



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARLOS SIMOES PEREIRA

Orientadora

Profa. Dra. BRÍGIDA RAMATI PEREIRA DA ROCHA

ELEMENTOS DE SENSORES DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA

DM-23/2010

**UFPA / ITEC / PPGEE
Cidade Universitária
Prof. Jose da Silveira Netto
Belém-Pará-Brasil
2010**



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

Carlos Simoes Pereira

ELEMENTOS DE SENSORES DE ELETRICIDADE ATMOSFERICA

**DISSERTAÇÃO submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Brígida
Ramati Pereira da Rocha.**

DM-23/2010

**UFPA / ITEC / PPGEE
Cidade Universitária
Prof. Jose da Silveira Netto
Belém-Pará-Brasil
2010**

DISSERTAÇÃO

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca Central - UFPA

P436M Pereira, Carlos Simoes;

Elementos de Sensores de Eletricidade Atmosférica. / Carlos Simoes
Pereira; Orientadora, Brígida Ramati Pereira da Rocha. — 2010

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Belém, 2010.

1. Eletricidade Atmosférica. 2. Raios. 3. Descargas Elétricas.
I. Orientador. II. Título.

CDD - 22. ed. 551.56

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

ELEMENTOS DE Sensores de Eletricidade Atmosférica

Autor: Carlos Simoes Pereira

Dissertação de Mestrado submetida à avaliação da Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia.

Aprovada em 18 / 05 / 2010

Banca Examinadora:

Profª. Dra. BRÍGIDA RAMATI PEREIRA DA ROCHA
Orientadora – UFPA /PPGE /FEE

Prof. Dr. JOSÉ PISSOLATO FILHO – UNICAMP

Prof. Dr. ARTHUR DA COSTA ALMEIDA – UFPA

Prof. Dr. VICTOR ALEXANDROVICH DMITRIEV – UFPA/PPGEE

Prof. Dr. EDUARDO TANNUS TUMA – UFPA/FEE

Profª. Dra. JACI MARIA BILHALVA SARAIVA – FURG/SIPAM

Visto:

Prof. Dr. MARCUS VINICIUS ALVES NUNES
Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

KERAUNOS

*De Thor o silencio,
de Zeus que seja forão;
Mas que Indra
nos ilumine a todos.*

*Quem moldou a vida,
interfere no clima,
e causa tanto medo:
Não passa de mero aglomerado
de cargas elétricas.*

Carlos Simões Pereira

(2008)

AGRADECIMENTOS

Qualquer trabalho, sempre é o resultado da contribuição de muitas pessoas que, de forma direta ou indireta, participaram de sua realização. Aqui, registro meus agradecimentos às pessoas e instituições que tiveram participação neste.

È realmente impossível avaliar quantas pessoas contribuíram... e para esses incontáveis os meus melhores pensamentos.

Ao SIPAM, principalmente aos gerentes de Belém, por terem me liberado em parte das minhas tarefas para que pudesse me dedicar a esta pesquisa.

À Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha, da Faculdade de Engenharia Elétrica, do Instituto de Tecnologia da UFPA, orientadora deste trabalho, por ter compartilhado comigo sua experiência e seus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Arthur Almeida, da Universidade Federal do Pará (UFPA), por ter compartilhado sua grande experiência matemática, analisando proposta e interpretando à luz da matemática processos físicos e dando sugestões, além de seu grande conhecimento sobre algoritmos e linguagens de programação, importante para este trabalho.

Aos colegas do SIPAM: João Gabriel Evangelista Aleixo, Marcus Paulo Barbosa Vasconcelos, Arilson Galdino da Silva, Fabricio Arthur de Figueiredo; que em função das minhas ausências, muitas vezes assumiram tarefas que eram de minha responsabilidade, e também pelo incentivo, opiniões e ajuda constante.

RESUMO

O ambiente eletromagnético que envolve o planeta Terra tem papel fundamental na preservação e desenvolvimento de todos os seres vivos, e talvez seja uma das últimas fronteiras do conhecimento humano a ser dominada completamente antes de nos aventurarmos ao espaço exterior na busca de novas oportunidades. Esse ambiente, apesar de vir sendo estudado a um longo tempo, só agora esta sendo desbravado e melhor conhecido, tendo como ponto fundamental de apoio o uso de sensores apropriados, que possam detectar e quantificar esses efeitos elétricos, e que sirvam de base para a geração de teorias para explicação dos fenômenos subjacentes, entre os quais os sensores de eletricidade atmosférica.

Este trabalho faz uma análise ampla dos sistemas sensores de eletricidade atmosférica em uso nos dias atuais, avaliando seus modelos de funcionamentos, suas limitações e sua inteligência, concluindo por sintetizar especificações básicas para desenvolvimento de melhores sensores e definição de padrões métricos de tipos de variáveis a serem medidas para atendimentos das atuais e futuras demandas nesse campo do conhecimento.

Adicionalmente, os processos envolvidos na calibração desses sensores serão abordados, com a revisão de modelos computacionais utilizados, baseado no método dos momentos (MoM) e outros, para avaliação de campos eletromagnéticos emitidos remotamente por padrões de cargas e correntes elétricas, que sirvam de apoio e base para essas calibrações.

Palavras-chave: Eletricidade atmosférica, raios, propagação de energia eletromagnética, sensores de eletricidade atmosférica, método dos momentos, calibração.

ABSTRACT

The electromagnetic environment surrounding the planet Earth has a fundamental role in the preservation and development of the living creature, and perhaps the last frontier of human knowledge to be dominated completely, before we ventured to the space outside in search of new opportunity outside.

This environment is only now being tamed and best known, and this endeavor has as lynch pin the use of appropriate sensors that can detect and quantify these electrical effects, to serve as a basis for the generation of theories, to explain the underlying phenomena, including in this, the sensors of atmospheric electricity.

This work intends to make a comprehensive analysis of these sensor's systems of atmospheric electricity in use today, evaluating their models of operation, its limitations and its intelligence, and producing a summarized basic specifications for development of better sensors and setting standards for metric types of the variables to be measured, to cope with the currents and future demands in this field of knowledge.

Additionally, the processes involved in the calibration of these sensors will be addressed with a review of computational model based on the method of moments (MoM) and other that may be used for evaluation of electromagnetic fields emitted by remote charges patterns and electrical currents, which serve to support and basis for these calibrations.

Keywords: Atmospheric electricity, lightning, propagation of electromagnetic energy, sensors, method of moments, calibration.

SUMÁRIO

Capítulo 1	INTRODUÇÃO, 16
1.1	Motivação, 16
1.2	Objetivos, 17
1.3	Metodologia e Estrutura de Desenvolvimento, 18
Capítulo 2	O MEIO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DO PLANETA TERRA, 20
2.1.	Relações Eletromagnéticas da Terra com sua Estrela Mãe: O Sol, 20
2.2.	Fenômenos Elétricos na Atmosfera, 21
2.3.	O Circuito Elétrico Global Atmosférico, 23
2.3.1	O Circuito AC, 23
2.3.2	O Circuito DC, 25
2.4	Outros Fenômenos e Conexões, 29
2.5	O Problema da Proteção, 31
Capítulo 3	FÍSICA DOS RAIOS, 34
3.1	Produção e Separação de Cargas Elétricas na Atmosfera, 34
3.2	Tipos de Raios, 35
3.3	Processos Componentes de Descargas Atmosféricas, 39
3.4	Campos Eletromagnéticos Emitidos pelas Descargas Atmosféricas, 41
3.5	Modelos Numéricos de Canal de Raios, 44
3.5.1	Modelo Hidrodinâmico de Gases, 44
3.5.2	Modelo Eletromagnético de Antena, 45
3.5.3	Modelo de Circuito Distribuído, 45
3.5.4	Modelos de Engenharia, 45
3.5.5	O Método dos Momentos, 46
Capítulo 4	SENSORIAMENTO REMOTO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA, 47
4.1	A Propagação de Sinais Radioelétricos na Natureza, 47
4.1.1	O Modelo de Raios de Propagação e a Onda de Solo, 48
4.1.2	Teoria de Modos de Propagação, 49
4.1.3	Anisotropia da Propagação de Ondas VLF/LF, 52
4.1.4	Apêndice Lento (Slow Tail), 52
4.1.5	Atenuação de Ondas VLF/LF, 53
Capítulo 5	DISPOSITIVOS SENSORES, 56
5.1	Medidores de Campo Eletrostático, 56
5.2	Medidores de Ondas Eletromagnéticas, 59
5.3	Arquitetura de receptores, 59
5.3.1	Outras Alternativas para Receptores de Raios, 60
5.3.1.2	Receptores de Filtro Casado, 60
5.3.1.3	Receptores do tipo Homodyne, 61
5.4	Sensores Isolados, 61
5.5	Operação em Rede, 64
5.5.1	Sistemas com Localização tipo ATD ou Hiperbólicos, 65
5.5.2	Sistemas com Localização tipo DF, 66
5.5.3	LPATS IV, 66

5.5.4	PLS, 67
5.5.5	WWLLN, 68
5.5.6	ZEUS, 69
5.5.7	ATDNET, 71
5.5.8	WLS, 72
5.5.9	Los Alamos Array, 73
5.5.10	IMPACT ESP, 74
5.5.11	LS-7000, 75
5.6	Sensores ELF, 76
5.7	Sensores VHF, 77
5.8	Sensores de Relâmpago, 79
5.9	Sensores a Bordo de Satélites, 80
5.9.1	OTD- Optical Transient Detector, 80
5.9.2	LIS – Lightning Imaging Sensor, 81
5.9.3	FORTE – Fast-on-Orbit Recording of Transients Events, 82
5.9.4	LMS – Lightning Mapper Sensor, 84
5.10	Futuros Projetos Satelizados, 84
5.10	Sensores de Trovão, 85
5.11	Raios Induzidos, 85
5.12	A Detecção de Raios Intra-Nuvem, 87
Capítulo 6	A DETERMINAÇÃO DO LOCAL DE OCORRÊNCIA, 89
6.1	O Problema da Localização, 89
6.2	Medição de Azimute, 89
6.3	Medição de Tempo de Chegada, 91
6.4	Medição da Diferença de Tempo de Chegada, 92
6.5	Método Interferométrico, 94
Capítulo 7	DESEMPENHO OPERACIONAL, 96
7.1	A Rede de Detecção de Raios do SIPAM, 96
7.2	Parâmetros de Avaliação, 96
7.3	Análise do Algoritmo da RDR SIPAM, 99
7.4	Métodos de Calibração, 103
7.4.1	A Calibração dos LPATS IV, 104
Capítulo 8	NOVA GERAÇÃO DE SENSORES, 106
8.1	A Necessidade de Novas Métricas, 106
8.1.1	Taxa de raios, 106
8.1.2	Campo Eletrostático, 107
8.1.3	Momento da Corrente, 107
8.1.4	Continuing Current e M-Component, 107
8.2	Melhorias Eletrônicas, 108
Capítulo 9	CONCLUSÕES, 109
9.1	Conclusões, 109
9.2	Recomendações, 110
Capítulo 10	REFERÊNCIAS, 112

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – O planeta Terra imerso em seu escudo protetor. 20
- Figura 2 - Raios cósmicos entrando na atmosfera terrestre. 21
- Figura 3 - Da mitologia à ciência. 22
- Figura 4 – Espaço da ressonância de Schumann. 23
- Figura 5 – Espectrograma dos valores da ressonância de Schumann. 24
- Figura 6 – O circuito elétrico DC. 26
- Figura 7 - A curva Carnegie. 28
- Figura 8 - Atividade de raios conformada com a curva Carnegie (Wipple e Scrase, 1936). 28
- Figura 9 – Interações de LEP's entre a ionosfera e os cinturões de radiação. 29
- Figura 10 – Simples registros de *sferics* (Natal University, África do Sul). 30
- Figura 11 – Formação de ondas de Rossby (<http://www.answer.com>). 31
- Figura 12 – Curvas de ensaio especificadas pelo IEC (adaptado de DEHN INC). 32
- Figura 13 – Criação e separação de cargas elétricas nas nuvens de tempestade. 35
- Figura 14 – Características dos tipos de raios (adaptado de Rakov e Uman, 2003). 37
- Figura 15 – Corte vertical de imagem radar de uma nuvem. 38
- Figura 16 - Descargas elétricas nas cinzas da fumarola do vulcão Eyjajallajokull (Marco Fulle). 38
- Figura 17 - Espectro de frequências emitidas pelos raios. 41
- Figura 18 – Determinação do campo distante. 43
- Figura 19 - Didática dos tipos de raios. 48
- Figura 20 – A propagação de ondas VLF. 49
- Figura 21 – Geometria de excitação de um guia de ondas. 50
- Figura 22 – Gráficos de modos de propagação. 51
- Figura 23 – Padrão de campos para uma onda TM. 51
- Figura 24 – Forma de onda com slow tail detectada na estação Palmer. 53
- Figura 25 – Gráfico de variação para o fator de atenuação de ondas VLF (Jordan et al., 1971). 54
- Figura 26 – Diagrama esquemático de um *field Mill* (adaptado de Wahlin, 1989). 56
- Figura 27 – *Field mill* de cilindro seccionado (adaptado de Wahlin, 1989). 57
- Figura 28 – Variação do campo eletrostático em Benevides-PA. 58
- Figura 29 – Detecção de campos eletrostáticos através de fios longos. 58
- Figura 30 - Forma de onda típica de um sinal de raios. 59
- Figura 31 – Espectrograma de um sinal de raios típico. 60
- Figura 32 – Diagrama de um receptor de raios. 62
- Figura 33 – Contador elétrico digital usado em contadores de raios. 62
- Figura 34 – Diagrama completo de um flash counter. 63
- Figura 35 – O stormscope. 63
- Figura 36 – Display característico de sensores isolados (Boltek). 64
- Figura 37 – Conversão analógica/digital e processamento digital de sinais. 65
- Figura 38 – Diagrama do sistema LPATS IV. 66
- Figura 39 – Diagrama do sistema PLS. 67
- Figura 40 – O sistema global WWLLN. 68
- Figura 41 – O sistema global Zeus. 70
- Figura 42 – Diagrama do sistema ATDNET. 71
- Figura 43 – O sistema Weatherbug. 72
- Figura 44 – O sistema Los Alamos sferic Array. 73
- Figura 45 – Sensor do tipo IMPACT (Vaisala). 74

Figura 46 – O sensor LS7000. 75

Figura 47 – Esquema de um sistema ELF. 77

Figura 48 – Sensor VHF da VAISALA. 77

Figura 49 – Visualização de sensor VHF. 78

Figura 50 – Imagem de câmera de alta velocidade e gráfico. 79

Figura 51 - Carta de dados do satélite OTD. 81

Figura 52 – O Satélite TRMM e dados LIS. 82

Figura 53 – O Satélite FORTE. 83

Figura 54 - O satélite CIBOLA. 83

Figura 55 - Foguete para indução de raios. 86

Figura 56 - Descargas intra nuvem. 87

Figura 57 – Conjunto de antenas usadas para determinação de azimutes. 90

Figura 58 – O processo de triangulação. 90

Figura 59 – O processo de trilateração. 92

Figura 60 – O algoritmo ATD. 93

Figura 61 – O algoritmo Interferométrico. 94

Figura 62 – O algoritmo Inreferometrico2. 95

Figura 63 - Histograma dos dados da RDR SIPAM. 97

Figura 64 – Eficiência de detecção. 98

Figura 65 – Exatidão posicional. 99

Figura 66 – Calculo gráfico de coordenadas. 102

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01 – Dados Técnicos de sensores LPATS IV, 67
- Tabela 02 – Dados Técnicos de sensores LPS, 68
- Tabela 03 - Dados Técnicos de sensores WWLLN, 69
- Tabela 04 – Dados Técnicos de sensores ZEUS, 70
- Tabela 05 – Dados Técnicos de sensores ATDNET, 71
- Tabela 06 – Dados Técnicos de sensores WLS, 72
- Tabela 07 – Dados Técnicos de sensores Los Alamos Array, 74
- Tabela 08 – Dados Técnicos de sensores IMPACT ESP, 74
- Tabela 09 - Dados Técnicos de sensores LS7000, 76
- Tabela 10 - Dados Técnicos de sensores LS8000, 78
- Tabela 11 – Especificações e Expectativa científica para o sensor LMS, 84
- Tabela 12 – Dados em tempo real mostrados pelo algoritmo CP8000, 100
- Tabela 13 – Resumo da análise do algoritmo do CP8000,101

LISTA DE SIGLAS

AC	Corrente Alternada
A/D	Analogic/Digital
AM	Amplitude Modulation
ASIM	Atmosphere-Space Interactions Monitor
ATD	Arrive Time Difference
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
C	Coulomb
CB	Cumulus-Nimbus
CG	Cloud to Ground
DC	Corrente Contínua
DF	Direction Finder
DSP	Digital Signal Processor
EIWG	Earth-Ionosphere Wave Guide
ELF	Extremely Low Frequency (3 a 3.000 Hz)
EW	Este West
FDTD	Finite Difference Time Domain
FURG	Universidade Federal de Rio Grande
GPS	Global Positioning System
kHz	kilo Hertz
kWh	kiloWatt-hora
IC	Intra Cloud
IEC	International Electrotechnical Comission
LEP	Lightning Electron Precipitation
LF	Low Frequency (30 a 300 KHz)
LIS	Lightning Imaging Sensor
LMS	Lightning Mapper Sensor
LO	Leste-Oeste
LORAN	Long Range Navigation
LPATS IV	Lightning Processor And Tracking System IV
MATLAB	Matrix Laboratory (Software de matemática aplicada)
MHD	Magneto Hidro Dinâmica

MINOS	Main Injector Neutrino Oscillation Search
MoM	Método dos Momentos
Np/m	Neper por metros (atenuação)
NS	Norte- Sul
ns	nano segundo
pT	Pico Tesla
RDR-SIPAM	Rede de Detecção de Raios do SIPAM
RF	Rádio Frequência
RNSS	Range Normalized Signal Strength
S	Siemens (unidade de condutância)
SFERIC	Radio Atmospheric
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
Sprite	Air spirit (de comedia de Shakespeare)
SSW	Sudden Stratospheric Warming
TCS	Traveling Current Source
TE	Transverse Eletric
TEM	Transverse Electric Magnetic
TGF	Terrestrial Gamma Ray Flash
TL	Transmission Line
TLE	Transient Luminous Events
TM	Transverse Magnetic
TOA	Time Of Arrive (usado no sistema GPS)
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRA	Universidade Federal Rural da Amazônia
UNICAMP	Universidade de Campinas
UTM	Universal Transverse Mercator
UTC	Universal Time Coordinated
VLF	Very Low Frequency (3 a 30 KHz)
V/m	Volt por metro (campo elétrico)
WLS	Weatherbug Lightning Sensor

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O avanço do conhecimento da física dos raios tem mostrado um profundo entrelaçamento entre parâmetros de descargas atmosféricas com vários e importantes parâmetros da natureza que nos cerca. O clima, o estado da atmosfera, o albedo do planeta e vários processos atmosféricos parecem influenciar e serem influenciados pelo comportamento dos raios.

O estado de previsibilidade desses eventos também tem avançado, levando a uma margem de proteção bem maior que há 10 anos, já que muitos eventos de raios tem sido catastróficos para pessoas e instalações.

Os sensores de raios, baseados em tecnologia simples e barata, têm se mostrado um instrumento de pesquisa versátil capaz de competir com sistemas mais sofisticados, inclusive os embarcados em plataforma satelizada, pois esses sensores coletam os sinais mais fundamentais da descarga: os campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos emitidos em todos os processos, desde a separação de cargas, polarização e descarga propriamente dita.

No entanto a produção e disseminação desses equipamentos, que apesar de simples, estão concentrados na mão de pouquíssimos produtores de equipamentos, levando a um exagerado custo de aquisição desses sistemas, que tem inibido o desenvolvimento dessa área de conhecimento.

As métricas coletadas continuam as mesmas desde sua introdução, apesar das crescentes necessidades do estágio atual da pesquisa, parece que os poucos fornecedores desses sistemas não sentem a pressão para evolução.

Há um grande anseio da comunidade científica por sistemas mais baratos, mais eficientes e com novas métricas de aquisição e/ou derivação e este trabalho vai esclarecer e especificar a matéria como uma resposta efetiva a esse tipo de anseio.

Muitas atividades humanas se beneficiam e muitas vezes dependem de dados obtidos por sensores de raios:

- As empresas de energia elétrica podem otimizar seus serviços de manutenção e operação, além de obterem dados para proteção de circuitos elétricos.
- Os controles de aeroportos e de rotas aéreas podem evitar inúmeros acidentes.
- Em engenharia civil a proteção de infra-estrutura predial depende desses dados para melhores projetos e instalações de proteção.
- A meteorologia pode exercer a previsão a curto prazo e caracterizar a violência de tempestades.
- A Ciência pode usá-los como *proxy* para o estudo de climatologia, física da atmosfera e ambiente eletromagnético da Terra, entre outros.

1.2 Objetivos

Este trabalho faz uma revisão da tecnologia de sensores de descargas atmosféricas, identificando conexões com outras áreas afins da ciência, propiciando o desenvolvimento de pesquisas aplicadas ou puras, tendo como objetivos básicos:

- Fazer uma análise ampla dos sistemas sensores de eletricidade atmosférica em uso nos dias atuais, avaliando modelos de funcionamentos, e limitações, concluindo por sintetizar especificações básicas para desenvolvimento de melhores sensores e definição de padrões métricos de variáveis a serem medidas, para atendimento das atuais e futuras demandas nesse campo do conhecimento.
- Revisão da metodologia de visualização da propagação de ondas radioelétricas em frequências emitidas por descargas elétricas, para melhor entendermos esses processos.
- Análise da eficiência do algoritmo de detecção utilizado na Rede de Detecção de Raios do SIPAM, que serviu de base para todas as avaliações do trabalho.

1.3 Metodologia e Estrutura de Desenvolvimento

A metodologia adotada consistiu de:

- Revisão bibliográfica sobre o campo de aplicação de sensores de Eletricidade Atmosférica.
- Avaliação de publicações de fabricantes e análise de trabalhos científicos Focalizando aspectos do sensor.
- Apresentação dos modelos de funcionamento de diversos sensores.
- Avaliação da rede de detecção de raios do SIPAM.
- Proposição de arquitetura de novo sensor e de novas métricas.

No capítulo 2 a ênfase é para a descrição do meio ambiente eletromagnético que envolve a Terra, com uma visão dos campos de ciência que podem se beneficiar dessa tecnologia, e as bases de engenharia elétrica para estudo desses fenômenos.

No capítulo 3 são revisados os fatos básicos da física dos raios, apresentando-se ao final, a descrição de metodologias e modelos para simulação do canal do raio e cálculo dos valores de intensidade de campos eletromagnéticos emitidos.

No capítulo 4 é feita a revisão de diversos tópicos utilizados no sensoriamento remoto de raios, abordando o problema da propagação de ondas guiadas, e teoria de modos de propagação, aplicável ao guia de onda formado pela superfície terrestre e o início da ionosfera como ambiente de existência de *sferics* emitidos por raios.

No capítulo 5 são analisados os principais tipos conhecidos de sensores de raios e descrições de diversos modelos, operação em rede, sistemas embarcados em satélite e alguns tópicos auxiliares como o caso da detecção de raios intra-nuvem e a indução de raios.

No capítulo 6 é feita uma revisão dos algoritmos de localização de um evento de raios com comparações entre os diversos métodos.

No capítulo 7 são abordados os modelos e métodos de avaliação da eficiência operacional e de técnicas de calibração dos sistemas de detecção de raios, tendo como base uma análise do sistema da Rede de Detecção de raios do SIPAM, utilizada em pesquisas e qualificação de sistemas meteorológicos, com campo de atuação na Amazônia ocidental, enfocando a eficiência de detecção, a exatidão posicional e a eficiência do algoritmo utilizado na localização, além de sistema de armazenamento de dados.

No capítulo 8 é apresentado uma discussão sobre o que seria, do ponto de vista desta análise, uma nova geração de sensores, com avaliação do problema de coleta e/ou cálculo de novas métricas.

No capítulo 9, são apresentadas as conclusões do trabalho e com base nos resultados dessas análises, as conclusões servirão para a definição de um projeto de especificação para sistemas de detecção de raios, com características mais atuais e que procura atender os anseios da comunidade de usuários desse tipo de sistema.

CAPÍTULO 2

O MEIO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DO PLANETA TERRA

2.1 Relações Eletromagnéticas da Terra com sua Estrela Mãe: O Sol

Toda energia necessária para a vida no nosso planeta Terra vem do sol, como um fluxo de radiação eletromagnética e um fluxo de plasma de partículas ionizadas (vento solar). Não fosse a existência de um campo magnético interno próprio do planeta, esse escudo protetor não funcionaria e a Terra seria submetida a uma intensidade maior de radiação cósmica, podendo gerar apagões mais frequentes, interferir rotineiramente nas comunicações; satélites e plataformas espaciais precisariam de proteção extra. Alguns animais perderiam seus sentidos de orientação [Roach, 2004]. Essa relação é mostrada graficamente no desenho da Figura 1.

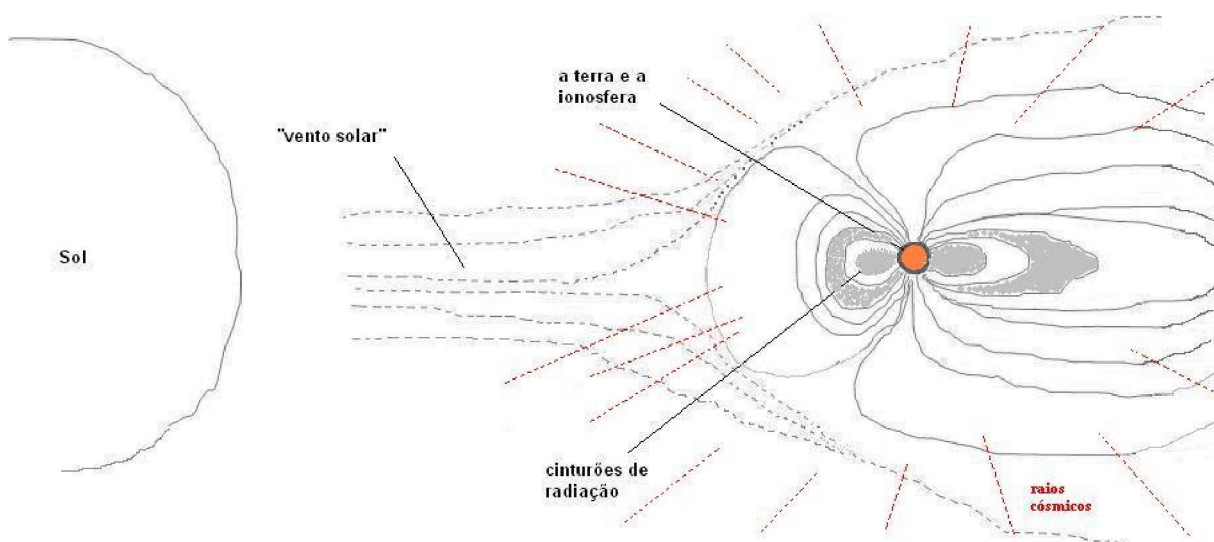


Fig. 1 – O planeta Terra imerso em seu escudo protetor.

O campo magnético terrestre age como um escudo protetor contra os excessos do sol mas permite a entrada controlada ao interior desse escudo de parte dessa energia propiciando a existência de camadas com características específicas como a íonfera e suas interações, a baixa atmosfera ou biosfera, faixa de existência de vida, todas imersas em um ambiente maior, área de atuação do escudo, a magnetosfera [Correia e Cristiano, 2008]. Assim esse ambiente é a nossa vida e ao mesmo tempo tornar-se nosso algoz.

Os raios cósmicos exercem grande influência na geração de portadores de cargas, em função de colisões com as moléculas de ar [SPATIUM-Editorial, 2003] e hoje discute-se se eles (os raios cósmicos), vindo de tão longe não são os reais causadores de toda atividade de raios no planeta. Na Figura 2 esta mostrada uma visualização de feixes de raios cósmicos colidindo com moléculas de ar.



Fig. 2 – Visualização artística de raios cósmicos chegando na atmosfera terrestre.

Também de capital importância, a incidência do vento solar, que pode modular o fluxo de raios cósmicos e até interrompê-lo completamente. A pergunta é: em estágios de alta atividade do sol, com a cessação dos raios cósmicos, cessa também a atividade de raios?

2.2 Fenômenos Elétricos na Atmosfera

Desde a mais remota antiguidade o homem tem tomado conhecimento das atividades elétricas na atmosfera principalmente através do fenômeno do raio que é definido na língua portuguesa (Houaiss & Aurelio) como uma “descarga elétrica na atmosfera entre uma nuvem e o solo acompanhada de relâmpago e trovão”.

Para efeito de paridade de termos no vernáculo (português) e em países de origem latina com os termos utilizados nos países de língua inglesa, podemos observar da definição oficial acima que raio é equivalente ao termo inglês *lightning flash*, que designa uma descarga completa, e como o canal da descarga inicial é, em cerca de 60% dos casos, usados várias vezes, a cada descarga individual é usado o nome *stroke current* ou simplesmente *stroke*, mas é usado unicamente para descargas pra terra; o nosso relâmpago, a manifestação luminosa não é normalmente usada em língua inglesa; o trovão é o *thunder*. Na língua Inglesa a palavra

lightning é um verbo, e indica coletivamente toda a atividade elétrica na atmosfera e não há uma palavra equivalente no português.

Da relação entre os humanos e as descargas elétricas na atmosfera, muitas vezes catastróficas devido ao seu poder destruidor, a manifestação desses fenômenos foi incorporado à mitologia antiga, atribuindo-se poderes divinos a esses eventos, sendo bem conhecido que o Zeus dos gregos atirava raios nos humanos e que Thor dos escandinavos dominava o trovão. Os textos dos Vedas, dos hindus, diz que todos somos filhos do relâmpago, de Indra a deusa das tempestades e que domina o tempo meteorológico, até Bep-Kororoti e sua borduna flamejante, divindade dos índios Carajás, esses momentos são como ilustrado na Figura 3.



Fig. 3 – Da mitologia à ciência.

Já no folclore popular registra-se o fogo-de-Santelmo, que é a ocorrência de efeito corona nos mastros dos navios, induzido por campos eletrostáticos nas nuvens de tempestades. A origem do nome se deve a São Elmo (São Erasmos) o santo padroeiro dos marinheiros, e sua ocorrência era tido como bom augúrio. O fogo-fátuo ou boi-tatá, ocorre nos pântanos e brejos e tem sua origem na inflamação espontânea do gás do pântano (metano), resultado da decomposição de matéria orgânica. A sua ocorrência pode influenciar a frequência de descargas elétricas na área. Outra esquisitice é o raio-bola, com comportamento alienígena, segundo algumas descrições, mas sem confirmação efetiva. Recentemente foi aventada a hipótese de alucinação induzida no cérebro pelo campo magnético de descargas intensas e denominadas fosfenos [ScienceDaily, 2010].

As coisas só mudaram com a intervenção do americano Benjamin Franklin a partir de 1770, quando pela primeira vez esses fenômenos tiveram um tratamento científico adequado. Franklin postulou que os raios eram formados pela mesma eletricidade que era armazenada e medida com as garrafas de Leyden, muito usadas na época [Morse, 2004], ou seja, eletricidade estática e que eram de dois tipos: positivas e negativas. Além do mais Franklin inventou o primeiro pára-raios, até hoje usado e que leva o seu nome.

2.3 O Circuito Elétrico Global Atmosférico

Atualmente, e usando o jargão da engenharia elétrica, a ciência reconhece a existência de um circuito elétrico global, proposto por C.T.R. WILSON em 1920 [Wilson, 1920], estabelecido entre componentes da região do escudo interior, interligando os fenômenos elétricos que ocorrem na ionosfera e magnetosfera com a superfície terrestre, com um ramo componente DC, um ramo AC [Tinsley, 2000] e um ramo de características “quase estático” entre o topo das nuvens de tempestades e a ionosfera onde ocorrem difusas descargas de plasma.

2.3.1 O Circuito AC

O circuito AC é identificado como um estado de ressonância na frequência de 7,83 Hz, que ocorre na cavidade esférica formada entre a superfície da terra e o início da ionosfera, alimentada pelas atividades globais de raios e denominada ressonância de Schumann, onde temos na Figura 4 uma mostra gráfica da situação com três componentes harmônicos desenhados.

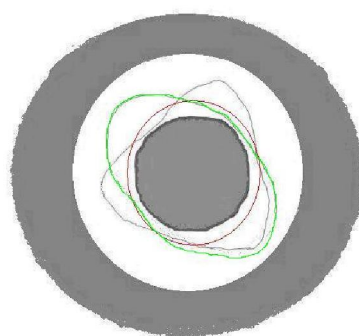


Fig. 4 Espaço da ressonância de Schumann, mostrando-se a visualização da frequência fundamental (vermelho), a segunda (verde) e terceira harmônica.

Essas oscilações foram prevista por Winfred Otto Schumann [Schumann, 1952] como uma proposta para seus alunos de calcular qual seria a frequência de ressonância em uma cavidade formada por duas esferas concêntricas e posteriormente conseguiu-se efetivamente detectar sua existência.

O modo fundamental dessas oscilações (com maior intensidade) é uma onda estacionária com comprimento de onda igual a circunferência da terra na frequência de 7,83 Hz. Os próximos modos ocorrem nas frequências: 14,3 Hz, 20,3 Hz, 27,3 Hz e 33,8 Hz. Na Figura 5, é mostrado

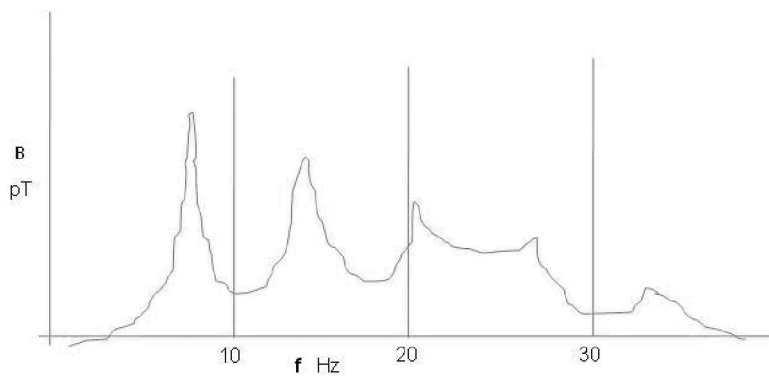


Fig. 5 Espectrograma dos valores da ressonância de Schumann.

um desenho aproximado dos gráficos normalmente obtidos em várias estações de detecção pelo mundo indicando os picos da ressonância de Schumann, com valores da frequência (f) em Hertz e valores de densidade de fluxo magnético (B) em pico-Tesla.

Os valores das frequências de ressonância podem ser calculados com o uso da fórmula:

$$f_n = \frac{c}{2\pi a} \sqrt{n(n-1)} \quad (2.1)$$

Para uma cavidade ideal, onde c é a velocidade da luz, a é o raio da Terra e n um numero inteiro (n=1,2,3 ..) representando os modos de propagação [Balser e Wagner, 1960].

Os valores de intensidade registrados para a Ressonância de Schumann podem estar sendo modulado por (ou modulando) fenômenos meteorológicos globais [Anyamba et al., 2000]; poderiam ser correlacionados, e servir como uma indicação, para os valores de temperatura global da superfície terrestre e podem ser usados para monitorar o conteúdo de

vapor d'água na alta troposfera, um parâmetro de grande influência no clima [Harrison, 2005].

2.3.2 O Circuito DC

O circuito DC compreende um ramo formado pelas fronteiras do início da ionosfera e a superfície da terra [Velinov e Tonev, 2008; Manninen e Turunen, 2006] em situações de bom tempo (sem nuvens carregadas acima) e que tem na atmosfera uma condutividade provida pela irradiação cósmica (raios gama) e varia em ciclos de 11 e 22 anos com o índice de atividade solar; na superfície o valor do campo elétrico gira em torno de 130 V/m.

Com tempo firme, esse ramo DC do circuito, nos permite inferir uma condutância líquida, G , e medir-se o fluxo de correntes da ordem de 1,5 pA/m², cuja integração por todas as áreas de tempo firme, produz globalmente correntes de até 1,5 kA.

A condutividade elétrica (σ) na superfície terrestre varia de 10^{-7} S/m em rochas de baixa condutividade a 10^{-2} S/m em argila ou calcário úmido. O valor médio para o ar em cima dos oceanos é de 3,2 S/m nas tempestades. Com tempo firme, dependendo da latitude geomagnética, quantidade de aerossol, etc. varia, logo acima da superfície, de 10^{-14} S/m até 10^{-7} no início da ionosfera 70-80 km acima.

Tempestades e chuvas eletrificadas entre as nuvens e a superfície da terra, compõem um dos ramos DC desse circuito global, onde a dinâmica é mais intensa e os portadores de carga são gerados e separados por polaridade.

Os principais componentes do circuito elétrico global estão mostrados no desenho da Figura 6, onde estão representados:

1 - O ramo com tempo meteorológico firme, pela condutância do ar, representada por uma resistência colunar R_{co} (resistência de uma coluna de atmosfera de área unitária), a corrente I e a tensão E_{io} (da ordem de 300 kV);

2 - O ramo abaixo das tempestades, representado pela corrente de descarga (raios), o campo eletrostático E_e , a precipitação e distribuído em toda extensão da nuvem as perdas por efeito corona.

3 - O ramo acima das tempestades, representado pelas manifestações luminosas (TLE) emitidas por portadores de cargas acelerados por campos quase eletrostáticos emitidos pelas descargas positivas abaixo das nuvens, e com a intermediação de raios cósmicos.

Essa atividade de cargas aceleradas acima das nuvens de tempestades, também havia sido prevista por CTR Wilson em 1925 [Wilson, 1925], mas só agora esta sendo mais bem conhecida e as pesquisas ainda estão em nível de hipóteses.

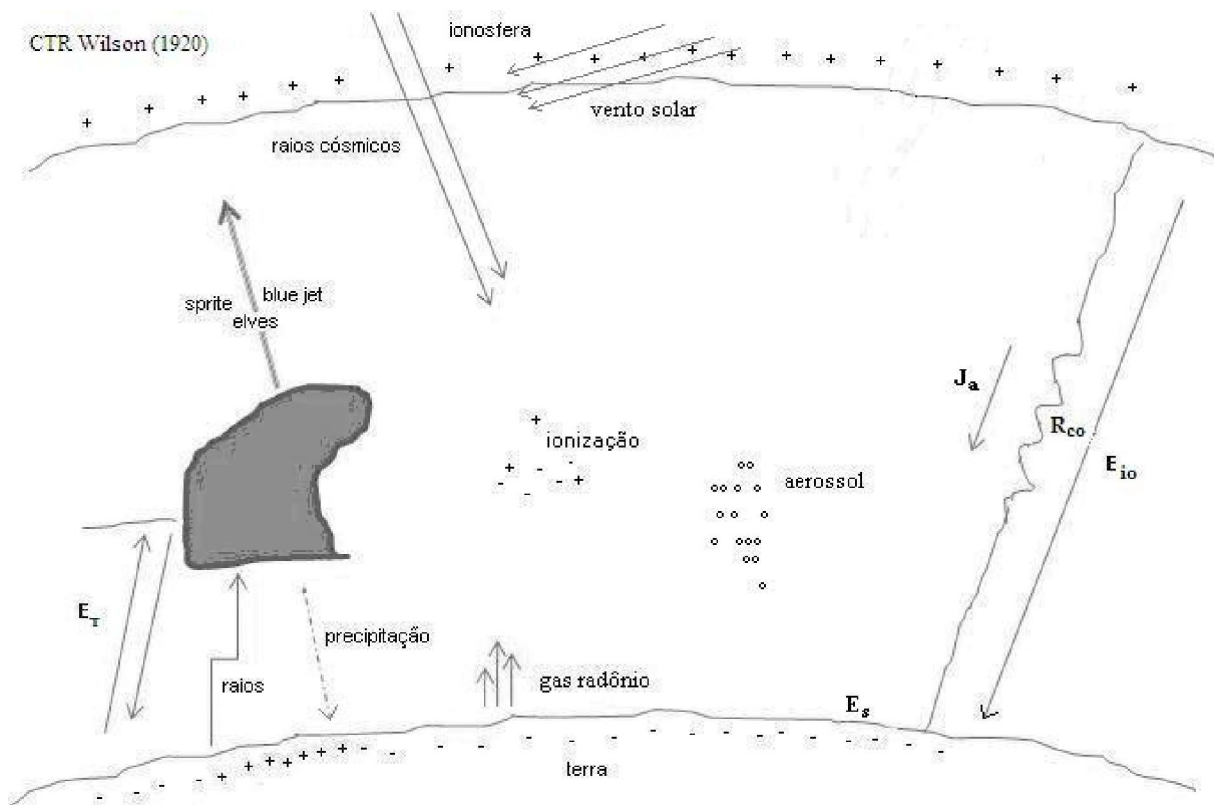


Fig. 6 – O circuito elétrico DC.

É nas nuvens de tempestades, principalmente do tipo cumulus-nimbus ou CB que ocorrem fenômenos elétricos mais conhecidos [Udo, 2006; Kenneth et al., 1998; Butts Jr, 1969; Price, 2008], como a geração e separação de cargas elétricas polarizando a nuvem onde as cargas positivas são acumuladas no topo e as negativas na base da nuvem; é claro que uma vez a nuvem polarizada pode haver atração de novos portadores de carga da região circunvizinha, reforçando a diferença de potencial. Antes da descarga há um processo de deposição de cargas denominado *stepped leader* [Frey et al., 2005] que sai da nuvem, preparando o caminho e a deposição de portadores de carga para a descarga propriamente dita; próximo à superfície da Terra há um processo de conexão com *stremears* que avançam da superfície da terra, iniciando a descarga; se houver um segundo *stroke*, um *dart leader* é

criado com subsequentes descargas no mesmo canal. Estima-se que um valor em torno de 230 Coulomb são normalmente transferidos por descarga completa [Fullekrug et al., 2006].

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

Não se sabe se essa quebra de dielétrico (se podemos denominá-lo com tal) é espontânea ou iniciada por eventos externos como raios cósmicos, segundo algumas teorias [Gurevich e Zybin, 2005; Eack et al., 2000]. A corrente de descarga emite pulsos de radiação eletromagnética em toda a gama do espectro, sendo conhecido como *sferics*, do inglês *radio atmospheric*.

O terceiro ramo do circuito DC, menos conhecido, e ainda não reconhecido como tal, envolve um fluxo de portadores de cargas na região acima das nuvens de tempestade, acelerados por campos quase eletrostáticos gerados por raios positivos (principalmente) [Fullekrug, 2010; Lefeuvre, 2008], contraposto às descargas elétricas entre nuvem e solo em regiões tempestuosas, cujos efeitos são emissões luminosas (TLE-Transient Luminous Events) na mesosfera, que atendem por nomes exóticos como: *sprite* (*air spirit* - de uma comédia romântica de Shakespeare), *blue jets* e *elves*, sendo este um acrônimo de *emission of light and very low frequency perturbation from electromagnetic pulse source*. Destes os principais componentes, *sprite* e *elves*, surgem, como já mencionado, em resposta às intensas descargas positivas para a terra +CG, principalmente, mas havendo estudos indicando como causa, também descargas negativas para terra -CG [Cohen, 2005].

Em uma contabilidade de portadores de cargas, e correntes no circuito elétrico atmosférico global, os valores medidos em tempo bom, têm que ser contrabalançados com os valores abaixo e acima das tempestades. Os valores a abaixo das tempestades são oriundos das descargas elétricas, da precipitação e de perdas generalizadas por efeito de ponta (corona).

Em 1920 o barco Carnegie, da instituição Carnegie de pesquisas dos Estados Unidos, saiu em uma viagem de pesquisas pelos mares da terra [Brown, 2004] medindo o campo elétrico em tempo bom, produzindo uma curva do valor do campo ao longo do dia em função do tempo UTC, que ficou conhecida como “curva Carnegie”, mostrado na Figura 7.

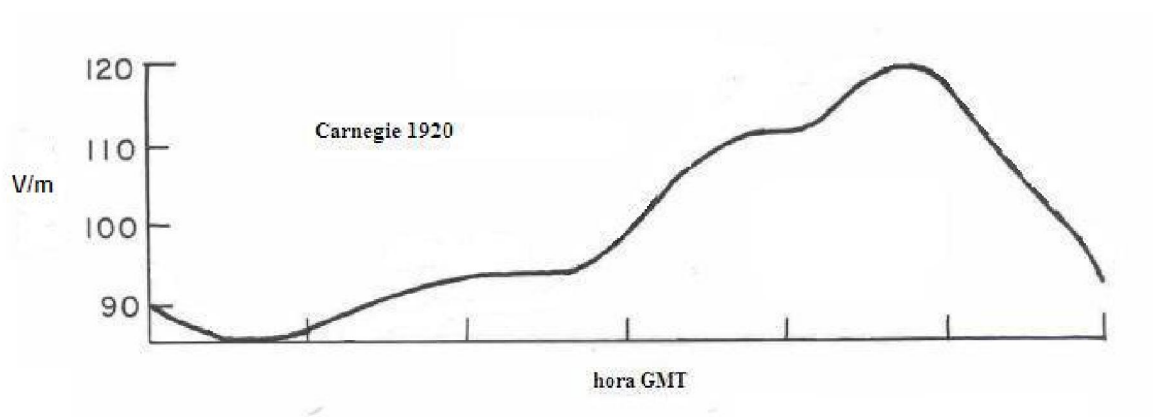


Fig. 7 - A curva Carnegie

Com a pesquisa de Whipple & Scrase em 1936 [Whipple e Scrase, 1936] foi apresentado um gráfico de atividades de raios na Europa-Africa, nas Américas e na Ásia mostrando que essas ocorrências se moldam perfeitamente com a curva Carnegie, como mostra a Figura 8.

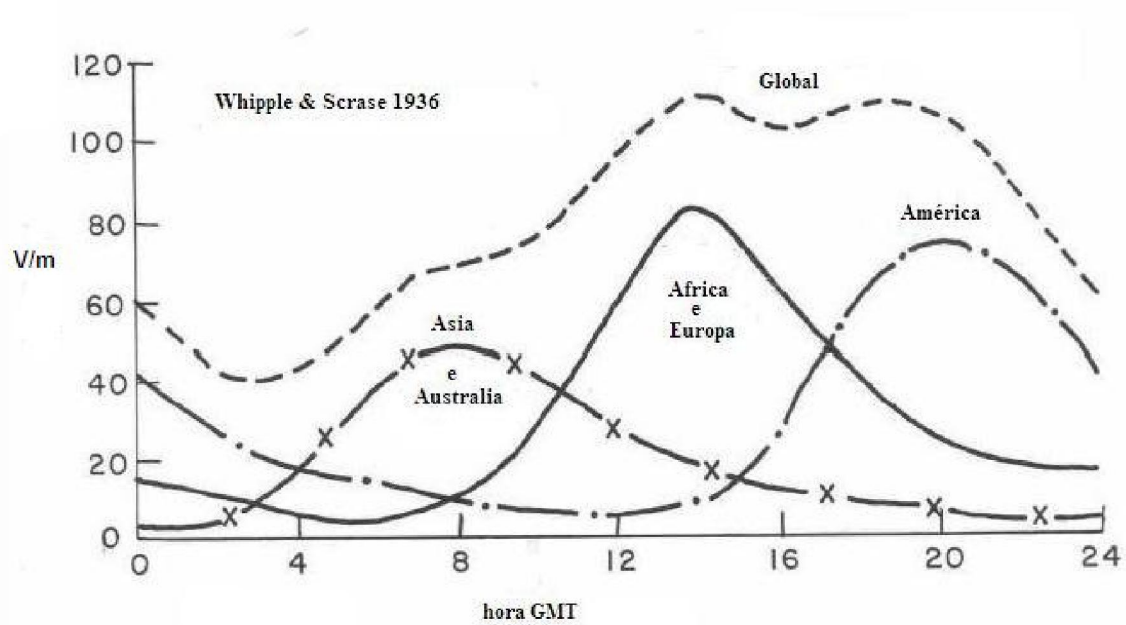


Fig. 8 - Atividades de raios conformados com a curva Carnegie.

Então as variações diurnas do campo elétrico na atmosfera são uma assinatura da atividade global de raios na terra.

2.4 Outros Fenômenos e Conexões

Na fenomenologia das descargas elétricas na atmosfera o estudo de alguns elementos são menos conhecidos, como é o caso das emissões na faixa da irradiação visível, o relâmpago, estudados por câmeras de alta velocidade tanto em terra como a bordo de satélites. Ainda menos conhecida são as emissões de raios x e gama, que parecem estar associadas ao formato tortuoso ou fractal do canal de descarga e são rotulados com TGF, *Terrestrial Gamma Ray Flash*.

Outros fenômeno apresentam conexões com outras áreas de pesquisa como é o caso da precipitação de elétrons induzida por raios, LEP do Inglês *Lightning Elétron Precipitation* [Burgess, 1992] que ocorre quando um *sferic* se propaga ao longo das linhas de força do campo magnético, quando passa a chamar-se *whistler* [Helliwell, 1990], atravessa a ionosfera e penetra nos cinturões de radiação onde interagem com elétrons de alta energia, reforçando a frente de onda original e são re-injetados na ionosfera, como simplifcadamente mostra o desenho da Figura 9.

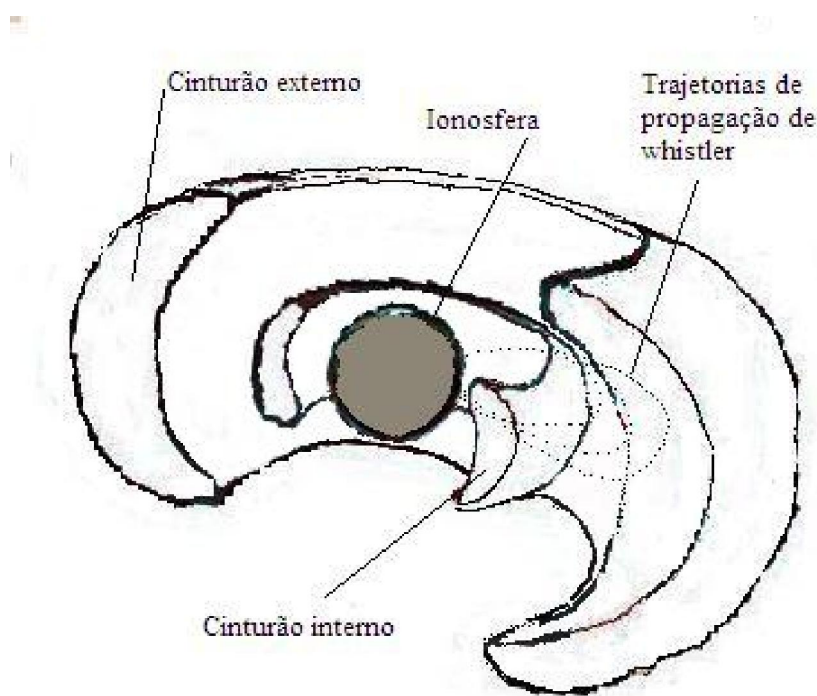


Fig. 9 - Interações de LEP's entre a ionosfera e os cinturões de radiação mostrando um possível trajeto de propagação das ondas de um *whistler*.

Provavelmente em função desses fenômenos [Inan et al., 1990], regiões de precipitação de elétrons aparecem acima de tempestades durante a duração destas. Pela

análise desses processos podemos inferir dados sobre a estrutura e funcionamento da magnetosfera.

Os *whistler* foram primeiramente reconhecidos como um *sferic* quase musical e são causados pela propagação pela ionosfera e cinturões de radiação no modo megneto-ionico no qual frequências abaixo da frequência do plasma (frequência de oscilação do plasma que forma a ionosfera) penetram na baixa ionosfera sem reflexão [Koster et al., 1955], por um efeito de duto, e se deslocam ao longo das linhas de força do campo magnético terrestre.

Esses processos também contribuem para o fenômeno das auroras polares e podem ser gatilho para iniciação de descargas elétricas subseqüentes [Hughes e Rice, 1999].

A Figura 10 mostra um registro de raios e whistlers coletado na Universidade de Natal, África do Sul. Esse gráfico é obtido calculando-se o espectro das emissões com o uso da placa de áudio do microcomputador e fazendo uso de conversão analógico/digital disponível nesse tipo de placa e pode ser visualizado por qualquer software de áudio.

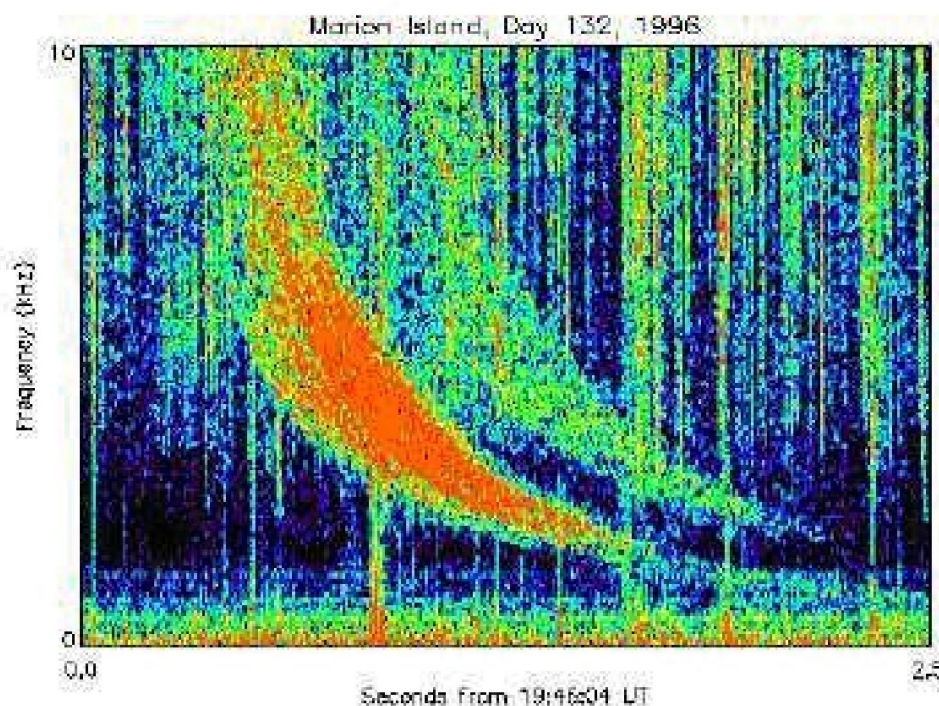


Fig. 10 - Simple registro de sferics (traços verticais) e whistlers (conjunto de traços curvos).

Ondas de Rossby [Rhines, 2009] são ondas com um componente inercial e outro de gravidade que surgem na atmosfera em função de atrito de massas de ar com o relevo e da variação do efeito Coriolis com a latitude, que se propagam horizontalmente e verticalmente para a estratosfera onde acaba se expandindo e aquecendo, fenômeno descoberto pelo projeto

MINOS do departamento de energia dos Estados Unidos pela análise da variação da taxa de criação de mesons na atmosfera, pela interação com raios cósmicos, e que atende pela denominação de SSW, de *Sudden Stratospheric Warming*. Durante o inverno, em ambos hemisférios, há aumentos bruscos de temperatura de até 40 °C, na alta estratosfera que influenciam o tempo o clima e a ocorrência de descargas atmosféricas [Osprey et al., 2009]. Na Figura 11 está mostrado o processo de formação das ondas de Rossby.

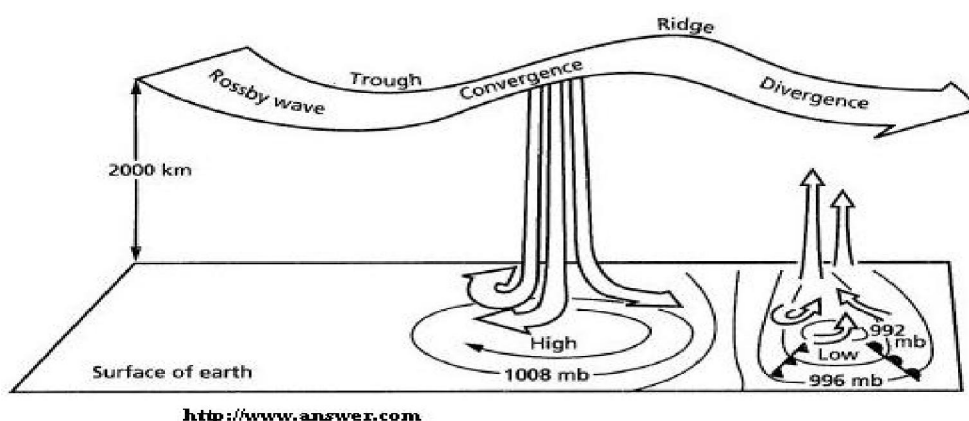


Fig.11 – A formação das ondas de Rossby

Alguns eventos de raios também podem causar aquecimento estratosférico e nesses casos especula-se que se originam condições para a ocorrência de eventos tipo *blue jets* [Fullekrug et al., 2006].

Como se observa, as atividades elétricas estão intimamente ligadas aos fenômenos que ocorrem na magnetosfera, permitindo a inferência da estruturas dessas camadas. Não foi a toa que a descoberta da região batizada de plasmafera, foi descoberta em 1919 por Barkhausen [Helliwell, 2001], através do estudo de detecção de radiações VLF, denominados *whistles*, que são alterações de pulsos de uma descarga de raios que trafega pelos cinturões de irradiação, ao longo das linhas de campo magnéticas do campo magnético terrestre.

2.5 O problema da Proteção

No estudo da eletricidade atmosférica está sempre presente o objetivo de proteção de seres humanos e infra-estruturas, sendo os parâmetros medidos pelos sistemas de detecção de

raios utilizados no estabelecimento de normas de proteção e parâmetros para teste de equipamentos elétricos como os SPD (Surge Protective Devices) [Heckler et al., 2007].

O IEC a Comissão Internacional de Eletrotécnica (International Electrotechnical Commission) através do comitê TC81 (Technical Committee 81) para proteção contra descargas atmosféricas estabeleceu a norma IEC-62.305 que estabelece uma classe I com parâmetros de tempo de subida/pico para zero de 10/350 μ s para proteção contra descargas atmosféricas direta e a norma C62.41-1991, que estabelece a forma de onda 8/20 μ s, para transitórios de chaveamento e descargas elétricas parciais, e a onda 1.2x50 μ s, para surtos de tensão.

Na Figura 12 estão mostrados os aspecto das curvas de ensaio especificadas e resumo das normas e sua aplicabilidade.

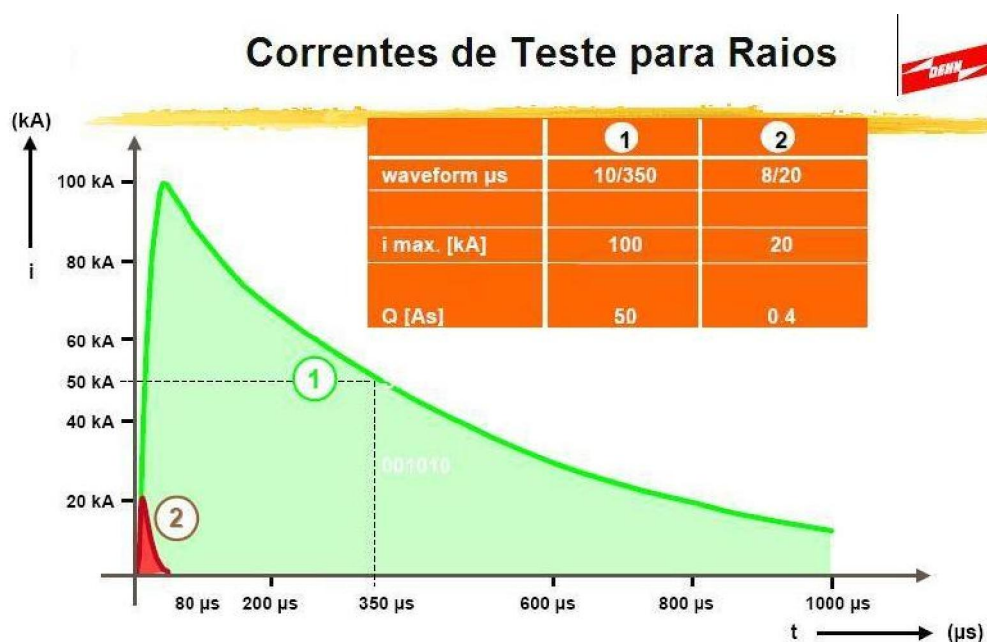


Fig. 12 - Curvas de ensaio especificadas pelo IEC (adaptação de DEHN INC).

Além das normas para teste de SPD's, a área de proteção emprega terminais aéreos (pára-raios) com localização definida por diversas metodologias. Também existem metodologias de cálculo para análise de ocorrência em sistemas elétricos, aero-geradores e estruturas altas (torres edifícios, etc.), além de regras de conduta para proteção individual.

CAPÍTULO 3

FÍSICA DOS RAIOS

3.1 Produção e Separação de Cargas Elétricas na Atmosfera

Embora até o presente não sejam muito bem entendidos e por isso as teorias são muito especulativas, os processos de produção de cargas elétricas na atmosfera, como estabelecido por Benjamin Franklin, se deve à eletricidade estática produzida por componentes das nuvens de tempestade em formação, nas violentas colisões propiciadas pelas correntes convectivas ascendentes e descendentes no interior da nuvem.

Gotículas de água são elevadas, resfriando-se e atingindo um estado de super-resfriamento, havendo também a formação de cristais de gelo. Da colisão desses cristais com as gotículas de água super-congelada, cargas elétricas são geradas: trata-se de triboeletricidade (eletricidade de contacto) onde os cristais de gelo perdem elétrons, tornando-se positivos e as gotículas de água super-congelada ganham elétrons tornando-se negativas.

Em temperaturas abaixo de um valor limite as polaridades são revertidas, explicando a existência de região de cargas positivas na base das nuvens, na área de precipitação, em área de predominância de cargas negativas.

A água super-congelada, mais pesada, acaba se acumulando na base da nuvem, enquanto os cristais de gelo, mais leves, acumulam-se no topo, com alguns bolsões tanto negativos como positivos aprisionados como regiões de portadores minoritários imersos em regiões maiores de portadores majoritários [Cotton, 1990].

O final desse processo está mostrado na Figura 13, com a representação das regiões de concentração de cargas, os processos líder e *streamers*, a região de conexão, e processos que drenam cargas para a superfície da terra: o raio e a precipitação, que são complementados por continuas perdas por efeito corona ao longo da superfície externa da nuvem.

A superfície da Terra, majoritariamente negativa, torna-se positiva logo abaixo da nuvem, estabelecendo o cenário para a ocorrência das descargas elétricas para a superfície da terra e no interior da nuvem de tempestade.

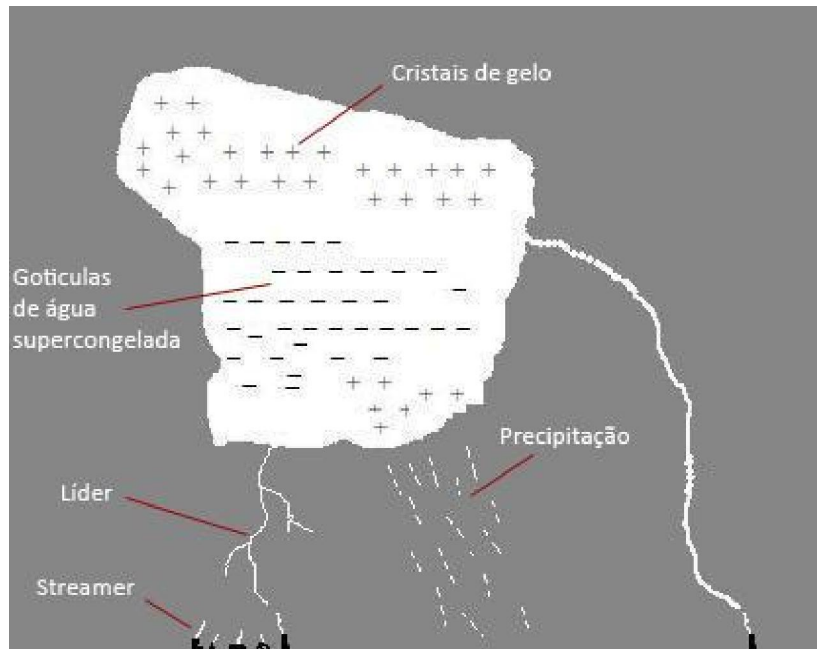


Fig. 13 – Criação e separação de cargas elétricas nas nuvens de tempestade.

Existem inúmeras outras teorias para a eletrificação e separação de cargas no interior das nuvens, entre as quais se incluem as representadas pelos resumos seguintes:

- Íons positivos elevados da superfície da terra pela convecção que por sua vez atraem íons negativos do entorno da nuvem.
- Íons presentes na atmosfera se difundem nas gotículas de chuva, com o campo elétrico existente promovendo a separação.
- Colisão e coalescência de gotículas de chuva e separação por campo elétrico.
- Captura seletiva (efeito Wilson); efeito termelétrico; potencial de contacto; etc.

Essas teorias são encontradas e melhor desenvolvidas em “Charging Mechanisms in Clouds and Thunderstorms, in The Earth's Electrical Environment” [Beard e Ochs, 1986].

3.2 Tipos de Raios

De uma maneira ampla os raios podem ser classificados em dois grandes grupos: Nuvem-Terra em que a descarga ocorre entre a nuvem e a terra; intra-nuvem em que a descarga ocorre entre regiões dentro da nuvem. Alguns eventos raros dão conta de descargas inter-nuvem ocorrendo entre regiões de duas nuvens próximas; e ainda mais raro, descargas

para o ar em que a descarga, extensão de uma descarga intra-nuvem provavelmente, se projeta para uma região no espaço em torno da nuvem. Esses dois tipos adicionais, podem ser considerados variações das descargas intra-nuvem.

Considerando-se a polaridade, os raios podem ser positivos, negativos e bipolares, estes quando ocorrem em descargas múltiplas através do mesmo canal de raios com cargas fluindo em direções alternadas, o que leva à existência de quatro (4) tipos de raios básicos, com suas abreviaturas na língua Inglesa: intra-nuvem (IC), nuvem-terra negativo (-CG), nuvem-terra positivo (+CG) e o bipolar que inicialmente pode ser qualquer um dos tipos, como esboçados em desenhos na Figura 14 [Rakov e Uman, 2003].

Os raios intra-nuvem são a maioria das descargas com uma estimativa atual de 70% do total da atividade de raios, embora por deficiência dos sensores utilizados, a maioria dos raios intra-nuvem são perdidos; não há definição de polaridade, pois os sensores não conseguem discriminar de que tipo de região (+/-) se origina a descarga, não havendo uma base para determinação da polaridade, embora isso possa ser feito. A maioria dos sistemas de sensores atribui polaridade positiva para os raios intra-nuvem, o que, segundo alguns autores pode causar um artefato cognominado “contaminação por raios intra-nuvem” para explicar um número elevado de raios positivos fluindo para a terra, com valores pequenos de corrente.

Os raios nuvem-terra do tipo negativo totalizam 70% a 90% das ocorrências em relação aos raios do tipo positivo, dependendo da região da terra considerada.

Na região equatorial estatísticas têm mostrado valores da ordem de 60% e até 50% [Almeida et al., 2008] para a relação raios negativos/raios positivos, sendo incerto o porque desse aumento de raios positivos na região equatorial.

Os raios positivos têm atraído inúmeras pesquisas por estarem associados à ocorrência de *sprites* e *elves*, que ocorrem na mesosfera, acima das nuvens de tempestades e também tem sido reportado observações que indicam que em estações frias os raios positivos pra terra, têm superados os negativos [Rakov, 2000], talvez por maior disponibilidade de cristais de gelo, que normalmente adquirem polaridade positiva no processo de eletrificação das nuvens de tempestade.

É preciso lembrar, como já mencionado no Capítulo 2 que não são só os raios que drenam cargas elétricas das nuvens; as precipitações (chuvas na nossa região) também drenam cargas elétricas e existe constante fluxo de cargas por efeito corona para regiões altas e pontiagudas na superfície da terra, de uma maneira imperceptível às pessoas, mas que podem suscitar quando ocorrem, estranhas interpretações.

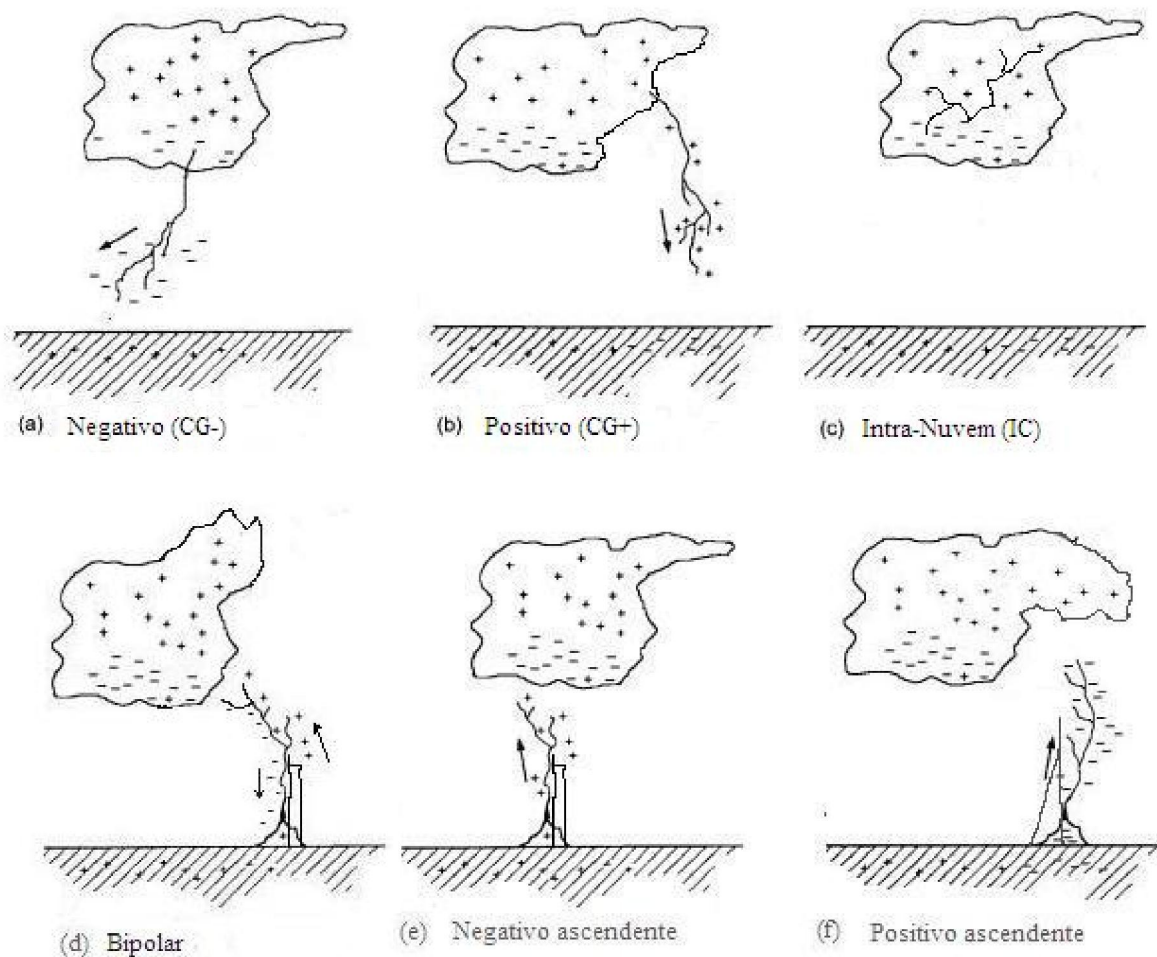


Fig. 14 – Características dos tipos de raios (adaptado de Rakov e Uman, 2003)

Como mostrado ainda na Figura 14, os raios negativos e positivos ascendentes, além dos bipolares, normalmente estão associados a estruturas elevadas como torres, edifícios e regiões montanhosas que causam perturbações nos campos eletromagnéticos circunjacentes, alterando seu comportamento e provavelmente impondo novas abordagens na proteção desse tipo de estrutura [Racchid, 2007].

Não há referências sobre, de que locais, dentro de uma nuvem de tempestade, originam-se os raios. Através de comparação de dados de radar meteorológico e ocorrência de raios [Pereira et al., 2009] onde se analisou, em que região da nuvem de tempestade a probabilidade de ocorrência de raios é maior, observou-se o padrão mostrado na Figura 15, um corte vertical de imagem de refletividade de radar meteorológico, onde com as setas brancas indicam de que região dentro da nuvem parte os raios.

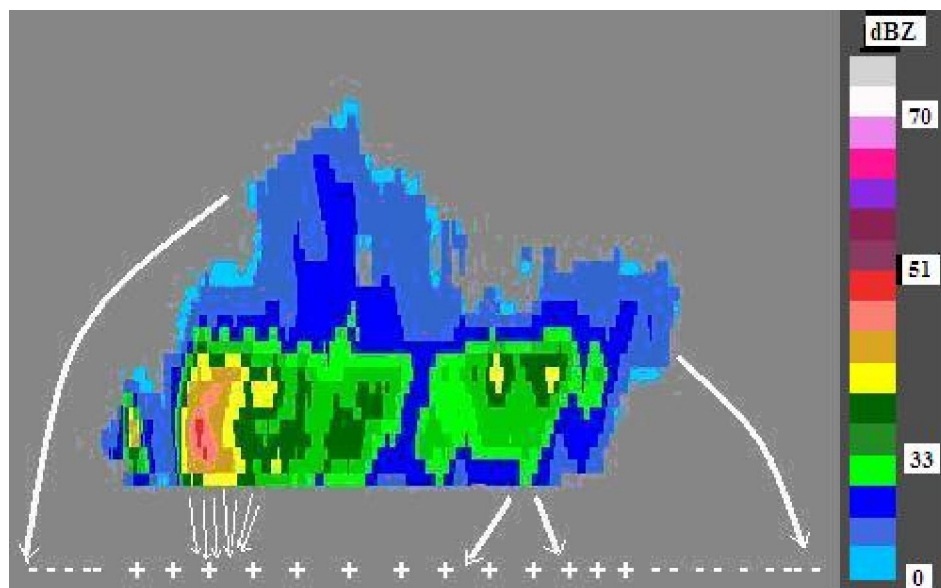


Fig. 15 – Corte de vertical de imagem de radar com visualização das áreas na nuvem propícias para ocorrência de descargas para Terra, com indicação da intensidade da corrente indicada pela grossura das linhas. dBZ é uma medida logarítmica da refletividade do radar.

A eletrificação de contacto entre gotas de água e cristais de gelo não é o único processo que leva a ocorrência de raios: As queimadas, tempestades de areia e erupções vulcânicas também geram processos de eletrificação e raios. Uma ocorrência recente é a erupção do vulcão Eyjafjallajokull na Islândia em maio de 2010, de onde um piloto de helicóptero obteve a foto da Figura 16.

As cinzas emitidas causam grandes perturbações no gradiente elétrico da atmosfera, e o processo de fraturas dos componentes na fumarola é o responsável pela geração da maioria das cargas elétricas presentes [James, 2008].



Fig.16 – Descargas elétricas nas cinzas do Eyjafjallajokull fotografado por Marco Fulle.

No entanto observou-se que nesses casos as cargas elétricas são em grande parte originadas no interior do vulcão antes de serem expelidos pela fumarola [Harrison et al., 2010].

3.3 Processos Componentes de Descargas Atmosféricas

Vários processos concorrem para a ocorrência dos raios. Após a eletrificação e separação das cargas no interior das nuvens, a separação não é perfeita havendo bolsões de cargas de uma polaridade imersas em cargas de polaridade contrária com ou sem o interstício de regiões não carregadas.

Esse ambiente é sede de descargas [Uman, 1987] internas às nuvens e que eventualmente, para o caso de -CG, levam ao desenvolvimento de um processo descendente da nuvem chamada *stepped leader*, que inicia sua jornada em direção à superfície da terra, abrindo por assim dizer um canal apresentando uma geometria fractal, onde deposita cargas elétricas, ao longo de seu desenvolvimento.

Ao aproximar-se da superfície o líder suscita a formação de *streamers*, com a afluência de cargas da superfície. À uma distancia de mais ou menos 10-50 m do solo ocorre o processo de conexão do *leader* com o *streamer*, fechando o circuito e iniciando um fluxo de cargas entre a nuvem e a terra. Um líder é um deslocamento auto-sustentado de cargas elétricas, criando um canal de alta condutividade e de grande extensão (~2km); enquanto que o streamer é um processo com uma condutividade baixa, limitado movimentação de cargas e tamanho, sendo um dos componentes do fenômeno chamado efeito corona.

Em seguida ocorrem alguns processos de arrumação das cargas remanescentes na região de onde partiu o líder, denominados processo J, identificado por variações lentas do campo elétrico da ordem de dezenas de milissegundos e processo K, identificado por variações rápidas do campo elétrico.

Como que aproveitando o canal aberto, em cerca de um terço dos casos, descargas subseqüentes ocorrem, fato esse cognominado de multiplicidade. Essas descargas subseqüentes são preparadas por outros *leaders*, aqui chamados de *dart leader*, pois fazem uma jornada direta até o solo depositando cargas ao longo do canal.

Para descargas +CG o desenvolvimento do líder inicia horizontalmente na parte estratiforme da nuvem, segundo crença popular, possivelmente auxiliado por efeito de cisalhamento horizontal de vento, continuando fora da nuvem, podendo se desenvolver

uniformemente e apresentar *steps* menos acentuados que os do tipo –CG, apresentando em 90% dos casos apenas uma descarga [Kong et al., 2008].

O desenvolvimento do líder em uma descarga intra-nuvem não é totalmente conhecido, podendo ocorrer processos líder com emissões *K-change*, a partir de áreas de cargas negativas, complementados por *streamers* positivos com emissões *J-change* oriundos de regiões de carga positiva; nos dois casos pode ocorrer a existência de *recoil leaders* ou *recoil streamers*, fazendo o caminho inverso do líder/*streamer* [Akita et al., 2008; Nag e Rakov, 2008].

O instante de início da formação do líder é objeto de intensas pesquisas, pois ocorre com valores de campo muito menores que os cerca de 2.500 a 3.000 kV/m necessários para quebra de rigidez dielétrica do ar. A hipótese mais aceita [Gurevich e Zybin, 2005] propõe o efeito de raios cósmicos, que em suas colisões com as moléculas de ar na atmosfera produzem moléculas em estado excitado que facilitariam o início da formação do líder [Lowke, 2008], por um processo de avalanche. No entanto os valores de campo eletrostático presentes nas nuvens são insuficientes; além do mais as pesquisas [Milikh et al., 2005] mostram uma diminuição da incidência dos raios cósmicos no equador magnético que não é acompanhado por uma diminuição da incidência de raios, o que leva dúvidas à possível influência desses processos no início do líder.

Essa energia adicional pode ser fornecida por processo [Pereira et al., 2009] de turbulência magnetohidrodinâmica (MHD), envolvido no transporte e transferência de energia em plasmas submetidos a incidência de campos magnéticos, e que pode fornecer energia inicial para processos de ionização na formação do líder.

A velocidade inicial para as cargas envolvidas podem ser obtidas através de descargas intra-nuvem ou outro processo como movimentos convectivos, impulsionando as cargas do líder adicionando energia inicial levando a um estado de avalanche dos portadores de carga sob o efeito combinado do campo elétrico e da turbulência MHD.

Essas violentas descargas, que atingem velocidades da ordem de 60.000 m/s promove o rápido aquecimento do ar no canal de raio à temperaturas superiores a 30.000 graus Celsius que explode em uma onda de choque, quebrando a barreira do som. Esse aquecimento gera intensa emissão de luz que denominamos relâmpago, e o processo todo é o nosso conhecido raio.

Logo após o pico de corrente de descarga (*stroke current*) na faixa de quilo Ampere, segue-se uma faixa mais ou menos fixa de corrente contínua na faixa de centenas de Ampere,

cognominada de *continuing current*, responsável pelos efeitos físicos e biológicos do raio. Modulando essa corrente continua existe picos espaçados denominados M-componentes.

A corrente elétrica que se estabelece não é um fluxo simples de elétrons como ocorre nos condutores de eletricidade de nossa residência e sim um violento fluxo de plasma eletrificado capaz de produzir reações químicas com os elementos em torno, produzindo, entre outros óxidos de Nitrogênio (NOx) que sobem e acabam reagindo com a camada de ozônio que envolve a terra suscitando efeitos tanto de aquecimento como efeitos de resfriamento [Wild, 2001].

O campo eletromagnético produzido pelos processos precursores e pela aceleração de cargas elétricas nessa sopa super aquecida que preenche o canal do raio, cobre uma vasta gama de frequências abrangendo o espectro de VLF até as microondas, passando pela faixa visível até a emissão de raios X.

A figura 17 é um gráfico dessas frequências, ressaltando as faixas mais usadas na operação de sensores de raios.

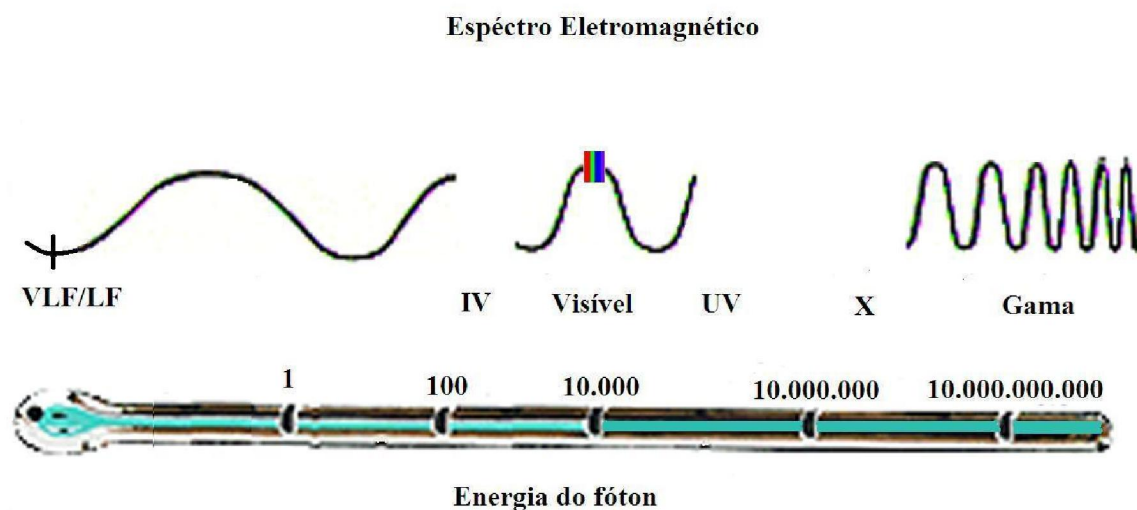


Fig. 17 – Espectro de frequências emitidas pelos raios.

É pela detecção de diferentes partes desse espectro de frequências que se baseia o funcionamento de todos os sensores de raios. Neste trabalho a ênfase é para sensores que operam na faixa de VLF/LF.

3.4 Campos Eletromagnéticos Emitidos pelas Descargas Atmosféricas

Sempre que cargas elétricas são aceleradas ou retardadas como nas descargas atmosféricas são gerados campos eletromagnéticos que se propagam nos meios naturais sendo

que as frequências na faixa de VLF/LF se propagam por longas distancias com mínima atenuação.

Esses campos são descritos pelas equações de Maxwell, podendo-se calcular seus valores em qualquer distância, a partir do ponto de ocorrência. Simplificadamente podemos caracterizar o campo irradiado por uma descarga elétrica da nuvem para o solo fazendo uso das características de uma antena monopolo de 1 quarto de onda, sobre uma superfície perfeitamente condutora, como mostra o desenho da Figura 18.

Essa representação é bem adequada para a região amazônica, uma vez que a altura media das nuvens está em torno de 7 km e os sinais estudados (*sferics*) têm um comprimento de onda da ordem de 30 km.

No processo de cálculo que se segue, obtém-se a expressão para um vetor potencial A auxiliar, em função da distribuição de corrente conhecida, obtendo-se em seguida uma expressão para o campo magnético H e em seguida por manipulação das equações de Maxwell a expressão para o campo elétrico E é obtida.

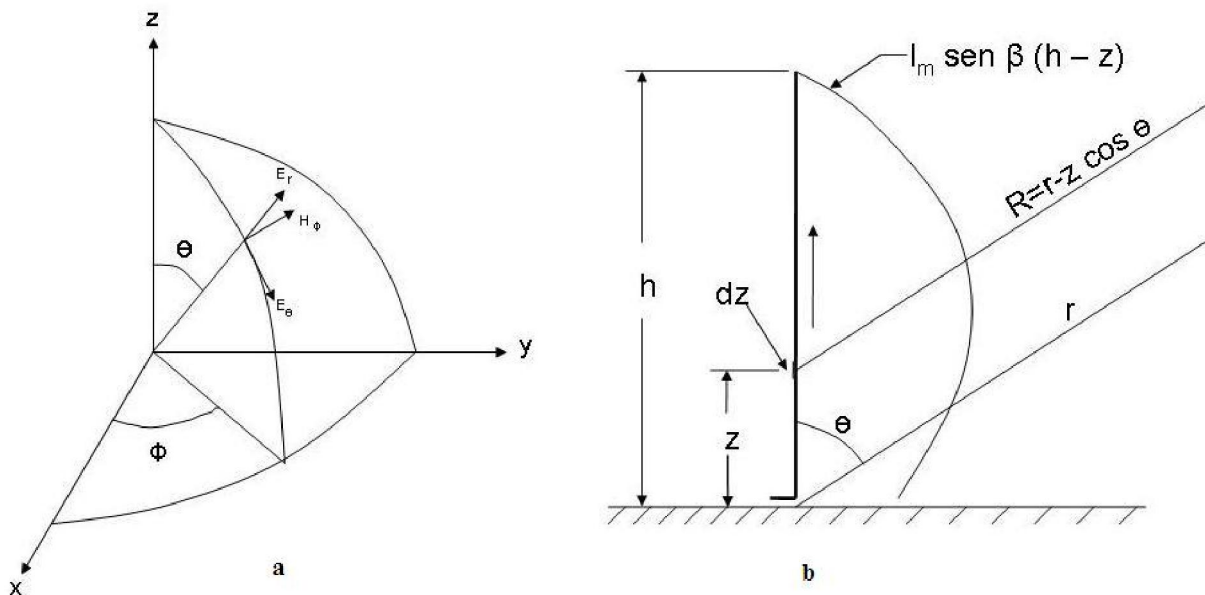


Fig. 18 - Desenhos base para a determinação do campo distante de um monopolo vertical de $\lambda/4$, em **a** está mostrado o sistema de coordenadas usados, e em **b** o monopolo com a distribuição de corrente.

Assumindo uma distribuição senoidal da forma $I = I_m \sin \beta(h \pm z)$ para a distribuição de corrente na antena [Jordan e Balmain, 1971], a expressão para o vetor potencial em um ponto P devido ao elemento de corrente Idz é dado por

$$dA_z = \frac{\mu I e^{-j\beta R} dz}{4\pi R} \quad (3.1)$$

Onde R é a distancia ao ponto P, e $\beta = 2\pi/\lambda$. O potencial vetor será

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-h}^0 \left[\frac{I_m \sin\beta(h+z)e^{-j\beta R}}{R} dz + \frac{\mu}{4\pi} \int_0^h \left[\frac{I_m \sin\beta(h-z)e^{-j\beta R}}{R} dz \right] \right] \quad (3.2)$$

Como estamos interessados no campo distante (far field), podemos fazer as seguintes simplificações:

$$\begin{array}{ll} \text{Para o componente de distancia (R no denominador)} & R \approx r \\ \text{Para o componente de fase (R no expoente)} & R = r - z \cos \theta \end{array}$$

A expressão para A_z fica

$$A_z = \frac{\mu I_m e^{-j\beta r}}{4\pi r} \left(\int_{-h}^0 \sin\beta(h+z)e^{j\beta z \cos \theta} dz + \int_0^h \sin\beta(h-z)e^{j\beta z \cos \theta} dz \right) \quad (3.3)$$

Para a condição $h = \lambda/4$, temos $\sin \beta(h+z) = \sin \beta(h-z) = \cos \beta z$, o valor de A_z é dado por

$$A_z = \frac{\mu I_m e^{-j\beta r}}{2\pi\beta r} \left(\frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \right) \quad (3.4)$$

O Campo magnético é dado pelo rotacional do vetor potencia A_z e para as condições de campo distante e corrente no eixo z de um sistema de coordenadas esférico, só existe o componente H_ϕ do campo magnético, reduzindo-se à expressão

$$\mu H_\phi = \frac{-\partial A_z}{\partial r} \sin \theta \text{ e } H_\phi = \frac{j I_m e^{-j\beta r}}{2\pi r} \left(\frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \right) \quad (3.5)$$

Para as mesmas condições o componente radial E_r do campo elétrico é zero, só restando o componente E_θ , dado por

$$E_\theta = \eta H_\phi, \text{ o que dá } E_\theta = \frac{j60 I_m e^{-j\beta r}}{r} \left(\frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \right) \quad (3.6)$$

Onde $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ é a impedância intrínseca do espaço ($\sim 377\Omega$).

3.5 Modelos Numéricos de Canal de Raios

Normalmente as equações para cálculo de campos eletromagnéticos emitidos por distribuições de correntes reais, não produzem equações fechadas, havendo necessidade de utilização de métodos numéricos para avaliação de campos e impedâncias. Nesse métodos subdividem-se os valores físicos em unidades menores onde definem-se as variáveis e por técnicas de reiteração e soma, obtém-se os valores procurados. Uma dessas técnicas é a FDTD (Finite Difference Time Domain) que discretiza as derivadas que aparecem nas equações que descrevem o campo eletromagnético, subdividindo a geometria em elementos menores e estabelece uma função simples de dependência para a variação espacial desconhecida, obtendo-se os valores de amplitude e fase, diretamente da solução das equações de Maxwell.

Outra técnica similar, o MoM (Method of Moment) discretiza os valores de distribuição de corrente em uma antena, instrumento emissor dos campos a serem determinados; aqui o campo eletromagnético é considerado como o produto de elementos de corrente por elementos de comprimento da antena (momento). O MoM pode ser utilizado com uma ferramenta preditora dos campos gerados pelas descargas elétricas, e poderá ser aplicado às atividades de calibração dos algoritmos estimadores de corrente na antena.

3.5.1 Modelo Hidrodinâmico de Gases

Para a modelagem da corrente do raio, existem modelos de dinâmica dos gases, que envolve a solução de equações hidrodinâmicas representando a conservação da massa, do momento e energia, sendo as principais variáveis fornecidas pelo modelo: a temperatura, a pressão, a densidade de massa, em função de coordenadas cilíndricas e do tempo, raio do

canal. Podem produzir a percentagem da energia total convertida em radiação, energia cinética e energia interna, resistência em função da altura e do tempo, entre outros.

3.5.2 Modelo Eletromagnético de Antena

Modelo eletromagnético que envolve a solução das equações de Maxwell estimando a distribuição de corrente ao longo do canal, a partir da qual, valores do campo eletromagnético podem ser calculados. Esses modelos usam a teoria de antenas e modelos numéricos para o cálculo dos campos às diversas distâncias, além de outras variáveis como a resistência de entrada.

3.5.3- Modelo de Circuitos Distribuídos

Modelo de circuito distribuído, como uma aproximação do modelo eletromagnético e que vê a descarga como um transitório, caracterizado pelos parâmetros do circuito sendo usado principalmente, o modelo de linha de transmissão (TL transmission line), fontes de correntes caminhanes (TCS - Traveling Currents Sources).

3.5.4 Modelos de Engenharia

Modelo de engenharia, nos quais a distribuição espacial e temporal de corrente no canal é baseada em valores observados de corrente da base do canal, medida por descargas induzidas; pela velocidade de propagação para cima da frente de onda de corrente e o padrão de luminosidade no canal, medidos por câmeras de alta velocidade. Esses modelos estimam correntes a uma dada altura arbitrária ao longo do canal e a um tempo também arbitrário, sendo representada como uma função da altura, tempo, velocidade de propagação da frente de corrente e corrente na base do canal.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo, baseado em antena de fio com aplicação de MoM, para os trabalhos de avaliação de campo para estimativa de corrente de raios, que entre outros usos servira para uma aferição da calibração do algoritmo que calcula a corrente do raio.

3.5.5 O Método dos Momentos

Da teoria de antenas sabemos que só há irradiação se houver aceleração de cargas elétricas, o que nos leva a concluir que, o que importa mesmo é a taxa de variação de corrente, ou seja: corrente x elemento de comprimento, ou momento da corrente.

O Método dos Momentos, aplicado a problemas de irradiação a partir de antenas tem como base teórica justamente essa realidade, dividindo a antena em segmentos e calculando o vetor $I \Delta m$ do produto escalar da corrente no elemento com o vetor elemento de antena, que incorpora a geometria desta. A intensidade desse momento é estimado com o uso de funções de Green, um conjunto de funções para solução de equações integro-diferenciais não homogêneas, que incorpora o acoplamento eletrostático entre os elementos.

Um conjunto de funções básicas para a representação da distribuição de corrente é utilizado, sendo as mais simples funções retangulares como aproximação da função delta de Dirac. Funções triangulares, apesar de introduzirem mais complexidade ao método aproximam os valores simulados de uma maneira mais uniforme.

Em geral o momento n é obtido pela integração do produto da função de Green pelo n elemento da função básica utilizada. Um conceito estranho ao método é que são calculados parâmetros da antena que dependem do campo próximo, com a impedância, mas só usa funções de Green que incorporam os elementos do campo distante.

CAPÍTULO 4

SENSORIAMENTO REMOTO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA

O sensoriamento remoto de descargas atmosféricas está baseado na detecção de campos eletromagnéticos emitidos por processo elétricos e avaliação dos efeitos da interação desses campos com os elementos físicos da atmosfera terrestre. O conhecimento desses mecanismos fornece informações sobre os processos de descargas na atmosfera e possibilita a inferência de parâmetros que caracterizem o estado da atmosfera.

4.1 A Propagação de Sinais Radioelétricos na Natureza

Durante o deslocamento da energia eletromagnética na natureza, que denominamos propagação há uma grande dependência da frequência, em alguns casos essa propagação ocorre como se estivesse em espaço livre, ou seja: em uma região livre de cargas elétricas e correntes, que é uma definição irreal, pois mesmo em situação de “espaço livre” sempre existe a influência do campo magnético terrestre, os efeitos de “lente” por eventuais regiões de tempestades, focos de ionização, etc. Nas fronteiras desse espaço livre (superfície da Terra, início da ionosfera) ocorre interação com a matéria, quando surgem vários fenômenos como a reflexão, e a refração, impondo mudanças na direção de deslocamento dessa energia: dizemos então que como decorrência dessas interações as equações que governam o comportamento do campo eletromagnético, devem obedecer a condições de contorno, que são imposições a serem observadas pelas equações que descrevem essas entidades. Essas condições de contorno também dependem da frequência com que essa energia se desloca.

As descargas elétricas e seus vários processos associados geram energia em uma amplitude muito extensa de frequências: muito baixas (ELF, VLF, LF), medias (HF), alta (VHF, UHF), frequências na faixa do visível, além de frequências de raios x e raios gama. Grosso modo podemos afirmar que energias com frequências altas não são refletidas pela ionosfera, as medias são refletidas e as de baixas frequências são guiadas.

A grande maioria da energia gerada pelas descargas atmosféricas concentra-se na faixa de frequências muito baixas e como o espaço em que se propagam está compreendido pelas superfícies da terra e o início da ionosfera, dizemos que existe um guia de ondas formado por

essas superfícies, a EWG (earth-ionosphere wave guide), por onde esses “sinais” (*sferics*) se propagam. No intuito de visualizar o deslocamento dessas energias são usadas técnicas didáticas, como o conceito de raio e de onda de solo, que foram desenvolvidos para altas frequências, mas que são inconvenientes para visualizar ondas guiadas de baixa frequência.

Uma faixa de frequências que vem obtendo atenção é a faixa em torno de 10 MHz, pois responde em bom nível pela atividade intra-nuvem e pode sinalizar o início dos líderes (*stepped leaders*).

4.1.1 O Modelo de Raios de Propagação e a Onda de solo

Para a visualização do deslocamento da energia eletromagnética existe uma representação didática que visualiza a frente de onda como um vetor perpendicular à frente, tendo como direção a mesma do deslocamento da energia como mostrado na Figura 19, abaixo:

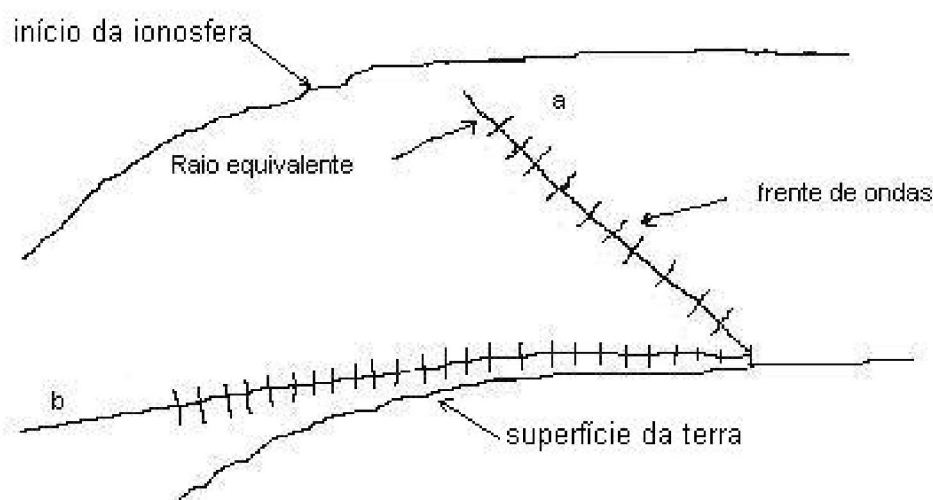


Fig. 19 – Didática dos tipos de Raios de Propagação

Onde as frentes são representadas por um comprimento de onda e perpendicular a ela, o raio que as representa. No caso “a” a frente de onda não sofre nenhuma influência até encontrar a descontinuidade representada acima, onde provavelmente se refletirá, sendo cognominado de onda espacial ou *Sky wave*, em inglês; na representação “b” mostramos um “raio” quase tangente à superfície e neste caso observamos que a parte de cima da frente de onda está livre de qualquer influência, o que não acontece com a parte de baixo que terá que interagir com a terra e por isso é refratada, acompanhando mais ou menos essa superfície, mas como a razão de caída da superfície é maior que a razão de refração, a frente de onda se liberta da influência

da terra e continua sua trajetória, sendo este fato, denominado de onda de solo ou de superfície, *ground wave* em inglês.

Observe-se que esse modelo subentende que a frequência é alta, como sugere o tamanho da onda, representado pelo seu comprimento de onda, em relação ao espaço em que está se propagando.

Situação bem diferente ocorre nos casos em que a frequência é baixa, ou em que o comprimento de onda tem um tamanho quase igual ao espaço em que está se deslocando, como podemos inferir pela Figura 20, abaixo:

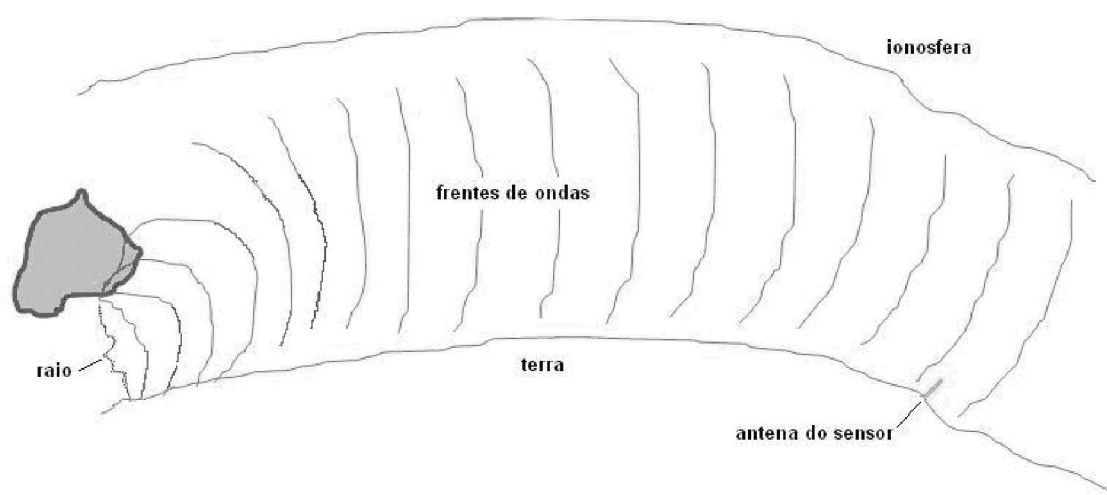


Fig. 20 – A propagação de ondas VLF

Podemos inferir rapidamente que a ficção “reflexão” e “onda de solo” não são convenientes para descrever esse tipo de propagação. Neste caso a frente de ondas vai “kicando” na superfície de cima e na superfície de baixo, sendo obrigada a seguir a direção dessas superfícies, quando neste caso dizemos que a onda está sendo “guiada”, ou seja, as duas superfícies agem como um guia de ondas.

4.1.2. Teoria de Modos de Propagação

Como as ondas eletromagnéticas “guiadas” são obrigadas a satisfazer as condições de contorno [Cummer, 2002] tanto na parte de cima como na de baixo, as equações que governam esses deslocamentos se modificam drasticamente com relação às equações que descrevem uma onda no “espaço livre”, onde não existem essas restrições.

Na Figura 21 é mostrada uma frente de onda deslocando-se em uma direção que faz um ângulo com a linha média do guia de ondas formado por duas superfícies paralelas excitando-o; situação muito semelhante à excitação de um determinado modo de propagação de um *esferic*, excitando o guia de ondas formado pelas superfícies da terra e superfície inferior da ionosfera, condição normal de propagação de ondas VLF/LF, emitidas por correntes de descargas de eventos de raios.

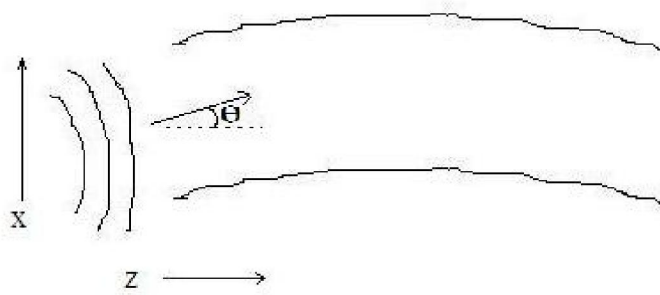


Fig. 21 – Geometria de excitação do guia de ondas terra-ionosfera.

O campo elétrico incidente em uma das superfícies [Wood, 2004] do guia pode ser dado por

$$E_y^i = E_0 e^{-jk(x \cos \theta - z \sin \theta)} e^{j\omega t} \quad (4.1)$$

Onde $k=2\pi f/c$; com f =frequência da irradiação e c =velocidade da luz.

Para satisfazer as condições de contorno para uma superfície perfeitamente condutora, o campo refletido é dado por

$$E_y^r = -E_0 e^{-jk(x \cos \theta + z \sin \theta)} e^{j\omega t} \quad (4.2)$$

e o campo total fica

$$E_y^t = j2E_0 \sin(k2z \sin \theta) e^{(j\omega t - kx \cos \theta)} \quad (4.3)$$

que para uma superfície perfeitamente condutora a uma altura h (ionosfera) produz

$$\frac{2\pi f}{c} \cdot h \cdot \sin \theta = n\pi \quad (4.4)$$

h é a altura da ionosfera e n é um numero inteiro.

Essa equação é conhecida como equação de modo e estabelece as condições para a existência de uma onda deslocando-se no guia de onda.

Nestes casos a energia é discretizada, só podendo existir em números inteiros de modos de propagação, havendo uma frequência de corte, abaixo do qual não há disseminação de energia e o modo mais privilegiado é o modo fundamental, que sofre pouca atenuação, sendo os modos subseqüentes àquele, bastante atenuados e atrasados.

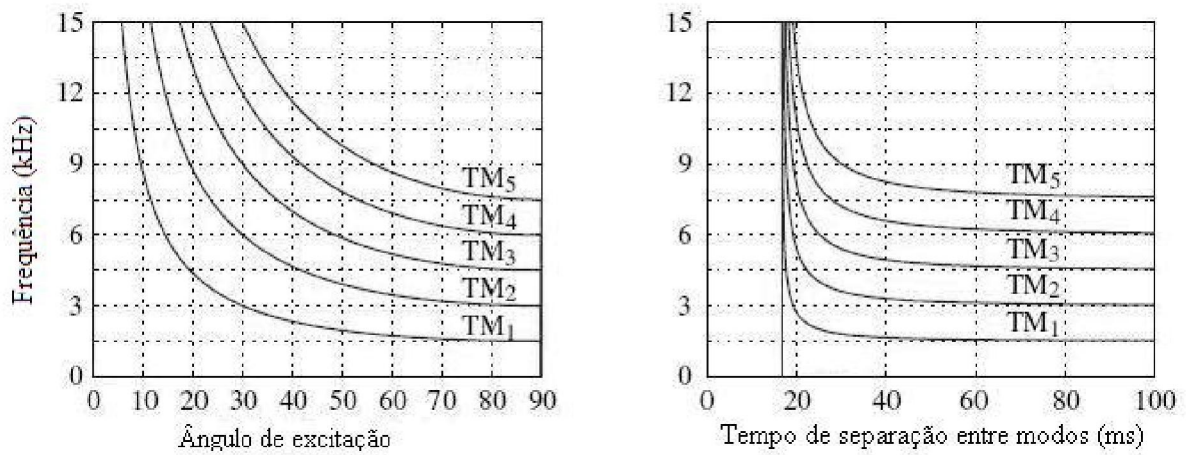


Fig. 22 - Gráficos de modos de propagação.

Nos gráficos da Figura 22 vemos famílias de curvas obtidas a partir da equação fundamental dos modos e das características de atenuação, onde podemos ver que há um atraso de injeção entre os modos, que é inerente ao processo físico de distribuição da densidade de energia transportada, e não uma consequência de multi-caminhamento como normalmente é apresentado.

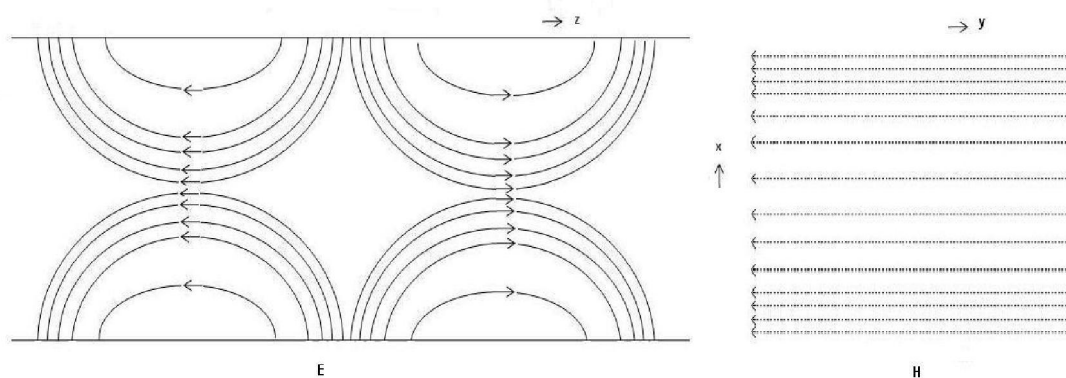


Fig. 23 - Padrão de campos para uma onda TM, o modo de propagação dos *sferics*.

Na Figura 23 esta desenhada uma representação do padrão de campos elétrico (E) e magnético (H) para uma onda TM em um guia de ondas plano, situação teórica mais próxima de um sinal de raios no espaço entra a superfície da Terra e o início da ionosfera, propagando-se na direção z.

As direções dos campos do tipo TM é função da característica das descargas nuvem-terra em que uma corrente elétrica descendente estabelece campo elétrico com polarização vertical e campo magnético horizontal, evidentemente há a emissão de campos do tipo TE, principalmente no caso de descargas intra-nuvem de desenvolvimento horizontal.

4.1.3 Anisotropia da Propagação de Ondas VLF/LF

Analizando-se mapas de ocorrência de raios em um dada região, percebe-se um efeito anisotrópico leste-oeste na propagação de ondas VLF/HF, estabelecendo grau de assimetria [Lynn e Crouchley, 1967] em função da direção em relação às linhas de campo magnético terrestre, causando maior atenuação nas propagações na direção leste-oeste que na direção oeste-leste, fato que é observado nos mapas de densidade de raios, obtidos para a área de cobertura da RDR-SIPAM.

4.1.4 Apêndice Lento (*Slow Tail*)

Alguns *sferics* detectados a longas distâncias apresentam um apêndice peculiar no final da forma de onda do sinal detectado, com normalmente um ciclo e meio de frequências mais baixas que as da forma de onda principal denominado *slow tail* (calda lenta). Tem se observado que essa característica provavelmente se deva à influência do modo de propagação TEM, superposto ao modo TM preponderante ou a algum processo peculiar de interação com o meio. A distância do fim da forma de onda principal para o início do *slow tail* apresenta valores proporcionais a distancia entre o ponto de detecção e a ocorrência do evento [Sukhorukov, 1992].

A análise espectral desse componente poderá levar a um melhor conhecimento da interação de fenômenos elétricos com a atmosfera e servir como método de estimativa da distância do ponto de ocorrência da descarga.

Na Figura 24 esta mostrado o desenho característico desse fenômeno com um evento detectado na Estação Palmer, na península Antártica, utilizada pelo programa LTER (Long Term Echological Research).

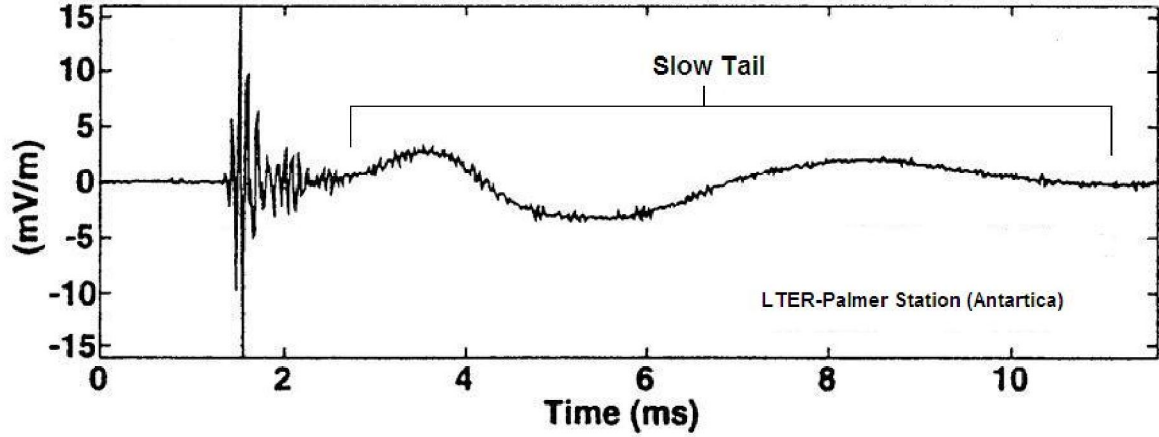


Fig. 24 – Forma de onda apresentando *slow tail* registrada na Estação Palmer.

4.1.5 Atenuação de Ondas VLF/LF Guiadas

A atenuação de ondas guiadas pode ser obtida considerando-se as condições de contorno para os componentes tangenciais do campo magnético H com valores iguais a zero em $x=0$ e $x=h$. A densidade de corrente fica

$$J_{sy} = H_z = \frac{n\pi C_1}{\omega\mu h} \quad (4.5)$$

onde C_1 é uma constante aleatória e μ é permeabilidade.

A perda em cada superfície é dada por

$$\frac{1}{2} J_{sy}^2 R_s = \frac{n^2 \pi^2 C_1^2 \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}}{2\omega^2 \mu^2 h^2} \quad (4.6)$$

Onde R_s é a resistência da superfície considerada e σ é a condutividade.

Calculando-se a potência transmitida na direção de propagação por unidade de área, através do vetor de Poynting, o fator de atenuação α em Np/m (Neper/metro) é dado por

$$\alpha = \frac{2n^2\pi^2\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}}{\beta\omega\mu h^3} \quad (4.7)$$

Onde β é a parte imaginária da constante de propagação γ também chamada constante de variação de fase dada por

$$\beta = \sqrt{\omega^2\mu\epsilon - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2} \quad (4.8)$$

Onde ϵ é a permissividade.

No gráfico da Figura 25 está mostrado a variação do fator de atenuação com a frequência para ondas TE TM e TEM no em torno da frequência de corte

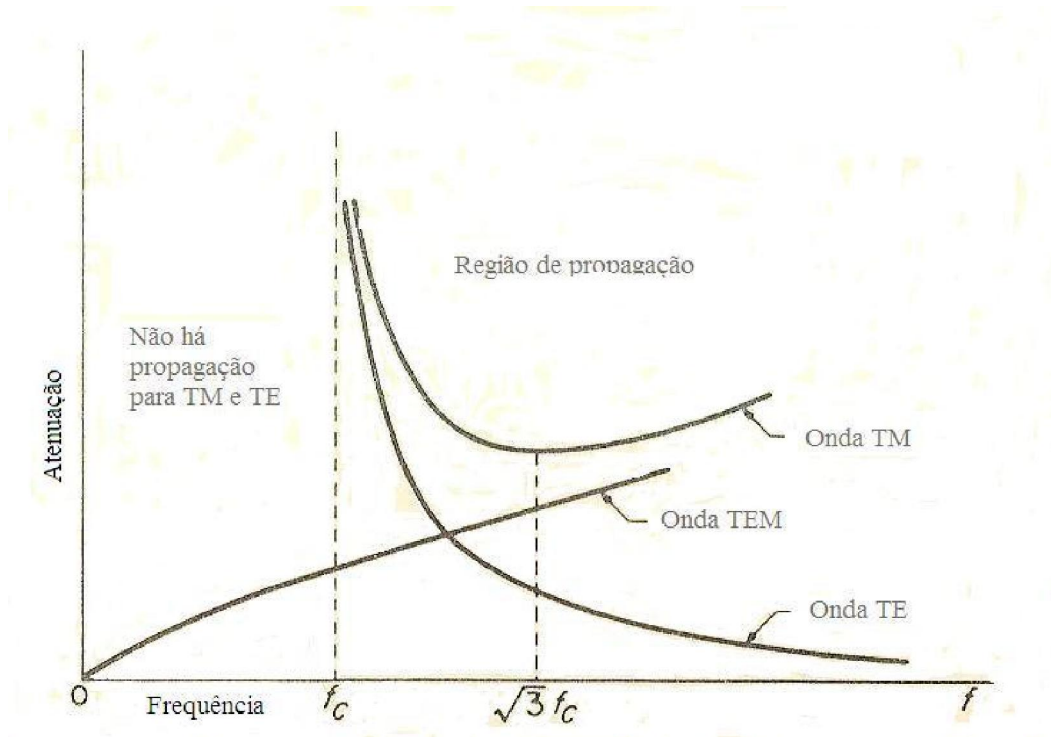


Fig. 25 - Variação do fator de atenuação para ondas TE TM e TEM (de Jordan ET al.,1971).

Além dos efeitos na propagação de ondas eletromagnéticas na atmosfera, são de especial interesse para o sensoriamento remoto dos raios, os processos associados à criação de dutos na ionosfera por descargas elétricas de baixa frequência, os *whistlers*, os processos

devidos a pulsos de correntes em descargas intra-nuvem conhecidos como *elves* e campos quase-estáticos decorrente do excesso de cargas restante nas nuvens por efeito de descargas nuvem-terra, que dão origem ao fenômeno *sprite*.

CAPÍTULO 5

DISPOSITIVOS SENSORES

5.1 Medidores de Campo Eletrostático

Mesmo sem a existência de nuvens, ou seja em tempo firme, existe um campo elétrico estabelecido, que na superfície da Terra atinge valores em torno de $+100 \text{ V/m}$, em áreas mais poluídas esse valor pode subir para até $+400 \text{ V/m}$. Com a aproximação de nuvens de tempestades ocorrem inúmeras variações no campo medido. Em baixo das nuvens de tempestades ocorrem mudanças bruscas, durante as descargas de raios. Os campos medidos nessas circunstancia podem ser maiores que 10 kV/m [Pereira et al., 2009; Campbell Scientific Inc, 2006], e podem começar a ocorrer descargas com valores de 2 kV/m , embora o valor de quebra da rigidez dielétrica do ar seja de 3.000 kV/m . Essas medições revelam razão de carga e descarga, polaridade e tempos de regeneração de campo elétrico, entre outros parâmetros.

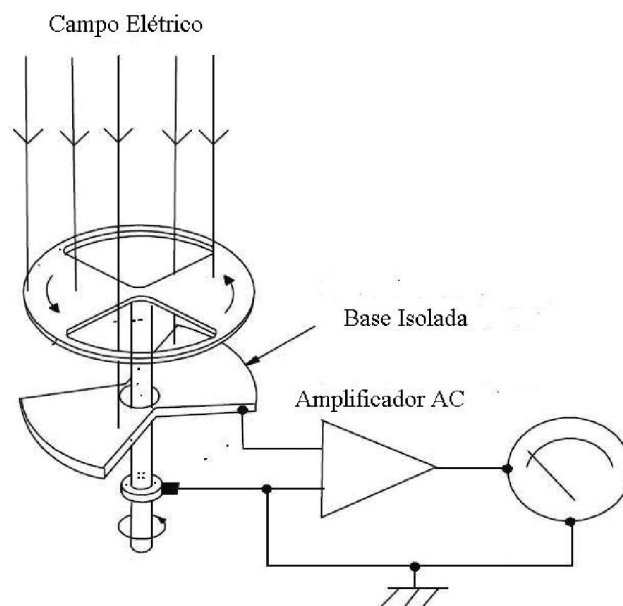


Fig. 26 - Diagrama esquemático de um *fieldmill* (adaptação de Wahlin, 1989).

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

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

e o campo elétrico é dado pelo gradiente $E = -\nabla V$ ou $E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$ (5.1)

Podemos medir esse campo (o *field*), como mostra a Figura 26 [Wahlin, 1989], pela indução de cargas em placas e medição da corrente de descarga, que é proporcional ao valor do campo; esses equipamentos receberam o nome de *field mill*, ou moinho de campo, em alusão ao processo de *shield* da placa indutora pela rotação de palheta (o mill) acima da placa coletora.

Outro tipo de *field mill* como mostrado na Figura 27, usa um cilindro seccionado que gira expondo alternadamente as faces seccionadas à direção positiva e negativa do campo respectivamente; esse arranjo tem a vantagem de poder indicar a direção do campo.

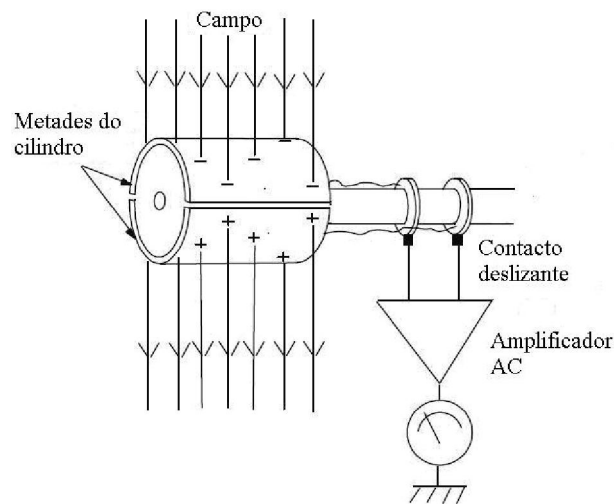


Fig. 27 - Field mill de cilindro seccionado (adaptação de Wahlin, 1989).

A Figura 28 mostra a variação do campo elétrico em Benevides, no Pará, medido durante o 1º Experimento de Raios Induzidos na Amazônia, no dia 15/03/2007 das 12 às 24hs, com um Maximo positivo de 10kV/m e um Maximo negativo de 20kV/m, onde os picos negativos abaixo de -5 kV/m indicam ocorrência de raios na área de alcance do *field mill*, até cerca de 60 km do local de instalação

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

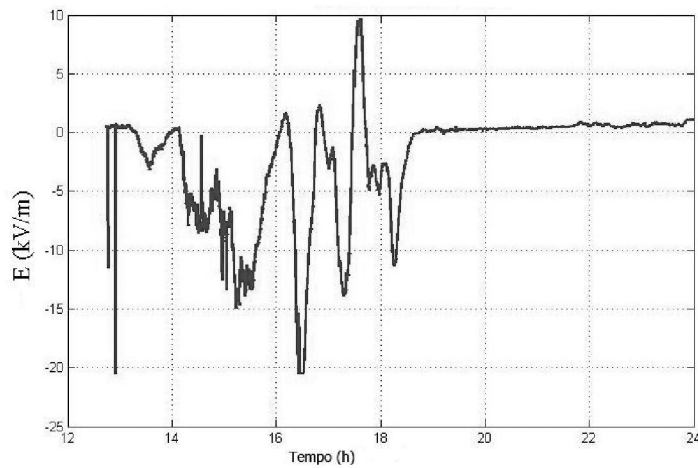


Fig. 28 - Variação do campo elétrico em Benevides-PA (48.56°W e 1.24°S) em 15/03/2007

Outro dispositivo simples para medição do campo eletrostático consiste num longo fio elétrico a uma distancia h do solo, ligado à um eletrômetro e a um aparelho registrador. Apesar de o mecanismo de coleta de cargas se dar por indução esses dispositivos são também denominados de antena lenta, em função do fato de ditas antenas não irradiarem/captarem

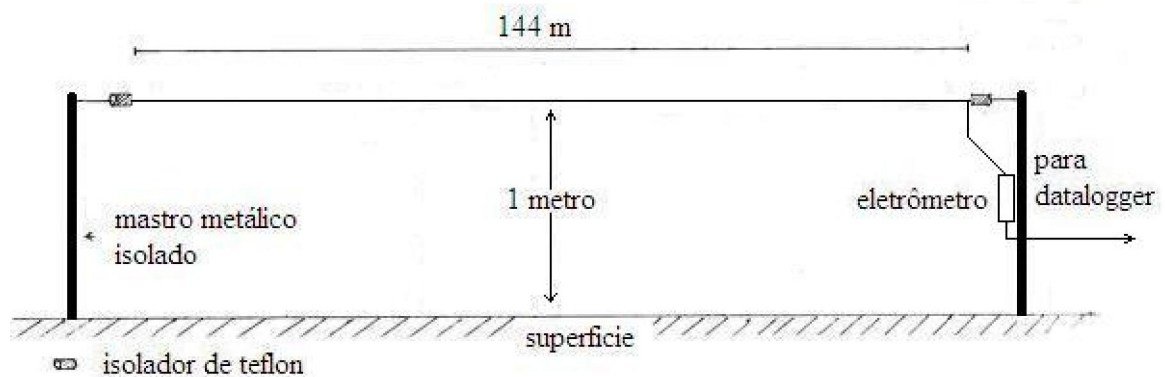


Fig. 29 - Detecção de campos eletrostáticos através de fios longos.

campos naturalmente, necessitando de excitação para funcionarem, tornando essas estruturas, por esse motivo, em bons coletores de cargas elétricas, possuindo características de isolamento às interferências externas. A Figura 29 mostra simplificada essas medições.

5.2 Medidores de Ondas Eletromagnéticas

Os medidores de ondas eletromagnéticas são receptores que captam os *sferics* emitidos pelos raios. Essas informações são processadas por componentes de software que calculam a localização do evento, e em seguida, usando a distância e as prováveis perdas de propagação estimam o valor da corrente estabelecida no canal de descarga do raio. Os *sferics* emitidos pelos raios têm duas grandes divisões: os raios nuvem-terra emitem onda do tipo TM, enquanto os raios intra-nuvem emitem ondas TE, ou em relação ao campo elétrico estes têm polarização horizontal e aqueles vertical. Todos os sensores têm seu sistema de antenas na polarização vertical, daí a baixa eficiência de detecção para raios intra-nuvem.

Para a determinação das coordenadas de ocorrência do evento de raios, alguns sensores usam um algoritmo hiperbólico de diferença de tempo de chegada cuja precisão depende da resolução do marcador de tempo, normalmente o sistema GPS; outros calculam o azimuth de chegada da energia eletromagnética (DF) cuja precisão depende do número de antenas usadas, da direção de chegada da energia e de dados do correto posicionamento dessas antenas; outros usam ainda uma combinação desses dois métodos.

Os sistemas mais simples, utilizados em estações únicas usam um esquema de terminação do azimuth e estimam a distância em função da intensidade do sinal.

5.3 Arquitetura de Receptores

O sensor de raios é um receptor do tipo AM (Amplitude Modulation) em que os pulsos eletromagnéticos emitidos pelos raios são detectados e através de processamento digital, deles é extraído a forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo como mostra o desenho da Figura 30. Essa forma de onda pode ser considerada como

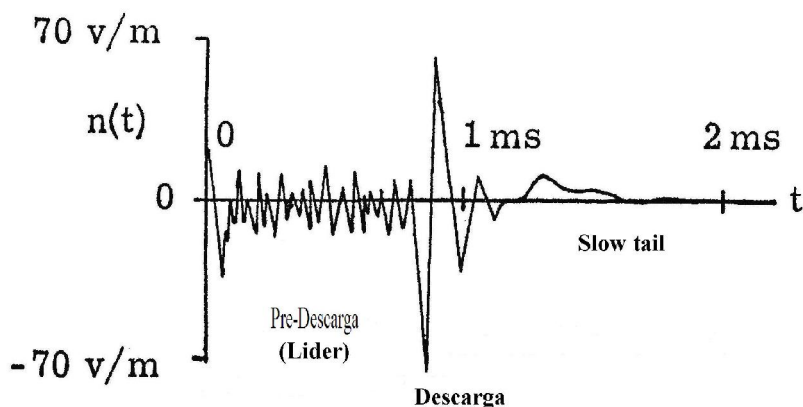


Fig. 30 - Desenho da forma de onda típica de um sinal de raios

resultante da superposição de diferentes modos de propagação e embora seja um sinal banda larga, normalmente é observada na faixa de 1 a 400 kHz, e tem seu máximo ocorrendo na faixa de frequências de 2 a 10 kHz e as pequenas oscilações iniciais estão associadas à deposição de cargas no canal pelo líder, em seguida o pulso associado à corrente de descarga, que neste caso é negativo, seguido de oscilações e decrescimento de amplitude. No domínio da frequência, o chamado espectro mostra o conteúdo de potencia por frequência, como mostrado na Figura 31.

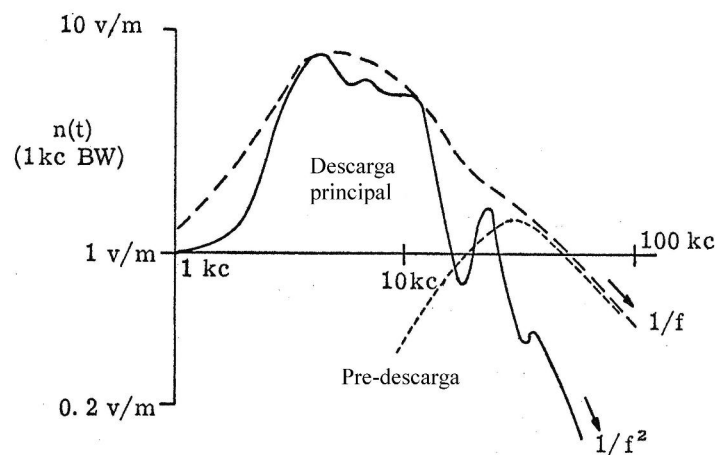


Fig. 31 - Desenho de um espectrograma de um sinal de raios típico.

Estes desenhos de forma de onda e espectro servem como um padrão para identificação e comparação de sinais reais que podem diferir da forma geral, mas que auxiliam na sua identificação.

5.3.1 Outras Alternativas para Receptores de Raios

5.3.1.2 Receptores de Filtro Casado

Receptores com filtro casado (matched filter) obtém uma saída y correlacionando um padrão conhecido h com um sinal desconhecido x a fim de detectar a presença do padrão no sinal desconhecido. Isso é equivalente a uma operação de convolução do sinal desconhecido com um padrão, ou correlação cruzada (cross-correlation). Essa operação maximiza a relação sinal/ruído e é dada por:

$$y[n] = \sum h[n-k]x[k] \text{ para } k=-\infty \text{ a } \infty \quad (3.2)$$

Nesse receptor um banco de filtros com as características dos sinais a serem detectados são programados nos filtros e o filtro que mostrar maior correlação (maior sinal) já indica também o tipo de raios (nuvem-solo, intra-nuvem, etc.), rejeitando também os sinais que não casam com o que está definido nos filtros.

5.3.1.3 Receptores do tipo Homodyne

Os receptores do tipo homodyne, se apoiados por dados e algoritmos podem se tornar em um modelo atraente para a detecção de raios. Nesses receptores o uso de um circuito do tipo PLL (Phase Locked Loop) como oscilador local, sintonizado na frequência do sinal recebido promove um reforço do sinal de entrada permitindo detecção direta da informação, ao contrario dos receptores comuns os do tipo heterodyne em que o oscilador local é fixo e promove uma diminuição do sinal em uma frequência intermediária a partir da qual é amplificado e demodulado.

Devido à instabilidade desse oscilador local, com frequência igual a do sinal recebido o esquema é muito pouco usado, mas se complementado por circuitos estabilizadores e apoio de software, tornam-se uma opção atraente para detecção de raios, aumentando a sensibilidade de recepção, significando maior eficiência de detecção inclusive para os sinais mais fracos.

5.4 Sensores Isolados

Como sensores isolados entendemos um sensor que só depende de seus sistemas próprios para obter informações do evento de raios. Na Figura 32 é mostrado um diagrama básico de receptor de raios isolado, de campo elétrico: o primeiro estágio do receptor tem a função de casamento da impedância da antena, que é extremamente baixa, com a entrada do receptor que normalmente é alta; em seguida há um filtro para eliminar frequências indesejáveis e em seguida um amplificador que eleva o nível do sinal e adapta impedância para acoplamento a um dispositivo de gravação ou amplificador.

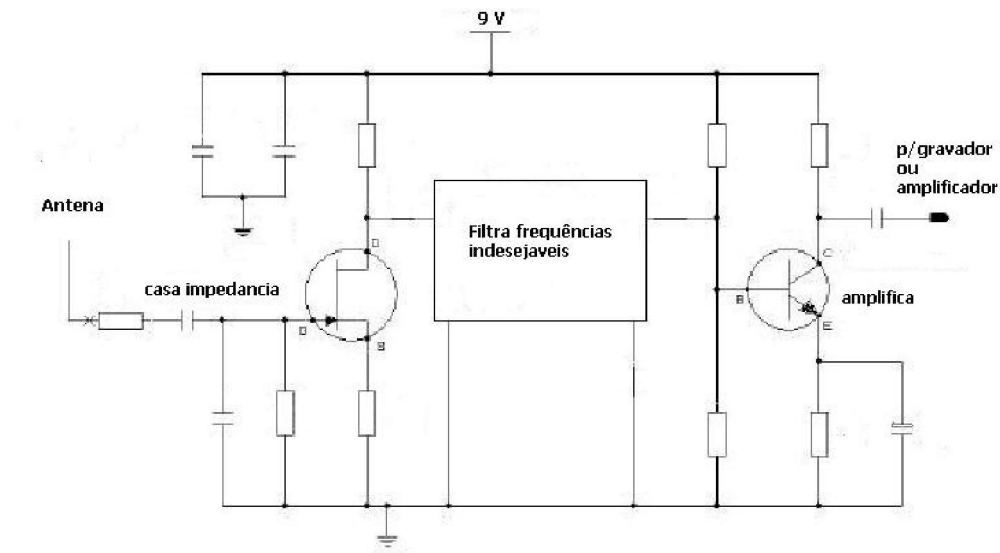


Fig. 32 - Diagrama de um receptor de raios

Nos sensores mais simples o sinal é detectado a partir do sistema de aterramento, detectando um pulso de tensão e pode acionar diretamente um contador mecânico ou elétrico como mostrado na Figura 33, onde ficam registrados o número de ocorrências.



Fig. 33 - Contador elétrico digital usado em contadores de raios

No próximo estágio de complexidade estão os equipamentos denominados contadores de raios (*flashcounter*) que fazem a contagem, calculam e registram também a frequência de ocorrência de raios.

Na Figura 34 vemos um exemplo de um circuito completo desse tipo de instrumento, que normalmente contém um sistema de alarme, dispositivos de proteção, display para visualização de dados e porta rs232 para conexão à equipamentos registradores (data logger), ou transferência para o computador.

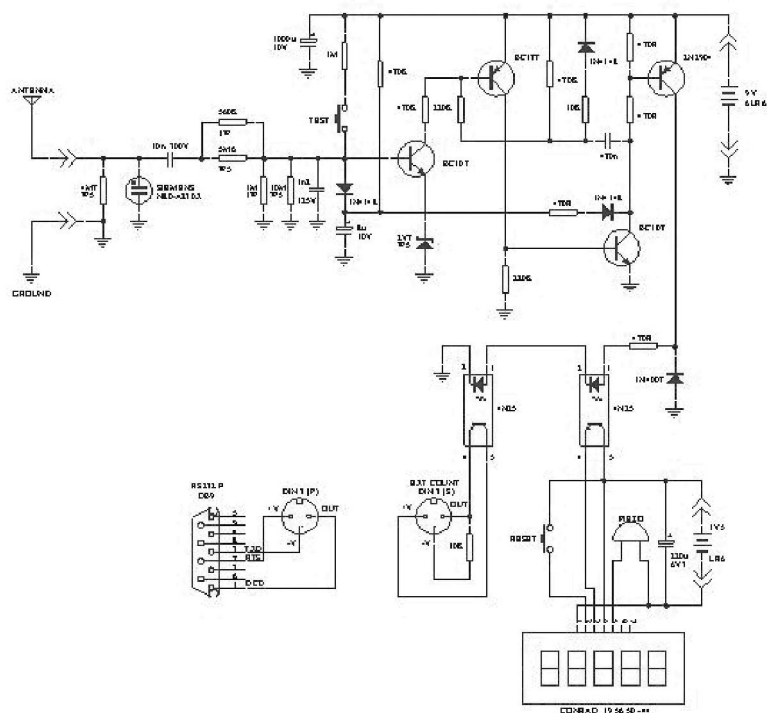


Fig. 34 - Diagrama completo de um flash counter

Um sensor isolado usado na aviação, o *stormscope*, usa duas antenas *magnetic loop* cruzadas e uma antena de campo elétrico. A antena de campo elétrico também é usada para validar descargas pela análise do espectro do campo elétrico. Determina a distância em função da mudança da forma de onda do sinal de raio recebido e pela intensidade do sinal, com o seu diagrama como mostrando na Figura 35. O sistema faz uso de algoritmos de clusterização para mostrar, além das ocorrências de raios, um desenho das células de tempestades.

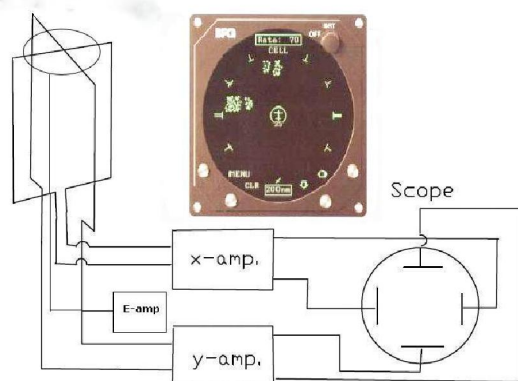


Fig. 35 - O Stormscope

O *stormscope* foi um dos primeiros sensores utilizados em função das necessidades da aviação. Ele usa a intensidade do sinal para calcular a distância, faz uma correlação entre o campo elétrico e o magnético para melhorar a sensibilidade e usa como saída um tubo de raios catódicos e mais modernamente equipamentos como os displays de cristal líquido e LED's.

Uma outra configuração, dispondo de antenas *loop* determina o azimuth e o nível do sinal, transformado em uma distância, com os resultados apresentados em um gráfico do tipo polar em que o centro corresponde à localização do sensor, como mostrado na Figura 36; esses sensores são também denominados de *standalone* por serem único em um dado sítio.

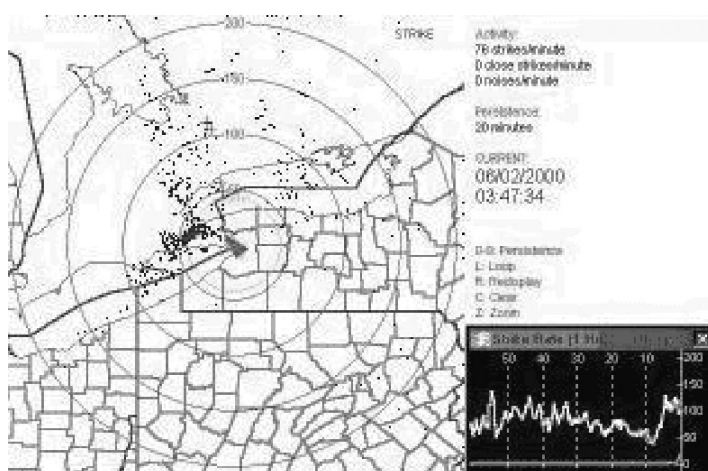


Fig. 36 - Display característico de sensores isolados, aqui um sistema da Boltek.

Os sensores isolados de raios também podem ser distribuídos por uma região e depois de coletado as informações poderá ser feito uma extrapolação para toda a região de localização obtendo-se assim um efeito imagem para estudos, sendo que a coleta também pode ser feito remotamente.

5.5 Operação em Rede

Os receptores topo de linha são os que operam em rede, determinando a localização em conjunto, existindo dois tipos básicos: os que usam como localização antenas em *loop*, detectando o campo magnético e os que utilizam a detecção do campo elétrico.

Nesses receptores o sinal é digitalizado, havendo um estágio de processamento digital de sinais (DSP) como mostra o desenho da Figura 37, onde o espectro do sinal recebido é comparado com espectros contidos em um banco de exemplo para decidir se o sinal é proveniente de um raio.

Com o processamento do sinal são calculados os valores de tempo de subida e tempo de pico para zero e a polaridade da corrente de descarga. O DSP também faz a comunicação entre todos os componentes do sistema.

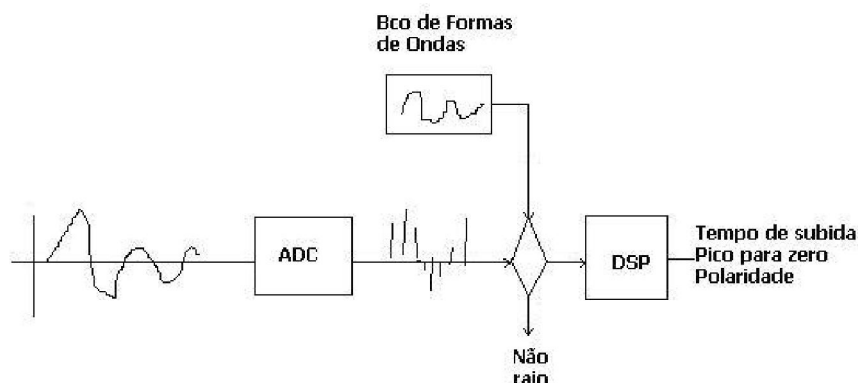


Fig. 37 - Conversão analógica/digital e processamento digital de sinais em um receptor de raios.

Alguns sensores usam a conversão A/D embutida nas placas de voz do microcomputador, diminuindo o custo final dos sensores, sendo uma solução que precisa ser explorada mais vezes, talvez influenciando os fabricantes de computadores a estender o uso desses dispositivos, com melhorias.

5.5.1 Sistemas com Localização tipo ATD ou Hiperbólica

Esses sistemas são assim chamados em função do algoritmo de localização utilizado, que consiste no cálculo da diferença de tempo de chegada entre duas estações (ATD=Arrive Time Difference), essa diferença define uma hipérbole como o lugar geométrico dos possíveis pontos de ocorrência do evento, com duas diferenças já é possível determinar uma posição, mas com alguma ambigüidade, sendo que três pontos disponibilizam 3 ATD's, garantindo uma localização sem ambigüidade; é claro que quanto mais sensores participarem do evento, maior é o grau de liberdade permitindo otimização dos resultados.

Os principais sensores dessa modalidade são o LPATS IV (Lightning Position And Tracking System IV), o PLS (Precision Lightning Sensor), o WWLLN (World Wide Lightning Location Network), o WLS (Weatherbug Lightning Sensor) e o Zeus, que são descritos a seguir.

5.5.2 Sistemas com Localização tipo DF

Esse tipo de sensor usa um conjunto de duas antenas loop cruzadas para determinação do azimuth, é um esquema usado desde os primórdios da comunicação via radio e teve sua escolha baseada na excelente rejeição a ruído impulsivo (semelhante aos raios), mas que tem como principal inimigo os campos magnéticos emitidos por sistemas de energia elétrica, que hoje proliferam em todos os ambientes.

Para os receptores de DF, além das antenas loop para detecção do campo magnético é também utilizado uma antena de campo elétrico do tipo *plate*, a partir da qual a polaridade da corrente de descarga é determinada (em alguns casos, pela polaridade do elemento *slow tail* do campo recebido) e também serve para levantar a ambigüidade de 180° na medição de azimuth.

5.5.3 LPATS IV

O LPATS IV foi desenvolvido pela GAI (Global Atmospheric Inc), que mais tarde foi incorporada pela VAISALA (Helsinki - Finlândia) e descontinuado sua fabricação. O sensor possui um circuito processador digital de sinais, com algumas funcionalidades que nem foram incluídos no software em função de sua brusca descontinuação.

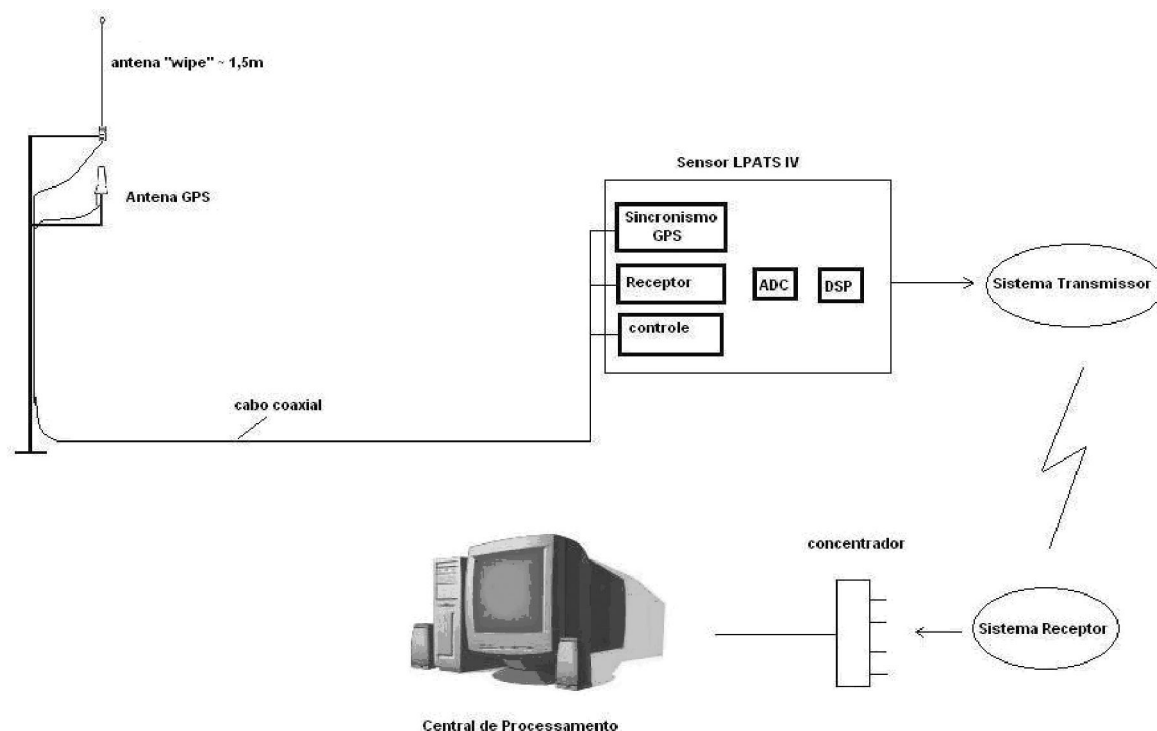


Fig. 38 - Diagrama do sistema LPATS IV da Vaisala

Na Figura 38 vemos um diagrama esquemático desse tipo de sistema, e na tabela-1 as suas principais características técnicas.

Tabela-01: Dados Técnicos dos sensores LPATS IV

LPATS IV (GAI/VAISALA)	
Eficiência de Detecção	CG=46% IC=25%
Mínimo de sensores para Localização	3
Algo.Localiza	ATD (50ns)
Acuracia da localização	80-160m
Faixa de RF	1 a 350 kHz
Alcance	20-460 km típico, max > 1.500 km
Resolução da digitalização	14 bits
Estima corrente	Campo elétrico
Tempo de rearme	< 350µs
Métricas	Localização, corrente, tempo de subida, peak-to-zero tipo e polaridade

5.5.4 PLS

O PLS é fabricado pela TOA Systems Inc (Florida - EEUU), e tem entre seus maiores usuários a rede americana USPLN (US Precision Lightning Network) e a Cia de eletricidade coreana do sul, KEPCO(Korean Electric Power Company). Seu funcionamento é muito semelhante ao LPATS IV, inclusive esse sistema aceita a ligação de sensores LPATS IV na sua rede, e, portanto, pode ser considerado como uma evolução natural do LPATS. Na Figura 39 e tabela-02 temos as características técnicas desse sistema de sensores.



Fig. 39 - Aspecto do sensor PLS da TOA INC.

Tabela-02: Dados Técnicos dos sensores PLS

PLS (TOA Systems Inc)	
Eficiência de Detecção	CG=95% IC=90%
Mínimo de sensores para Localização	3
Algo.Localiza	ATD (15ns)
Acuracia da localização	<250 m
Faixa de RF	1,5 a 400 kHz
Alcance	Max >1.500 km
Resolução de digitalização	12 bits
Estima corrente	Campo elétrico
Tempo de rearme	< 100µs
Métricas	Localização, corrente, tempo de subida, peak-to-zero tipo e polaridade

5.5.5 WWLLN

WWLLN é uma rede em escala mundial, e tem como única métrica a localização do evento de raios e cálculo da frequência de ocorrência e seu esquema está mostrado na Figura 40, alguns trabalhos publicados têm pesquisado o uso do cálculo da densidade de potencia recebida na antena como *proxy* para derivar outras métricas, como a corrente de descarga do raio. Essa rede foi estabelecida em função do estudo de uma provável correlação da frequência

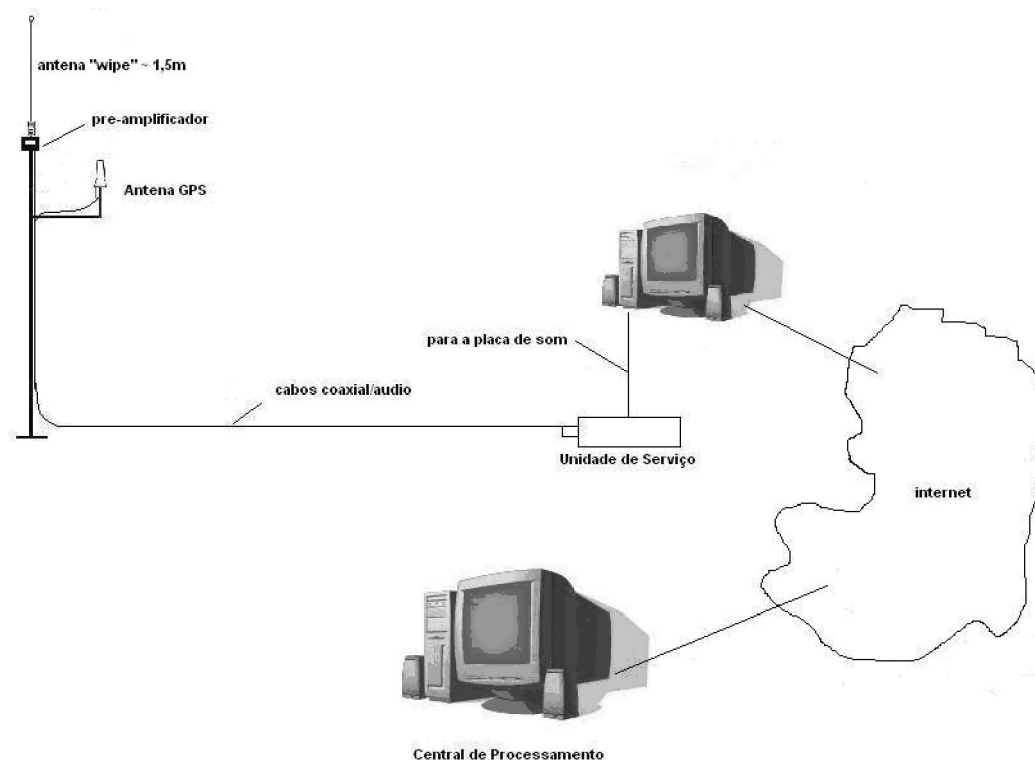


Fig. 40 - O sistema global WWLLN

global de raios com parâmetros meteorológicos como temperatura, chuva, etc., também podendo efetuar monitoração global de tempestades severas. Esse sistema usa a placa de som de um micro para amplificação e conversão analógico/digital, e para melhorar a acurácia da localização usa 5 ou mais ocorrências de raios para cálculo da localização. Para marcar exatamente o tempo de chegada o sistema usa um algoritmo denominado toga (time of group arrive) para sincronizar o tempo de chegada em função do fato de o momento de disparo dos circuitos não coincidir com a chegada da energia do pulso eletromagnético do raio.

Tabela-03: Dados Técnicos dos sensores WWLLN

WWLLN	
Eficiência de Detecção	CG+IC=25%
Mínimo de sensores para Localização	3 (usa um mínimo de 5 para melhorar a acurácia)
Algo.Localiza	ATD (1 μ s)
Acurácia da localização	10 a 20 km
Faixa de RF	6 a 22 kHz
Alcance	Max >6.000 km
Resolução de digitalização	12 bits
Estima corrente	
Tempo de rearme	< 100 μ s
Métricas	Localização, energia não calibrada

5.5.6 Zeus

A rede Zeus teve sua origem em um projeto patrocinado pela National Science Foundation dos Estados Unidos e outros parceiros e seu sensor é fabricado pela Resolution Display Inc dos Estados Unidos, sendo seu desenho básico mostrado na Figura 41. Os objetivos da Zeus eram: obter frequência global de raios e monitorar tempestades severas a nível global, aplicações em hidrologia e recursos hídricos. Como a WWLLN, a Zeus utiliza ao maximo a condição de propagação dos sinais de raios (VLF) por longas distancias [Heilmann e Rodriguez, 2007].

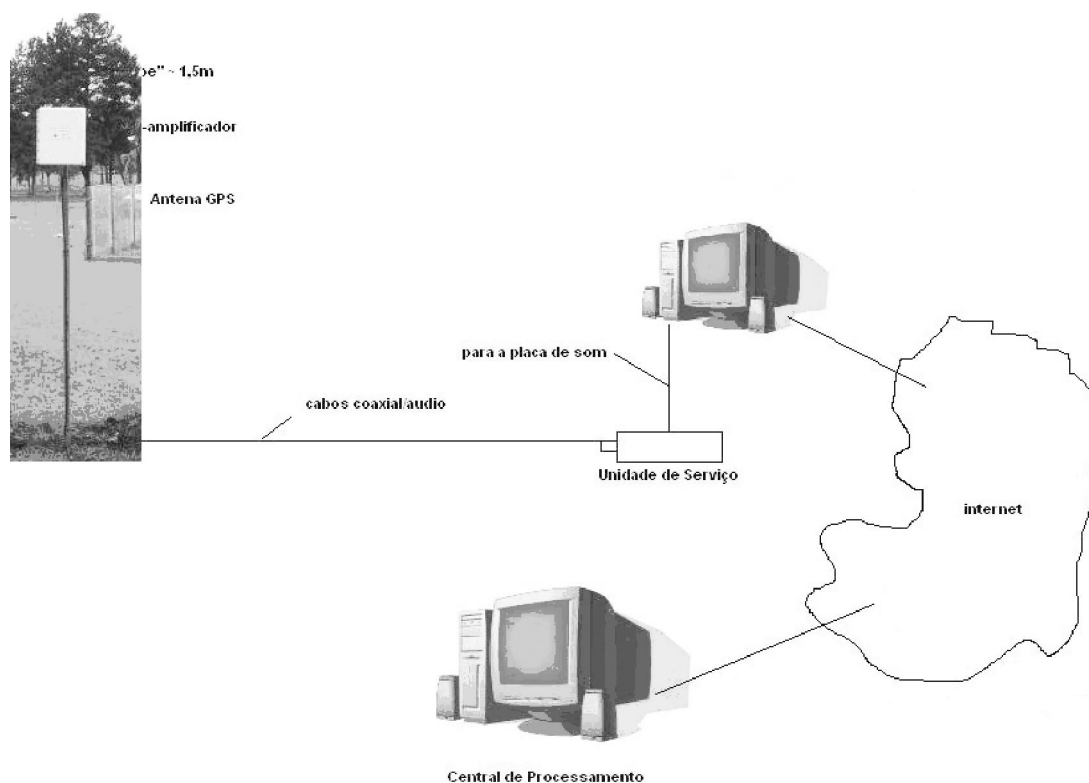


Fig. 41 - O sistema global ZEUS

O diagrama do sistema é semelhante ao da WWLLN, com as diferenças de que a conversão analógica/digital é feita na unidade de serviço e depois mandado para o micro que usa um software de DSP para o processamento. Na tabela-4 temos as características desse sistema.

Tabela-04: Dados Técnicos dos sensores Zeus

Resolution Display Inc	
Eficiência de Detecção	CG+IC=35%
Mínimo de sensores para Localização	3
Algo.Localiza	ATD (1,5µs)
Acuracia da localização	15-20 km
Faixa de RF	7 a 15 kHz
Alcance	Max >3.000 km
Resolução de digitalização	12 bits
Estima corrente	
Tempo de rearme	< 100µs
Métricas	Localização

5.5.7 ATDNET

A ATDNET é uma rede bem semelhante à WWLN, operando em uma faixa estreita de frequências (2,5kHz), usando ATD como algoritmo de localização e usando a técnica de correlação para o cálculo das coordenadas. É operada pelo Met Office o órgão de meteorologia da Gran Bretanha e tem como área operacional a Europa Oeste da Ásia, Norte da África, America central e norte da America do Sul. A antena usada é do tipo *wipe*, com polarização vertical e sua estrutura é como mostra a Figura 42.

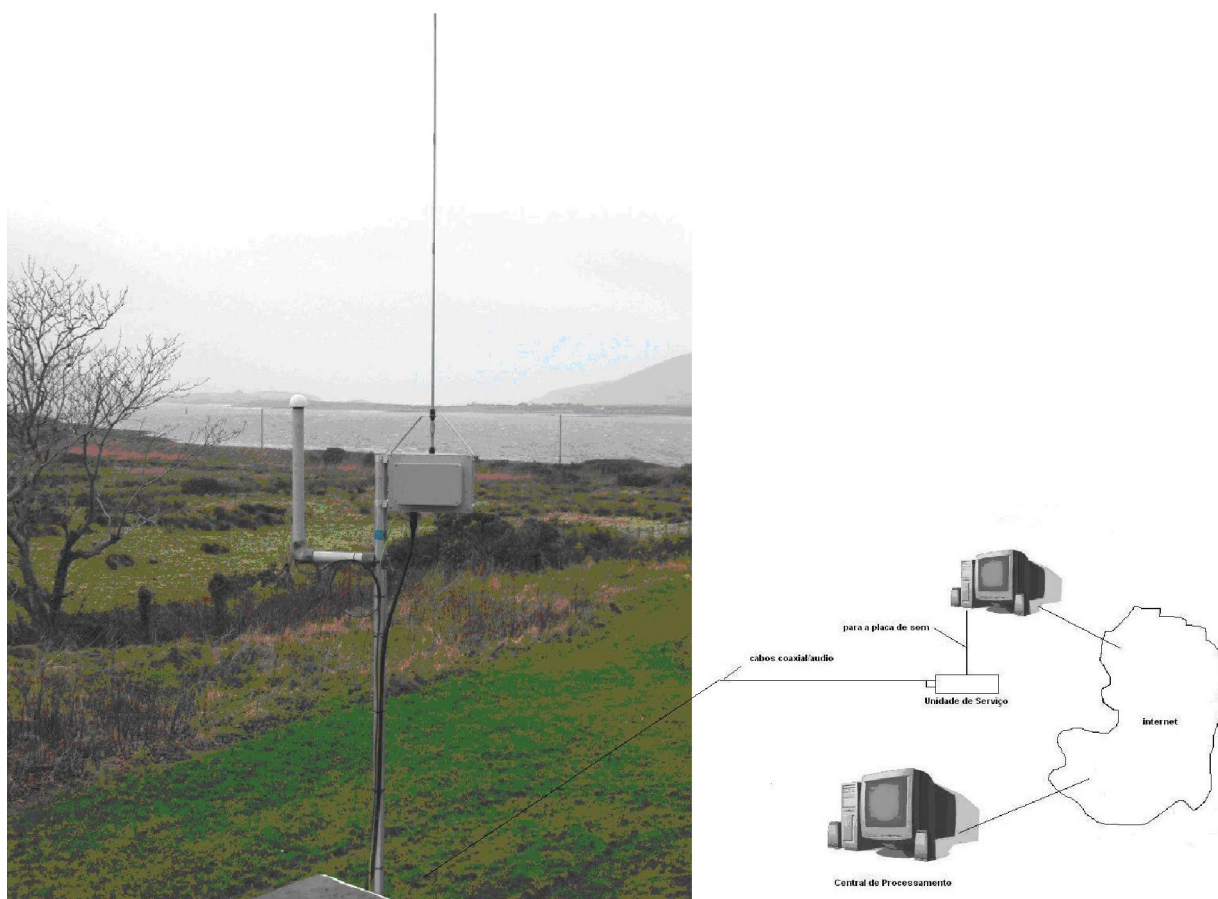


Fig. 42 - O sistema ATDNET

Tabela-05: Dados Técnicos dos sensores da ATDNET

Resolution Display Inc	
Eficiência de Detecção	CG+IC=35%
Mínimo de sensores para Localização	3
Algo.Localiza	ATD (1,5µs)
Acuracia da localização	< 10 km
Faixa de RF	10 a 14 kHz
Alcance	Max > 6.000 km
Resolução de digitalização	12 bits

Estima corrente	
Tempo de rearme	< 100µs
Métricas	Localização

5.5.8 WLS

O WLS Weatherbug Lightning Sensor é um sensor de banda larga (1Hz a 12 MHz) utilizando dois (2) canais, tendo o ATD como algoritmo de localização e usando a técnica de correlação para o cálculo das coordenadas. É a terceira maior rede nos Estados Unidos denominada WTLN e inclui vários itens de modernidade como uma melhor detecção de raios intra-nuvem e eletrônica moderna e veloz e de maior densidade de digitalização e sua estrutura é como mostra a Figura 43.

Além da introdução de um segundo canal para melhorar a detecção de raios intra-nuvem, o WLS faz a digitalização contínua dos sinais detectados, não existindo o chamado tempo de rearme, ou tempo que o sensor fica preso, processando uma determinada ocorrência e portanto não estando disponível para uma nova.

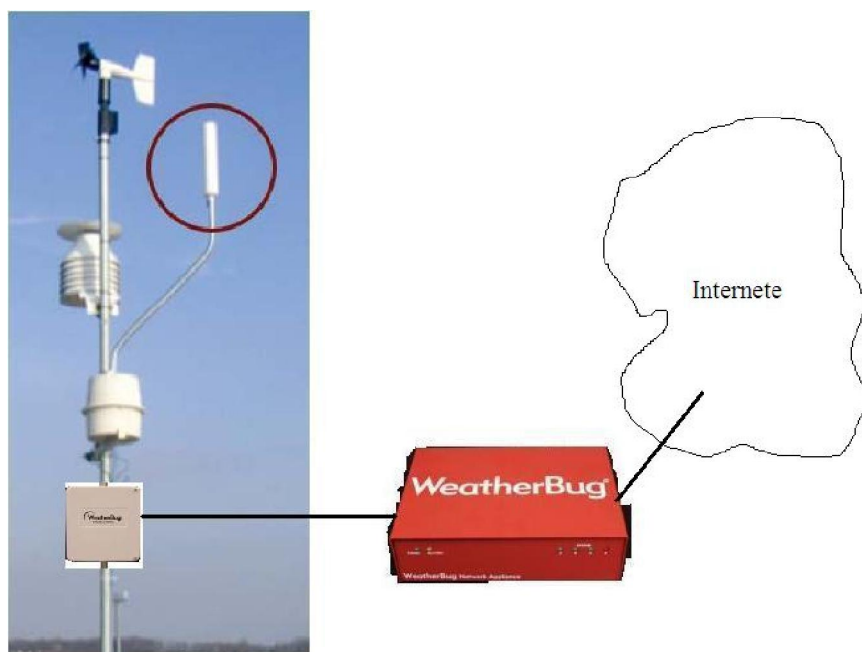


Fig. 43 - O sistema Weatherbug instalado em uma estação meteorológica de superfície

Tabela-06: Dados Técnicos dos sensores WLS

Resolution Display Inc	
Eficiência de Detecção	CG> 98% IC=75%
Mínimo de sensores para	3

Localização	
Algo.Localiza	ATD (2ns)
Acuracia da localização	< 200 m
Faixa de RF	1 a 250 kHz e 5 a 12 MHz
Alcance	Max > 3.000 km
Resolução de digitalização	24 bits
Estima corrente	Campo Elétrico
Tempo de rearme	Não existe (digitalização continua)
Métricas	Localização, Corrente, tipo, polaridade e forma de onda

5.5.9 Los Alamos Array

O Los Alamos sferic array [Wiens et al., 2000] utiliza um detector de variação de campo eletrostático, uma variação do sensor tipo *fieldmill* identificados com tempo GPS. Foi instalado para dar suporte a operação do satélite FORTE (Fast On-orbit Recording), desenvolvido conjuntamente com o Laboratório Sandia e tinha como objetivo a detecção de emissões eletromagnéticas oriundas de explosões nucleares. O FORTE usa um foto diodo e um receptor operando em VHF e em virtude da necessidade de uma verdade de campo para os dados FORTE, foi estabelecido uma rede de detecção nos Estados Unidos. A estrutura básica de instalação esta mostrada na Figura 44.

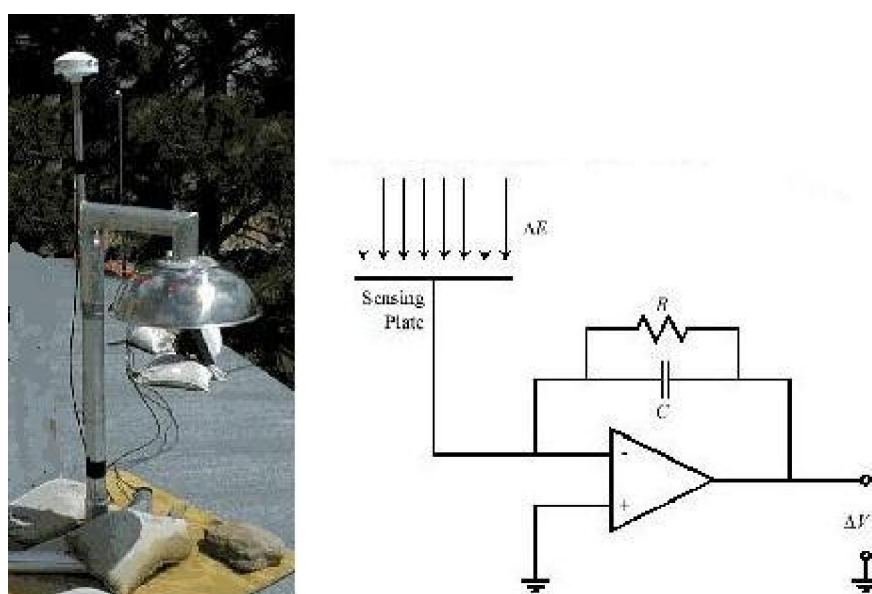


Fig. 44 - O sistema Los Alamos *sferic* Array

Tabela-07: Dados Técnicos do sensor Los Alamos

Resolution Display Inc	
Eficiência de Detecção	CG+IC=35%
Mínimo de sensores para Localização	3
Algo.Localiza	ATD (1,5 μ s)
Acuracia da localização	= 10 km
Faixa de RF	Variação do campo eletrostático
Alcance	Max > 6.000 km
Resolução de digitalização	12 bits
Estima corrente	Não
Tempo de rearme	< 100 μ s
Métricas	Localização

5.5.10 IMPACT ESP

O Impact ESP (Improved Accuracy from Combined Technology – Enhanced Sensitivity Performance) foi desenvolvido pela GAI e incorporado pela Vaisala e usa um sistema de localização tipo DF, mas que pode ser combinado com ATD, para o qual a Vaisala chama de MDF (Magnetic Direction Finder). Na Figura 45 temos os detalhes do tipo Impact e na tabela-08 os dados técnicos do sensor Impact ESP da Vaisala.

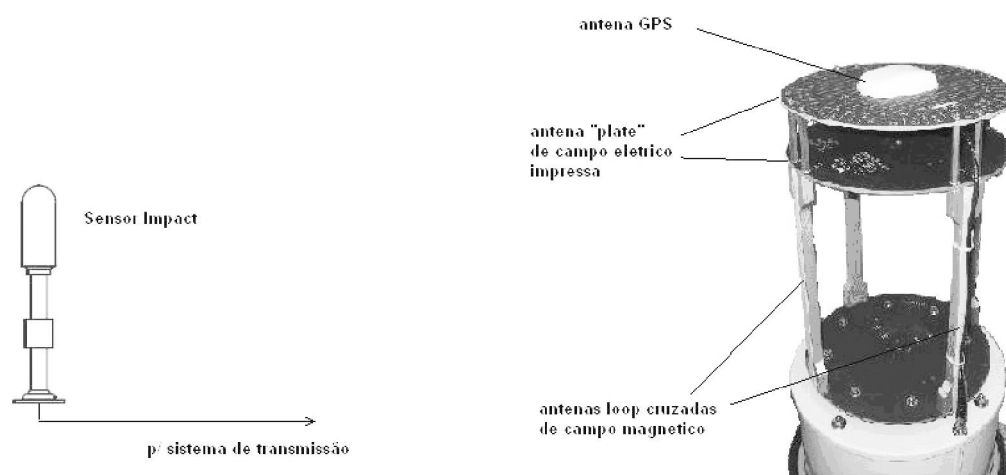


Fig. 45 - Sensor do tipo Impact (Vaisala)

Tabela-08: Dados Técnicos dos sensores IMPACT ESP

IMPACT ESP	
Eficiência de Detecção	CG=85% IC=50%
Mínimo de sensores para Localização	2
Algo.Localiza	DF (erro=0,5°) ATD (100ns)

Acuracia da localização	<500m
Faixa de RF	400 khz
Alcance	90-500 km típico, max=1.000 km
Digitalização	
Estima corrente	Campo elétrico e Campo Magnético
Tempo de rearme	< 1ms
Métricas	Localização, corrente, tempo de subida, peak-to-zero e polaridade

O *Department of Meteorology of University of Hawaii* opera uma rede de longa distancia denominada PacNet, utilizando sensores do tipo Impact na monitoração de eventos extremos nessa área do pacifico, como auxilio a navegação e outros. As estações, em número de 7, estão localizadas em ilhas do Pacifico Norte, com distância média entre estações de 4.000 quilômetros (compare com as especificações do Impact ESP). Os operadores informam que eles limitam a banda de RF do sensor e alteram o setup do programa central para aceitar os cálculos efetuados em localizações de longa distância; adicionalmente executam modelagens para avaliação de intensidade de campo e estimativas de erros para calibrar os sensores.

5.5.11 LS7000

O LS7000 é fabricado pela VAISALA e baseado na tecnologia dos IMPACT ESP, basicamente a maior mudança foi uma redução do tamanho dos componentes, eletrônica mais rápida e para permitir um upgrade para um sistema de detecção que a VAISALA chama de Total Lightning e que incorpora ao sensor LS7000, um sensor em VHF, com a parte VLF cobrindo os raios para terra e a parte VHF cobrindo principalmente os raios intra-nuvem. O sensor em VHF permite um sensoriamento mais detalhado sobre os fenômenos elétricos ocorrendo na nuvem, como os *stepped leader*, que são facilmente detectados por esses sistemas. Na Figura 46 e tabela-09 temos as características do sensor LS7000.

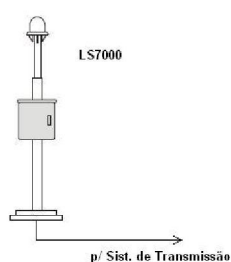


Fig. 46 - O sensor LS7000 da VAISALA

Tabela-09: Dados Técnicos dos sensores LS7000

LS7000	
Eficiência de Detecção	CG=90% IC=5-30%
Mínimo de sensores para Localização	2
Algo.Localiza	DF (erro=0,5°) ATD (100ns)
Acuracia da localização	500 m
Faixa de RF	1-350 kHz
Alcance	> 1.500 km
Digitalização	12 bits
Estima corrente	Campo elétrico e Campo Magnético
Tempo de rearme	< 1ms
Métricas	Localização, corrente, tempo de subida, peak-to-zero e polaridade

5.6 Sensores ELF

Os sensores que operam nessa faixa de frequência normalmente operam no modo standalone (um só sensor), além de registrarem fielmente a forma de ondas dos sinais de raios [Greenberg e Price, 2006; Ramachandran et al., 2007; Dowden Rodger, 2005], também medem os valores da ressonância de Schumann, permitindo medição contínua da atividade global de raios. A Figura 47 mostra um desenho desse tipo de instalação.

Sensores ELF funcionam com uma combinação de bobinas de indução horizontal e medidores de campo elétrico vertical. As bobinas de indução detectam os campos magnéticos na direção NS e LO e são normalmente enterradas para reduzir o nível de ruído, tendo comprimento de cerca de 1,5m e devem ter sensibilidade na ordem de pico Tesla (pT) em função da pequena intensidade desses sinais. O campo elétrico vertical é detectado com uma antena bola, suspensa 2 a 10 metros acima do solo.

Essas estações normalmente operam com um só sensor e localizam a ocorrência dos raios com uma combinação de DF e estimativa da distancia usando a relação entre os componentes elétricos e magnéticos (impedância) com uma “acuracia” de 500 a 1.000 km.

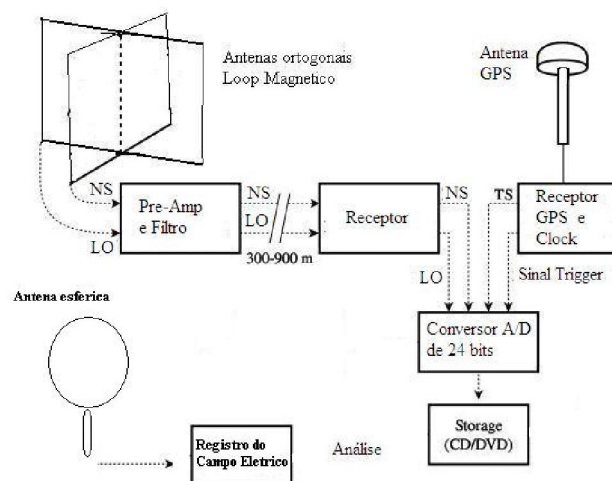
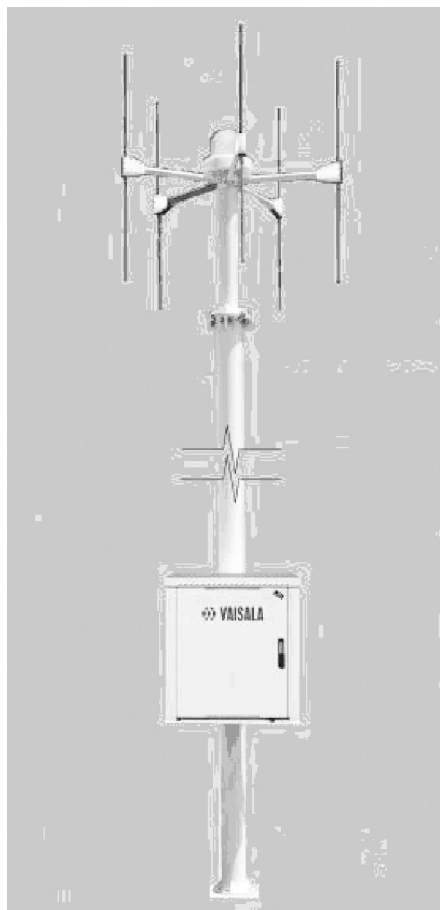


Fig. 47 - Esquemático de um sistema ELF.

5.7 Sensores VHF

Os sensores que operam em VHF provêm uma visualização mais detalhada de processo elétricos ocorrendo no interior das nuvens, como: a formação dos líderes, processos



de re-arrumação de cargas (J e K), etc. Esses sensores, cujo aspecto é como mostra a Figura 48, usam uma técnica de detecção dita interferométrica, medindo a diferença de fase do sinal à medida que a frente de onda passa nos elementos da antena, a partir do qual são extraídos os valores das coordenadas tridimensionais, permitindo uma visualização em 3-D do desenvolvimento dos processos elétricos de carga e descarga dentro da nuvem.

Entre os representantes desse tipo de sensores estão o francês SAFIR (Surveillance et Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique), assimilado pela VAISALA e o japonês DIFT (VHF broadband Digital Interferometer).

Fig. 48 - Sensor VHF LS8000 da VAISALA.

Tabela-10: Dados Técnicos dos sensores LS8000 (VHF)

LS8000 (VHF)	
Eficiência de Detecção	CG>90% IC>90%
Min.Sensores	2
Algo.Localiza	Interferométrico (erro=1.0°) GPS (100ns)
Acuracia	CG=500m IC=1.000m
Faixa de RF	110-118 MHz
Alcance	200 km

As funções de display dos sistemas de sensores em VHF é bem diferente da dos outros tipos de sensores, pois permite a visualização de perfis e em 3D, como mostra a Figura 49.

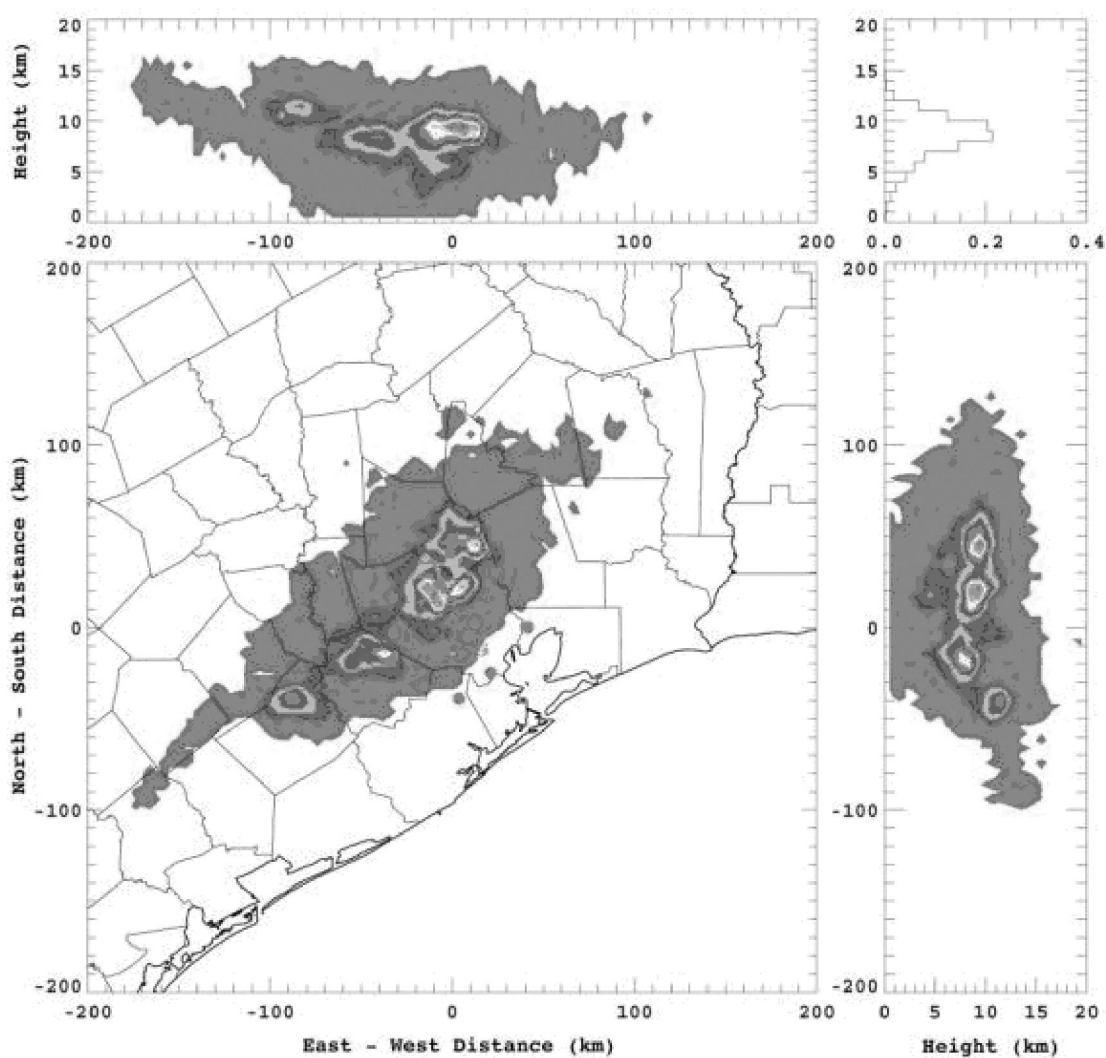


Fig. 49 - Modelo de display tridimensional de sensores em VHF.

5.8 Sensores de Relâmpagos

Os sensores de relâmpagos detectam as emissões nos comprimentos de onda visível e normalmente utilizam um sensor CCD (charge coupled device) para a localização da ocorrência e um fotodiodo para acessar a intensidade do evento e a história da intensidade luminosa no tempo.

Câmeras de alta velocidade são usadas para a captura do histórico luminoso do evento e no laboratório pela rotação do filme em velocidade normal, a descarga aparece em câmera-lenta, permitindo a identificação dos processos da descarga e a sua modelagem, através da construção de histogramas e gráficos correlacionando a intensidade do sinal no tempo com os parâmetros analisados. Através de análises de forma de onda x luminosidade, medição no filme da frente de onda e outras técnicas [Jordan et al., 1995] é possível a recuperação de todos os parâmetros da descarga.

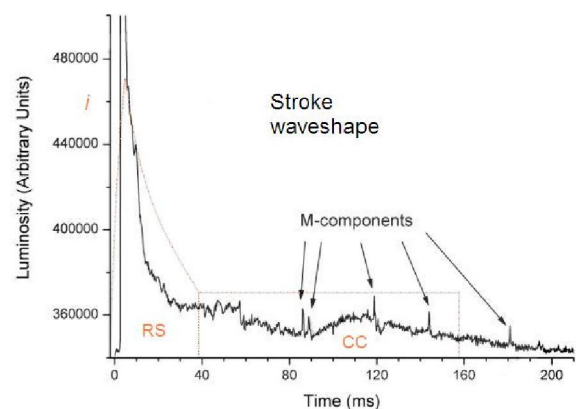
Com o uso de múltiplas câmeras localizadas em pontos estratégicos toda a estrutura tridimensional do canal do raio pode ser determinada [Pack et al., 2008].

Em sistemas satelizados o cdd e o fotodiodo são normalmente usados como sensores de relâmpagos e em alguns sensores isolados. Na Figura 50 é mostrada uma fotografia de alta velocidade e um exemplo de gráfico da forma de onda que pode ser obtida.

lake ontario



(an old shot from [ioe's](#) august 2003)



(a)

(b)

Fig. 50 – a) Imagem oriunda de câmera de alta velocidade e b) gráfico de luminosidade x tempo obtido.

5.9 Sensores a Bordo de Satélites

Os sensores baseados em satélite usam a detecção de relâmpagos, seja através de foto diodos, telescópios óticos e RF na faixa de VHF. Em funcionamento existem o OTD, o FORTE e o LIS e aguardando lançamento em 2014 o LMS. Uma das grandes vantagens dos sensores em satélite se deve a sua grande cobertura e monitoramento de corpos de águas não alcançados pelos sensores em redes terrestres.

5.9.1 OTD – Optical Transient Detector

O Optical Transient Detector foi lançado pela NASA a bordo do satélite Microlab-1, que foi lançado em órbita por um foguete Pegasus 3 de abril de 1995. A missão principal do instrumento OTD é de melhorar a compreensão das distribuições de tempestade, nuvens, e variabilidade de tempestade através da detecção e localização de relâmpagos ao longo de grandes áreas da superfície da Terra e testar modelo de engenharia para o sensor (LIS).

O instrumento OTD detecta e localiza a descargas de raios que ocorrer dentro de seu campo de visão, marca o momento da ocorrência do relâmpago, e mede a energia radiante. A resolução espacial do instrumento é de 10 km e a resolução temporal é de 2 ms. O OTD detecta raios intra-nuvem e nuvem-terra durante o dia e à noite com uma alta eficiência de detecção.

A trajetória orbital da Microlab-1 permite que o satélite OTD circule a terra com uma inclinação de 70 graus, uma vez a cada 100 minutos, a uma altitude de 740 km. Usando seu foto-díodo com pixel 128x128 e amplo campo de visão da lente, o instrumento OTD é capaz de visualizar uma área total de 1300 km x 1300 km. Dada o campo de visão e a trajetória orbital, o OTD pode monitorar tempestades individuais e sistemas de tempestade durante cerca de 4 minutos, período suficiente para obter uma medida da taxa de relâmpago nessas tempestades.

Outro sensor à bordo do Microlab-1 mede a flutuação do sinal dos satélites do sistema GPS para correlação com parâmetros atmosféricos [Gurevich et al., 2006] para estudo da circulação global atmosférica, entre outros estudos. Na Figura 51 está mostrado o aspecto do satélite que abriga o sensor OTD e a carta de dados do sensor.

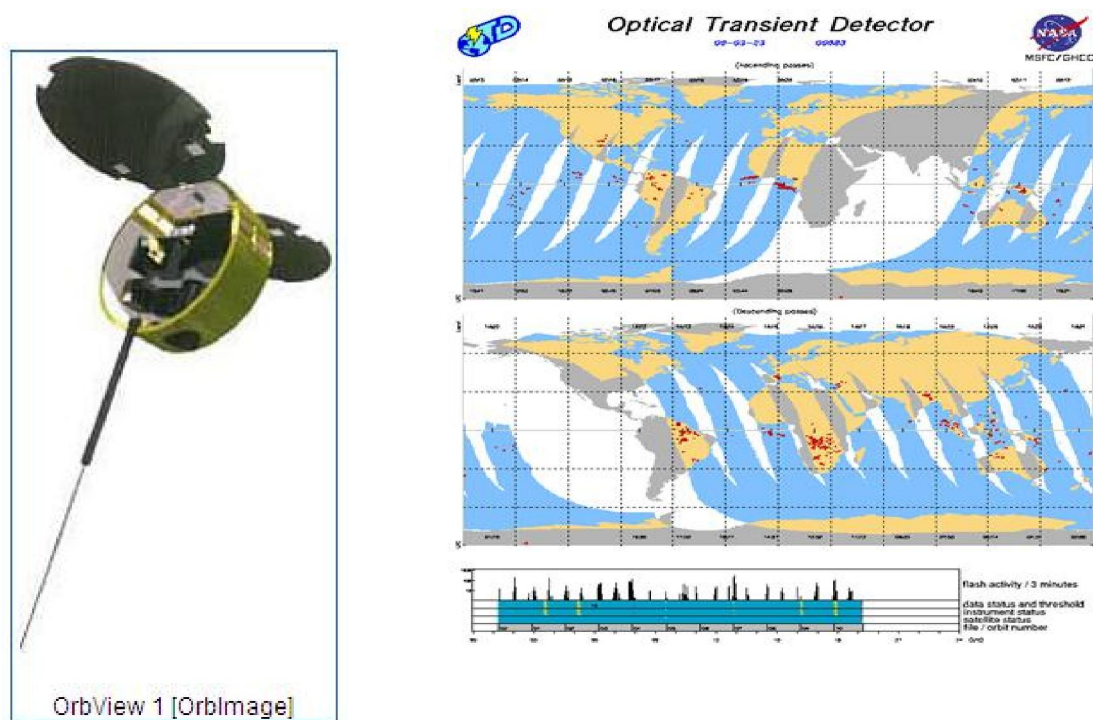


Fig. 51 - O satélite Microlab-1 e a carta de dados do sensor OTD.

5.9.2 LIS – Lightning Imaging Sensor

O sensor LIS está instalado no satélite TRMM (Transient Rainfall Measuring Mission), e tem sido operado desde novembro de 1997, quando foi lançado com êxito. LIS consiste de matriz CCD com lente e telescópio e um sistema de dados em tempo real e unidade de processamento a bordo. LIS é cuidadosamente projetado com filtro óptico da sua largura de banda de 1 nm, possui 8,5 km de resolução espacial e 2 ms em tempo matriz CCD 128x128. O limiar de detecção de relâmpago é de 4.7J/m/m/sr e de eficiência de detecção de 90%.

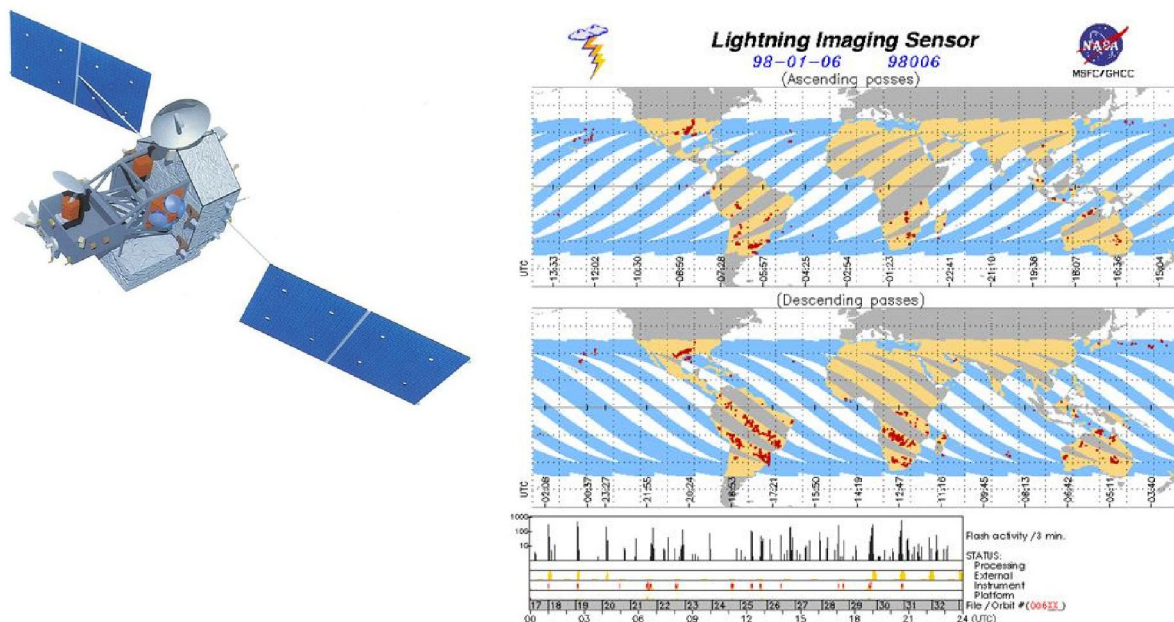


Fig. 52 - O satélite TRMM e carta dos dados LIS.

Na Figura 52 é mostrada uma foto do satélite em que o sensor LIS esta embarcado e uma carta mostrando a disposição dos percursos de varredura e os dados coletados. A orbita do TRMM alcança 350 km, tem uma inclinação de 35° e leva cerca de 91 minutos.

5.9.3 FORTE - Fast On-orbit Recording of Transient Events

O FORTE foi lançado em 29 de agosto de 1997 e está em funcionamento contínuo desde o alcance da órbita, é patrocinado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos como um teste de tecnologias aplicáveis a detecção de detonação nuclear. Foi desenvolvido pelo Los Alamos National Laboratory e Sandia National Laboratories. O FORTE está em uma orbita circular inclinada 70 graus, a 800 km de altitude da Terra e a circunda varias vezes por dia; carrega um conjunto de instrumentos ópticos (localização ótica, fotodiodo e câmera CCD) e de RF (30-300MHz) que têm sido utilizados para estudar raios a partir do espaço, bem como testar tecnologias de detecção de eventos nucleares.

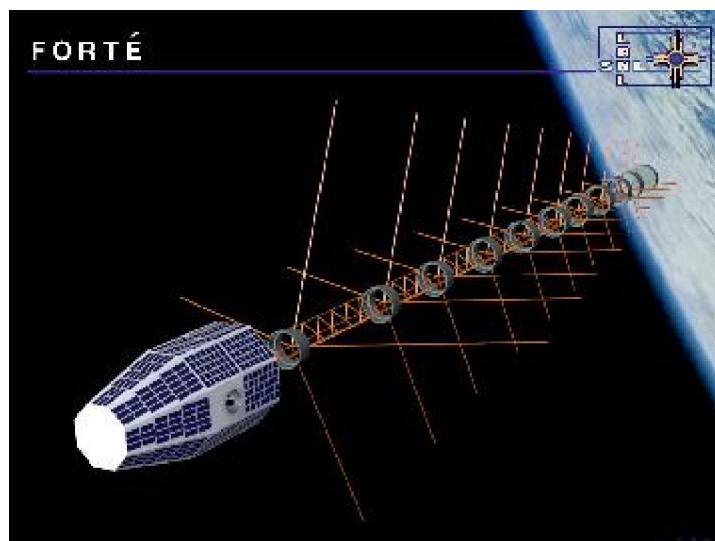


Fig. 53 - O satélite FORTE.

Na Figura 53 está mostrada uma visão artística do FORTE em sua órbita, que hoje conta com uma rede de detecção terrestre exclusivamente para validação dos dados adquiridos (Los Alamos array). Recentemente, em março-2010, o Los Alamos National Laboratory lançou o satélite CIBOLA (alusão ao complexo Zuni-Cibola, um distrito histórico no Novo México, onde dizem, estão situadas as famosas “Sete cidades do Ouro”, procurada por exploradores espanhóis na América), com o mesmo objetivo e possível substituição do FORTE, que tem a bordo um computador de alto desempenho que facilitará a análise dos eventos detectados [Caffrey et al., 2010].

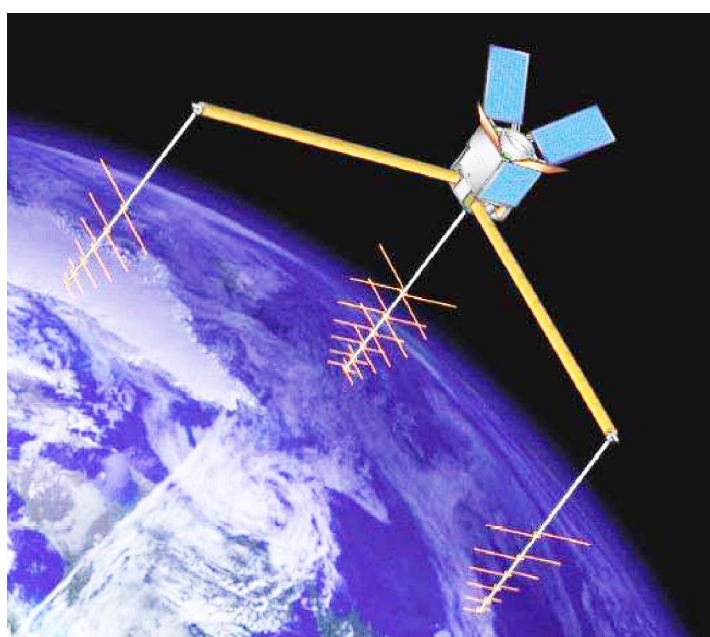


Fig. 54 - O satélite CIBOLA.

Na Figura 54 vemos a concepção artística do satélite CIBOLA.

5.9.4 LMS - Lightning Mapper Sensor

O sensor LMS possui um telescópio pequeno e duplo, sensor de raios ópticos, a bordo de um satélite geoestacionário GOES para medir a atividade total de relâmpagos em uma base contínua ao longo dos Estados Unidos continentais, América Central e do Sul e porções dos oceanos adjacentes. Esse sistema tem agendado como data de lançamento o ano 2014 e suas especificações estão mostradas na tabela 11.

	Expectativas científicas	
Grande área de cobertura	Monitorar raios nos trópicos e extratropicos ate 50 graus de latitude sobre terra e água	Prover dados confiáveis sobre raios com auxilio de sítios de calibração e validação
Alta eficiência de detecção	Estimate the total lighting activity of each storm Estimar atividade total de raios nas tempestades	Used for inferring convective activity, mixed phase precipitation, etc. Inferir atividade convectiva e fases de precipitação
Baixo nível de falso alarme	Detecta só eventos de raios	Menos de 5% dos eventos necessitam de processamento em terra
Sensibilidade de medida	$3.8 \times 10^{-6} \text{ j m}^{-2} \text{ um}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ (desejável) $4.7 \times 10^{-6} \text{ j m}^{-2} \text{ um}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ (aceitável)	Os números de sensibilidade incluem 6 db de SNR margem
Range dinâmico	> 2 ordens de magnitude	Subtraindo efeitos de background o sistema deve manter > que 2 ordens de magnitude para detecção de raios
Resolução espacial	Identificar células convectivas individuais	8 km no nadir
Observação continua	Observação continua da área monitorada	-
Operação com único comprimento de onda	Detecção de raios durante o dia	7774 Å
Medição radiométrica	Determinar intensidade do raio	Exatidão = 10%
Continuing current	Detecta e estima continuing current	Não atualiza background durante períodos de pixel ativo
Compressão de dados	Suportar altas taxas de eventos	Compressão multi dimensão
Atitude da plataforma	Visada para terra	-
Comando e controle	Capaz de • selectar subarray(s) • ajustar threshold • seleccionar área de imagem	mapear 20 sub-regioes ate 16 RTEPs
Exatidão de apontamento	Detecção de raios em uma célula específica	110 micro radianos
Conhecimento de apontamento	Localizar raios em uma célula específica	40 micro radianos

Tabela-11: Especificações e expectativa científica para o sensor LMS

5.10 Futuros Projetos Satelizados

Nos próximos anos algumas missões baseadas em satélites deverão contribuir para um melhor conhecimento de atividades atmosféricas ligadas a raios, como é o caso da missão que leva o nome do Deus Celta do trovão: TARANIS (Tools for the Analysis of Radiation from Lightning and Sprite) a ser lançado em um satélite com órbita polar a 700 km de altitude pelo CNES (Centre National d'Études Spatiales) e da missão ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor), que deve ser montada em uma plataforma externa da estação espacial internacional (ISS) e será usada no estudo de acoplamento entre tempestades e a alta atmosfera, ionosfera, cinturões de radiação para estudos de TLE's [Neubert et al., 2006].

5.11 Sensores de Trovão

Os primeiros sensores de raios eram na verdade o ouvido humano, que registrava os dias de trovão (*Thunder days*) em diversas localidades e que eram usados na produção de mapas ditos, ceráunicos, contendo o percentual de dias de tempestades por ano, interpolados e espacializados, sendo os valores médios obtidos para cada localidade de interesse, denominados índice isoceráunico e até hoje usados na especificação da proteção de sistemas elétricos e outras estruturas.

Como os índices de ocorrências de raios atualmente são espacializados em função da densidade de ocorrências por km²/ano; por correlação de dados pode-se definir formulas de conversão de densidade para índice isoceráunico, como $D = 0,04 \cdot I_k^{1,25}$, em que D é a densidade (raios/km²/ano) e I_k o índice isoceráunico (dias de tempestade/ano) [Uman, 1987].

Pela análise espectral do som produzido pelo trovão, é possível a determinação de características do canal, definir tipo de descarga (para terra e na nuvem) entre outros. Por exemplo, as descargas intra-nuvem contêm mais estrondos do que as nuvem-terra, e a frequência do som está em média à 200 Hz, sendo um pouco maior para intra-nuvem e menor para nuvem-terra [Bodika et al., 2008].

5.12 Raios Induzidos

Para induzir raios é usada uma versão da experiência do papagaio devida a Benjamin Franklin. Aqui, em vez de um papagaio, um pequeno foguete com uma bobina de fio de cobre recoberto de kevlar de aproximadamente 600 m, com a outra ponta ligada à plataforma de lançamento é disparado na direção da nuvem.

O momento do disparo é importante, e as condições da nuvem são monitoradas através de medidores de campo eletrostático, que indicam o momento mais propício, sob pena de falha.

Esse processo obriga a corrente de raio a passar por uma bateria de sensores onde suas características são diretamente medidas ao contrário dos sensores comuns que medem o campo emitido pela corrente a uma longa distância.

Essas experiências servem como verdade de campo para calibração de sistemas de detecção, estudos em ambientes controlados e descobrimento de novos fenômenos como a emissão de raios X pelos processos envolvidos na ocorrência de raios. Na Figura 55 esta mostrado o foguete e a plataforma de lançamento.

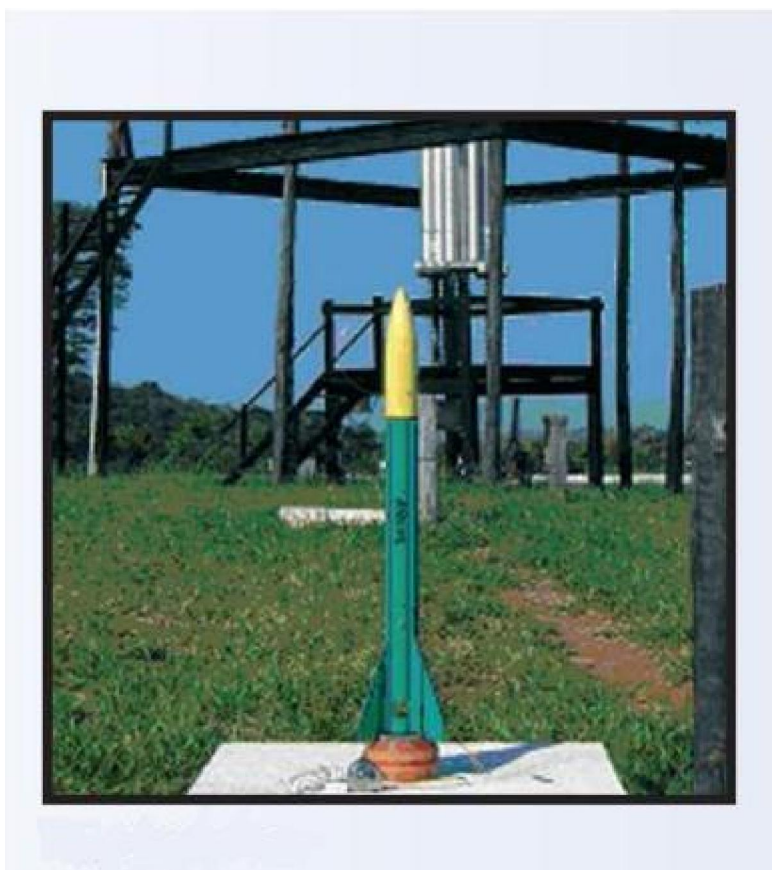


Fig. 55 – Em primeiro plano o foguete com a bobina de fio acoplado e ao fundo a plataforma de lançamento, utilizada por um conjunto de Instituições de Pesquisas como a UNICAMP.

Outras soluções tecnológicas também são experimentadas para a indução de raios, como o uso de raios laser e canhões de água salgada, com relativo sucesso.

O uso de raios induzidos também pode ser usado como proteção, pelo descarregamento de nuvens perigosas, por disparos consecutivos, drenando-se as cargas da nuvem de maneira controlada.

5.13 A Detecção de Raios Intra-Nuvem

A eficiência de detecção de raios intra-nuvem na maioria dos sensores é muito pequena, mas esse tipo de atividade é muito importante, principalmente como auxílio na validação de sensores em satélite que são muito sensíveis a raio IC, além do mais uma correta relação IC/CG pode revelar o estado de convecção em uma nuvem de tempestade. Os processos intra-nuvem talvez sejam precursores inclusive da própria iniciação dos *stepped leaders* nas descargas pra terra e algumas pesquisas [NEA, 2009] indicam que podem sinalizar eventos severos como rajadas de vento e tornados.

NBE's (Narrow bipolar events) (NBEs) é um dos eventos de descargas intra-nuvem bem estudados e especula-se que estejam associados à “chuvas” de raios cósmicos. NBE's causam relaxações de processos de separação de cargas em tempos muito curtos (10 μ s) gerando irradiações bipolares nas faixas LF/VLF com potências da ordem de centenas de Giga Watts e podem estar associados com áreas de intensa convecção na troposfera [Jacobson e Heavner, 2005].

A natureza dessa menor eficiência em detectar raios IC deve-se a vários fatores: o sinal eletromagnético emitido por um raio intra-nuvem [Heavner et al., 2003] é diferente do sinal de um raio nuvem-terra: enquanto aquele gera uma onda TE de polarização horizontal, este emite uma onda TM de polarização vertical. É claro que essa relação não é rígida, com alguns raios CG emitindo ondas TE e alguns raios IC emitem ondas TM, principalmente nos primeiros momentos do deslocamento do líder, [Behnke et al., 2005], mas isso em níveis muito baixos e em frequências fora da faixa VLF/LF. Na Figura 56 observa-se o desenvolvimento predominantemente horizontal das descargas do tipo IC.

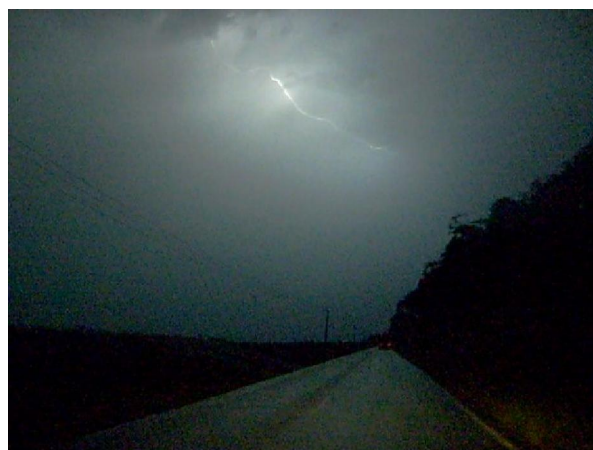


Fig. 56 - Descargas intra-nuvem com desenvolvimento predominantemente horizontal em Victoria, Austrália e no Moju, Pará.

As antenas dos sensores de raios que operam na faixa de VLF estão posicionadas para receber a onda de polarização vertical (do tipo TM), além do mais os raios CG são mais intensos, mascarando ainda mais a detecção de Raios IC, daí porque nas especificações técnicas de todos os sensores de raios, a eficiência de detecção para raios intra-nuvem é bem menor que a eficiência de detecção para raios nuvem-terra. Em função disso fica difícil diferenciar IC de CG, usando-se para isso principalmente o critério de intensidade de sinais, seguido por alguma discriminação por forma de onda. O sensor LPATS IV introduziu uma variável advinda do processamento digital no sensor, reportada como de excelente resultado na discriminação IC/CG, mas que não chegou a ser ativada, embora essa informação seja enviada para o sitio central e reconhecida pelo software, uma vez que este foi descontinuado.

O método padrão usa o valor da variável pico-pro-zero e compara com um valor padrão de 10 microssegundos, classificando como IC os raios com valores iguais ou menores que esse valor; adicionalmente pode especificar critério que: se todos, 1, 2 ou três sensores determinaram com IC, então será IC. Há também uma sintonia fina baseada nos parâmetros de precisão determinados (elipse de erro, χ quadrado, etc.).

Para minorar essa deficiência pode-se usar a antena inclinada, mas um esquema que pode ser adotado seria o uso de um *array* de antenas que recebesse as duas formas de ondas, auxiliado por uma rotina em DSP para a discriminação dos raios para terra. Outra abordagem está no uso de frequências mais altas para a detecção das descargas intra-nuvem.

CAPÍTULO 6

A DETERMINAÇÃO DO LOCAL DE OCORRENCIA

6.1 O Problema da Localização

O problema da localização de um evento de raios pertence à área de radio localização, que tem, ao longo dos anos, recebido extensas contribuições técnicas - científicas em função da importância em se determinar remotamente a ocorrência de um evento. Essas técnicas utilizam como dados de entrada de uma ou mais medições, tais como azimute, tempo de chegada/propagação e espectro de potência recebida.

O conceito básico da localização está apoiado em técnicas de triangulações, trilaterações e multilaterações, a partir de um conjunto de pontos de localização perfeitamente conhecidas, sendo importante a distância entre eles ou linha base.

Falsas localizações ocorrem devido a ruídos de medição, erros de calibração, efeitos de multi-caminhamento, “inacuracias” em estimativas de tempos e distâncias.

Neste capítulo serão analisadas as medições de azimute, de tempo de chegada, diferença de tempo de chegada e *profile* de potência ou intensidade do sinal. As técnicas baseadas em medição de azimute são coletivamente chamadas de DF (*direction finding*) ou cálculo de direções. As técnicas de tempo de chegada analisadas serão a de tempo de chegada (TOA=Time of Arrive) e diferença de tempo de chegada (ATD=Arrive Time Difference), além da análise de *profile* de potência recebida.

6.2 Medição de Azimute

A medição de azimute é conseguida fazendo uso de características direcionais das antenas, utilizando o ponto de máximo ou de mínimo para a localização da direção, o que é válido para qualquer tipo de antena. No entanto são muito usadas as antenas ditas de “quadro” ou *loop*, que em função de detectarem o campo magnético são também conhecidas como de *loop* magnético. Essas antenas foram o tipo usado por Marconi para os primeiros testes de transmissão/recepção via sinais de rádio.

Normalmente são usadas duas antenas posicionadas transversalmente conforme mostrado na Figura 57. Com esse tipo de antenas são introduzidos erros devido à posição rela-

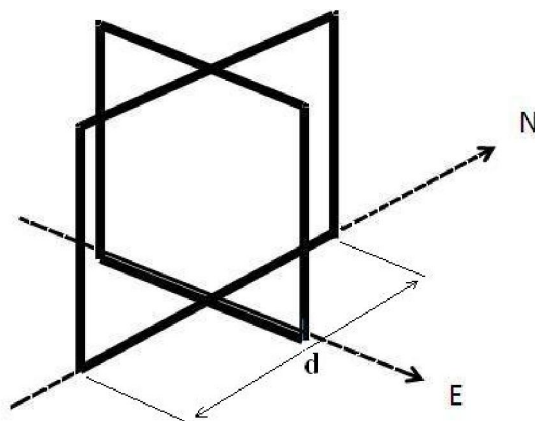


Fig. 57 – Conjunto de antenas loop usado para determinação de azimutes

tiva das duas antenas diferir de 90° e erros de posicionamento do conjunto em relação aos pontos cardeais do local. Como essas antenas são sensíveis a um campo magnético perpendicular a direção de propagação como o emitido por um raio para terra (TM), mas muito pouco sensível para um campo emitido por uma descarga na nuvem (TE). Qualquer diferença de direção do campo magnético introduz erros na determinação do azimuth e para minimizar esses efeitos são usados receptores do tipo *gated*, que usam só os primeiros microssegundos da frente de onda, numa tentativa de minimizar os erros no cálculo do DF.

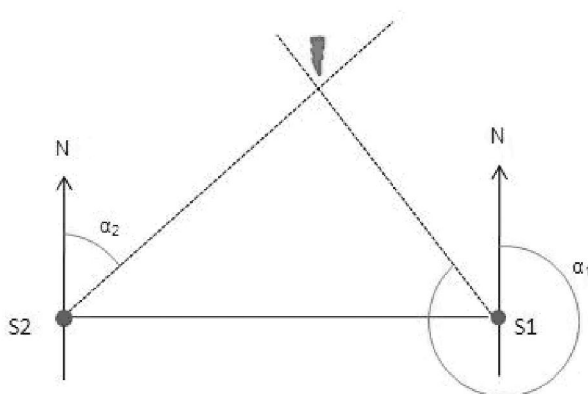


Fig. 58 - O processo de triangulação

Outra característica desse esquema é que há uma ambigüidade de 180° na direção determinada, usando-se uma antena de campo elétrico para resolver essa ambigüidade. Essa, antena, na forma de uma antena de placa (*plate antenna*) também é necessária para a correta determinação da polaridade dos raios (igual à do campo elétrico) em função do fato de que o

sinal é detectado pelo campo magnético. Uma vantagem é que só são necessárias duas medições (sem ambigüidade) para determinar-se uma posição, o que teoricamente exigiria menor densidade de sensores para determinada área. A tensão induzida em um loop vertical por um sinal polarizado verticalmente chegando horizontalmente com um ângulo φ ao plano do loop vale

$$E_r = 2.E.\text{sen}(\Delta.\cos \varphi/2) \quad (6.1)$$

Válido para uma espira com espaçamento Δ radianos, onde E é a voltagem induzida, que para pequenos espaçamentos ($d < \lambda/4$) pode ser re-escrita

$$E_r = E.\Delta.\cos \varphi \quad (6.2)$$

E para dois loops ortogonais, a tensão diferencial dos dois loops vale $dE_r = \tan \varphi$

O azimute de chegada é dado por:

$\varphi_i = \tan^{-1}(y_i - y_m/x_i - x_m)$ e a reta sob a qual encontra-se o alvo é dada por

$Y_m = x_m \cdot \tan \varphi_i + (Y_i - x_i \cdot \tan \varphi_i) \quad i = 1, 2 \dots$, resolvendo-se o sistema para $i=1,2$ temos o ponto de intercepção de duas retas

$$x_m = (y_2 - y_1 - x_2 \cdot \tan \varphi_2 + x_1 \cdot \tan \varphi_1) / (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (6.3)$$

$$y_m = x_m \cdot \tan \varphi_1 + (y_1 - x_1 \cdot \tan \varphi_1) \quad (6.4)$$

A situação do calculo é mostrado graficamente na Figura 58.

6.3 Medição de Tempo de Chegada

Nesta técnica é medido o tempo de propagação do sinal, e uma vez conhecido o instante em que o sinal foi emitido podemos calcular a distância através da equação de um círculo, sendo denominado este método de TOA (Time Of Arrive) que é o método utilizado pelo sistema GPS, que transmite sua posição para o receptor, permitindo a determinação do instante em que o sinal foi emitido que com a medição do tempo de chegada estima-se a distancia ao ponto do evento.

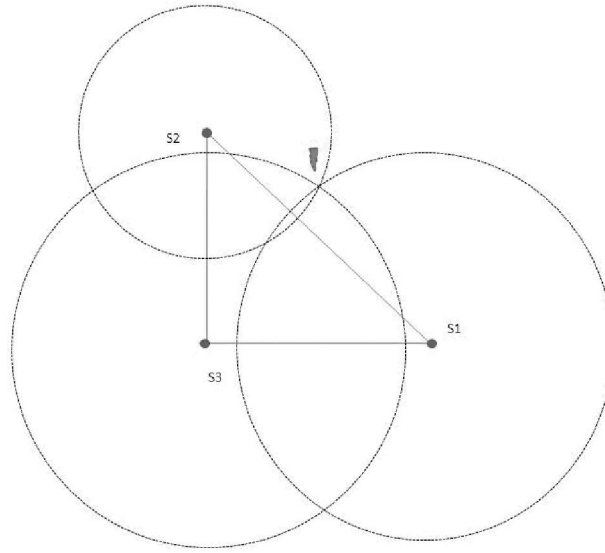


Fig. 59 - O processo de trilateração

Como no caso dos sistemas de raios não se sabe a priori o instante da ocorrência, o método não é usado em função dessa necessidade de estimarem-se as coordenadas do local do evento de raios. Neste caso temos

$$t_i c = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (6.5)$$

que representa a equação de um círculo, resolvendo-se o sistema de 3 equações obtém-se o ponto de interseção de 3 círculos de raios R1, R2, R3 como mostrado no gráfico da Figura 59.

$$x_m = \frac{(y_2 - y_1)C_3 - (y_2 - y_3)C_1}{2[(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3)]} \quad (6.6)$$

$$y_m = \frac{(x_2 - x_1)C_3 - (x_2 - x_3)C_1}{2[(y_2 - y_3)(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1)(x_2 - y_3)]} \quad (6.7)$$

$$C_1 = x_{22} + y_{22} - x_{12} - y_{12} + R_{12} - R_{22}$$

$$C_3 = x_{22} + y_{22} - x_{32} - y_{32} + R_{32} - R_{22}$$

6.4 Medição da Diferença de Tempo de Chegada

Computando-se a diferença do tempo de chegada, a necessidade de saber-se a priori o instante de ocorrência é filtrada pela diferença [Gustafsson e Gunnarsson, 2009]; a Figura 60

mostra o gráfico do algoritmo. Temos então o algoritmo ATD (Arrive Time Difference) que tem suas coordenadas calculadas através da formula de uma hipérbole, sendo por esse fato, também conhecido como sistema hiperbólico.

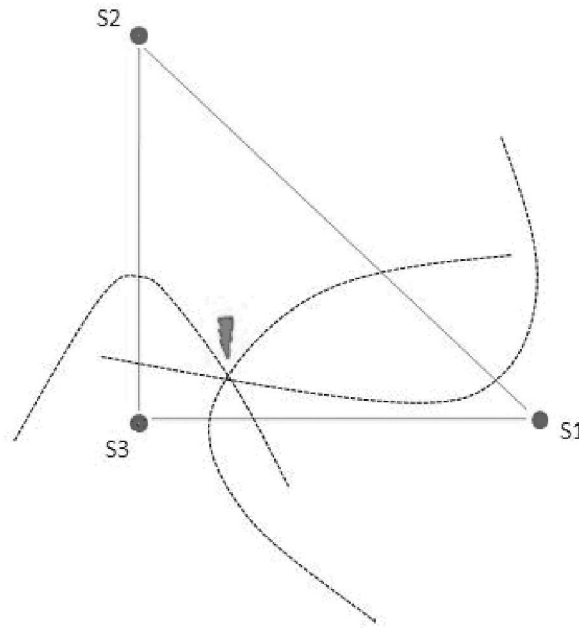


Fig. 60 - O algoritmo ATD

Dados os tempos de chegada do sinal t_i e t_j relativos aos sensores i e j , calcula-se a diferença desses tempos δ_{ij} as coordenadas x_r e y_r do local de ocorrência do raio devem satisfazer a seguinte equação

$$\delta_{ij} = c(t_i - t_j) = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2} - \sqrt{(x_j - x_r)^2 + (y_j - y_r)^2} \quad (6.8)$$

Que é a equação de uma hipérbole com os focos nos sensores i e j . Resolvendo-se o sistema de duas equações (uma ATD) obtém-se

$$A.xm^2 + B.xm + C = 0 \quad (6.9)$$

$$ym = mx + b \quad (6.10)$$

onde A , B , m , b são funções da diferença medida.

Pelo fato de a medição hiperbólica apresentar não linearidades com a utilização de menos de quatro sensores por posição calculada, outra alternativa para os cálculos está no uso de correlação entre a diferença de tempo medido e a teórica, com a minimização da função:

$$J = \sum_{i=1}^m \frac{(\Delta T_{thi}(x, y) - \Delta T_{mi})^2}{\sigma_i^2} \quad (6.11)$$

Onde ΔT_{thi} é a diferença teórica e ΔT_{mi} é a diferença medida, com σ_i representando uma função peso.

O algoritmo ATD era conhecido desde o final de 1930, mas a 2ª. Guerra mundial postergou sua utilização e só foi usado pela primeira vez no sistema LORAN (Long Range Navegation) [Bowditch, 1995]. Também tem sido usado em sistemas de aproximação em aeroportos e na grande maioria das redes de detecção de raios atualmente em operação. A grande vantagem desse método é que a acurácia conseguida só depender da resolução do sistema marcador de tempo utilizado [Hidayat, 2007], e com o aumento linear do número de estações que detectam o mesmo evento há um aumento nC_2 de ATD's disponíveis permitindo uma otimização na determinação do fixo. O sistema GPS é usado extensivamente com vários graus de acurácia, existindo redes que usam 100, 50 e 20 nano segundos de resolução. Uma desvantagem teórica é que necessita de maior densidade de sensores para cobrir determinada área, se compararmos com os sistemas usando determinação de azimuth.

6.5 Método Interferométrico

O método interferométrico analisa a diferença de fase de uma frente de onda em função do instante de chegada e do ângulo em cada antena de um array, obtendo-se assim uma tensão que é função do azimuth e do ângulo de inclinação de chegada da frente de ondas no sistema de antena [Mardiana et al., 2001; Mardiana et al, 2002; Kawada, 2002].

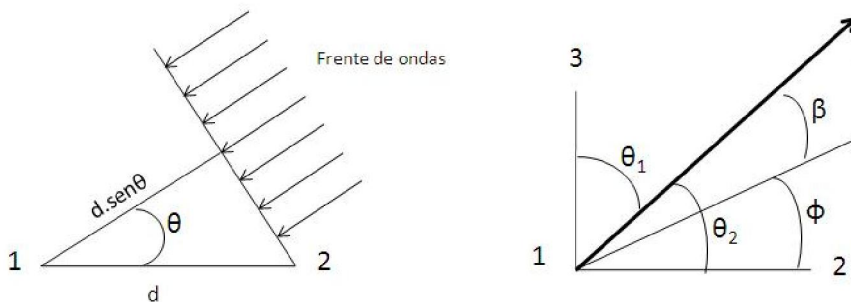


Fig. 61 - O algoritmo Interferométrico

Para uma distância do evento muito maior que a distancia d, base entre duas antenas podemos considerar raios paralelos, ou seja, onda plana, valendo a relação mostrada à esquerda no gráfico da Figura 61. A diferença de fase δ , é dado por

$$\Theta_{12} = \Theta_1 - \Theta_2 = 2\pi \cdot d \cdot \sin\Theta / \lambda = 2\pi f \cdot d \cdot \sin\Theta / c \quad (6.12)$$

$$\Theta = \sin^{-1}(c \cdot \Theta_{12} / 2\pi f \cdot d) \quad (6.13)$$

Considerando uma segunda base 1-3, perpendicular a primeira (1-2), temos

$$\cos \Theta_1 = \cos\varphi \cos\beta \quad (3) \quad \cos \Theta_2 = \sin\varphi \cos\beta \quad (4), \text{dividindo (3)/(4)}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\cos\Theta_2 / \cos\Theta_1) \quad \text{para } \Theta_1 < 90^\circ \text{ e } \beta < 90^\circ$$

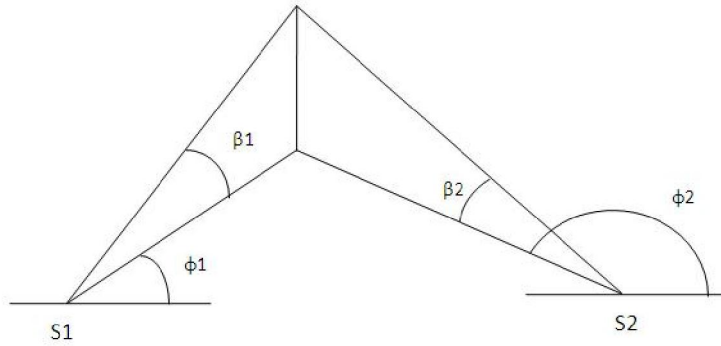


Fig. 62 - O algoritmo Interferométrico 2

Com relação à geometria da Figura 62, onde são mostrados dois sítios qualquer de sensores, podemos inferir

$$x = (\tan \varphi_1 \cdot X_1 - \tan \varphi_2 \cdot X_2 - Y_1 + Y_2) / \tan \varphi_1 - \tan \varphi_2 \quad (6.14)$$

$$y = \tan \varphi_1 (x - X_1) + Y_1 \quad (6.15)$$

$$z_1 = \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2} \cdot \tan\beta_1$$

$$z_2 = \sqrt{(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2} \cdot \tan\beta_2$$

$$z = (z_1 + z_2) / 2 \quad (6.16)$$

CAPÍTULO 7

DESEMPENHO OPERACIONAL

7.1 A Rede de Detecção de Raios do SIPAM

Embora sistemas para detecção de raios baseados em satélites comecem a ser estabelecidos, os atuais sistemas para detecção e medição de raios apóiam-se fortemente em uma rede, geograficamente distribuída para realizar seus fins. A rede que será utilizada neste trabalho é a rede de detecção de raios do SIPAM (RDR-SIPAM), que coleta dados para a Amazônia Oriental, dando suporte a área de meteorologia, estudos de eventos extremos, suporte a operação de empresas de *utilities* (empresas elétricas, de telecomunicações e águas), apoio a defesa civil, base para pesquisa de eletricidade atmosférica e outros usuários governamentais.

Essa rede é composta por sensores do tipo LPATS IV, usando um esquema de detecção hiperbólico baseado na diferença de tempo de chegada (ATD), com uma resolução GPS de 50 ns, classe de exatidão locacional de 80-160 m, receptor com faixa de passagem de 1 a 400 kHz, eficiência de detecção média de 73% conseguindo detecções a 1500km com classe de exatidão de 10km. Alguns valores de corrente de raios calculados com esse algoritmo apresentam valores considerados muito altos (centenas de kA) e permanecem à espera de uma explicação [Zepka e Pinto Jr, 2008].

7.2 Parâmetros de Avaliação

Para a avaliação de um sensor de raios são usados alguns parâmetros como:

- o tempo despendido no processamento de uma ocorrência (dead time, tempo de rearme);
- a faixa de passagem dos sinais recebidos e o nível de digitalização do DSP utilizado.

O tempo de rearme é sem duvida o mais importante, pois enquanto o sensor não terminar de processar uma dada ocorrência não poderá analisar uma nova.

Os três principais parâmetros para avaliação de uma rede de detecção de raios são:

- a eficiência de detecção DE (Detection Efficiency),
- a exatidão posicional PA (Positional Accuracy) e
- o estado de calibração dos sensores e algoritmos de processamento.

A DE é definida com o percentual de raios detectados em relação ao número de ocorrências total para uma dada região. A DE absoluta é impossível de ser calculada, uma vez que o número total de raios é quase impossível de ser medido. Uma boa aproximação está em medições com câmeras de alta velocidade, mas fazer isso em toda área de cobertura é muito difícil, assim existem métodos alternativos:

1 Compara-se a distribuição de raios total com a distribuição de uma área de DE conhecida (medido com câmeras óticas, por exemplo) e por um processo de re-amostragem, corrige-se a distribuição total em função da amostragem conhecida [Rompala et al., 2003]. O problema com esse tipo de metodologia é que devemos ter um bom número de áreas conhecidas distribuídas pela área total, tarefa difícil e custosa para obter-se.

2 Outra abordagem consiste em correlacionar os eventos de raios a uma distribuição conhecida, como a distribuição gama e corrigir em função de estudo de regressão de DE versus número de sensores simultâneos que participaram em cada ponto de detecção [Orville, 1994], obtendo-se assim a DE absoluta [Pereira et al., 2008].

Neste capítulo serão determinados parâmetros técnicos da Rede Detecção de raios do SIPAM como base para avaliação de desempenho operacional de sistemas de sensores.

A eficiência de Detecção foi avaliado com a técnica 2, descrita acima. O ponto de partida para a avaliação da DE, está na análise do histograma dos dados coletados pela rede de detecção de raios. Na Figura 63 esta mostrado o histograma dos dados da RDR SIPAM:

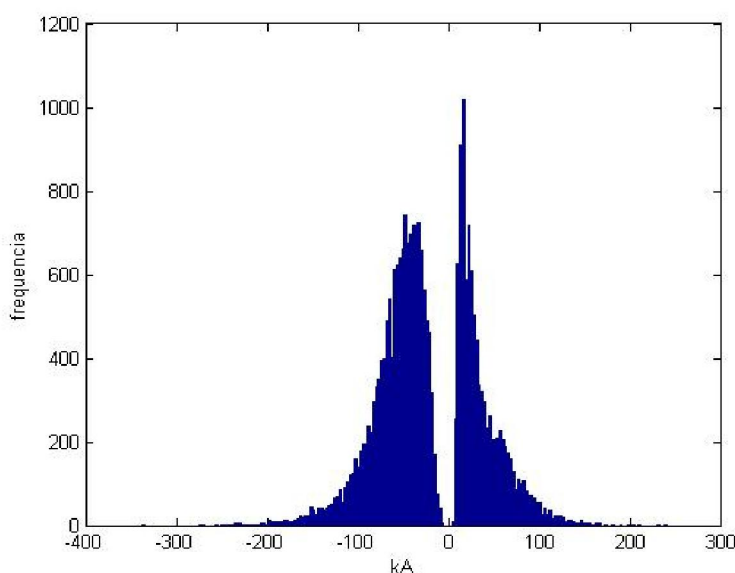
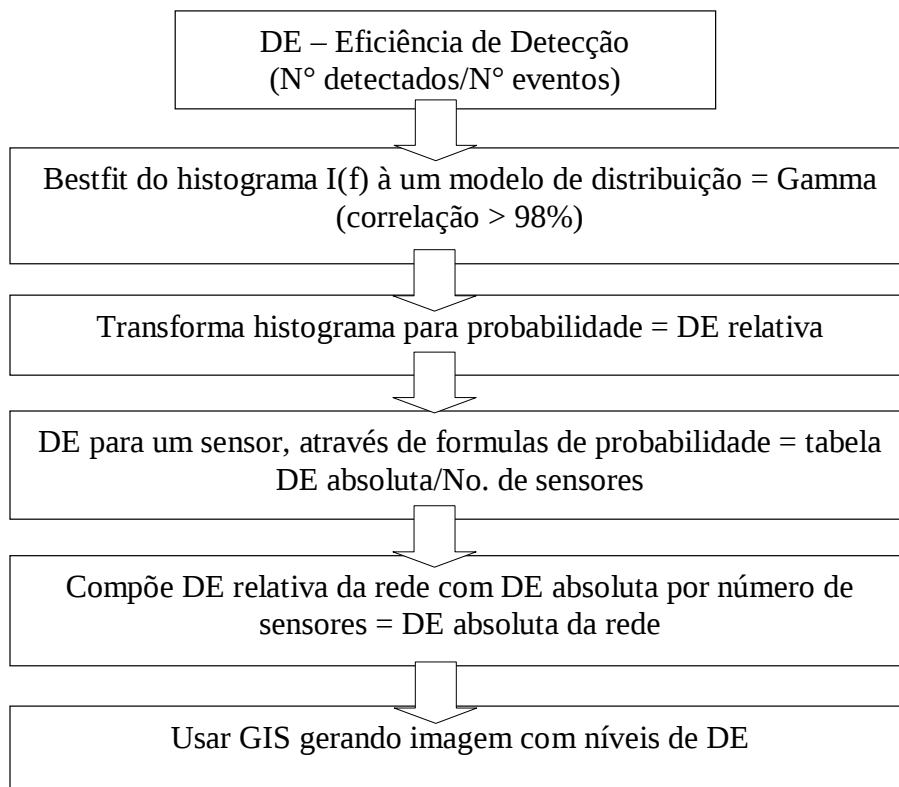


Fig. 63 - Histograma dos dados da RDR SIPAM

Utilizando-se o fluxograma:



Obtém-se como resultado um mapa como o mostrado na Figura 64, de onde podemos constatar uma eficiência de detecção média, em função do baixo índice dos sensores usados e a grande ineficiência do algoritmo, como veremos adiante.

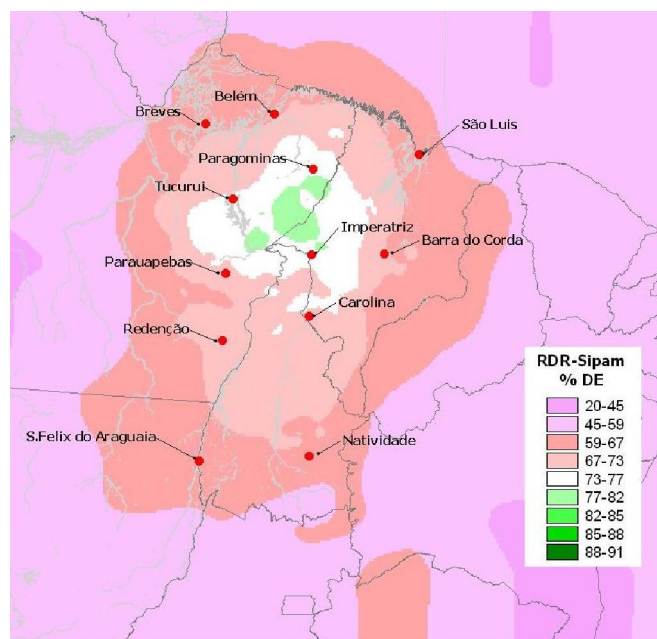
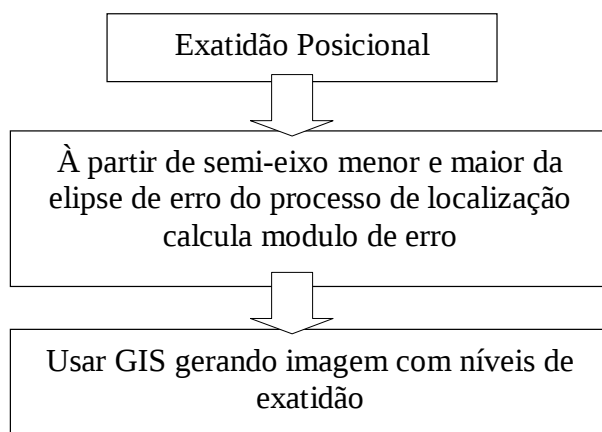


Fig. 64 - Imagem em tons de cinza da eficiência de detecção da RDR-SIPAM;

A exatidão posicional da detecção exprime o erro cometido no cálculo das coordenadas da localização geográfica do evento de raios. Como o software de controle faz uma avaliação de erro dos algoritmos e este valor está associado aos dados da ocorrência podemos plotar uma imagem com os valores de erros, como mostrado na Figura 65, utilizando o fluxograma:



Obtendo o mapa da Figura 65.

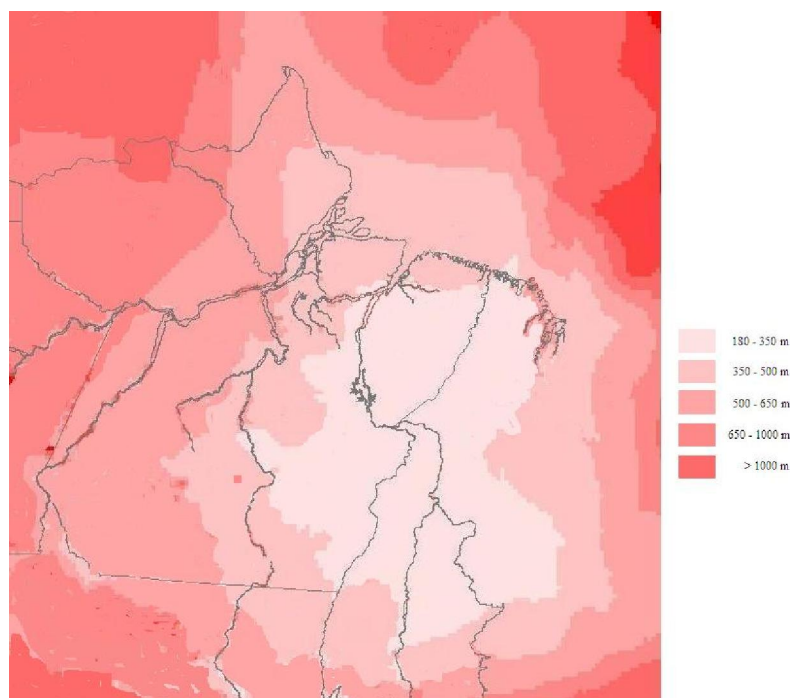


Fig. 65 - Imagem com a exatidão posicional para a RDR-SIPAM, instalada na Amazônia Oriental

7.3 Análise do Algoritmo de Detecção da RDR SIPAM

Para a análise da eficiência do algoritmo de detecção utilizado no software CP8000 da VAISALA, foram coletados dados em tempo real da central de controle da RDR SIPAM, em Belém, com início no dia 27/02/2009 às 12:08 hs até o dia 13/03/2009 às 05:42 hs o que

perfaz aproximadamente 15 dias de dados. Na época estavam em funcionamento 5 sensores em Belém-PA, Paragominas-PA, Imperatriz-MA, Parauapebas-PA e Redenção-PA, registrados com os códigos 36, 40, 43, 44 e 46 respectivamente.

Foram registrados no total cerca de 13,4 milhões de eventos e desse total a grande maioria é de eventos não correlacionados (UNCORR), com um total de 10 milhões (44%) de eventos registrados por apenas um dos sensores, mas identificados como eventos de raios.

Na tabela 12 podemos ver um exemplo dos dados que são exibidos em tempo real, tendo acima uma descrição dos campos mostrados em cada linha e a definição de alguns códigos de qualidade ou indicação, mostrados pelo algoritmo de processamento do sistema CP8000 da Vaisala:

1 - A primeira linha da tabela representa os dados da detecção com os campos: data, hora-minuto-segundo-nano segundo, latitude, longitude, altitude (m), intensidade do sinal normalizada, multiplicidade, semi-eixo maior da elipse de erro (km), semi-eixo menor da elipse de erro (km), excentricidade da elipse de erro, ângulo de orientação da elipse de erro (°), χ -quadrado, no. de sensores usados na solução, códigos de qualidade.
 2 - A segunda linha mostra a contribuição de cada sensor, com os campos: código do sensor, nano segundo, micro segundo de diferença, tempo de subida, ângulo, ângulo corrigido, desvio angular, sinal medido (LLP), RNSS, diferença de RNSS, multiplicidade, distância para a ocorrência (km), códigos de qualidade.
 3- Os principais códigos usados são: G – nuvem-terra, C – intra-nuvem, H – solução hiperbólica, OK – passou em todos os testes, NOPOSN – nem posição inicial nem otimizada encontrada, NOSTRT – posição inicial não encontrada, UNCORR – informado por apenas um sensor.

a)	2009-03-13 05:42:11.582248000	0.1687	-60.2471	0	+543.3	0	16.9	1.3	13.0	293.8	18.0	4	G H_ST OK
	36	.586658100	-4.25	5.8	0.0	0.0	__	+37.5	+702.3	-159.0	0	1323.0	_ST_ST __ PG_S_
	46	.587109900	1.18	5.1	0.0	0.0	__	+13.1	+273.8	+269.5	0	1456.3	_ST_T_d PG_S_
	40	.587189750	8.51	7.3	0.0	0.0	__	+36.7	+780.0	-236.7	0	1478.5	_ST_ST __ PG_S_
	43	.587455900	-5.43	6.1	0.0	0.0	__	+18.4	+417.2	+126.1	0	1562.0	_ST_ST __ PG_S_
b)	2009-03-13 05:41:45.313967300	-4.9074	-47.0967	0	-105.9	0	2.3	0.4	5.8	284.6	0.0	3	G H_ST NOPOSN
	44	.315091800	0.00	7.8	0.0	0.0	__	-42.2	-166.9	+61.0	0	336.7	_ST_ST __ _G_S_
	36	.315355600	0.00	4.3	0.0	0.0	__	-19.6	-98.1	-7.8	0	415.3	_ST_ST __ _G_S_
	46	.315540600	0.00	5.0	0.0	0.0	__	-9.2	-53.0	-52.9	0	470.8	_ST_ST __ _G_S_
	43	.315824700	1600.23	3.5	0.0	0.0	__	-10.6	-7.8	-98.1	0	76.2	_ST __ _dd _G_S_ RC
c)	2009-03-13 05:42:07.976393350	0.0000	0.0000	0	+0.0	0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0	G ? __ NOSTRT
	46	.976393350	-3.55	5.9	0.0	0.0	__	-9.0	+0.0	+12.4	0	335.6	_ST __ __ _G_S_
	43	.976487350	-341.91	5.4	0.0	0.0	__	-13.8	+0.0	+0.9	0	465.2	_ST __ __ _G_S_
	44	.976899400	-2.68	0.7	0.0	0.0	__	-8.1	+0.0	+5.9	0	487.0	_ST __ __ _G_S_
	40	.977759350	-1.05	12.3	0.0	0.0	__	-12.8	+0.0	-4.2	0	744.3	_ST __ __ _G_S_
d)	UNCORR 44	2009-03-13 05:42:17.759246500	1	0.0	+20.0	3.9	22.0	LPAT4					
	UNCORR 44	2009-03-13 05:42:17.833600900	1	0.0	+12.8	0.5	3.6	LPAT4 CLOUD					
	UNCORR 36	2009-03-13 05:42:17.850634650	1	0.0	+30.1	2.6	11.2	LPAT4 CLOUD					
	UNCORR 40	2009-03-13 05:42:17.863021400	1	0.0	+16.6	2.2	51.2	LPAT4					
	UNCORR 44	2009-03-13 05:42:18.054275550	1	0.0	-17.1	1.5	3.8	LPAT4 CLOUD					
	UNCORR 40	2009-03-13 05:42:18.579655050	1	0.0	+16.9	2.8	51.2	LPAT4					

Tabela-12 Dados em tempo real mostrados pelo algoritmo do sistema CP8000.

em a) temos os dados para uma localização considerada ok pelo algoritmo; em b) e c) temos uma ocorrência considerada não boa e em d) os dados para os quais não foi possível estabelecer correlação, (detectados por um só sensor).

Em b) com o código NOPOSN o algoritmo esta informando que não foi possível estabelecer uma posição inicial e nem otimizada o que é no mínimo estranho, pois a coordenada foi calculada e há redundância (5 sensores) para otimização.

Em c) com o código NOSTRT o algoritmo informa que não foi possível estabelecer uma posição inicial, que é uma característica de algoritmos de busca de interseção dos pares de hipérbole, o tipo mais simples de algoritmo; não sendo possível o cálculo das coordenadas, embora tenha sido calculado a distância do sensor ao evento.

Na tabela 13 é mostrado um resumo dessas análises, de onde podemos concluir as seguintes observações:

- O valor de 40.681,34 eventos/hora, calculado a partir dos dados coletados da RDR-SIPAM estão dentro dos valores observados (10.000 a 60.000 eventos/hora) por outras redes de alcance mundial [Gaffard et al., 2008].

Tabela-13 Resumo da análise do algoritmo do sistema CP8000

Tipo de Evento	Contagem	%
(a) Numero total de eventos em 13.75 dias	13.424.843	
Numero de eventos/hora	40.681,34	
(b) Não correlacionados (UNCORR), 1 sensor	10.052.241	
Identificados como intra-nuvem	4.427.949	44
(c) Sem posição inicial (NOSTRT), 2 sensores	1.154.487	
Identificados com intra-nuvem		
(d) Sem posição inicial (NOSTRT), =>3 sensores	1.918.773	
Identificados como intra-nuvem		
(e) Sem posição inicial e otimização (NOPOSN)	24.896	
Identificados como intra-nuvem		
(f) Com valor grande de elipse de erro (LRGELL)	4.522	
Identificados como intra-nuvem		
(g) Identificados (OK)	322.165	
Identificados como intra-nuvem	128.169	39,78
Passiveis de detecção (c+d+e+f+g)	3.424.843	

Identificáveis (d+e+f+g)	2.270.356	
DE pontual aproximada com 5 sensores simultâneos (Identificáveis/passíveis de detecção)	66,29%	

- Esses dados nos permitiu calcular a eficiência de detecção intrínseca da rede em função do numero de sensores que participaram na localização, obtendo-se um valor de 66,29% para o caso de 5 sensores, valor que é corroborado por outras pesquisas [Orville, 1994].

- Cerca de 65% de eventos com 3 ou mais registros, não foram calculados em função do algoritmo não ter podido determinar um valor inicial. Para esse tipo de evento, fizemos um cálculo gráfico da posição, como mostramos na Figura 66, onde podemos perceber que a posição está perfeitamente determinada, sendo o eixo maior da elipse de erro menor que 500m.

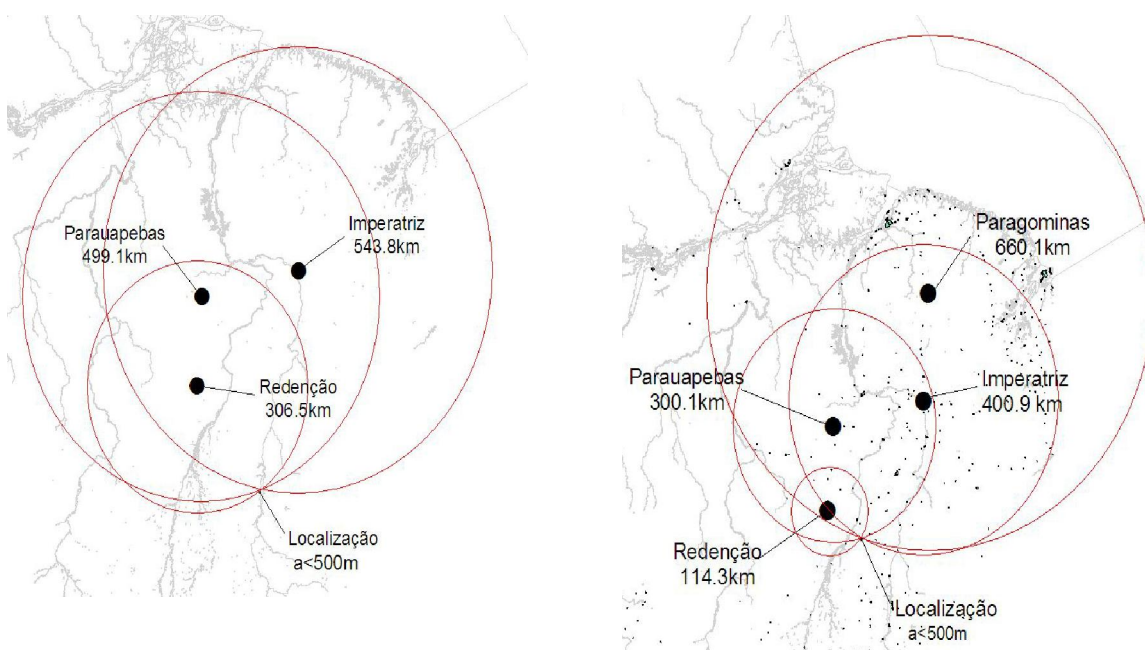


Fig. 66 - Avaliação gráfica das coordenadas não calculadas pelo algoritmo CP8000 para uma ocorrência de 3 sensores e outra com quatro.

Esses exemplos levam a conclusão que a eficiência de detecção do algoritmo computacional usado tem que ser levado em conta, na determinação da eficiência de detecção do sistema como um todo e também na escolha de um sistema de detecção. Verificamos também, a partir dos dados da tabela 12 e dos resultados mostrados na Figura 66 que ajustes têm que ser feitos nos parâmetros fornecidos pelo fabricante sob pena de perda de dados, pois é melhor termos dados com precisão inferior, se for o caso a não termos dados nenhum.

Para efeito deste estudo foram capturados dados como os mostrados na tabela 12 para os dias de 27/02/ as 5:00 hs até 13/03/2009 as 02:hs e com esses dados foi construído a tabela 13 com o resumo dessas observações.

7.4 Métodos de Calibração

Segundo o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) e outras instituições, em sua publicação VIM - Vocabulário Internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia:

Ajuste - É uma operação destinada a fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com o seu uso. Pode ser automático, semi-automático ou manual.

Calibração - É o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões.

O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento de valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas.

Podemos depreender dois tipos de calibração: a calibração em laboratório e a calibração no campo [Hidayat, 2007]. No laboratório as atividades consistem de levantamento do perfil de frequência dos instrumentos utilizados, em um sinal de um gerador de funções de RF é injetado, e na saída mede-se a resposta do sensor no domínio do tempo e da frequência, esse procedimento pode ser executado no sensor e no conjunto do sensor + antena, medindo-se a performance e a aderência as especificações do sistema.

Para as verificações de campo podemos observar vários níveis de calibração: o valor do campo recebido a nível da antena tem que ser equacionado a volts/m e correlacionado com o valor da tensão obtida na saída do amplificador e entregue a conversão analógica digital e nesse processo, um estudo dos valores médios de influencia dos objetos em torno da antena há que ser estimado; em seguida sinais de raios de correntes conhecidas, que podem ser estimados com modelos de corrente de raios, tem de ser correlacionados com os valores determinados e geradas fórmulas para estimativa das correntes de raios.

Para o primeiro nível de calibração o conhecimento dos ganhos nos estágios de amplificação devem ser determinados, além de valores do ganho da antena utilizada. Para as medições é essencial o uso de medidores de intensidade de campo, calibrados e de reconhecida procedência.

Para o segundo nível de calibração o método comumente usado é o de raios trigados, ou induzidos, onde pode-se aferir a acurácia da localização, os parâmetros da corrente de descarga são medidos diretamente e correlacionados com os valores estimados pelos sensores que detectaram os mesmos raios trigados. Um problema com esse tipo de calibração para o caso de verificação da corrente estimada está no fato de que até agora, em experiências de raios trigados, não se obteve valores de corrente superior a 60kA [Rakov, 2009] e como os sistemas de detecção de raios atualmente em operação detectam correntes com valores bem superiores a 60kA esse método carece de complementação. Os sensores de raios em uso atualmente não possuem facilidades para calibração posterior, pois não permitem o acesso ao valor de volts/m medido na antena e entregue para os estágios de digitalização.

7.4.1 A Calibração dos LPATS-IV

O método padrão de calibração de corrente de descarga para sensores de raios foi introduzido pela Lightning Location and Protection Inc de Tucson no Arizona-USA e utilizado pelos sensores predecessores ao LPATS IV, mas é usado para todos os sensores subsequentes indistintamente, utilizando uma normalização dos valores a uma distância de 100km para equalizar a intensidade do sinal, que é maior para os eventos mais próximo do sensor e introduziu uma unidade chamada LLP [Rovelli e Bernardi, 2007], até hoje usada, convertendo o valor do campo recebido, proporcional ao pico de campo magnético em v/m para unidades LLP, na proporção: $52 \text{ V/m} = 1158 \text{ LLP unidades}$ [Diendorfer, 2007]. Na calibração dos LPATS IV a General Atmospheric Inc usou um modelo de corrente de stroke baseado em linha de transmissão para estimativa da corrente, medindo a amplitude máxima do campo elétrico em LLP, utilizando as fórmulas

$$\text{RNSS} = \text{sinal medido} \times (\text{distância pro raio}/100)^{\beta} \times \exp[(\text{distância}-100\text{km})/\lambda]$$

O fator $\exp[(\text{distância}-100\text{km})/\lambda]$ foi introduzido levando em conta que a superfície terrestre não tem condução infinita, produzindo, portanto um valor de atenuação.

O valor da corrente de descarga é dado por: $kA = k1 \times \text{RNSS}$.

As constantes β (1.12999999) e λ (100000) são determinadas empiricamente e o fator $k1$ (0.185) é determinado experimentalmente pela correlação dos valores previstos para corrente pelo modelo de LT utilizado [Liaw et al., 1996, Kordi et al., 2002].

O software de controle da RDR_SIPAM, baseado em sensores LPATS IV só guarda os dados finais e estatísticas das localizações, não permitindo uma melhor avaliação do processo. No entanto esses dados são mostrados em tempo real no monitor, assim com o uso de um script para captura de tela em txt, os dados de um mês de funcionamento com 5 sensores operacionais, foram obtidos para o mês de fevereiro de 2009. Na tabela 12 temos o layout dos valores mostrados na tela.

Neste trabalho objetivamos duas ações de complementação de calibração:

A primeira esta na construção de um modelo eletromagnético de antenas para estimativa de campo distante, para comparação com valores detectados pelos sensores. Com a aplicação da equação 2.7 desenvolvida no capítulo 3 verificou-se diferença em torno de 20% entre os valores calculados pela fórmula e os valores medidos pelo LPATS IV.

A segunda ação está em usarem-se medições independentes, como a de campo eletrostático através de *fieldmill* e o correlacionamento, usando técnicas de redes neurais, das variáveis: variação de campo eletrostático durante eventos de raios com valores de corrente, tempo de subida, pico-pro-zero como medido pelos sensores, para os raios associados, obtendo-se famílias de curvas com esse correlacionamento a serem usados em verificação de calibração [Djalel et al., 2007] e se o método se mostrar efetivo, usar em calibração diretamente. Outro método de verificação será a detecção de sinais de estações de radio que operam nessas faixas de frequência com potência e localização conhecidas, que podem servir de referência cruzada para verificações. Pretendemos também o desenvolvimento de um transmissor de pulsos de raios para testes e calibração.

CAPÍTULO 8

NOVA GERAÇÃO DE SENSORES

8.1 A Necessidade de Novas Métricas

A maioria dos sensores atuais calcula apenas a localização do evento, enquanto que poucos vão além disso, estimando também a intensidade da corrente de descarga do raio da nuvem pro solo, a polarização da descarga (se positiva ou negativa), a taxa de variação máxima da corrente, o tempo de subida do pulso, o tempo do pico-pro-zero e a identificação do tipo de raios, se IC ou CG [Lyons e Cummer, 2005].

No entanto, com o desenvolvimento das pesquisas na área, verificou-se a necessidade de medição de novos parâmetros como a taxa de raios (*flashrate*) em intervalos de tempo de 5 minutos, que podem ser correlacionado com muitos fenômenos meteorológicos de intensidade, e pode contribuir para o cálculo da eficiência de detecção do sensor. Outro parâmetro, a variação do momento de transferência de carga/corrente (corrente x comprimento do canal), tem sido associado à ocorrência de *sprite*'s.

Também os valores de *continuing current* e m-componentes têm sido associados a efeitos biológicos das descargas de raios, a ocorrência de *blue jets* e *sprite* [Schienle et al., 1998; Reising et al., 1996], e apesar de serem descobertos e estudados pela luminosidade de câmeras de alta velocidade, estão associados à emissão de pulsos de RF que se propagam por centenas de quilômetros, e poderiam ser determinados e estudados por meios eletromagnéticos, apenas de pequenas variações dos valores de *continuing currents*.

Um outro parâmetro, medido independentemente por outro tipo de sensor, se refere ao valor do campo eletrostático da configuração das cargas elétricas no interior da nuvem e sua variação durante a ocorrência da descarga.

Então um avanço tecnológico natural para os dispositivos sensores de raios, seria a incorporação de algumas dessas “novas” métricas no modo de funcionamento dos mesmos.

8.1.1 Taxa de raios

Os valores de taxa de raios atualmente usados normalmente vem de medições óticas através de satélites como é o caso do LIS. Os valores da taxa de raios observados na área de cada sensor podem ser calculados localmente e enviados para a central e com o conjunto de taxa de raios de todos os sensores teríamos uma visão espacial dessa métrica.

8.1.2 Campo Eletrostático

A incorporação de uma antena de onda progressiva (traveling wave) operando como tipo lenta, que em alguns sensores usando antenas do tipo loop magnético já a incorporam, com o objetivo de determinação da polaridade dos raios, com o uso de circuitos apropriados podem registrar as variações do campo eletrostático na área de operação do sensor e permitir a estimativa dos momentos de carga e corrente, por exemplo.

8.1.3 Momento da Corrente

O cálculo da variação do momento da corrente envolve o conhecimento do comprimento do canal do raio, parâmetro que pode ser modelado pelo software de controle, que junto com a estimativa de variação da carga propiciaria o cálculo dessa métrica, que normalmente é utilizado na prospecção de sprites, e poderiam qualificar melhor outros processos, como melhorar a estimativa de corrente do raio. As formas de onda dos sinais de raios recebidos a distância podem ser entendidas como a convolução do momento de corrente com a função de transferência do meio, incluindo aí os efeitos da propagação e, portanto, a partir desses campos recebidos e medidos, por um processo inverso de deconvolução, o valor do momento da corrente é recuperado. No entanto, o mesmo é válido para os sensores VLF dos receptores de raios, sendo que esses cálculos poderiam ser introduzidos no próprio receptor ou no programa de controle central.

8.1.4 Continuing Current e M-Componentes

Alguns parâmetros como continuing current e m-componentes são adquiridos através de câmeras de alta velocidade, mas poderiam ser identificados através de processamento mais elaborados do espectro das formas de ondas digitalizadas e analisadas no receptor.

8.2 Melhorias da Eletrônica

O uso de chipsets de maior velocidade é vital ao aumento da eficiência de detecção, multiplicando a capacidade de processamento do sensor.

O uso de processamento digital de sinais mais velozes e eficientes permitiria a identificação de outros processos, como é o caso de m-componentes e CC (Continuing Current).

É possível também, com um melhor processamento digital ampliar o escopo de tipos de formas de ondas identificadas, qualificando melhor o tipo de descarga (IC-CG), permitindo a identificação de processos associados com raios-whistles-ejeção de eletros na atmosfera, emissões de explosões nucleares, localização de receptores operando na faixa de recepção do sensor.

A possibilidade de armazenamento local, recuperável remotamente ou localmente, na eventualidade de falha dos meios de comunicações, aumentaria a disponibilização de dados oriundos do processamento digital, aumentando o conhecimento desses processos e a efetivação de novas análises deve ser considerada, principalmente em função do contínuo barateamento dos dispositivos de memória, como os do tipo *flash memory*.

Evidentemente essas adições encareceriam mais o custo do sistema de sensores, mas propiciariam melhor conhecimento e avanço na ciência de se entender os raios.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

9.1 Conclusões

Efetuamos uma avaliação dos tipos de sensores de descargas elétricas atmosféricas atualmente utilizados, sendo cotejado ao longo do trabalho, uma comparação entre esses diversos tipos, apoiado na teoria que esta por traz do funcionamento desses sensores, bem como baseado nas características de sinais detectados pela Rede de Detecção de Raios do SIPAM que serviu de base para as comparações

O que se constata é que os sensores atualmente usados precisam de novas medições e maior disponibilidade de aquisição desses sistemas, como forma inclusive de barateamento de custos, necessitando de ampliação de escopo, como a incorporação no mesmo sensor, de medição de campo eletrostático das nuvens de tempestade [Jayendra et al., 2009]. O modelo de normalização usado pela Vaisala só alcança 100km, precisando ser revisto.

Observamos que além das aplicações de proteção e meteorológicas, comumente usadas com esse tipo de sistema, novas aplicações podem ser buscadas, como o estudo de processos nos cinturões de radiação e na ionosfera, localização de eventos energéticos e a hipótese de conexão da atividade elétrica na atmosfera com processos climáticos.

Uma nova geração de sensores é esperado pela comunidade de usuários, com novos sensores uma sensível melhoria na detecção dos raios intra-nuvem e na determinação da corrente de descarga do raio, além da determinação de novas métricas como:

- a determinação dos valores de taxa de raios na região de cada sensor da rede, obtendo-se assim uma imagem da distribuição dessa variável ao longo da área sensoriada, já que muitos fenômenos atmosféricos têm mostrado grande correlação com essa variável, como é o caso da severidade da tempestade, entre outros.
- a determinação do valor do campo eletrostático das configurações de cargas elétricas nas nuvens, dentro do alcance do sensor.

Outro objetivo esta na extração de valores de variação de momento de carga e momento de corrente [Cummerl e Inan, 2000], como dados de apoio nas pesquisas de estabelecimento

de conexão entre as atividades de raios e fenômenos mesosféricos como os TLE's (sprite, elves, etc.).

Observamos que os sensores disponíveis não diferem muito do LPATS IV, usado pela Rede de Detecção de raios do SIPAM, que além de uma baixa eficiência de detecção também utiliza um ineficiente algoritmo de detecção, de localizar, entorno de 45% de eventos perfeitamente localizáveis, significando que a eficiência da rede poderia ser bem melhor que os cerca de 75% no geral.

O sensor WLS da Weatherbug pode ser considerado um primeiro passo na direção dessa nova geração de sensores, principalmente pela melhoria considerável da detecção de raios intra-nuvem e uso de eletrônica atual.

O trabalho procurou estabelecer uma revisão na metodologia de visualização da propagação de sinais eletromagnéticos na atmosfera, adotando uma visualização do transporte de energia baseado no modelo de modos de propagação, com derivação de gráficos pictóricos que visualizem esses deslocamentos, por entender que essa é uma metodologia mais adequada aos valores de frequência utilizados, em contraposição a metodologia de raios vetores, que é muito bom para altas frequências.

9.2 Recomendações

No desenvolvimento de novos sensores que sejam incorporados:

- 1- Determinação dos valores da taxa de raios na região de cada sensor da rede,
- 2- Determinação do valor do campo eletrostático das configurações de cargas elétricas nas nuvens de tempestades nas vizinhanças do sensor.
- 3- Melhorar a detecção dos raios intra-nuvem com aumento da sensibilidade do receptor, melhor sistema de antena, determinação da forma de onda e uso de novas faixas de frequência.
- 4 - Usar formas mais avançadas do algoritmo ATD.
- 5- Desenvolver algoritmos para calcular os valores de corrente contínua e M-componentes a partir do espectro da descarga.
- 6-Ampliação do modelo de normalização de dados recebidos dos atuais 100km para 300km
- 7- extração de valores de variação de momento de carga e momento de corrente, como dados de apoio nas pesquisas de estabelecimento de conexão entre as atividades de raios e

fenômenos mesosféricos como os TLE's (*sprite, elves, etc.*).

- 8- O uso de chipsets de maior velocidade é vital ao aumento da eficiência de detecção, multiplicando a capacidade de processamento do sensor. O uso de processamento digital de sinais mais velozes e eficientes permitiria a identificação de outros processos, como é o caso de M-Componentes e CC (*Continuing Current*).
- 9- É possível também, com um melhor processamento digital ampliar o escopo de tipos de formas de ondas identificadas, qualificando melhor o tipo de descarga (IC-CG), permitindo a identificação de processos associados com raios-whistles-ejeção de eletros na atmosfera, emissões de explosões nucleares, emissões de elétrons relativísticos na mesosfera, localização de receptores operando na faixa de recepção do sensor, etc.
- 10- A possibilidade de armazenamento local, recuperável remotamente ou localmente, na eventualidade de falha dos meios de comunicações, aumentaria a disponibilização de dados oriundos do processamento digital, aumentando o conhecimento desses processos e a efetivação de novas análises deve ser considerada, principalmente em função do continuo barateamento dos dispositivos de memória, como os do tipo flash memory.
- 11- Usar medição de campo elétrico em unidades V/m, provendo meio de acesso externo a esse valor para aferição e calibração do campo recebido.

10 Referências

- Akita, M.; Sato, M.; Morimoto, T.; Ushio, T.; Kawasaki, Z. 3D Observations of Cloud-to-Ground Lightning Flashes Accompanied by K-Change Using VHF Broadband Digital Interferometer. Japan Geosciences Union Meeting, Tokyo, 2008.
- Almeida, A.C.; Rocha, B.R.P.; Pereira, C.S.; Monteiro, J.H.A.; Souza, J.R.S.; Souza W.A. Statistical Analysis of High Intensity Currents in CG Lightning Events Detected by SIPAM's LDN over the Amazon Region. Ground'2008 & 3rd LPE, Florianopolis, Brazil, 2008.
- Anyamba, E.; Williams, E.; Susskind, J.; Fraser-Smith, A.; Fullekrug, M. The Manifestation of the Madden-Julian Oscillation in Global Deep Convection and the Schuman Resonance Intensity. *Journal of Atmospheric Science* v.57, n.8, 2000.
- Balser, M.; Wagner, C. Observations of Earth-Ionosphere Cavity Resonances. *Nature* n.188, p.638–641. 1960.
- Beard, K.V.K.; Ochs, H.T. Charging Mechanisms in Clouds and Thunderstorms, in *The Earth's Electrical Environment*. National Academy Press, Washington D.C. 1986.
- Behnke, S.A.; Thomas, R.J.; Krehbiel, P.R.; Rison, W. Initial leader velocities during intracloud lightning: Possible evidence for a runaway breakdown effect. *Journal of Geophysical Research*, v.110, n.D10207, 2005.
- Bodika, J.A.P.; Fernando, M.; Cooray, V.; Dharmaratna, W.G.D. A Comparison of Thunder Signatures Between Cloud and Ground Flashes Associated with Audio Frequency Pressure Variations over Sri Lanka. 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 2008.
- Bowditch, N. *The American Practical Navigator-Hyperbolic Systems-Introduction to Loran C*, 1995. Disponível em: < <http://www.irbs.com/bowditch> >.
- Brown, L. *Centennial History of the Carnegie Institution of Washington*. Cambridge University Press, UK, 2004.
- Burgess, W.C. Lightning-Induced Coupling of the Radiation Belts to Geomagnetically Conjugate Ionospheric Regions, 1993. Dissertation (Doctor of Philosophy), Stanford University, California.
- Butts Jr, D.A. An Examination of the Relationship Between Cool Season Tornadoes And Cloud-to-Ground Lightning Flashes. 1969. Thesis (Master of Science), Texas A&M University.
- Caffrey, M.; Morgan, K.; Roussel-Dupre, D.; Robinson, S.; Nelson, A.; Salazar, A. On-Orbit Flight Results from the Reconfigurable Cibola Flight Experiment Satellite (CFESat). Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, 2010, USA. Disponível em: <http://www.chrec.org/pubs/B3_FCCM09.pdf>.
- Campbell Scientific Inc. CS110 Electric Field Meter Overview. 2006.

Cohen, M.; Scherrer, P.; Scherrer, D.; Inan, U.; Mitchell, R.; Tan, J. Stanford VLF Remote Sensing Science, Engineering, Educational outreach. Space Telecommunications and Radio science Laboratory. Stanford University, 2005. Disponível em:< <http://www-star.stanford.edu/~vlf/>>.

Correia, C.F.T.; Christiano P.L. Magnetosfera: Nosso Escudo Magnético. 5CCENDFPET01 UFPB – PRG, X Encontro de Iniciação à Docência. Anais. Paraíba, Brasil, 2008.

Cotton, W.R. Storms. Geophysical Science Series, v.1, ASTER Press, Fort Collins, CO, USA, 1990.

Cummer, S.A. Modeling Electromagnetic Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v.48, n.9, p.1420. 2002.

Cummerl, S.A.; Inan, U.S. Modeling ELF Radio Atmospheric Propagation and Extracting Lightning Currents from ELF Observations. Radio Science, v.35, n.2, p.385-394, 2000.

Diendorfer, G. Lightning Location Sytems (LLS). IX International Symposium on Lightning Protection. Foz do Iguaçu, Brazil, 2007.

Djalel, D.; Ali, H.; Fayçal, C. The Return-Stroke of Lightning Current, Source of Electromagnetic Fields, (Study, Analysis and Modeling). American Journal of Applied Sciences v.4, n.1, p. 42-48. 2007.

Dowden, R.; Rodger, C.J. True Global Mapping of Lightning Using Widely Spaced VLF Receivers on the Ground. Physics Department, University of Otago, P.O.Box 56, Dunedin, New Zealand, 2005. Disponível em:< <http://www.ann-geophys.net>>.

Eack, K.B.; Suszcynsk, D.M.; Beasley, W.; Russel-Dupre, R.; Symbalisty, E. Gamma-Ray Emissions Observed in a Thunderstorm Anvil. Geophysical Research Letters, v.27, n.2, 2000.

Frey, H.U.; Mende, B.; Cummer, S.A.; Chen, A.B.; Hsu, R.R.; Su, H.T.; Chang, Y.S.; Adachi, T.; Fukunishi, H.; Takahashi, Y. Beta-type Stepped Leader of Elves-producing Lightning. Geophysical Research Letters, v.32, 2005.

Fullekrug, M.; Ignaccolo, M.; Kuvshinov, A. Stratospheric Joule Heating by Lightning Continuing Current Inferred from Radio Remote Sensing. Radio Science, n.41, 2006.

Fullekrug, M. Giant Natural Particle Accelerator above Thunderclouds. National Astronomy Meeting, Royal Astronomical Society, Glasgow, Scotland, 2010.

Gaffard, C.; Bennett, A.; Atkinson, N.C.; Nash, J.; Hibbett, E.; Callaghan, G.; Taylor, P.L.; Odams, P. Observing Lightning from the Ground over Large Areas of the Globe. TECO-2008-WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, St. Peterburg, Russian Federation, 2008.

Greenberg, E.; Price, C. Statistics of Global ELF Transients due to Lightning. Department of Geophysics and Planetary Sciences, Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel. 2006.

Gurevich, A.V.; Zybin; K.P. Runaway Breakdown and the Mysteries of Lightning. 2005. Disponível em: <<http://www.physicstoday.org>>.

Gurevich, A.V.; Gorbunov, M.E.; Kornbluch, L. Comparison Between Refraction Angles Mesured in Microlab-1 Experiment and Calculated on basis of an Atmospheric General Circulation Model. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, v.42, n.6, p.709-714, 2006.

Gustafsson, F.; Gunnarsson, F. Positioning Using Time-Difference of Arrival Measurements. Department of Electrical Engineering, Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden, 2009. Disponível em: <<http://www.control.isy.liu.se/reports/03icasspgustafsson.pdf>>.

Harrison, R.G.; Nicoll, K.A.; Ulanowski, Z.; Mather, T.A. Self-charging of the Eyjafjallajökull Volcanic Ash Plume. *Environmental Research Letters*. 2010. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org>>.

Harrison, R.G. The Global Atmospheric Electrical Circuit and Climate, 2005. Department of Meteorology, The University of Reading, Berkshire, UK. Disponível em: <arxiv.org/pdf/physics>.

Heavner, M.J.; Suszcynsky, D.M.; Smith, D.A. LF/VLF Intracloud Waveform Classification. Space and Atmospheric Sciences Group, LA-UR-03-2078, 2003.

Heckler, H.; Wetter, M.; Scheiber, K.; Schimanski, J. Lightning Current Arrester Technology – Comparison of Spark-Gap and Mov-Technology, IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 2007.

Heilmann, A.; Rodriguez, C.M. Location Error Evaluation for the Zeus Long Range Lightning Monitoring Network in Brazil. *Journal of Lightning Research*, v.3, p.10-19, 2007.

Helliwell, R.A. Coherent VLF waves in Magnetosphere. *Phil Trans R. Soc. Lond.*, n.280, p.137-149, London, 1975.

Helliwell, R.A. A Tale of two Magnetospheres - the Cold and the Hot. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v63, n.11, p.1107-1116, 2001.

Hidayat, S. Error in Lightning Location by TOA-MDF Technique. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2007.

Hidayat, S. Calibration of Measuring Instrument of Lightning Electromagnetic Field. *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2007.

Hughes, A.R.W.; Rice, W.K.M. Lightning and Whistler Ghosts. Space Physics Research Institute, University of Natal, Durban, South Africa, 1999.

Inan, U.S.; Knifsend, F.A.; Oh, J. Subionospheric VLF “Imaging” of Lightning-Induced Electrons Precipitation from the Magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, v.195, n.A10, 1990.

- Jacobson, A.R.; Heavner, M.J. Comparison of Narrow Bipolar Events with Ordinary Lightning as Proxies for Severe Convection. *Monthly Weather Review*, v.133, n.5, p.1144-1154, 2005.
- James, M.R.; Wilson, L.; Lane, L.S.; Gilbert, J.S.; Mather, T.A.; Harrison, R.G.; Martin, R.S. Electrical Charging of Volcanic Plumes. *Space Science Reviews*, v.137, n.1, 2008.
- Jayendra, G.; Lucas, R.; Kumarawadu, S.; Neelawala, L.; Jeevantha, C.; Dhamapriya, P. Intelligent Lightning Warning System. 2009.
- Jordan, D.M.; Idone, V.P.; Orville, R.E.; Rakov, V.A.; Uman, M.A. Luminosity Characteristics of Lightning M Components. *Journal of Geophysical Research* v.100, n.D12, p.25695-25700, 1995.
- Jordan, E.C.; Balmain, H.G. Electromagnetic Waves and Radiating Systems. Prentice-Hall Electrical Engineering Series-2d Edition, 1971.
- Kawada, M. Fundamental Study on Locating Partial Discharge Source using VHF-UHF Radio Interferometer System. Nagoya Institute of Technology, 2002. Disponivel em: <kawada@manage.nitech.ac.jp>.
- Kenneth, L.; Cummins, E.; Krider, P.; Malone, M.D. The U.S. National Lightning Detection Network and Applications of Cloud-to-Ground, Lightning Data by Electric Power Utilities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v.40, n.4, 1998.
- Kong, X.; Qie, X.; Zhao, Y. Characteristics of Downward Leader in Positive Cloud-to-Ground Lightning Flash Observed by High-Speed Video Camera and Electric Field Changes. *Geophysical Research Letters*, v.35, n.L05816, 5p, 2008.
- Kordi, B.; Moini, R.; Rakov, V.A. Comment on “Return Stroke Transmission Line Model for Stroke Speed, near and equal that of Light”. *Geophysical Research Letters*, v.29, n.10, 10.1029/2001GL014602. 2002.
- Koster, J.R.; Storey, L.R.O. An Attempt to Observe Whistling Atmospherics near the Magnetic Equator. *Nature* n.175, p.36-37, 1955.
- Lefeuvre, F.; Marshall, R.; Pinçon, J.L.; Inan, U.S.; Lagoutte, D.; Parrot, M.; J.J. Berthelier. On Remote Sensing of TLEs by ELF/VLF Wave Measurements on Board a Satellite. 1LPCE/CNRS, Orléans, France, 2008. Disponivel em: < <http://www.oma.be/TLE2008Workshop/Session3/Lefeuvre.ppt> >.
- Liaw, Y.P.; Cook, D.R.; Sisterson, D.L. Estimation of Lightning Stroke Peak Current as a Function of Peak Electric Field and The Normalized Amplitude of Signal Strength: Corrections and Improvements. Environmental Research Division, Argonne National Laboratory, Argon Illinois, Notes and Correspondence, 1996.
- Lowke, J.J. Formation, Structure and Development of the Stepped Leader. 29th International Conference on Lightning Protection. Uppsala, Sweden. 2008.

Lynn, K.J.W.; Crouchley, J. Night-Time Sferic Propagation at Frequencies below 10 kHz. Australian Journal of Physics, n.20, p.1001-8, 1967.

Lyons, W.A.; Cummer, S. Comprehensive Characterization of Lightning Parameters during the Houston Environmental Aerosol Thunderstorm Project (HEAT). Dept. of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Dept. of Earth Sciences, University of Northern Colorado, 2005.

Manninen, J.; Turunen, T. The Observed Polarization of Sferics in the Frequency Range of 0.1-8.0 kHz and Corresponding Features Seen in the ELF-VLF Emissions of Magnetospheric Origin. Geophysical Research Abstracts, v.8, n.03576. 2006.

Mardiana, R.; Morimoto, T.; Kawasaki, Z.I. Imaging Lightning Progression Using VHF Broadband Radio Interferometry. IEICE Trans. Elétron, v.E84-C, n.12, 2001.

Mardiana, R.; Kawasaki, Z.I.; Morimoto, T. Three-Dimensional Lightning Observations of Cloud-to-Ground Flashes Using Broadband Interferometers. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics n.64, p.91 –103, 2002.

Morse, R.A. Franklin and Electrostatic. Lecture, Wright Center for Science Teaching, Tufts University, 2004.

Milikh, G.M.; Guzdar, P.N.; Sharma, A.S. Gamma Ray Flashes due to Plasma Process in Atmosphere: Role of Whistler Waves. Journal of Geophysical Research, v.110, n.A02308, 7p, 2005.

NEA-National Environment Agency. Weather Wise Singapore, 2009. Disponível em <<http://app2.nea.gov.sg>>.

Neubert, T.; Kuvvetli, I.; Budtz-Jorgensen, C.; Ostgaard N.; Reglero, V.; Arnold, N. The Atmosphere-Space Interactions Monitor (ASIM) for the International Space Station. ILWS Workshop 2006, Goa, 2006.

Orville, R.E. Cloud-to-Ground Lightning flash Characteristics in Contiguous United States: 1989-1991. Journal of Geophysical Research, v.99, n.D5 p.10833-10841, 1994.

Osprey, S.M. et al. Sudden Stratospheric Warming seen in MINOS deep Underground muon Data. Geophysical Research Letters, 2009.

Pack, S.; Ruther, M.; Bischof, H. Optical Detection and Evaluation of Lightning Discharge. 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 2008.

Pereira, C.S.; Aleixo, J.G.; Rocha, E.P.; Simões Neto, B. A Statistical Approach to the Determination of the Lightning Detection Efficiency of the SIPAM's Lightning Detection Network. International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, 2008.

Pereira, C.S.; Rocha, B.R., Almeida, A.C. Correlação de Campos Eletrostáticos Medidos por Fieldmill com Ocorrência de Descargas Atmosféricas. Universidade Federal do Pará - Depto de Engenharia Elétrica, 2009.

Pereira, C.S.; Lopes J.L.M., Simões Neto B. Lightning Physics by Comparative Analysis With Meteorological Radar Data. TITAN-Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting Workshop, Belém, Brasil, 2009.

Price, C. Lightning Sensors for Observing, Tracking and Nowcasting Severe Weather. Department of Geophysics and Planetary Sciences, Tel Aviv University, 69978 Israel, n.8, p.157-170, 2008.

Ramachandran, V.; Prakash, J.N.; Deo, A.; Kumar, S. Lightning Stroke Distance Estimation from Single Station Observation and Validation with WWLLN data. Ann. Geophysics., n.25, p.1509–1517, 2007.

Rakov, V.A.; Uman, M.A. Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003.

Rakov, V. A. Positive and Bipolar Lightning Discharges: A Review. International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, 2000.

Rakov, V.A. Characteristics of Lightning to Tall Structures and Wind Turbines of Various Heights, Parameters of Rocket-Triggered Lightning. 4th International Workshop on Electromagnetic Radiation from Lightning to Tall Structures, Montreal, Canadá, 2009.

Racchidi, F. Modeling Lightning Return Strokes to Tall Structures: A Review. Journal of Lightning Research, v.1, p.16-31, 2007.

Reising, S.C.; Inan, U.S.; Bell, T.F. Evidence for Continuing Current in Sprite-Producing Cloud-to-Ground Lightning. Geophysical Research Letters, v.23, n.24. 1996.

Rhines, P.B. **Rossby waves**. 2009. Disponível em:
<<http://www.ocean.washington.edu/coursers/oc512/rossby-waves>>.

Roach, J. Earth's Magnetic field is Fading. 2004. National Geographic Magazine News. Disponível em <<http://news.nationalgeographic.com>>.

Rompala, J.T. et al. Detection Efficiency Contours for Regions Serviced by Lightning Detection Network of Limited Scope. Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity, Versailles, v.1, p.101-104, 2003.

Rovelli, C.; Bernardi M. Evaluation of the Theoretical Error for the Lightning Peak Current as Measured by Lightning Location Systems. IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 2007.
SPATIUM-Editorial. Cosmic Rays. International Space Science Institute, N11, Bern, Swiss, 2003.

ScienceDaily Staff Writers, Mysterious Ball Lightning: Illusion Or Reality? Innsbruck, Austria (SPX) May 25, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedaily.com>>.

Schienenle, A.; Stark, R.; Vaitl, D. Biological Effects of Very Low Frequency (VLF) Atmospherics in Humans: A Review. *Journal of Scientific Exploration*, v.12, n.3, p.455-468, 1998.

Schumann, W. O. Über die Dämpfung der elektromagnetischen Eigenschwingungen des Systems Erde – Luft – Ionosphäre. *Zeitschrift und Naturforschung* n.7a: p.250–252. 1952.

Sukhorukov, A.;I. On the Excitation of the Earth-Ionosphere Wave Guide by Pulsed ELF Sources. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.54, n.10, p.1337, 1992.

Tinsley, B.A. Influence of Solar Wind on the Global Electric Circuit, and Inferred Effects on Cloud Microphysics, Temperature and Dynamics in the Troposphere. *Space Science Reviews* v.1 n.28, 2000.

Udo, T. Study of the Winter Lightning Ground Flash Density Investigated by the Lightning Location Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.21, n.3, 2006.

Velinov, P.; Tonev, P. **11** - Year Variations of Atmospheric Conductivity and Electric Currents from Thunderstorms to Ionosphere during Solar Cycle - Quasi-Static Modeling of the Coupling Mechanism. *Bulgarian Academy of Sciences, Acad*, 2008. Disponivel em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006cosp.meet.1617V>>.

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

Wilson, C.T.R. The Acceleration of β -particles, in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds. *Cambridge Phil. Society Proceedings*, v.22, n.534, 1925.

Whipple, F.J.W.; Scrase, F.T. Point Discharge in the Electric Field of the Earth. *Geophysical Mem. London*, v.II, n.68, 1936.

Uman, M.A. The lightning Discharge. *International Geophysics Series* v.39, 1987, Orlando, Florida, USA.

Wild, O. Indirect Long-term Global Cooling from NO_x Emissions. *Frontier Research System for Global Changes*, Yokoama, Japão, 2001.

Wood, T.G. Geo-Location of Individual Lightning Discharge Using Impulsive VLF Electromagnetic Waveforms. 2004. Dissertation (Philosophy Doctor), Stanford University, California, USA.

Wahlin L. Atmospheric Electrostatics. Colutron Research Corp, Boulder CO, John Wile & Sons Iic, New York, 1989.

Wiens, K.; Massey, R.S.; Shao, X.M.; Eberle, M.; Eack, K.B. The Los Alamos Electric-Field Change Sensor Array. 2000. Disponivel em: <EDOT.lanl.gov>.

Zepka, G.S.; Pinto Jr, O. About the Peak Currents Above 300 kA Observed by Lightning Location Systems. 20th International Lightning Detection Conference, Tucson, USA, 2008.

