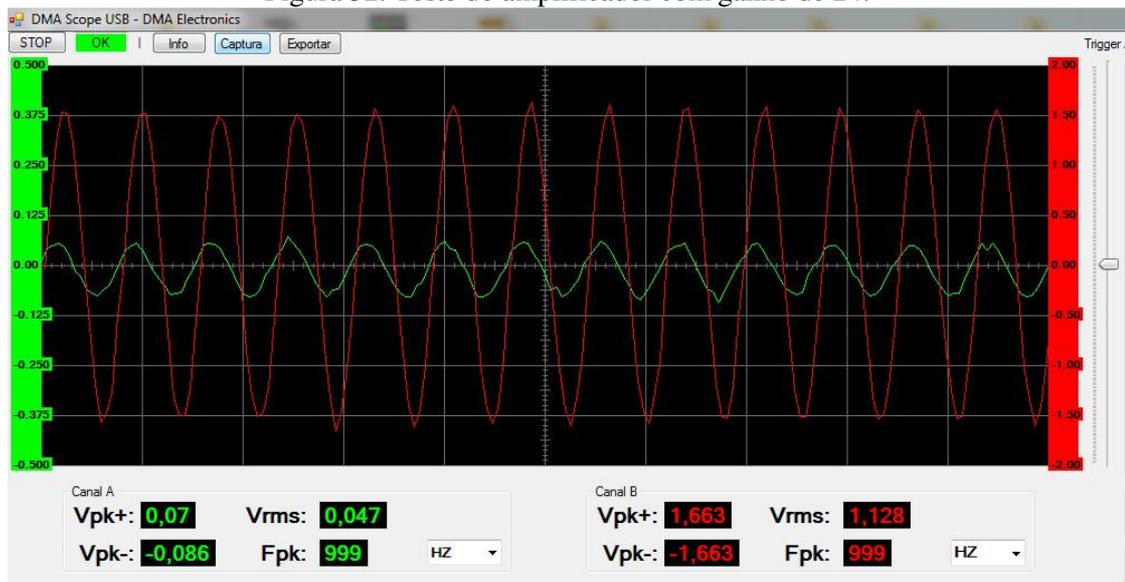
Fonte: Do autor.

Este amplificador é extremamente versátil. O terra pode ser referenciado para o terra analógico do circuito (mais usual), e para outros tipos de referências dependendo da aplicação. O ganho deste amplificador pode ser programado de acordo com o arranjo de resistores no ramo de realimentação. A saída deste amplificador tem dois tipos de função de transferência, uma referente a ganhos maiores ou iguais a 1, e outra referente a ganhos menores que 1, ou seja, quando o amplificador estiver funcionando como atenuador.

$$V_o = (V_{IN} - V_{GND}) \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) + V_{GND} \text{ para Ganho} \geq 1$$

$$V_o = (V_{IN} - V_{GND}) \cdot \left(\frac{R_a}{R_a + R_b}\right) + V_{GND} \text{ para Ganho} < 1$$

Figura 52. Teste do amplificador com ganho de 24.

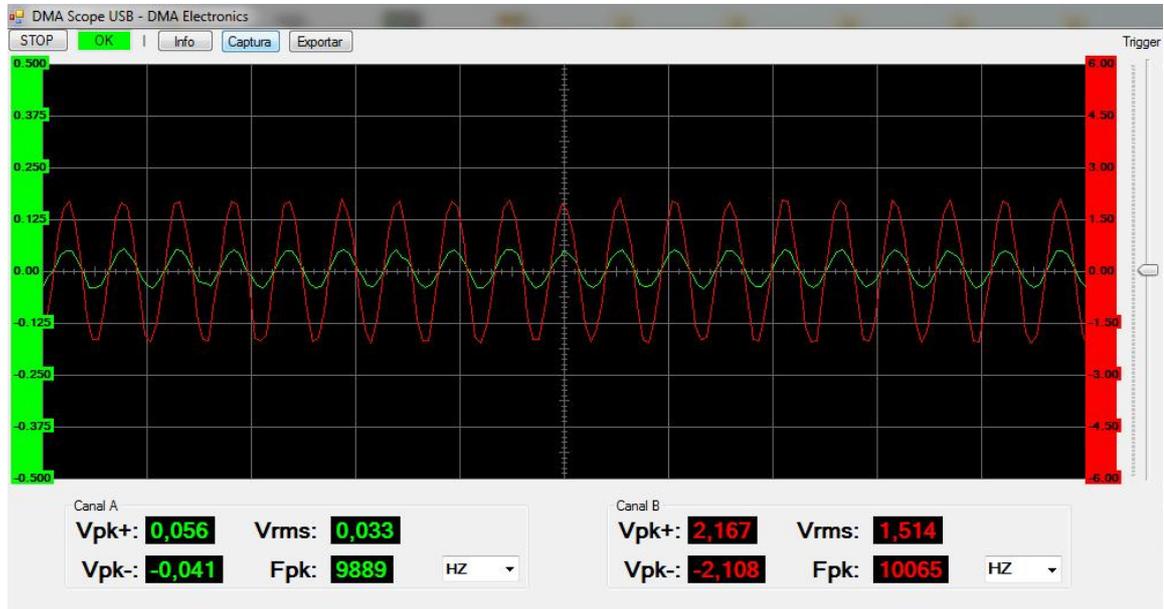


No Canal B (Vermelho) temos a saída do amplificador com $V_{rms}=1,128$ e no Canal A (Verde) temos a entrada com $V_{rms}=0,047$. Ganho = Saída/Entrada = 24. Fonte: Do autor.

Na figura 52 está apresentado o teste realizado com o amplificador do estágio de pré-condicionamento da antena Loop, o amplificador foi projetado para ter um ganho de 24, e como podemos ver na Figura 52, analisando as tensões V_{rms} na entrada e na saída do amplificador é verificado que o ganho projetado corresponde

ao ganho real. Porém esse ganho pode variar dependendo de alguns fatores, como a frequência do sinal de entrada.

Figura 53. Teste dos dois estágios de amplificação do sinal oriundo da antenna loop.



No Canal B (Vermelho) temos a saída com $V_{rms}=1,514$ e no Canal A (Verde) temos a entrada com $V_{rms}=0,033$. Ganho = Saída/Entrada = 45,87. Fonte: Do autor.

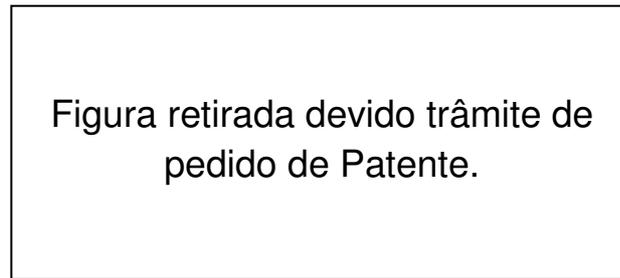
Na Figura 53 esta apresentado o teste dos dois estágios de amplificação, como mencionado anteriormente, o primeiro estágio foi projetado para ter um ganho de 24 e o segundo de 2, totalizando 48, mas como podemos observar na Figura 52 o ganho real foi de 45,87.

5. 6 FILTRO

Assim como o amplificador o filtro é fundamental para o condicionamento de um sinal. Eles possibilitam a passagem do sinal de interesse e rejeitam os sinais que iram prejudicar a análise desse sinal. Para o desenvolvimento deste dispositivo foi projetado um filtro passa faixa que estará conectado a saída do amplificador da antenna loop.

No filtro passa-faixa implementado, foi utilizado a tecnologia de capacitores chaveados. Na Figura 54 podemos ver o diagrama do filtro.

Figura 54. Diagrama do Filtro passa faixa de 2ª ordem.



Fonte: Do autor.

Neste tipo de filtros a frequência de corte e a largura de banda são funções da frequência de chaveamento e da razão entre capacitores do ramo de realimentação e os de entrada. Abaixo temos a função de transferência para o filtro apresentado na Figura 54.

$$\frac{V_{saida}}{V_{entrada}} = \frac{-\frac{C_1}{C_2} \frac{C_B}{C_3} \frac{S \left(1 + \frac{S}{2f_s}\right) f_s}{\left(\frac{C_A C_B}{C_2 C_3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{C_4}{C_2}\right)}}{s^2 + \frac{C_4}{C_2} \frac{S f_s}{\left(\frac{C_A C_B}{C_2 C_3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{C_4}{C_2}\right)} + \frac{C_B}{C_3} \frac{f_s^2}{\left(\frac{C_A C_B}{C_2 C_3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{C_4}{C_2}\right)}}$$

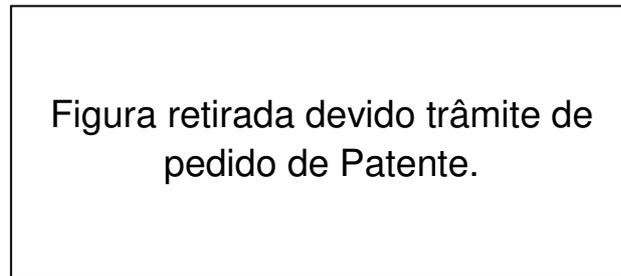
O projeto de filtros utilizando o PSoC se dá de maneira simples, porém existem algumas limitações quanto à frequência de corte e à amplitude do sinal de entrada.

A configuração do filtro ocorre basicamente através da escolha das capacitâncias C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_A e C_B , e principalmente da frequência de chaveamento. Dentro da interface de desenvolvimento do projeto existe um aplicativo denominado "BPF2 configuration WIZARD", no qual a configuração do filtro se dá pela escolha da frequência de corte, largura de banda, ganho e frequência de chaveamento. Com esses dados o programa calcula automaticamente quantas unidades de capacitância serão necessárias. Cada unidade de capacitância

no PSoC corresponde a aproximadamente 50 fento farads, e os capacitores podem variar de 1 a 32 unidades.

A interface do BPF2 configuration WIZARD, e o projeto do filtro podem ser visualizados na Figura 55.

Figura 55. Aplicativo BPF2 configuration WIZARD

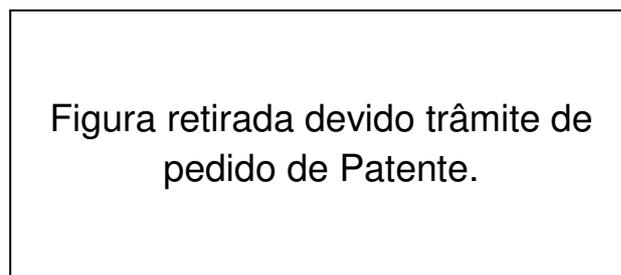


Fonte: Do autor.

Teste do filtro

Uma limitação do PSoC é o fato de ele trabalhar somente com sinais entre 0 e 5V, por este motivo é necessário sempre manter o sinal de entrada nesta faixa. Uma solução, utilizada neste projeto, é colocar o nível DC do sinal de origem em 0V com um capacitor e seguida acrescentar 2,5V com o Bloco RefMUX do PSoC, com isso o sinal na entrada do filtro terá um offssset de 2,5V.

Foi adotada a seguinte metodologia para testar o filtro: ao aplicar um sinal senoidal com 1 Vp-p, a frequência deste sinal é variada de 300HZ a 60KHz. Se faz então a anotação da amplitude do sinal de saída e em seguida é calculado o ganho em (db) para cada frequência. Com os dados obtidos foi gerado o gráfico abaixo.



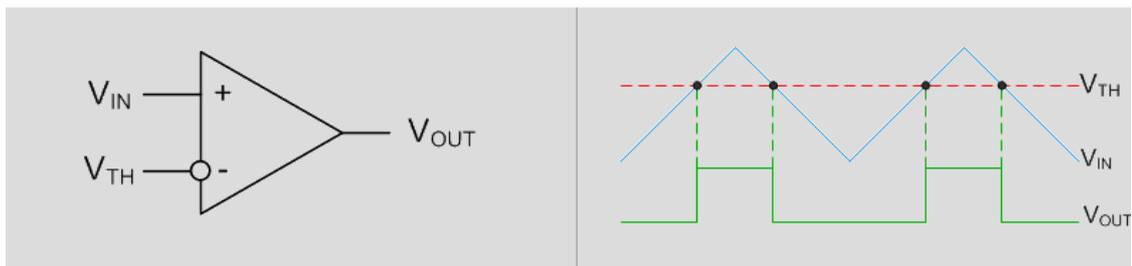
Fonte: Do autor.

5.7 COMPARADOR

A função do comparador no dispositivo é gerar um pulso para o contador, quando ocorrer uma descarga atmosférica. Ele ficara continuamente analisando o sinal de saída do segundo estágio de amplificação, e quando este sinal ultrapassar um determinado limiar, sua saída ira para um nível lógico alto, ou seja, eu sua saída teremos um pulso de +5V.

Na Figura 56 temos o diagrama do comparador implementado.

Figura 56. Comparador.



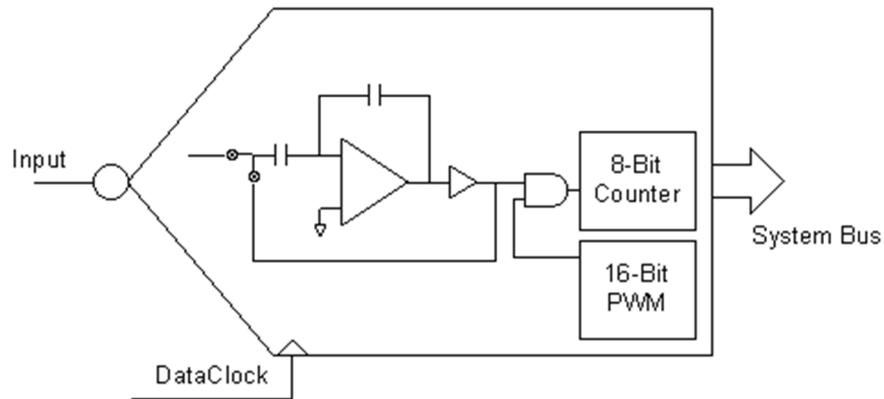
Fonte: Do autor.

5.8 CONVERSOR AD

O conversor analógico digital implementado foi o ADCINCVR (Conversor Analógico Digital Incremental Com Resolução Variável). Sua resolução pode variar entre 7 e 13 bits e pode remover ruídos de alta frequência otimizando o tempo de integração. Taxas de amostragem entre 4 e 10.000 sps são atingidas dependendo de parâmetros como; resolução, DataClock e CalcTime.

O conversor ADCINCVR é formado por um bloco analógico a capacitor chaveado e três blocos digitais, sendo um que irá funcionar como um contador de 8 bits e dois que iram funcionar como um PWM de 16 bits.

Figura 57. Diagrama de blocos do conversor analógico digital.

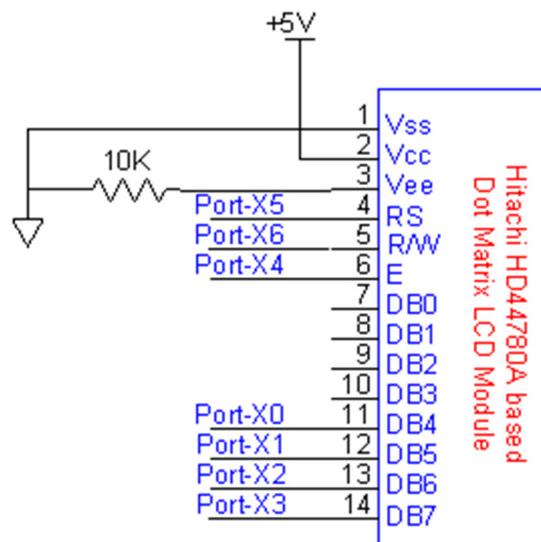


Fonte: Do autor.

5.9 LCD

Foi implementado um módulo LCD no PSOC para fazer as devidas transcrições de caracteres para o Display de LCD. Este módulo trabalha especificamente com o padrão industrial Hitachi HD44780. Esse módulo usa uma interface de comunicação de 4bits. Na Figura 58 temos o diagrama de interconexões deste módulo.

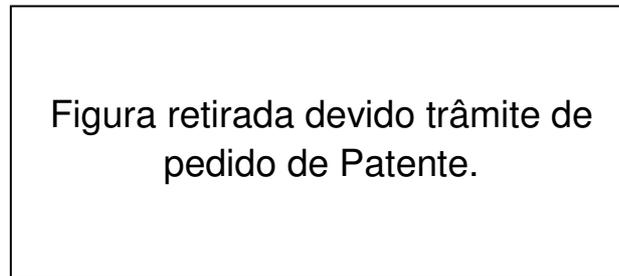
Figura 58. Diagrama de interconexões do LCD.



Fonte: Do autor.

No Display de LCD será exibido 3 dados, NR que corresponde ao número de raios detectados, DR que é a densidade de raios para a região de instalação do sensor e E que é o pico da intensidade do campo elétrico no instante de ocorrência da descarga.

Figura 59. Display de LCD.



Fonte: Do autor.

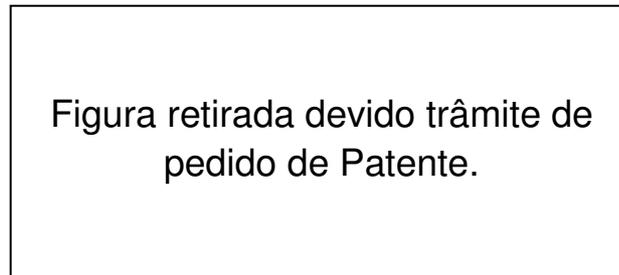
5.10 ALGORITMOS.

Basicamente foram implementados 3 algoritmos em linguagem C no microprocessador do PSoC, o primeiro é um contador que irá incrementar a variável "número de raios" a cada momento que o limiar do comparador for ultrapassado. O segundo algoritmo é o que irá calcular a densidade de raios para a região de instalação da antena e o terceiro irá digitalizar o valor do campo elétrico e mostrar no LCD no mesmo instante em que o raio foi detectado.

5.10.1 Algoritmo Contador

No algoritmo contador temos uma variável NR que irá acumular a contagem de raios, a saída do comparador está ligada na porta 1 [2] do PSoC, esse algoritmo fica constantemente observando esta porta e no instante em que ela mudar de 0V para 5V, ou de nível lógico baixo para nível lógico alto, a variável NR será incrementada com mais uma unidade, conforme podemos observar no fluxograma da Figura 60.

Figura 60. Algoritmo contador.

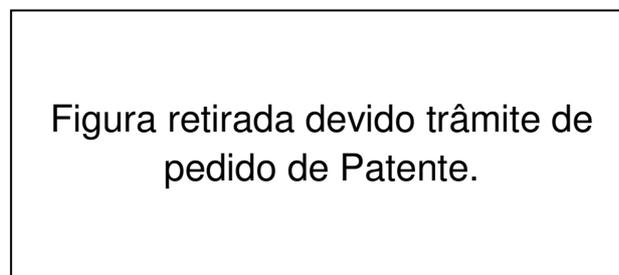


Fonte: Do autor.

5.10.2 Programa Densidade De Raios

O algoritmo densidade de raios é o mais simples, ele simplesmente irá realizar a divisão da variável NR que representa o número de raios pela constante Área, que representa a área de abrangência do sensor, esta constante será determinada com testes durante tempestades e validados por dados obtidos pela STARNET. Na Figura 61 esta apresentado o fluxograma do algoritmo.

Figura 61. Algoritmo densidade de raios.

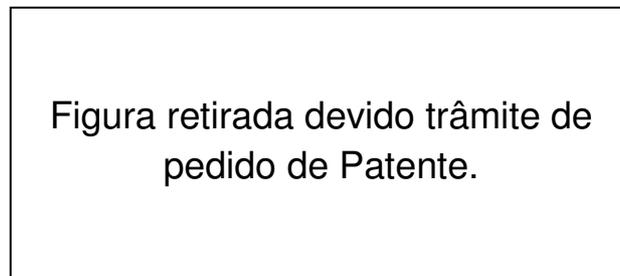


Fonte: Do autor.

5.10.3 Algoritmo De Digitalização Do Campo Elétrico

O algoritmo de digitalização do campo elétrico, assim como o contador irá ficar constantemente observando esta porta 1 [2] e no instante que ela sofrer a variação de 0v para 5v, ele digitalizará o sinal oriundo da antena flat plate e disponibilizara esse valor no LCD. Durante a digitalização o sinal será multiplicado pela constante K do item 5.3 deste capítulo. O fluxograma deste algoritmo está apresentado na Figura 62.

Figura 62. Algoritmo de digitalização do campo elétrico.



Fonte: Do autor.

5.11 CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO.

Os custos de desenvolvimento do protótipo foram divididos em três grupos: Gastos com materiais, desenvolvimento intelectual e gastos com testes.

Quanto ao custo referente ao desenvolvimento intelectual, foi levado em conta que o protótipo levou aproximadamente 12 meses para chegar a resultados satisfatórios, logo este período foi multiplicado pela bolsa de estudos do referido desenvolvedor.

Já os gastos com testes foi levado em consideração os gastos com equipamentos de testes como osciloscópio e geradores de sinais. Na tabela I podemos ver de forma resumido o custo total.

Custo Total	
Material	R\$ 68,50
Desenvolvimento Intelectual	R\$ 18.000,00
Testes	R\$ 3.000,00
Total (Reias)	R\$ 21.068,50
Total (Dollar)	\$ 8.889,66

5.12 QUADRO DE COMPARAÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO E O ADQUIRIDO PELO CEPEL.

Quadro de comparações		
Itens comparados	Protótipo	CEPEL
Alimentação por painel fotovoltaico e banco de baterias	NÃO	SIM
Sistema de Telemetria GSM/GPRS	NÃO	SIM
Estimativa da Densidade de Raios	SIM	SIM
Raio de Atuação 20Km	NÃO	SIM
Raio de Atuação 100Km	SIM	NÃO
Display LCD	SIM	NÃO
Contador de raios	SIM	NÃO
Estimativa de pico de campo elétrico.	SIM	NÃO
Velocidade de contagem de 10 a 30 contagens por minuto.	NÃO	SIM
Velocidade de contagem de 18.000 a 19.000 contagens por minuto.	SIM	NÃO
Varição do limiar de detecção	SIM	NÃO
Varição dos ganhos de amplificação	SIM	NÃO

CAPÍTULO 6 –TESTES E RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Os testes preliminares foram feitos com ajuda de geradores de sinais, posteriormente passou-se a realizar testes com um centelhador Atlas 4B e por fim foram realizados testes durante tempestades.

6.2 TESTE COM GERADOR DE SINAL.

Os primeiros testes foram feitos com um gerador de sinal ligado na entrada do circuito de pré condicionamento. O gerador de sinal utilizado foi o "Test Tone Generator" que é um software que utiliza a placa de som do computador para gerar sinais senoidais, quadrados e triangulares.

O primeiro procedimento adotado foi gerar um sinal senoidal e variar a sua frequência para verificar o intervalo de frequência que o dispositivo incrementava a variável NR ou seja, contava o número de raios.

Para esse teste verificou-se que o contador incrementava no intervalo entre as frequência de 6Khz e 20Khz, isto para um sinal de entrada por volta de 40mVpp.

6.3 TESTE COM CENTELHADOR ATLAS 4B.

Após os testes com o gerador de sinal, foram realizados testes com o dispositivo completo, antenas ligadas nos circuitos eletrônicos, e com um centelhador para simular a descarga atmosférica.

Neste segundo procedimento as antenas ficaram posicionadas a uma distância de aproximadamente 5 metros do centelhador. Neste teste foi utilizado um osciloscópio da marca DMA ligado a saída do segundo estágio de amplificação das antenas para verificar a forma de onda do sinal detectado.

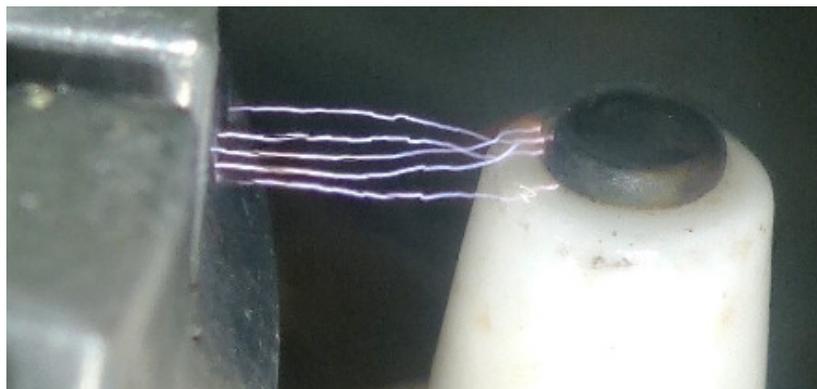
Figura 63. Osciloscópio ligado ao segundo estágio de amplificação do circuito de eletrônico.

Figura retirada devido trâmite de
pedido de Patente.

Fonte: Do autor.

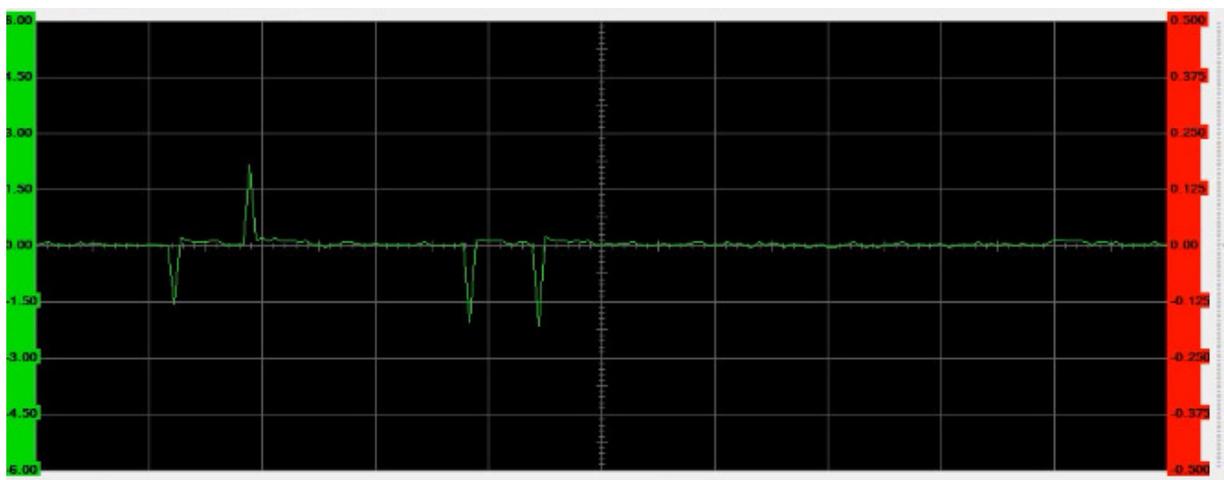
Foi constatado que o centelhador gerava pulsos negativos e positivos, conforme Figura 65.

Figura 64. Centelhador Atlas 4B.



Fonte: Do autor.

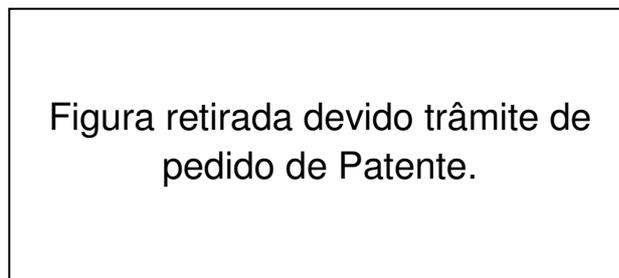
Figura 65. Sinais obtidos nos testes com faiscador.



Fonte: Do autor.

Estes teste foram fundamentais para verificação do detector de pico de campo elétrico. Na Figura 66 verificamos que ele funcionou conforme o esperado. O valor mostrado no LCD não está multiplicado pelo constante K, ele representa somente o valor da tensão V, isto foi adotado para fazer as devidas comparações com os valores obtidos no osciloscópio, considerando que o osciloscópio está na escala de 1,5V o valor de pico é visualizado é de aproximadamente 0,29V bem próximo do digitalizado pelo detector que foi de 0,2807V.

Figura 66. Detecção do pico positivo de Campo elétrico.



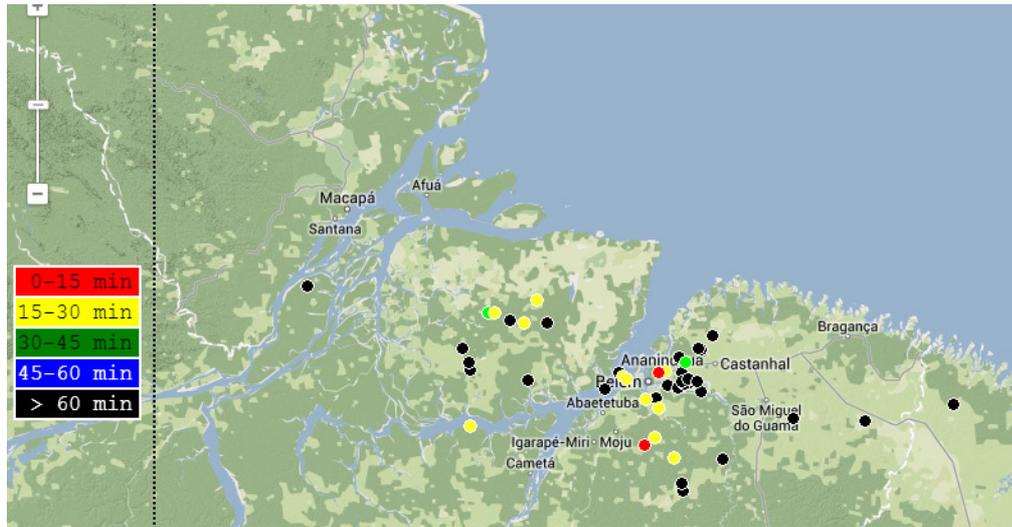
Fonte: Do autor.

Os testes com o faiscador foram muito proveitosos, o dispositivo funcionou plenamente contando os pulsos positivos gerados pelo centelhador.

6.4 TESTE DURANTE TEMPESTADES.

O primeiro teste durante uma tempestade ocorreu no dia 16/01/2014, no intervalo entre as 18h e 19:30h. Neste teste a antena foi instalada "Indoor" dentro de um abrigo. Assim como no teste com o centelhador, foi utilizado o osciloscópio para verificar os sinais que estavam sendo detectados. Para validar e comparar os dados obtidos com este sensor, foi usado os dados da rede STARNET disponível em [58], neste endereço eletrônico é possível observar em tempo real a localização dos raios, assim como sua distribuição temporal de 15 em 15 minutos. Na Figura 67 podemos ver a distribuição dos raios na proximidade da cidade de Belém as 18:50 do dia 16/01/2014.

Figura 67. Rede STARNET atualizado as 18:50 do dia 16/01/2014.

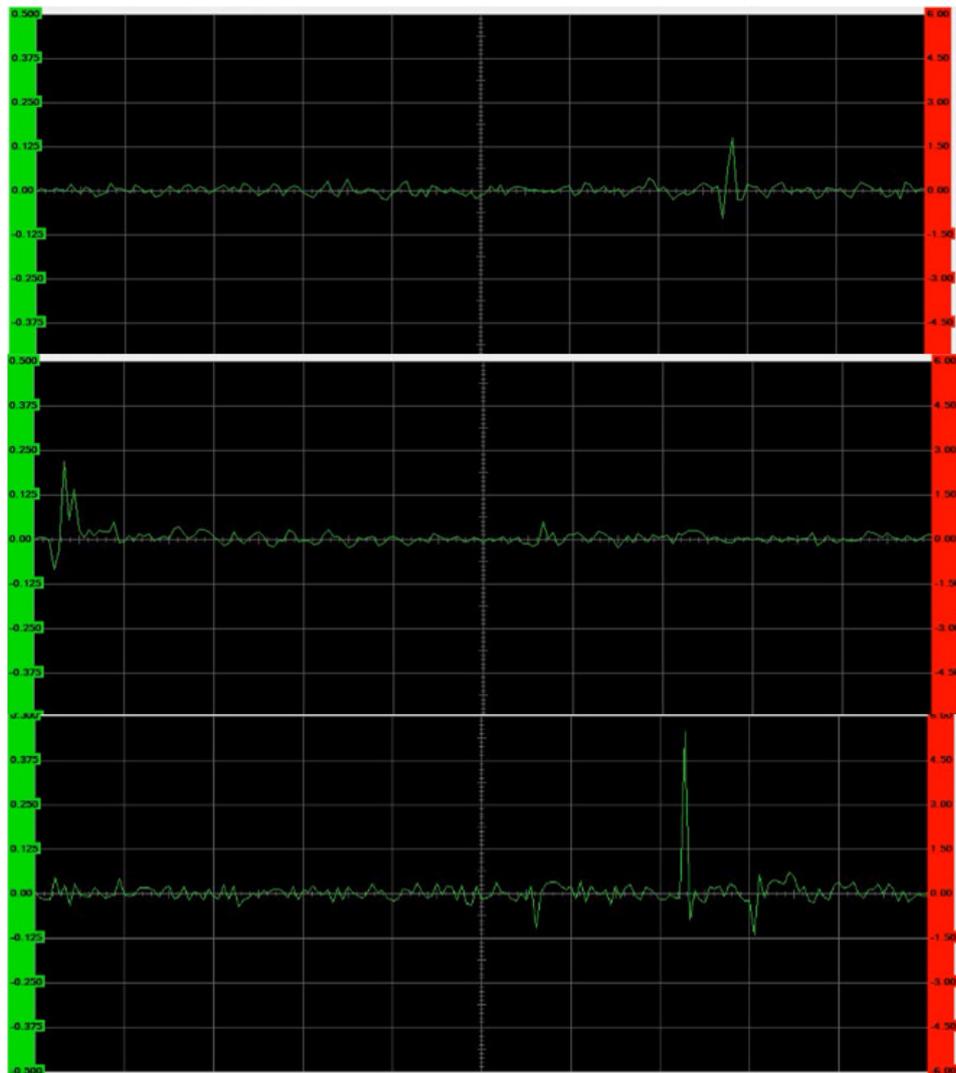


Fonte: Do autor.

Como podemos observar na Figura 67, os raios detectados são representados por círculos de cores diferentes, cada cor representa a quanto tempo o raio ocorreu, a partir do momento da atualização da página da internet.

Inicialmente o dispositivo estava com a seguinte configuração de detecção; ganho de pré condicionamento de 24, segundo estágio de ganho de 2 e o limiar do comparador estava em 3,592V, ou seja considerando que o nível DC do sinal é 2,5V, a saída do comprador iria para nível lógico alto quando o pico do sinal detectado ultrapassasse os 1,092V. Contudo para essa configuração o contador não estava incrementando quando ocorria as descargas. Isso se deve pois o sinal recebido não tinha amplitude suficiente para atingir o limiar estabelecido no comparador como podemos ver na Figura 68, onde o pico do maior sinal captado depois da amplificação ficou em torno de 0,4V.

Figura 68. Sinais observados no osciloscópio durante a tempestade de raios do dia 16/01/2014, utilizando a configuração inicial do dispositivo. Osciloscópio estava na escala de 0,125V.



Fonte: Do autor.

Para solucionar este problema foi implementado novos parâmetros, o ganho do amplificador de pré condicionamento foi alterado para 48 e o amplificador do segundo estágio foi alterado para 4. O limiar de comparação foi reestabelecido para 2,97V, ou seja, a saída do comparador iria para nível lógico alto quando o pico do sinal detectado após a amplificação ultrapassasse os 0,47V. Os sinais detectados após estas alterações podem ser vistos na Figura 69.

Figura 69. Sinais observados no osciloscópio durante a tempestade de raios do dia 16/01/2014, após as modificações das configurações iniciais. Osciloscópio estava na escala de 0,5V.

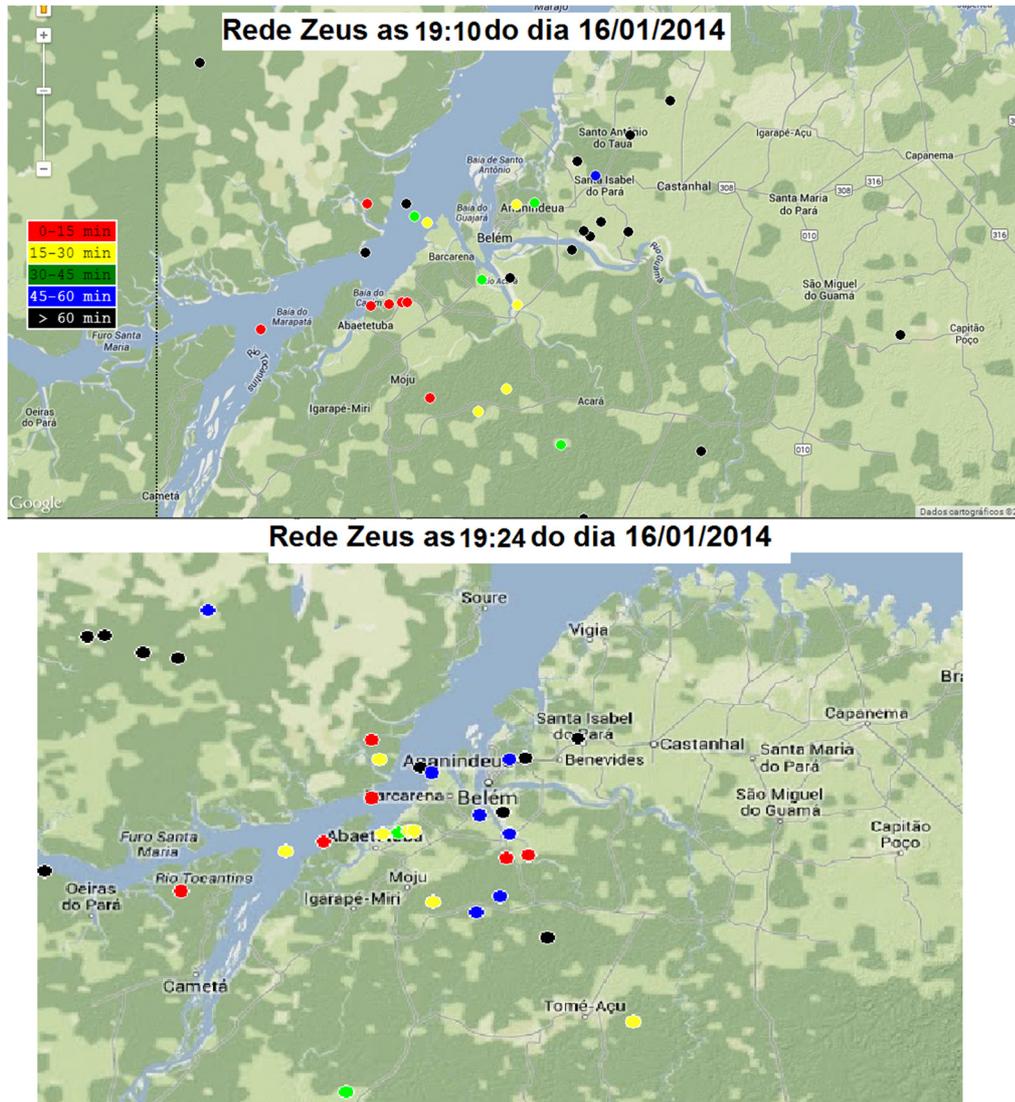


Fonte: Do autor.

Como pode ser constatado na Figura 69 os sinais na saída do segundo estágio de amplificação passaram a atingir níveis de aproximadamente 1,2V de pico, com isso melhorando a sua visualização e detecção.

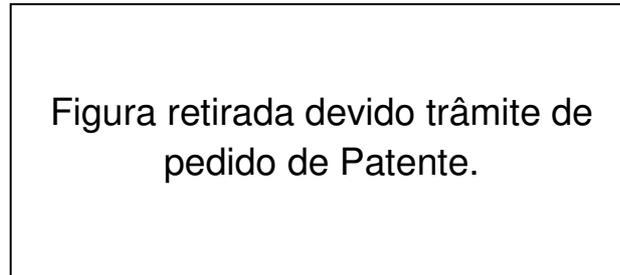
Determinação do parâmetro Área do algoritmo de "Densidade de raios".

Figura 70. Imagens da rede STARNET obtidas no endereço eletrônico (47) no intervalo entre as 19:10 e 19:24 do dia 16/01/2014.



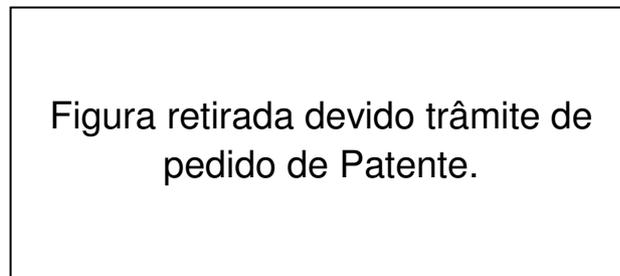
Fonte: Do autor.

Figura 71. Foto do display LCD após 1min que o sensor foi ligado.



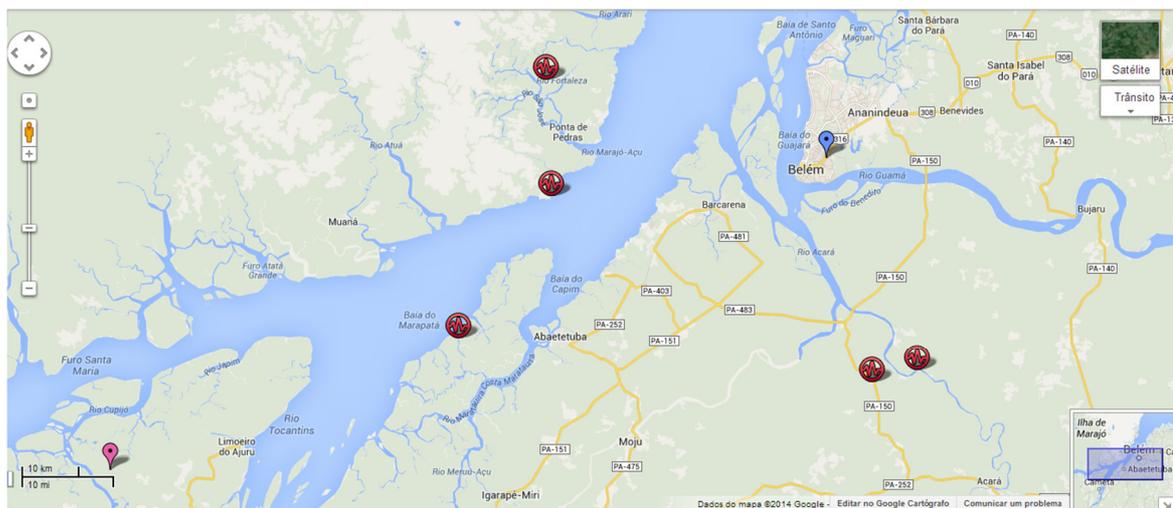
Fonte: Do autor.

Figura 72. Foto do display LCD as 19:24h.



Fonte: Do autor.

Figura 73. Localização dos raios detectados e não detectados e do Sensor.



LEGENDA

-  Raio ocorrido dentro do intervalo de 15min e detectado pelo sensor.
-  Raio ocorrido dentro do intervalo de 15min e NÃO detectado pelo sensor.
-  Localização do Sensor

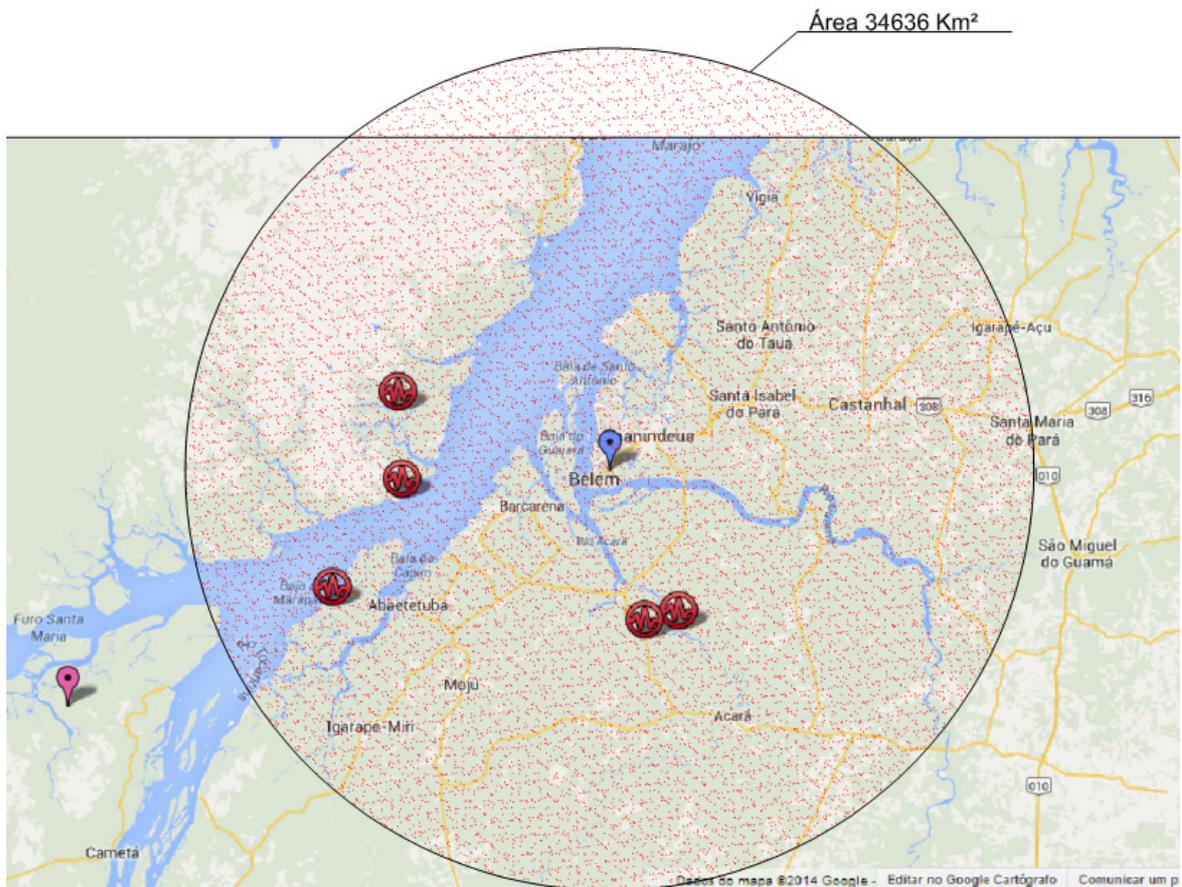
Fonte: Do autor.

Figura 74. Distancias entre o sensor e o raio mais distante do sensor que foi detectado, e distância entre esse raio e o raio mais perto do sensor que não foi detectado.



Fonte: Do autor.

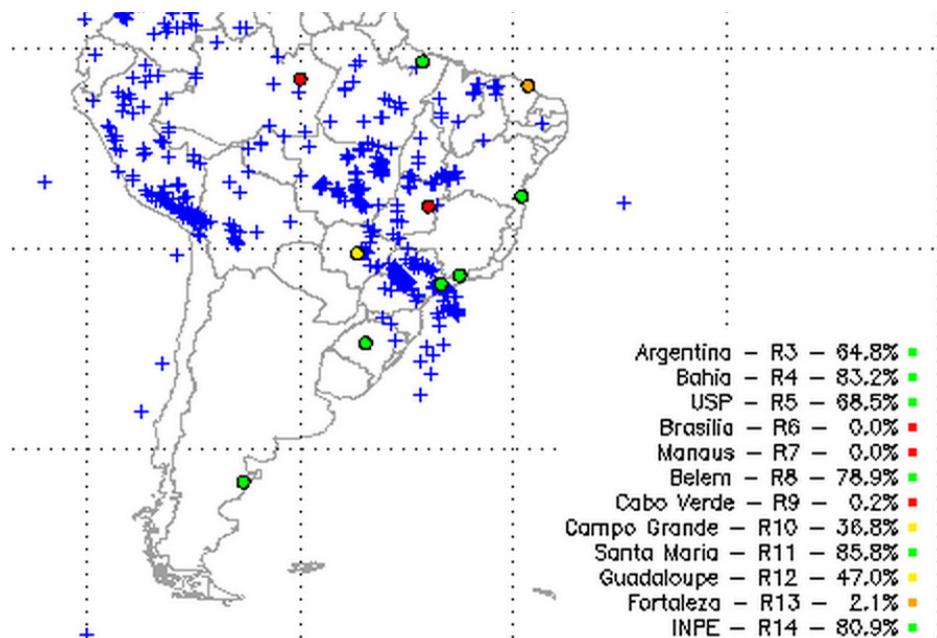
Figura 75. Estimativa da área de abrangência do sensor.



Fonte: Do autor.

Dentre as várias amostras coletadas, foi obtido 8 amostras com o mesmo número de sensores ativos e mesma configuração da rede STARNET. Esta mesma configuração foi adotada para se ter uma maior confiabilidade das amostras coletadas, uma vez que a eficiência da rede STARNET varia de acordo com a quantidade de estações ativas e suas disposições na rede. Esta configuração e o número de sensores ativos estão apresentados na Figura 76.

Figura 76. Configuração dos sensores ativos da rede STAENET.



Fonte: (58)

Para determinar o parâmetro área, então foi admitido a média das amostras obtidas, com isso chegando a uma área de abrangência do sensor de 25195Km². Na tabela abaixo estão os valores de cada amostra para a mesma configuração e mesmo número de sensores ativos da rede STARNET.

N° Amostra	Raio (Km)	Área (Km ²)
1	105	34635
2	98,2	30294
3	101,3	32237
4	90,6	25787
5	83,5	21903
6	88,5	24605
7	75,145	17739
8	86,2	23343
Média		
	89,55	25195,788

É importante ressaltar que esta metodologia deve ser adotada cada vez que o local de instalação do sensor for modificado, pois, em uma área sem interferências e sem muitas edificações o sinal captado pela antena será maior, conseqüentemente aumentando a área de abrangência do sensor. O mesmo vale quando for alterado os ganhos dos amplificadores.

CONCLUSÃO

A partir da realização de cada teste, o dispositivo foi sendo aperfeiçoado gradativamente. Por se tratar de um dispositivo com um hardware altamente flexível, foi viável realizar a calibração de alguns parâmetros como: ganho dos amplificadores, limiar de comparação do comparador e até a largura de banda dos filtros.

Os testes foram fundamentais para; a verificação dos níveis dos sinais captados e, principalmente, para identificar a área de abrangência do sensor. Esta área de abrangência foi baseada em testes durante tempestades e em comparações dos dados obtidos do sensor, com os dados da rede STARNET. Uma vez que a STARNET tem sua eficiência alterada de acordo com a disposição dos sensores ativos, foram admitidas amostras de apenas uma configuração, para maior confiabilidade das amostras. A partir dessa metodologia, foi considerada uma área de atuação do detector de aproximadamente 25185Km², isto para o modo de instalação indoor.

Ao fim dos testes o dispositivo apresentou resultados satisfatórios, conseguiu detectar com exatidão os pulsos gerados pelo centelhador Atlas 4B e não apresentou falsos alarmes nos testes realizados durante tempestades, ou seja, sempre que o protótipo detectava uma descarga atmosférica a rede STARNET também a detectava.

O protótipo apresentou baixo custo de fabricação, podendo ser fabricado em larga escala. Ele pode auxiliar os atuais sistemas de detecção para gerar mapas de densidade de raios com melhor resolução, em áreas da Amazônia onde os sistemas atuais apresentem baixa eficiência.

O ponto forte do dispositivo é sua adaptabilidade e seu baixo custo. Os parâmetros como; ganho dos amplificadores, frequência de corte dos filtros e limiar do comparador são totalmente configuráveis, diferentemente de alguns dispositivos encontrados no mercado. Essa flexibilidade possibilita a adaptação dos sensores de acordo com seu local de instalação.

A gama de possibilidades que o dispositivo PSoC oferece, abre a porta para elaboração de diversos projetos futuros utilizando o mesmo Hardware (mesmas

antenas e mesmos circuitos eletrônicos), ou seja, sem aumentar os custos do projeto. Abaixo podemos citar algumas propostas para trabalhos futuros.

- Calibração do sensor usando dados de uma torre instrumentada.
- Elaboração das placas de circuito impresso
- Caixa de proteção para os circuitos eletrônicos
- Estimação da Corrente da descarga captada.
- Quantificar os Raios de acordo com sua Polaridade.
- Implementar comunicação do sensor com PC, Notebook.
- Criação de banco de dados de descargas.
- Estimar a distância do sensor a descarga.
- Calibração do sensor usando dados de uma torre instrumentada.
- Elaboração das placas de circuito impresso.
- Caixa de proteção para os circuitos eletrônicos.
- Estimar a área de abrangência do sensor por diferentes metodologias.
- Gerar alertas contra incidência de descargas severas.

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 PSoC, com a construção das antenas e principalmente durante os testes, pois os equipamentos utilizados não eram tão sofisticados. Com o domínio da interface de desenvolvimento do PSoC e domínio da teoria sobre as descargas, o projeto é facilitado e possibilita a implementação de sistemas bastante complexos.

REFERÊNCIAS

- [1] Morales, C. A. R. Notas de aula. Disponível em: < <http://www.storm-t.iag.usp.br/pub/ACA0330/> > Acesso em 27/12/2013
- [2] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Conceitos. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>> Acesso em 05/12/2013.
- [3] MENDES Jr. Odim; DOMINGUES, Margarete Oliveira. Introdução à eletrodinâmica atmosférica. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, mar./2002, nº 1, p. 3-19.
- [4] Dantas, M. A troposfera e a radiação solar. Disponível em: <<http://professormarcianodantas.blogspot.com.br/2012/04/troposfera-e-radiacao-solar.html>> Acesso em 10/12/2013.
- [5] BUSSULA DE PLASMA. Magnetosfera. Disponível em: <<http://bussoladeplasma.wordpress.com/2012/09/28/anomalia-do-atlantico-sul/magnetosfera-2/>> Acesso em 10/12/2013.
- [6] Atmospheric Electrostatics, Lars Wåhlin, Colutron Research Corporation Boulder, Colorado, USA, 1989
- [7] MARQUES, E.S. **DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE UM SENSOR PARA DETECÇÃO DE SFERICS**. 2010. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza-CE, 2010.
- [8] HEILMANN, A. **AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM VLF - ZEUS NO BRASIL**. 2006. 155f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2006.
- [9] Cotton, W.R. Storms. Geophysical Science Series, v.1, ASTER Press, Fort Collins, CO, USA, 1990.
- [10] V.A. Rakov, University of Florida, LIGHTNING PHENOMENOLOGY AND PARAMETERS IMPORTANT FOR LIGHTNING PROTECTION, IX International Symposium on Lightning Protection, 2007
- [11] UMAN, M. A. 1987. The Lightning Discharge, Academic Press, 377.
- [12] KINDERMANN, G. **Descargas Atmosféricas**. Sagra- DC Luzzatto. Rio Grande do Sul, 1992.
- [13] MASON, J; MASON, N, 2003. The physics of a thunderstorm, European Journal of Physics, 24.
- [14] PEREIRA, C. S. **ELEMENTOS DE SENSORES DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA**. 2010. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2010.

[15] Santos, J. F.C. Propagação. Disponível em:<<http://www.pp6pp.com.br/propagacao.htm>> Acesso em 01/01/2014

[16] Krapf, H. Disponível em: < http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Lightning_14.07.2009_20-42-33.JPG> Acesso em 01/01/2014

[17] Ahmad , N. A. **BROADBAND AND HF RADIATION FROM CLOUD FLASHES AND NARROW BIPOLAR PULSES**. 2011, 66f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Uppsala University, Uppsala-SU. 2011.

[18] APCEE CORPORATION. Measuring. Disponível em <www.apcee.com/file/esdmeasuring.pdf> Acesso em 02/01/2014

[19] CAMPBELL, James A. Electric Field Mill Fabrication. Disponível em: <http://www.precisionstrobe.com/jc/fieldmill/fieldmill.html/>. Acesso em: 04 Jul. 2005.

[20] BALANIS, C. A. Teoria de Antenas: Análise e Síntese. Volumes 1 e 2. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

[21] INSTITUTO PORTUGUES DO MAR E DA ATMOSFERA – IPMA. Área educativa - Rede de Detectores de Descargas Eléctricas Atmosféricas (Trovoadas). Disponível em: <<https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=trovoada.xml>> Acesso em 02/01/2014

[22] MACGORMAN, Donald R.; RUST, W. David. The Electrical Nature of Storms. New York: Oxford University Press, 1998.

[23] MIRANDA, B. N. P. **USO DO ALGORITMO TOA NA ESTIMAÇÃO DO LOCAL DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. 2013. 80f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2013.

[24] **C.J.Rodger, J.B.Brundell ,and R.L.Dowden: Location accuracy of VLF World-Wide Lightning Location (WWLL) network: Post-algorithm upgrades, *Annales Geophysicae (2005) 23:1–14***

[25] RODGER, C.J; BRUNDELL, J.B; DOWDEN, R.L; THOMSON,N.R 2004. Location Accuracy of Long Distance VLF Lightning Location Network, *Annales Geophysicae* 22, 747-758.

[26] MET OFFICE COLLEGE. Arrival Time Differencing – ATD Lightning Location System. Disponível em: <http://www.eumetcal.org/intralibrary/open_virtual_file_path/i04n7061t/Arrival%20Time%20Differencing.doc> Acesso em 03/01/2014

- [27] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. Space Research and Observations. Disponível em: <<http://thunder.msfc.nasa.gov/research.html>> Acesso em 30/12/2013
- [28] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. OLS. Disponível em: <<http://thunder.msfc.nasa.gov/ols/>> Acesso em 30/12/2013
- [29] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. OLS. Disponível em: <http://thunder.msfc.nasa.gov/ols/OLS/ols_1996_02_world.gif> Acesso em 30/12/2013
- [30] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. OTD and OLS. Disponível em: <http://thunder.msfc.nasa.gov/ols/OTD_OLS/otd_ols_1995_11.gif> Acesso em 30/12/2013
- [31] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. OTD. Disponível em: <<http://thunder.msfc.nasa.gov/otd/>> Acesso em 30/12/2013
- [32] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Optical Transient Detector. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/otd.html>> Acesso em 30/12/2013
- [33] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. OTD. Disponível em: <http://lightning.nsstc.nasa.gov/data/OTDbrowse/1997/gif/mlab.otd.1_1.1997.012.gif> Acesso em 30/12/2013
- [34] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. LIS. Disponível em: <<http://lightning.nsstc.nasa.gov/lis/>> Acesso em 30/12/2013
- [35] LIGHTNING AND ATMOSPHERIC ELECTRICITY RESEARCH AT THE CGHH. LIS. Disponível em: <<ftp://ghrc.nsstc.nasa.gov/pub/browse/lis/lis-summaries/2012/2012.png>> Acesso em 30/12/2013
- [36] SHARING EARTH OBSERVATION RESOURCES. FORTE. Disponível em: <http://www.eoportal.org/directory/pres_FORTEFastOnOrbitRecordingofTransientEventsP94.1.html> Acesso em 30/12/2013
- [37] RAIOS ACESSORIA E CONSULTORIA. Sobre Raios. Disponível em: <<http://fisica-potierj.pro.br/outros/SobreoRaio.pdf>> Acesso em 01/01/2014
- [38] SANTOS, J. G. M.: Precipitação associada a raios nuvem-solo, em torno de Belém-PA In: Seminário de Iniciação Científica da UFPa, 10, 2000, Belém.

- [39] LIGHTNING LOCATION AND PROTECTION – LLP. MODELO 430 TSS. Manual LLP
- [40] SOUZA, José Ricardo Santos de ; Rocha, B.R.P.da ; CARRERA, G. T. . CG - Lightning Observation (and applications) Around Belém, During the 1995-1998 Period. In: V International Symposium on Lightning Protection, 1999, São Paulo. Proceeding of the V International Symposium on Lightning Protection. São Paulo: V International Symposium on Lightning Protection, 1999. v. 1. p. 17-21.
- [41] ROCHA, B. R. P. ; RIBEIRO, W. N. ; G, A. J. J. ; SANTOS, M. M. ; N ; SOUZA, J. R. S. . Efeitos de Descargas El tricas Nuvem-Solo no Sistema Telefonico de Bel m no Per odo 95-96. In: 1st International Conference on Grounding and Earthing, 1998. 1st International Conference on Grounding and Earthing Proceedings. Belo Horizonte - MG, 1998. v. 1. p. 89-92.
- [42] ROCHA, B. R. P. ; SOUZA, J. R. S. . Lightning Observations and Applications Around Belém during the 1995-1997 Period. In: 1st International Conference on Grounding and Earthing, 1998. 1st International Conference on Grounding and Earthing Proceedings. Belo Horizonte - MG, 1998. v. 1. p. 18-21.
- [43] ROCHA, B. R. P. . Precipitation Estimates from an Electromagnetic Lightning Detector data in Radiofrequenciees. In: International Microwave and Optoelectronics Conference - 1997SBMO/IEEE MTT-S, 1997. International Microwave and Optoelectronics Conference - 1997SBMO/IEEE MTT-S - Proceedings. NATAL - RN, 1997. v. 2. p. 655-659.
- [44] ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; COSTA, M. J. Electric and Magnetic Fields from Lightin in Belem. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Ouro Preto: [s.n.]. 1996. p. 55-58.
- [45] GLOBAL ATMOSPHERIC, INC. SENSOR LPATS-IV. Manual LPATS-IV
- [46] THE UNIVERSITY OF OKLAHOMA. SCHOOL OF METEOROLOGY. Disponível em: <weather.ou.edu/~mahler/mahler_final.ppt> Acesso em 07/01/2014
- [47] Braga, N. Detecção de descargas atmosféricas (ART716). Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/5588>> Acesso em 07/01/2014
- [48] C. ALMEIDA, Arthur; S. SOUZA, José Ricardo; S. SÁ, José Alberto; MONTEIRO, M.R.; ROCHA, Brígida R.P.; FILHO, José Pissolato; Características dos Raios Nuvem-Solo na Amazônia Oriental: Subsídios para Proteção de Sistemas Elétricos, 01/2010, Científico Nacional, III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Vol. 1, pp.1-3, Belém, Pará, PA, BRASIL, 2010
- [49] SFERICS TIMING AND RANGING NETWORK (STARNET). Visão geral do sistema. Disponível em: < <http://www.zeus.iag.usp.br/system.php> > Acesso em 27/01/14
- [50] DIAS R. N. **NOVA METODOLOGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS DE DESEMPENHO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. 2006, 268f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). UFMG. Belo Horizonte 2006.

- [51] CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL . Edital de Pregão Eletrônico nº PE-034/2012. Disponível em: <<https://www.eletronbras.com/ELB/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7B84982199-34DA-483A-AFD5-D752A7557329%7D&ServiceInstUID=%7B7291A7D7-8FB9-406C-AB54-5EBEB9A7F838%7D>> Acesso em 25/01/14.
- [52] CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL . CONTRATO Nº 0293/2012. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/gestaofinanceira/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7B4A40C1C7-9773-44C1-BD2A-BD37DA91619F%7D&ServiceInstUID=%7B7291A7D7-8FB9-406C-AB54-5EBEB9A7F838%7D>> Acesso em 25/01/14.
- [53] D.E.C. Nicolosi e R.C.B. Santos "*Microcontrolador Psoc uma Nova Tecnologia, uma Nova Tendência*", 1a. edição, Erica.
- [54] CYPRESS. Products. Disponível em: <www.cypress.com> Acesso em 10/01/14
- [55] CY8C27xxx Data Sheet, Disponível em: <<http://www.cypress.com/?docID=35973>> Acesso em 20/01/14
- [56] Carr, Joseph J. (1994). "Small Loop Antennas for MW, AM BCB, LF and VLF Reception - Part 1." Elektor Electronics (UK), June 1994, pp. 58 - 63.8
- [57] Carr, Joseph J. (1994). "Small Loop Antennas for MW, AM BCB, LF and VLF Reception - Part 2." Elektor Electronics (UK), July/August 1994, pp. 104 - 109.
- [58] SFERICS TIMING AND RANGING NETWORK (STARNET). Tempo real. Disponível em: <http://www.zeus.iag.usp.br/zeus_google_v3/> Acesso em 16/01/14