



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-12333-TDI/994**

**MONITORAMENTO DA  
ATIVIDADE ELÉTRICA ATMOSFÉRICA DO  
CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA**

Marco Antonio da Silva Ferro

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior e Francisco Carlos Parquet Bizarria, aprovada em 9 de agosto de 2004.

INPE  
São José dos Campos  
2005

551.594.22 (812.1 A/Z)


FERRO, M. A. S.

Monitoramento da atividade elétrica atmosférica do  
Centro de Lançamento de Alcântara / M.A.S. Ferro. – São  
José dos Campos: INPE, 2004.  
146p. – (INPE-12333-TDI/994).

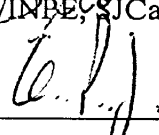
1.Eletricidade atmosférica. 2.Campos elétricos.  
3.Relâmpago. 4.Tempestades. 5.Geofísica. 6.Ciências espaciais.  
7.Alcântara. I. Título.

Aprovado(a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Geofísica Espacial.

Dr. Plínio Carlos Alvalã

  
\_\_\_\_\_  
Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr. Osmar Pinto Junior

  
\_\_\_\_\_  
Orientador/INPE, SJCampos-SP

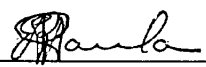
Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria

  
\_\_\_\_\_  
Orientador/CTA-IAE, SJCampos-SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Eurico Rodrigues de Paula

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Gilberto Fernando Fisch

  
\_\_\_\_\_  
Convidado/CTA-IAE, SJCampos-SP

**Aluno: Marco Antonio da Silva Ferro**

São José dos Campos, 09 de agosto de 2004.



**À Débora, Bruno e Lara,**  
cada um a razão de tudo,  
dedico.



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, o mestre supremo.

A meus pais, os primeiros orientadores no árduo trabalho de forjar o homem.

Aos meus orientadores, Dr. Osmar Pinto Jr. e Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria, pela compreensão e paciência na orientação deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

Ao Dr. Emmanuel Antonio dos Santos, pelo crédito dado, pelo incentivo desde o início, quando a idéia do trabalho não havia sequer brotado e, principalmente, pela amizade que, dessa fonte, tem o dobro do valor.

Ao Dr. Gilberto Fisch pela colaboração e pelos não poucos esclarecimentos dados.

Aos colegas do Centro de Lançamento de Alcântara que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esse trabalho fosse exequível.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ao Centro Técnico Aeroespacial e ao Centro de Lançamento de Alcântara pelo apoio na realização desta pesquisa.

E, em especial, à minha família, pelas muitas horas de convívio roubadas, pela compreensão, paciência e amor com que me apoiou.





## RESUMO

Durante as missões de lançamento de foguetes de sondagem ou de veículos lançadores, várias operações são realizadas, em cuja execução os riscos de ocorrência de descargas atmosféricas devem ser reduzidos ao mínimo possível. Instalou-se um sistema de monitoramento do campo elétrico e detecção de relâmpagos no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), no Maranhão, de modo a permitir o acompanhamento da atividade elétrica de origem atmosférica da região. A análise dos dados obtidos a partir desse sistema permitiu definir critérios relativos à atividade elétrica de origem atmosférica no CLA e, mais especificamente, no local da plataforma de lançamento, para dar apoio às decisões de realização ou não das operações envolvidas numa missão de lançamento como, por exemplo, durante as fases de montagem do veículo, simulação e no lançamento. Além dos dados gerados pelo sistema de monitoramento da atividade elétrica de origem atmosférica instalado no CLA, foram utilizados, também, os dados existentes na Divisão de Ciências Atmosféricas ACA do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA). São dados meteorológicos que foram coletados pela estação meteorológica de superfície do CLA, localizada na latitude  $02^{\circ} 22' S$ , longitude  $44^{\circ} 23' W$ , constituídos por séries temporais de 11 (onze) anos (1993 – 2003) e pela estação meteorológica do aeroporto de São Luís – MA, constituídos por uma série temporal de 53 (cinquenta e três) anos.



## **MONITORING OF THE ELECTRICAL ACTIVITY OF ATMOSPHERICAL ORIGIN IN THE LAUNCHING CENTER OF ALCÂNTARA**

### **ABSTRACT**

During a complete survey rockets or launcher vehicles launching mission, several operations are accomplished, in whose execution the risks of atmospheric discharges occurrence should be reduced to the minimum possible. An electric field and lightning detection monitoring system was installed in the Launching Center of Alcântara (CLA), at Maranhão, allowing the electrical activity accompaniment of atmospherical origin. The data analysis obtained from the system allowed defining criteria related in the CLA electrical activity of atmospherical origin and, more specifically, at the launch pad, to support accomplishment decisions, or not, the operations involved in a launching mission as, for example, during the vehicle assembly phase, launching simulation and in the launching itself. Besides the data generated by the atmospherical electrical activity monitoring system installed at CLA, it was used, also, the existent Alcântara area climatological data available in the Aeronautic and Space Institute (IAE) on its Atmospheric Sciences Division (ACA) at the Aerospace Technical Center (CTA). This climatological data were collected by the land meteorological station at the CLA, located in the latitude  $02^{\circ} 22'S$ , longitude  $44^{\circ} 23'W$ , constituted by a 11 (eleven) years (1993 - 2003) temporal series and by the São Luís's airport meteorological station, constituted by a 53 (fifty three) years temporal series.



## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	25
1.1 – Acidentes Envolvendo Veículos Espaciais.....	25
1.1.1 – Acidentes Decorrentes de Agentes Internos.....	25
1.1.2 – Acidentes Decorrentes de Agentes Externos.....	26
1.2 – Necessidade de um Sistema de Detecção e Proteção.....	27
1.3 – Necessidade de Critérios Apoiando Decisões.....	28
1.4 – Importância das Características Climatológicas da Região.....	28
1.5 – Estrutura do Trabalho.....	29
<b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	31
2.1 – Conceitos Sobre Eletricidade Atmosférica.....	31
2.1.1 – Classificação das Nuvens.....	32
2.1.2 – Formação de uma Célula de Tempestade.....	36
2.1.3 – Mecanismos de Geração de Cargas Elétricas.....	37
2.1.3.1 – Eletricidade das Tempestades.....	37
2.1.4 – Processo de Formação do Relâmpago.....	42
2.2 – Relâmpagos Induzidos.....	49
<b>CAPÍTULO 3 – INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA</b> .....	51
3.1 – Instrumentação.....	51
3.1.1 – Electric Field Mill (EFM).....	51
3.1.1.1 - Princípio de Operação.....	52
3.1.1.2 – Método de Determinação do Campo Elétrico, Quase Estático, de Tempo Bom.....	54
3.1.1.3 - Escolha do Local de Instalação.....	61
3.1.1.3.1 - Critérios para Escolha do Local de Instalação.....	61
3.1.1.3.2 – Montagem no Topo de Edifícios.....	62
3.1.2 – Medida da Intensidade do Campo Magnético Gerado por um Relâmpago.....	62

3.1.3 – Método de Determinação do Campo Elétrico Variável Gerado por um Relâmpago.....	65
3.1.4 - Thunderstorm Sensor 928 (TSS 928).....	67
3.1.4.1 - Princípio de Operação.....	69
3.1.4.1.1 – Processamento do Relâmpago.....	70
3.1.4.2 – Escolha do Local de Instalação.....	72
3.1.4.3 - Componentes Principais do Sensor.....	73
3.2 – Metodologia.....	77
3.2.1 – Etapas da Pesquisa.....	77
3.2.2 – Período dos Dados.....	77
3.2.3 – Aquisição dos Dados.....	78
3.2.3.1 - Dados Obtidos a Partir da TSS 928.....	79
3.2.3.2 – Dados Obtidos a Partir do EFM.....	81
<b>CAPÍTULO 4 - CLIMATOLOGIA DA REGIÃO DE ALCÂNTARA.....</b>	<b>83</b>
4.1 – Apresentação dos Dados Coletados em Alcântara.....	84
4.1.1 - Temperatura do Ar.....	84
4.1.2 - Umidade Relativa.....	86
4.1.3 - Distribuição de Chuva.....	89
4.1.4 - Ocorrência de Trovoada/Relâmpago.....	90
4.1.5 – Cobertura de Nuvens.....	91
4.2 – Sistemas Atmosféricos que Afetam a Região de Alcântara.....	94
4.2.1 – Padrão de Dipolo do Atlântico.....	95
4.2.2 - Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	95
4.2.3 - Linhas de Instabilidade (LI).....	96
<b>CAPÍTULO 5 – ESTUDO DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE RELÂMPAGOS DURANTE O LANÇAMENTO DE FOGUETES.....</b>	<b>97</b>
5.1 – Porque se Preocupar com Relâmpagos?.....	97
5.2 – Aspectos Sobre a Probabilidade de Ocorrência de uma Descarga Atmosférica.....	97
5.3 – Índice Ceráunico.....	98
5.4 – Densidade de Descargas.....	99
5.4.1 – Densidade de Descargas a Partir da Norma NBR-5419.....	99
5.4.2 – Densidade de Descargas a Partir dos Dados da ACA/IAE.....	99
5.4.3 – Densidade de Descargas a Partir dos Dados da TSS 928.....	100
5.5 – Tempo de Exposição.....	103
5.6 – Avaliação da Probabilidade de uma Descarga Direta.....	103
5.7 – Descarga Induzida por Foguete.....	106
<b>CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>109</b>
6.1. Relação entre Relâmpagos Intranuvem e Nuvem-Solo.....	109

6.2. Propriedades Fenomenológicas dos Relâmpagos em Relação aos Parâmetros Meteorológicos.....	111
6.2.1. Direção com Maior Número de Ocorrência de Relâmpagos.....	111
6.2.2. Relação entre a Atividade de Tempestades e os Fenômenos <i>El Niño, La Niña</i> e Padrão de Dipolo do Atlântico.....	112
6.3. Campo Elétrico.....	118
6.3.1. Campo Elétrico de Tempo Bom.....	118
6.3.2. Definição do Nível Crítico para o Campo Elétrico.....	120
6.4. Proposição de Critérios para o CLA Baseados na Atividade Elétrica de Origem Atmosférica da Região de Alcântara.....	125
6.4.1. Operações Envolvidas numa Campanha de Lançamento do VLS.....	125
6.4.2. Critérios Propostos.....	129
6.4.2.1 - Critérios Relativos ao Campo Elétrico Atmosférico.....	129
6.4.2.2 - Critério Relativo a Descargas Intranuvem e Nuvem-Solo.....	130
6.5 – Tabela Resumo.....	131
<b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>135</b>
7.1 – Conclusões.....	135
7.1.1 – Critérios.....	136
7.1.1.1 – Critérios Relativos ao Campo Elétrico Atmosférico.....	137
7.1.1.2 - Critérios Relativos às Descargas Intranuvem e Nuvem-Solo.....	137
7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	137
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>
<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE A - OCORRÊNCIA E INTENSIDADE DOS FENÔMENOS <i>EL NIÑO E LA NIÑA</i>.....</b>	<b>145</b>





## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1. Nuvem do tipo Cirrostratus.....	33
2.2. Nuvem do tipo Altocumulus e Stratocumulus.....	33
2.3. Nuvem do tipo Cumulus e Stratocumulus.....	34
2.4. Nuvem do tipo Cumulus.....	34
2.5. Nuvem do tipo Cumulonimbus.....	35
2.6. Nuvem do tipo Cumulonimbus.....	35
2.7. Estrutura Elétrica de uma Nuvem de Tempestade.....	38
2.8. Mecanismo de Separação de Cargas.....	39
2.9. Mecanismos de Separação de Cargas.....	41
2.10. Processo Colisional Termoelétrico de Separação de Cargas.....	42
2.11. Relâmpagos. Descargas nuvem-solo.....	43
2.12. Relâmpagos. Descargas solo-nuvem partindo de uma torre no alto do Monte San Salvatore, Suíça.....	44
2.13. Relâmpagos. Fotografia de um relâmpago nuvem-solo com filme em movimento (velocidade do filme: 30 m/s).....	45
2.14. Relâmpagos. Fotografia do mesmo relâmpago feita com um tipo usual de câmera.....	45
2.15. Líder Escalonado e Descarga Conectante.....	46
2.16. Estrutura do Relâmpago. Representação esquemática dos diferentes estágios de um relâmpago de descargas múltiplas, da maneira como seria registrado por uma câmera de filme móvel (esquerda: escala de tempo aumentando para a direita) e o mesmo relâmpago registrado por uma câmera convencional.....	47
3.1. Electric Field Mill model II.....	51

3.2. Esquema simplificado de montagem dos discos de um equipamento do tipo Electric Field Mill.....	55
3.3. Área dos setores do rotor.....	55
3.4. Cilindro imaginário situado entre o rotor e o estator do Electric Field Mill....	56
3.5. Circuito para medida do sinal de tensão.....	58
3.6. Carga induzida no estator em função do tempo.....	58
3.7. Gráfico da corrente e tensão, respectivamente, em função do tempo para um sinal de alta frequência ( $T = T_a \lll CR$ ).....	59
3.8. Gráfico da corrente e tensão, respectivamente, em função do tempo para um sinal de baixa frequência ( $T = T_a \ggg CR$ ).....	60
3.9. Esquema Simplificado de uma Antena tipo Bobina.....	63
3.10. Esquema Simplificado de uma antena tipo bobina conectada a um circuito amplificador.....	64
3.11. Esquema simplificado de uma antena tipo disco estático.....	66
3.12. Thunderstorm Sensor model TSS 928.....	68
3.13. Processo de discriminação da forma de onda.....	69
3.14. Critérios para escolha do local de instalação do sensor TSS 928.....	73
3.15. Disposição das antenas do sensor TSS 928.....	74
3.16. Disposição das antenas do sensor TSS 928.....	75
3.17. Alinhamento do sensor TSS 928 utilizando um “gnomon”.....	76
3.18. Tela do Sistema.....	79
3.19. Exemplo de informação sobre ocorrência de um evento de relâmpago.....	80
4.1. Média mensal da Temperatura do Ar ao longo do ano em Alcântara – MA. Período de 1993 a 1999.....	85
4.2. Média horária da Temperatura do Ar ao longo do dia em Alcântara – MA. Período de 1993 a 1999.....	85

4.3. Curva média horária de Temperatura do Ar para um mês seco (novembro) e chuvoso (março) em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.....	86
4.4. Média mensal da Umidade Relativa do Ar em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.....	87
4.5. Média horária da Umidade Relativa do Ar em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.....	88
4.6. Média horária da Umidade Relativa do Ar para um mês chuvoso (março) e um seco (novembro) em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.....	88
4.7. Distribuição mensal de Chuva em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999	89
4.8. Distribuição mensal de Chuva em São Luís - MA. Período de 1951 a 1992.	90
4.9. Frequência de ocorrência de Trovoadas e Relâmpagos em São Luís - MA. Período de 1951 a 1992.....	91
4.10. Definição dos setores para análise da cobertura de nuvens e sua localização.....	92
4.11. Variação anual da Cobertura de Nuvens para o Setor S1.....	93
4.12. Variação anual da Cobertura de Nuvens para o Setor S2.....	93
4.13. Ciclo anual da migração da ZCIT. (a) Oceano Atlântico entre 10-40°W; (b) Global entre 0-359°E e (c) América do Sul entre 45-75°W.....	96
5.1. VLS montado na mesa de lançamento.....	104
6.1. Área coberta pela TSS 928 a partir do CLA.....	111
6.3. Relação entre os fenômenos <i>El Nino</i> e <i>La Nina</i> e o número de dias de trovoada para a estação meteorológica de São Luís.....	114
6.4. Valores médios do número de dias de trovoada para cada evento e as respectivas barras de incerteza, expressas em função do desvio padrão.....	116
6.5. Valores médios do número de dias de trovoada para cada evento e as respectivas barras de incerteza, expressas em função do desvio padrão.....	117
6.6. Variação média diária do campo elétrico em torno do seu valor médio.....	119
6.7. Curva de Carnegie.....	120

6.8. Foguete utilizado nos experimentos de indução.....	121
---	-----

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
3.1 – Precipitação no primeiro semestre de 2004.....	78
4.1 – Relação entre a porcentagem total de cobertura de nuvens e a porcentagem de nuvens convectivas.....	94
5.1 – Densidade de descargas Nuvem-Solo para Alcântara.....	100
5.2 – Densidade de descargas Nuvem-Solo para Alcântara em função da fonte de dados.....	102
5.3 – Operações realizadas com o VLS completamente montado.....	105
6.1 – Relâmpagos IN e NS para o verão/outono de 2004.....	110
6.2 – Numero de Relâmpagos em cada Octante.....	112
6.3 – Anos de Ocorrência do Padrão de Dipolo do Atlântico.....	113
6.4 – Relação entre a Ocorrência dos Fenômenos e a Atividade Elétrica Atmosférica.....	115
6.5 – Relação entre a Ocorrência Agrupada dos Fenômenos e a Atividade Elétrica Atmosférica.....	116
6.6 – Relação entre a Ocorrência de <i>El Niño</i> e <i>La Niña</i> e a Atividade Elétrica Atmosférica.....	117
6.7 – Campo elétrico necessário para disparar um relâmpago devido ao lançamento de um foguete.....	122
6.8 - Tabela Resumo das Operações e Critérios para uma Campanha de Lançamento do VLS.....	132



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
AC	<i>Alternating Current</i>
B	Densidade de fluxo magnético
C	Coulomb
C	Capacitância
°C	Graus Celsius
DC	<i>Direct Current</i>
$e$	Unidade de Carga Elétrica ( $1,6021 \cdot 10^{-19}$ C)
E	Campo Elétrico
hPa	Hecto-Pascal
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
km	kilômetro
ms	Milissegundo
N	Densidade de Descargas por quilômetro quadrado por unidade de tempo
$N_c$	Densidade de Descargas nas nuvens por quilômetro quadrado por unidade de tempo
$N_g$	Densidade de Descargas para o solo por quilômetro quadrado por unidade de tempo
$q$	Representação da Carga Elétrica
rms	<i>root mean square</i>
R	Resistência
T	Período de tempo no qual um fenômeno se repete

$V$	Diferença de Potencial
$V/m$	Volt por metro
$\pi$	Número PI (3,14159....)
$\mu s$	Microsegundo
$\lambda$	Latitude Geográfica
$\xi_0$	Permissividade elétrica do vácuo



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACA	- Divisão de Ciências Atmosféricas
CLA	- Centro de Lançamento de Alcântara
CPU	- <i>Central Processor Unit</i>
CTA	- Centro Técnico Aeroespacial
EFM	- <i>Electric Field Mill</i>
ELAT	- Grupo de Eletricidade Atmosférica
HN	- Hemisfério Norte
IAE	- Instituto de Aeronáutica e Espaço
IBM	- <i>International Business Machine Inc.</i>
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISCCP	- <i>International Satellite Cloud Climatology Project</i>
KSC	- <i>Kennedy Space Center</i>
LCb	- Linha de Cumulonimbus
LI	- Linha de Instabilidade
NS	- Relâmpago Nuvem-Solo
PC	- <i>Personal Computer</i>
PCD	- Plataforma de Coleta de Dados
PDA	- Padrão de Dipolo do Atlântico
PDL	- <i>Pulse Discrimination Logic</i>
TMI	- Torre Móvel de Integração
TSS 928	- <i>Thunderstorm Sensor model 928</i>
VLS	- Veículo Lançador de Satélite

WMO - *World Meteorological Organization*

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Acidentes Envolvendo Veículos Espaciais

Programas espaciais desenvolvidos em várias partes do mundo sofreram fracassos em missões devido a problemas surgidos num dos componentes que fazem parte do conjunto formado pelo foguete de sondagem, do veículo lançador de satélite, da carga útil que ele transporta e os sistemas de apoio em terra. Problemas esses cujas origens podem ser falhas causadas por agentes internos, tais como as intrínsecas aos milhares de componentes eletro-eletrônicos, mecânicos, etc. utilizados, falhas humanas ou as decorrentes de agentes externos como, por exemplo, as surgidas em função das condições climatológicas.

##### 1.1.1 Acidentes Decorrentes de Agentes Internos e Falhas Humanas

Como exemplo das falhas causadas por agentes internos e por falhas humanas temos, no programa espacial norte-americano, os casos:

##### **Programa Apollo - Missão Apollo 1.**

Nessa missão, uma falha na isolação dos cabos elétricos ou em algum equipamento que causou uma sobrecarga nos referidos cabos, provocou centelhamento no interior do módulo, o que, por sua vez, iniciou a queima do oxigênio existente em alto nível na cabine da tripulação. Na época da missão a cabine era pressurizada com oxigênio a praticamente 100%. Uma outra falha na porta do módulo impediu que os três astronautas que estavam no módulo saíssem a tempo. Todos os três morreram (*Kennedy Space Center – NASA - The Kennedy Space Center Story*).

### **Programa Apollo - Missão Apollo 13.**

Nessa missão, um tubo de abastecimento de um dos tanques de oxigênio líquido do módulo de serviço, utilizado para alimentar as células que fornecem energia elétrica para os sistemas de suporte de vida da Apollo, foi verificado estar solto nos testes realizados em terra.

As equipes de engenheiros do *Kennedy Space Center (KSC)*, de *Houston*, de *Washington* e do fabricante do módulo em *Downey, Califórnia*, depois de estudar o problema, decidiram não trocar o tanque uma vez que o problema não afetava o fluxo de combustível para as células de energia e, além disso, a substituição atrasaria o programa em dois dias e havia a possibilidade da troca danificar outros equipamentos vitais.

O problema tornou-se muito mais grave quando o tanque número 2 explodiu estando os astronautas a cerca de 390.000 km no espaço e 87 horas distante da Terra (*Kennedy Space Center – NASA - The Kennedy Space Center Story*). Os tripulantes foram resgatados com vida.

#### **1.1.2 Acidentes Decorrentes de Agentes Externos**

Como exemplos de situações críticas criadas devido às condições climatológicas próximas ao local do lançamento, mais especificamente à atividade elétrica de origem atmosférica, têm-se os casos envolvendo as seguintes missões espaciais norte-americanas:

### **Programa Apollo - Missão Apollo 12.**

Em 14 de novembro de 1969, 36 segundos após o lançamento, os espectadores que se encontravam em um local de observação ao norte do Prédio de Montagem do Veículo (*Vehicle Assembly Building - VAB*), no *Kennedy Space Center (KSC)*,

viram duas descargas de relâmpago atingir o solo no outro lado da Torre de Lançamento.

O comandante da missão informou ao Comando da Operação que haviam perdido a plataforma inercial a qual é fundamental para o sistema de controle, direção e navegação do foguete *Saturn V* que transportava o módulo lunar e o módulo de serviço. Após alguns segundos a tripulação conseguiu restabelecer a plataforma inercial e, em seguida, todos os demais sistemas.

Nos testes realizados em terra a Apollo 12 nunca havia falhado. Mais tarde, concluiu-se que o foguete, mais o longo rastro incandescente deixado pela queima de seu combustível, agiram como um pára-raios, provocando a descarga da carga elétrica existente nas nuvens que cobriam o *Kennedy Space Center* dando origem aos relâmpagos (*Kennedy Space Center – NASA - The Kennedy Space Center Story*).

### **Foguete *Atlas/Centaur*.**

Em março de 1987, um foguete *Atlas/Centaur*, carregando o satélite de comunicações da marinha norte-americana, *FltSatCom 6*, falhou quando um relâmpago nas suas proximidades causou um mau funcionamento dos sistemas.

O Comando da Missão destruiu o foguete e sua carga aproximadamente 51 segundos após seu lançamento (*Kennedy Space Center – NASA - The Kennedy Space Center Story*).

## **1.2 Necessidade de um Sistema de Detecção e Proteção**

Um foguete e sua carga útil são extremamente caros e sua perda como resultado de uma descarga atmosférica é extremamente indesejável no programa da missão. Alguns fatores, tal como lançamento somente sob condições climatológicas ideais, podem ser controlados. Porém, a espera por condições climatológicas ideais pode provocar atrasos

que, por sua vez, podem inviabilizar a missão fazendo com que, por exemplo, perca-se a janela de lançamento. Desse modo, para minimizar o impacto de incertezas climáticas, é necessário adotar algum tipo de proteção e/ou prevenção.

Do ponto de vista da atividade elétrica de origem atmosférica, torna-se indispensável à instalação de um sistema que permita o seu monitoramento contínuo dessa atividade na região do lançamento e propicie alerta antecipado da possibilidade de incidência de relâmpagos quando da identificação de condições favoráveis à sua ocorrência.

### **1.3 Necessidade de Critérios Apoiando Decisões**

Além da implantação do referido sistema é necessário, também, a definição de critérios definindo quais são as condições a partir das quais os riscos de incidência de relâmpago são inaceitáveis, de modo a dar suporte às decisões de executar ou não determinadas operações relacionadas a uma missão de lançamento tais como: o transporte do aeroporto de Alcântara ao Prédio de Preparação de Propulsores (PPP) dos motores do foguete, o transporte do aeroporto de Alcântara ao Prédio de Preparação de Propulsores (PPP) dos componentes pirotécnicos, as atividades de montagem no PPP, o transporte dos motores do PPP à Torre Móvel de Integração (TMI), o transporte dos módulos (saías, coifa, baía de equipamentos etc.) do PPP à TMI, o carregamento da baía de controle com Dimetil Hidrazina Assimétrica e Tetróxido de Nitrogênio no Prédio de Operações Perigosas (POP), o transporte da baía de controle do POP à TMI, as atividades na TMI, as atividades realizadas no foguete com recuo de 12 m da TMI, as atividades realizadas com recuo de 53 m da TMI e o lançamento e acompanhamento do vôo até a altura de 20 km.

### **1.4 Importância das Características Climatológicas da Região**

Os critérios que irão dar suporte às decisões de executar ou não operações devem ser baseados não apenas nas informações geradas pelo sistema de monitoramento do

ambiente eletromagnético como também devem levar em conta as características climatológicas próprias da região onde o centro de lançamento está localizado.

### **1.5 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho é formado por 7 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, enfocando a classificação das nuvens, o processo de formação de uma célula de tempestade, os mecanismos de geração de cargas elétricas no interior de uma nuvem de tempestade e o processo de formação de um relâmpago. No Capítulo 3 é apresentada uma análise sobre a probabilidade de ocorrência de relâmpagos durante o lançamento de foguetes. No Capítulo 4 são descritos os instrumentos utilizados no sistema implantado no Centro de Lançamento de Alcântara e a fundamentação teórica na qual se baseia o princípio de funcionamento desses equipamentos. O Capítulo 5 apresenta, resumidamente, a climatologia da região de Alcântara, abordando os fatores climatológicos que influenciam ou propiciam a ocorrência de relâmpagos. O Capítulo 6 apresenta as análises realizadas e as considerações sobre os resultados obtidos e, como último, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugere trabalhos futuros que poderão dar seqüência à pesquisa realizada.





## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Conceitos sobre Eletricidade Atmosférica

As definições e conceitos contidos nesse item baseiam-se no informado por Iribarne e Cho (1980), a menos que esteja explicitamente indicada outra referência bibliográfica.

De acordo com o perfil de temperatura a atmosfera terrestre pode ser dividida nas seguintes regiões ou camadas à medida que a altitude cresce em relação à superfície do planeta:

- Troposfera: é a primeira camada em contato com a superfície terrestre. Sofre aquecimento pela absorção de radiação de ondas longas emitida pela superfície terrestre que é aquecida por absorção de radiação solar de ondas curtas, ou seja: a superfície terrestre é a fonte de calor. Em função do aquecimento sua espessura varia tendo altitude média de 11 km (8 nos pólos, entre 17 e 18 km no Equador e 14 km nas regiões temperadas). Também em função do aquecimento solar é mais alta no verão que no inverno.
- Tropopausa: é a camada de transição entre a troposfera e a estratosfera. Possui de 3 a 5 km de espessura é mais alta no Equador que nos pólos.
- Estratosfera: inicia-se a, aproximadamente, 15-20 km de altura e estende-se até próximo de 50 km de altitude.
- Estratopausa: é a camada de transição entre a estratosfera e a mesosfera. Tem espessura média de 3 a 5 km.

- Mesosfera: é a camada atmosférica que inicia a, aproximadamente, 50 km de altura e estende-se até próximo de 90 km.
- Mesopausa: é a camada de transição entre a mesosfera e a termosfera. Possui espessura média de 10 km com limites entre 80 e 90 km.
- Termosfera: inicia-se a, aproximadamente, 90 km de altura e tem seu topo entre 400 e 500 km de altitude.

A troposfera é, portanto, a região em contato com a superfície do planeta, logo é a camada da atmosfera na qual o ser humano está diretamente imerso e a cujo comportamento e variações está diretamente sujeito. Nessa camada ocorrem alguns dos fenômenos atmosféricos que impressionam mais fortemente o ser humano, entre eles o relâmpago. A maior parte dos relâmpagos está associada a uma nuvem particular, denominada de nuvem *Cumulonimbus*.

A seguir, serão revistas a classificação e a nomenclatura adotadas internacionalmente para os diferentes tipos e grupos de nuvens. Serão abordados brevemente o processo de formação das nuvens de tempestade e os mecanismos de geração das cargas elétricas que vão propiciar o aumento do campo elétrico em determinada região provocando, como consequência de uma eventual ruptura da rigidez dielétrica do ar, a ocorrência de uma descarga elétrica de origem atmosférica.

### **2.1.1 Classificação das Nuvens**

Nos nomes adotados internacionalmente, os seguintes prefixos ou sufixos aparecem repetidamente. *Cirrus*, *cirro* – indica uma nuvem constituída de cristais de gelo e, conseqüentemente, aparece somente em altos níveis nos quais a temperatura é baixa o suficiente para a formação dos mesmos. *Strato-*, *(-)stratus* - significa uma camada contínua de nuvens. *Alto* - refere-se a nuvens de média altitude. *Cumulo-*, *(-)cumulus* - indicam circulação vertical com correntes ascendentes localizadas isoladas ou

repetindo-se em um padrão. *Nimbo-*, (-)*nimbus* - indicam um tipo de nuvem produzindo precipitação. *Cumulus* e *Cumulonimbus* diferem das outras nuvens por apresentarem considerável desenvolvimento vertical sobre uma determinada área; elas constituem a categoria de nuvens convectivas, em oposição a nuvens de camadas ou estratificadas (Iribarne e Cho, 1980). Alguns exemplos dos diferentes tipos de nuvens são dados nas Figuras de 2.1 a 2.6.



FIGURA 2.1 - *Nuvem do tipo Cirrostratus.*

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 99).



FIGURA 2.2. - *Nuvem do tipo Altocumulus e Stratocumulus.*

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 99).



FIGURA 2.3. - *Cumulus e Stratocumulus.*

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 100).



FIGURA 2.4. - *Nuvem do tipo Cumulus.*

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 100).



FIGURA 2.5. - *Nuvem do tipo Cumulonimbus.*

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 101).



FIGURA 2.6 - *Nuvem do tipo Cumulonimbus.* Vista próxima da vertical do topo de uma nuvem de tempestade sobre a América do Sul, do foguete Apollo 9.

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 102).

## 2.1.2 Formação de uma Célula de Tempestade

Durante sua vida, que dura cerca de uma hora, uma nuvem, ou célula de tempestade, ou tempestade unicelular, passa por três estágios: estágio de desenvolvimento, estágio maduro e estágio dissipativo (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

A duração da fase ou estágio de desenvolvimento é cerca de algumas dezenas de minutos e a nuvem, chamada de *Cumulus*, é branca possuindo sua base à cerca de 1 km de altura. Nesse estágio a temperatura interna da célula de tempestade, para uma mesma altura, é maior que fora dela, favorecendo as correntes ascendentes que transportam gotículas d'água, cristais de gelo e granizo que são os principais responsáveis pela geração das cargas nas nuvens, segundo as teorias mais aceitas que serão mostradas nos itens a seguir.

No estágio maduro o diâmetro da tempestade unicelular é da ordem de 10 km e o seu topo situa-se entre 8 e 18 km de altura. Devido à ação dos ventos a região do topo pode se estender horizontalmente fazendo com que a nuvem assemelhe-se a uma bigorna cuja ponta indica a direção do vento. As gotículas de água e os cristais de gelo e granizo se avolumam aumentando de massa e, devido a não sustentação, precipitam-se arrastando consigo o ar para baixo provocando correntes descendentes, enquanto que as correntes ascendentes concentram-se na região central da nuvem. Nesse estágio os movimentos ascendentes e descendentes podem atingir velocidades da ordem de 100 km/h (Pinto Jr. e Pinto, 2000). Com o aumento da massa parte das gotas de água, cristais de gelo e granizo já não são mais arrastados para cima pelas correntes de ar provocando, com isso, o início da chuva na base da nuvem. É nessa fase que a maioria das chuvas, relâmpagos, granizo e ventos ocorrem. A duração média desse estágio é da ordem de meia hora (Iribarne e Cho, 1980).

Na fase dissipativa o movimento do ar tem uma forte predominância descendente o que provoca um resfriamento da nuvem em relação à sua vizinhança. A nuvem, então, se dissipará até que as temperaturas se equilibrem.

## 2.1.3 Mecanismos de Geração das Cargas Elétricas

### 2.1.3.1 Eletricidade das Tempestades

Serão apresentadas, de forma resumida, as explicações mais amplamente aceitas para os mecanismos de geração de cargas elétricas nas nuvens.

Um modelo simples, idealizado durante as primeiras pesquisas a respeito da distribuição de cargas dentro de uma nuvem de tempestade, é mostrada na Figura 2.7. As cargas principais estão localizadas, mais comumente, como indicado nessa figura, mas algumas vezes os sinais estão invertidos. As regiões das principais quantidades de carga, tipicamente de várias dezenas de *Coulomb*, estão localizadas, aproximadamente, nas alturas das isoterms de  $-5$  a  $-10^{\circ}\text{C}$  para a região de cargas negativas e a região positiva cerca de 2 a 3km acima. Um centro menor de cargas negativas (uns poucos *Coulomb*) é algumas vezes observado na altitude da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  ou na altitude com a temperatura ligeiramente mais alta. Alguma blindagem desenvolve-se nas camadas superficiais da nuvem, onde gotículas ou cristais capturam íons entrantes movendo-se ao longo do campo em direção a um dos principais centros de cargas (Iribarne e Cho, 1980).

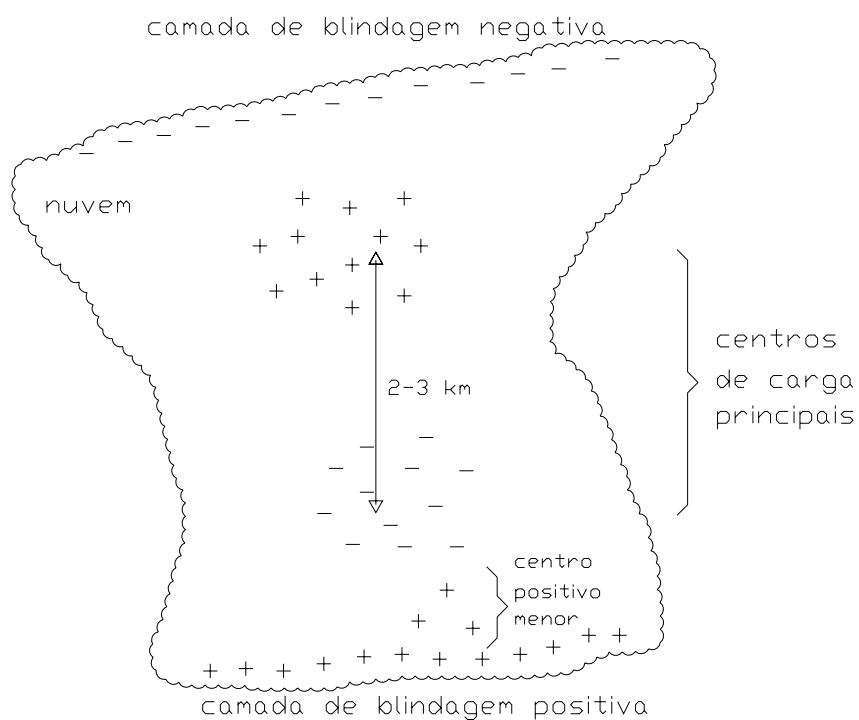


FIGURA 2.7. - *Estrutura Elétrica de uma Nuvem de Tempestade.*

FONTE: Adaptada de Iribarne e Cho (1980, p. 137).

A magnitude das cargas é da ordem de dezenas de *Coulomb*. Quando os campos elétricos alcançam valores altos o suficiente (da ordem de milhares de V/cm), descargas atmosféricas ocorrem, tanto dentro da nuvem como entre a nuvem e o solo. Em média, cerca de 20 C são neutralizados em uma descarga (Iribarne e Cho, 1980; Pinto Jr. e Pinto, 2000).

A Teoria Gravitacional assume que algum processo microfísico separa as cargas, deixando as cargas negativas nas partículas mais pesadas (gotas de chuva, “*graupel*” e pedras de granizo), enquanto as cargas positivas são levadas pelas partículas mais leves (gotículas de chuva, cristais de gelo, íons). As partículas mais pesadas posicionam-se nas regiões mais baixas da nuvem, enquanto as mais leves são carregadas pelas correntes ascendentes para a parte superior da nuvem.



Quanto aos processos microfísicos responsáveis pela separação de cargas, os mais aceitos são os descritos a seguir:

a) Processo Colisional Indutivo.

O processo colisional indutivo ocorre devido às colisões entre granizo e cristais de gelo. A pedra de granizo está polarizada sob influência do campo elétrico  $E$  de tempo bom. Como o campo elétrico de tempo bom tem direção vertical e sentido do centro da terra, um excesso de cargas positivas estará localizado na sua parte inferior e cargas negativas estarão localizadas na sua parte superior.

Conforme mostra a Figura 2.8, a pedra de granizo colidirá com os cristais de gelo que estão sendo arrastados pelas correntes de ar ascendentes. A colisão ocorrerá na superfície inferior e algumas das cargas positivas podem ser transferidas da pedra de granizo para o cristal, deixando, por compensação, um excesso de carga negativa no granizo.

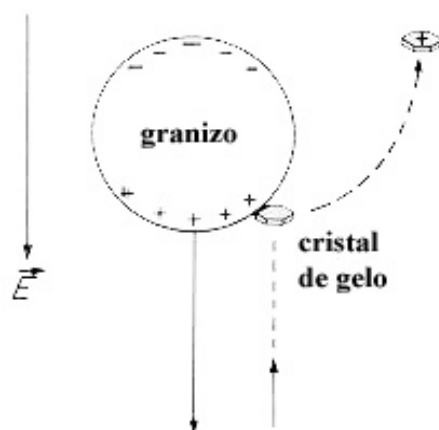


FIGURA 2.8. - *Mecanismo de Separação de Cargas.*

FONTE: Adaptada de Iribarne e Cho (1980, p. 138).

Assim, os cristais leves são carregados para cima pelas correntes ascendentes, sempre presentes nas nuvens convectivas, enquanto as pedras de granizo, mais pesadas, devido à ação da gravidade, posicionam-se nas regiões inferiores da nuvem. Portanto, uma carga espacial negativa é construída nas regiões mais baixas da nuvem e uma carga espacial positiva é construída nas regiões superiores.

*“Riming” de pedra de granizo ou “graupel”.* Por *“riming”* entende-se o crescimento do gelo às custas de gotículas de água super resfriadas, que colidem com ele, congelando em sua superfície.

Se as gotículas, colidindo com a pedra de granizo, permanecessem na sua totalidade como gelo adicionado, não existiria separação de cargas. No entanto, essa separação pode ocorrer devido a dois mecanismos:

- 1) Conforme mostra a Figura 2.9, algumas gotículas, colidindo com velocidade suficiente nos lados da superfície inferior, podem espirrar produzindo fragmentos que voam para longe. Devido à presença do campo elétrico externo, o mesmo tipo de transferência induzida por polarização mencionada anteriormente ocorrerá nessa situação.
- 2) Na outra situação, alguns fragmentos da gota espirrados para fora, ou até mesmo uma gota inteira que somente colidiu e saltou sem aderir, carregarão carga positiva. Restará a carga complementar negativa, como anteriormente, na pedra de granizo.



FIGURA 2.9. - *Mecanismos de Separação de Cargas.*

FONTE: Adaptada de Iribarne e Cho (1980, p. 139).

Nos dois tipos de processos descritos, assim que a separação de cargas ocorre, o campo elétrico original intensifica-se, isto é, aumenta seu valor no sentido descendente. Isso, por sua vez, aumenta o efeito indutivo. Desse modo o aumento do campo elétrico torna-se realimentado.

Esses processos têm sido estudados em laboratório. Eles podem, em princípio, explicar o crescimento da carga elétrica no interior das nuvens. Surge uma inconsistência pois os estudos em laboratório parecem indicar que o campo elétrico de tempo bom não tem intensidade suficiente para polarizar as pedras de granizo (Iribarne e Cho, 1980; Pinto Jr. e Pinto, 2000).

b) Processo Colisional Termoelétrico.

O processo colisional termoelétrico considera a temperatura como fator preponderante na determinação da polaridade da carga transferida. Conforme é mostrado na Figura 2.10, definiu-se a “Temperatura de Inversão de Carga”, estimada em  $-15^{\circ}\text{C}$ , em relação à qual se compara a temperatura

da região onde ocorre a colisão. Se a temperatura do local for maior que a temperatura de inversão de carga, o granizo transferirá carga negativa para o cristal de gelo, caso contrário transferirá carga positiva (Iribarne e Cho, 1980; Pinto Jr. e Pinto, 2000).

Em relação ao processo colisional indutivo o colisional termoelétrico tem a vantagem que, em princípio, pode ser efetivo desde o início da tempestade. Após a geração das cargas pelo processo colisional termoelétrico elas são separadas pelo mesmo método explicado para o colisional indutivo, ou seja, as correntes ascendentes carregam as cargas positivas enquanto os granizos, mais pesados, localizam-se próximos à base da nuvem.

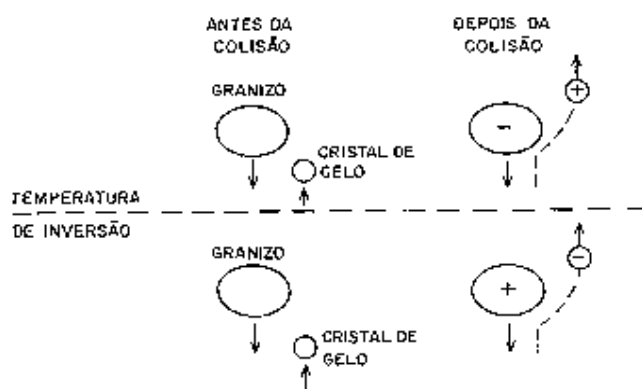


FIGURA 2.10. - *Processo Colisional Termoelétrico de Separação de Cargas.*

FONTE: Pinto Jr. e Pinto ( 2000).

#### 2.1.4 Processo de Formação do Relâmpago

A medida que os centros de carga vão se formando no interior de uma nuvem, o campo elétrico aumenta continuamente até que ocorra a quebra da rigidez dielétrica do ar com a conseqüente descarga elétrica. Os transientes que surgem como conseqüência dessa quebra da rigidez são chamados relâmpagos.

Relâmpagos podem ocorrer entre nuvem e solo, entre a nuvem e o ar nas suas vizinhanças ou dentro da nuvem (Iribarne e Cho, 1980; Pinto Jr. e Pinto, 2000). Eles também podem ocorrer em outras situações quando cargas são geradas de maneira que o campo elétrico atinja valores altos o suficiente para romper a rigidez dielétrica. São exemplos dessas situações as tempestades de neve, as tempestades de areia, a erupção de vulcões, etc.

A Figura 2.11 mostra descargas nuvem-solo, com suas ramificações buscando, tipicamente, a direção do solo.



FIGURA 2.11. - *Relâmpagos*. Descargas nuvem-solo.

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 141).

A Figura 2.12 mostra descargas solo-nuvem, com suas ramificações buscando, tipicamente, a direção da nuvem, partindo de uma torre no alto do *Monte San Salvatore*, Suíça.

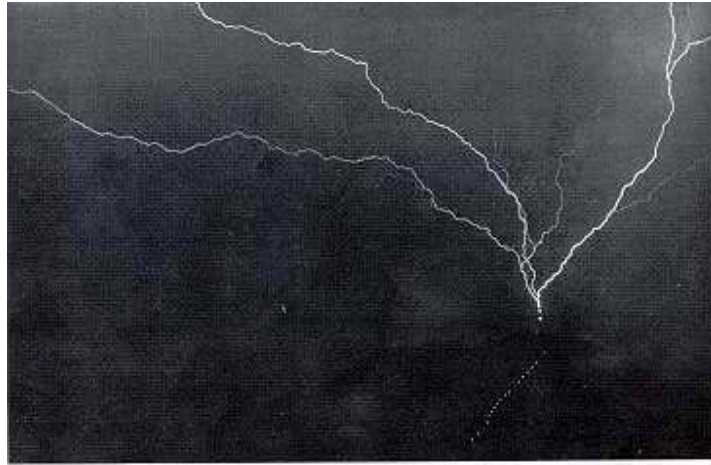


FIGURA 2.12. - *Relâmpagos*. Descargas solo-nuvem.

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 141).

As altas correntes elétricas (da ordem de dezenas de milhares de Ampère) provocam o aquecimento e expansão do ar ao longo do canal do relâmpago. Essa expansão produz ondas sonoras as quais são percebidas como trovão.

Embora o relâmpago nuvem-solo pareça visualmente uma descarga simples, ele realmente ocorre em etapas, de uma maneira bastante complexa. Primeiramente uma seqüência de descargas discretas avança cerca de cinquenta metros, num intervalo de tempo de  $1 \mu\text{s}$ , a cada passo, seguindo um caminho tortuoso em busca do trajeto de menor resistência em direção ao solo. À fraca descarga luminosa resultante desse processo, geralmente não visível a olho nu, chamamos “Líder Escalonado”. O intervalo médio entre cada passo é cerca de  $50 \mu\text{s}$  (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

A Figura 2.13 mostra a fotografia de um relâmpago nuvem-solo com filme em movimento (velocidade do filme de 30 m/s). O avanço em direção descendente do líder escalonado pode ser visto à esquerda (o tempo aumenta para a direita). A descarga luminosa à direita é a descarga de retorno.

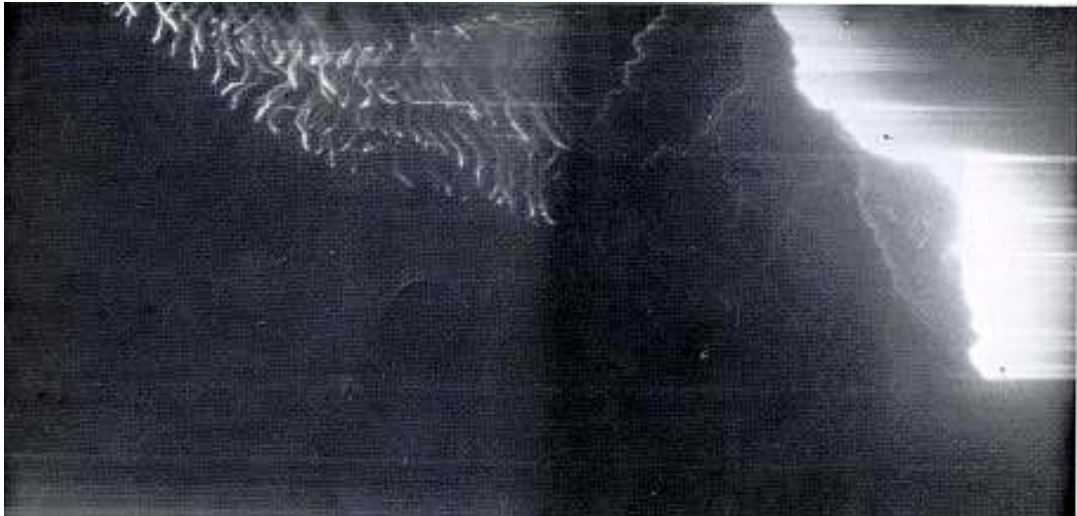


FIGURA 2.13. - *Relâmpago fotografado com filme em movimento.*

FONTE: Adaptada de Iribarne e Cho (1980, p. 142).

A Figura 2.14 mostra a fotografia do mesmo relâmpago mostrado na Figura 2.13 feita com um tipo usual de câmera. O relâmpago atingiu uma torre no alto do *Monte San Salvatore*, Suíça.



FIGURA 2.14. - *Relâmpago fotografado com exposição simples do filme.*

FONTE: Adaptada de Iribarne e Cho (1980, p. 143).

O desenho esquemático da Figura 2.15 mostra sucessivos estágios (a), (b) e (c) do avanço na direção descendente e ramificações do líder escalonado numa descarga nuvem-solo. O estágio (c) mostra a descarga conectante subindo a partir de uma árvore para encontrar o líder escalonado e iniciar a descarga de retorno.

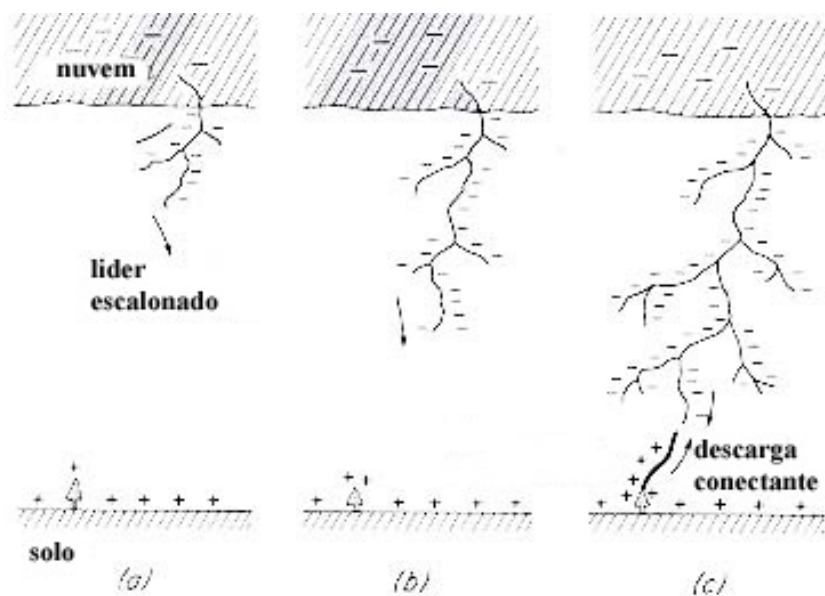


FIGURA 2.15. - Líder Escalonado e Descarga Conectante.

FONTE: Iribarne e Cho (1980, p. 142).

Desse modo, o trajeto tortuoso e ramificado característico do canal do relâmpago é devido ao progresso hesitante do líder escalonado procurando pelo caminho mais favorável. Depois de, aproximadamente, 20 ms, a propagação (com velocidade média de cerca de  $10^5$  m/s) traz a ponta do líder próximo ao solo.

Quando a ponta do líder escalonado alcança uma curta distância do solo (entre algumas dezenas e pouco mais que uma centena de metros), o campo elétrico no solo logo abaixo terá se tornado suficientemente alto para que uma nova descarga, chamada descarga conectante, inicie-se de algum objeto pontiagudo (edifícios altos, árvores, captadores de SPDA). A descarga conectante encontra a ponta do líder escalonado e continua avançando na direção ascendente através do canal ionizado (condutivo) já produzido.



Esta é, agora, uma descarga muito mais forte, transportando uma corrente de pico da ordem de 10 000 A, propagando-se a velocidades da ordem de  $10^7 - 10^8$  m/s e fortemente luminosa. Ela alcança a nuvem em cerca de 100  $\mu$ s. É chamada descarga de retorno ou descarga principal.

O relâmpago pode terminar com a descarga principal, sendo então chamado de relâmpago de descarga simples ou única. Porém, o caso mais frequentemente é de um relâmpago de descargas múltiplas. Nesse caso, algumas centenas de milissegundos depois da descarga principal uma nova descarga é produzida da nuvem para o solo, conforme mostrado na Figura 2.16.

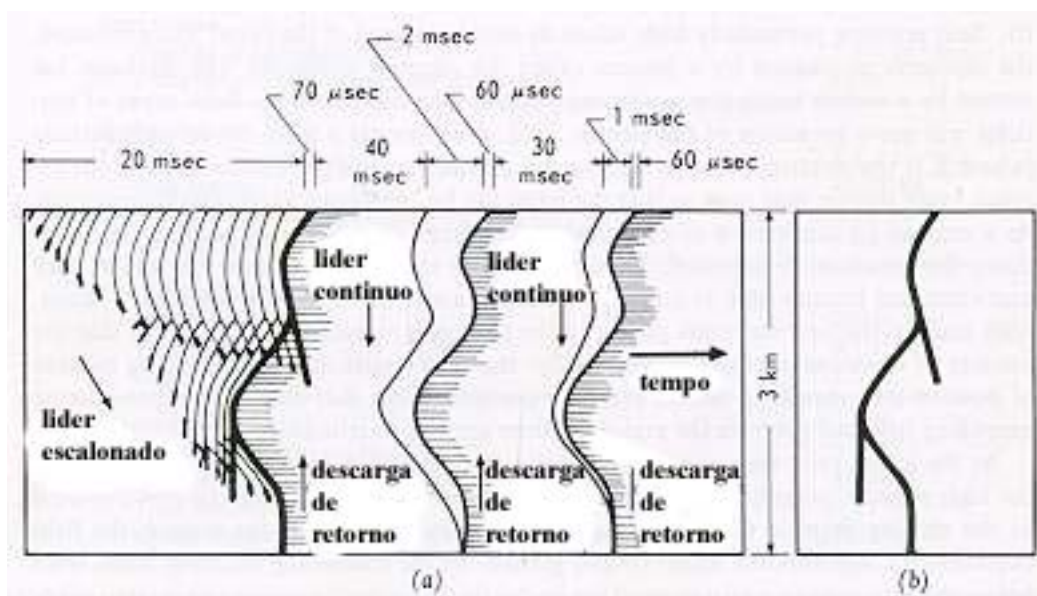


FIGURA 2.16. - *Estrutura do Relâmpago.*

FONTE: Adaptada de Iribarne e Cho (1980, p. 143).

Isso só ocorrerá caso cargas sejam drenadas de uma região próxima à origem do líder escalonado. Essa drenagem ocorre devido à correntes associadas à processos conhecidos como processos K e J. O processo J é responsável por uma lenta e contínua variação do campo elétrico no solo com duração de cerca de dezenas de milissegundos. O processo J é composto pela superposição de pequenas e rápidas descargas denominadas descargas

K, distanciadas entre si de cerca de 20 ms. As descargas K produzem variações bruscas do campo elétrico no solo (do tipo pulsos) (Solorzano, 2003). Portanto, os processos J e K são os responsáveis pelo transporte de cargas de regiões próximas para o ponto no qual o canal do líder escalonado iniciou-se. Mas agora essas cargas propagar-se-ão rapidamente e continuamente através do ainda ionizado canal a cerca de  $2 \times 10^6$  m/s (isto é: cerca de dez vezes mais rápido do que o líder escalonado, porém vinte vezes mais lento do que a descarga de retorno), de modo que elas chegam próximo ao solo em cerca de 2 ms (Iribarne e Cho, 1980; Pinto Jr. e Pinto, 2000). Esse líder contínuo (*dart leader*), assim chamado por não apresentar ramificações como o líder escalonado, é seguido por uma segunda descarga de retorno da mesma maneira como ocorreu com o líder escalonado. Essa seqüência completa – intervalo de umas poucas centenas de milissegundos, líder contínuo, descarga de retorno, repetindo-se novamente por um número variável de vezes, usualmente umas poucas vezes mas ocasionalmente 20 vezes ou mais, depois das quais o canal ionizado decai e o relâmpago termina. Algumas vezes a descarga de retorno é seguida por uma corrente contínua ( $\sim 100$  A) por um período de umas poucas dezenas a centenas de milissegundos. Isso ocorre depois de uma ou várias descargas, em cerca de metade dos relâmpagos.

A estrutura do relâmpago tem sido determinada para descargas nuvem-solo ou solo-nuvem, as quais podem ser claramente fotografadas. Descargas intra-nuvem, no entanto, são mais numerosas. De fato, elas são o tipo mais freqüente de descargas. Uma carga de mesma ordem de magnitude como aquela transferida em uma descarga nuvem-solo é neutralizada por ela com um tempo de duração similar.

Não há plena concordância sobre o processo, ou processos, envolvidos no disparo do líder escalonado. Esse processo é chamado de quebra de rigidez preliminar e pode estar conectado com o desarranjo iniciado nas extremidades da gota d'água alongada pelo campo elétrico que alcança particularmente altos valores em certas regiões da nuvem. Uma vez iniciada, a descarga propaga-se por um processo chamado de avalanche de elétrons. A descarga é iniciada por uma certa ionização produzindo íons positivos e elétrons. Ambos os tipos de partículas irão se mover por ação do campo elétrico, o qual

exerce uma força  $Ee$  em cada partícula. No entanto, elétrons têm mobilidade muito maior que os íons, de modo que os últimos podem ser considerados como essencialmente imobilizados. As partículas carregadas, viajando ao longo do campo, adquirem uma energia cinética igual a sua carga multiplicado pela variação do potencial. Assim, os elétrons movendo-se na direção descendente no líder, aceleram-se e tornam-se capazes de ionizar, por colisão, um certo número de outros átomos ou moléculas. Com cada um dos novos elétrons produzidos, o processo é repetido, resultando que o número de elétrons aumenta exponencialmente; isto é uma avalanche. O número aumentado de íons positivos criados como resultado da avalanche cria uma carga positiva que se opõe ao campo propulente preexistente e previne a avalanche de crescer indefinidamente (Iribarne e Cho, 1980).

## **2.2 Relâmpagos Induzidos**

Uma descarga atmosférica é induzida devido à aproximação rápida de um condutor, estendido na direção vertical por um foguete, a uma nuvem carregada eletricamente.

À medida que o citado condutor sobe, provoca uma intensificação do forte campo elétrico gerado pela presença da nuvem carregada, o que pode levar à quebra da rigidez dielétrica do ar e à ocorrência de uma descarga inicial a partir da extremidade do condutor.

Essa descarga inicial leva ao desenvolvimento do chamado líder escalonado, conforme visto no item 2.4, anterior, que desencadeia todo o processo conhecido por relâmpago.

Porém, como relatado em Solórzano (2003), se o condutor aproxima-se de forma lenta, as descargas corona que se formam ao redor do mesmo, devido a esse estar imerso num campo elétrico intenso, geram cargas espaciais positivas que irão blindá-lo, reduzindo a intensidade do campo elétrico e evitando, dessa forma, a indução do relâmpago (Brook et al., 1960 e Rakov, 2002).

Os foguetes destinados à indução de relâmpagos têm velocidade superior àquela alcançada pela corrente iônica positiva produzida pelas descargas corona (cerca de  $100 \text{ ms}^{-1}$ ). Assim, o foguete deixa para trás a carga espacial positiva e, portanto, a blindagem eletrostática não se forma e o relâmpago é induzido (Solorzano, 2003).

## CAPÍTULO 3

### INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

#### 3.1 Instrumentação

##### 3.1.1 *Electric Field Mill II*

Na Figura 3.1 é mostrado o equipamento instalado no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). É um equipamento do tipo “*model II*”, de fabricação da *Global Atmospheric Inc*, do grupo *Vaisala Inc*.

As definições, dados e conceitos contidos nesse sub-item baseiam-se no *User’s Guide* da *Global Atmospherics, Inc.*, 2003, a menos que esteja explicitamente indicada outra referência bibliográfica.



FIGURA 3.1. - *Electric Field Mill model II*.

FONTE: *User’s Guide - Electric Field Mill model II* (2003).

### 3.1.1.1 Princípio de Operação

Sempre há um campo elétrico vertical na atmosfera. Com tempo bom esse campo é baixo, aproximadamente 0 a +/- 200 (V/m). Com clima tempestuoso, o campo é muito mais alto porque cargas elétricas estão presentes nas nuvens de tempestade. Quando um temporal se forma logo acima do sensor (*overhead*), o campo elétrico, tipicamente de polaridade reversa, aumenta continuamente. Assim que o campo elétrico alcance valor aproximado de 2000 V/m, segundo critério adotado pelo fabricante do equipamento baseado em estudos das forças armadas norte-americanas, a probabilidade de ocorrência de um relâmpago é significativa.

A operação do *Electric Field Mill* (EFM) e sua teoria estão baseadas nas leis fundamentais do eletromagnetismo, as leis de Maxwell. Conforme mencionado anteriormente, a segunda lei de Maxwell estabelece que, quando um disco condutor é exposto a um campo elétrico variável, surgirá uma corrente induzida, nesse disco, proporcional à variação do fluxo do campo elétrico em relação ao tempo e à área do disco. A intensidade normal do campo elétrico da atmosfera varia muito lentamente para ser detectada, portanto, ela não pode, normalmente, induzir quantidades detectáveis de corrente no disco condutor do EFM. O EFM cria artificialmente uma taxa alta de variação de campos elétricos alternados usando um servo-motor e um arranjo adequado de estator-rotor.

O sensor do EFM consiste de dois discos, um funcionando como estator e o outro como rotor, situado logo acima do estator. O rotor é o disco girante e o estator o disco fixo. Cargas elétricas detectáveis podem ser induzidas nos discos usando o disco girante, ou rotor, para “cortar” o campo elétrico. Como o rotor gira sobre o estator ele expõe o disco fixo ao campo elétrico quando não se encontra sobre ele e isola-o do campo elétrico quando está sobre ele. “Cortando”, dessa forma, o campo elétrico normal que é estático ou que varia muito lentamente, o EFM cria um campo elétrico “variável” que irá induzir uma carga elétrica no estator. A magnitude e polaridade da carga serão

dependentes da magnitude e polaridade do campo elétrico. Embora a carga induzida contenha a informação da magnitude do campo de interesse, a informação deve ser convertida para uma forma mais usual.

A forma de onda da corrente induzida no estator irá comportar-se de forma semelhante a uma senoide. A frequência do sinal é igual ao número de vezes por segundo que o campo elétrico é “cortado”. O rotor corta o campo elétrico 60 vezes por segundo, portanto, o sinal da corrente induzida tem uma frequência de 60 Hz. Uma vez que o sinal de corrente é aproximadamente senoidal, não é adequado usar um amperímetro *Alternating Current (AC)* para medir sua magnitude pois o valor indicado é o valor *Root Mean Square (RMS)* ou valor eficaz. O valor eficaz ou RMS é, por definição, o valor da corrente constante que, no mesmo intervalo de tempo, produz a mesma quantidade de calor que uma corrente variável percorrendo uma mesma resistência. É preferível medir o valor *Direct Current (DC)* em um ponto específico do sinal.

O EFM converte o sinal de corrente em sinal de tensão, mede o sinal em ponto específico e transporta essa medida de voltagem para o terminal de saída. A amostragem (medida) do sinal é sincronizada com a posição do rotor por um sensor magnético que monitora a rotação do servo-motor. Se o sinal de corrente é convertido em sinal de tensão e medido no instante em que o rotor provê a máxima exposição do disco ao campo elétrico, uma série de medidas elétricas será obtida cuja magnitude e polaridade são proporcionais à intensidade do campo elétrico. Medindo o intervalo de tempo entre as medidas com um amplificador, uma tensão DC é obtida cuja polaridade assemelha-se à polaridade do campo elétrico e cuja magnitude é proporcional à magnitude do campo elétrico. Ajustando o ganho do amplificador qualquer função de transferência de saída desejada pode ser conseguida. Essa saída DC pode, então, ser facilmente medida, levada a um dispositivo de conversão analógico-digital, processada e apresentada na tela de um computador, padrão IBM/PC, como a intensidade de campo do local de instalação do EFM e, depois, arquivada para novos processamentos ou consulta futuros.

### **3.1.1.2 Método de Determinação do Campo Elétrico, Quase Estático, de Tempo Bom**

A Segunda lei de Maxwell estabelece, de maneira resumida, que quando um condutor é exposto a um campo elétrico variante, surgirá uma corrente induzida, nesse condutor, proporcional à variação do fluxo do campo elétrico em relação ao tempo e à área do condutor exposta ao campo. A intensidade do campo elétrico da atmosfera varia muito lentamente para ser detectada, portanto, ela não pode, normalmente, induzir quantidades detectáveis de corrente num condutor.

Porém, o campo elétrico de tempo bom, que é praticamente estático ou varia muito lentamente ao longo do dia, pode ser determinado empregando-se um equipamento cujo esquema simplificado é mostrado na Figura 3.2. No diagrama, contido nessa Figura, o disco de metal inferior tem a forma de dois quadrantes que estão eletricamente conectados. Estando presos a um isolador fixo ao eixo, os discos inferiores não estão aterrados.

Na Figura 3.2, a distância entre o disco superior e o inferior está maximizada. O disco superior é vazado por duas áreas na forma dos quadrantes inferiores, de maneira que os dois quadrantes recebem fluxo elétrico total em sua superfície duas vezes a cada rotação do disco superior.



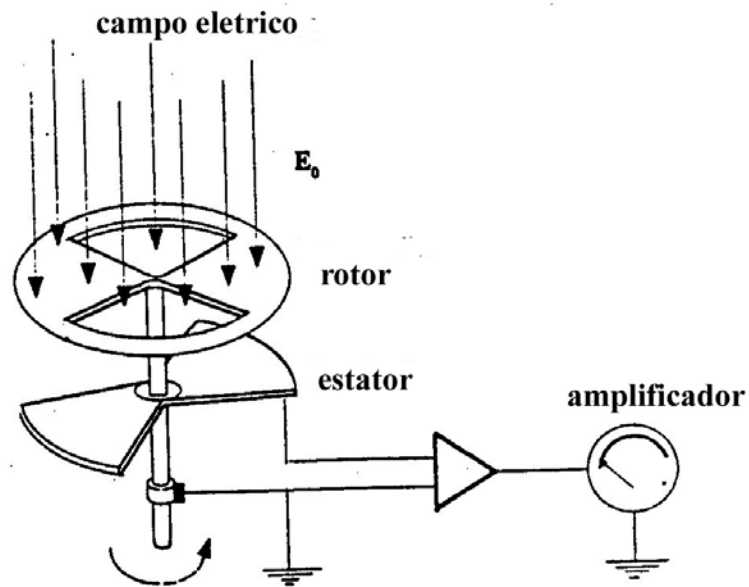


FIGURA 3.2. - Esquema simplificado de um equipamento do tipo *Electric Field Mill*.

Se  $T$  é o período de rotação do disco superior e  $r_1$  e  $r_2$  são os raios interno e externo dos quadrantes do disco inferior, como mostrado na Figura 3.3, determina-se a carga  $q(t)$  induzida no disco inferior como uma função do tempo de  $t=0$ s a  $t=T/2$ .

Considere um cilindro de pequeno comprimento, como o mostrado na Figura 3.4, colocado na posição vertical entre o disco inferior e o superior. Considere, também, somente as seções do cilindro que possuem área de seção transversal igual à dos dois quadrantes mostrados na Figura 3.2.

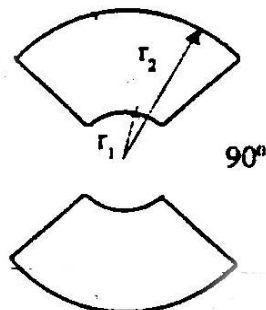


FIGURA 3.3. - Área dos setores do rotor.

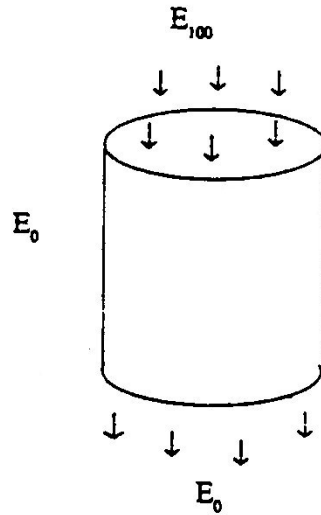


FIGURA 3.4. - Cilindro de pequeno comprimento situado entre o rotor e o estator do *Electric Field Mill*.

A área de cada um dos quadrantes é dada por:

$$A = \pi/4(r_2^2 - r_1^2) \quad (3.1)$$

As superfícies superiores das seções do cilindro sob consideração estão sujeitas ao fluxo elétrico somente quando estão diretamente abaixo das áreas vazadas do disco superior. Isso ocorre  $2/T$  vezes por segundo para cada área vazada, ou  $4/T$  vezes por segundo para ambas as áreas.

A área da superfície superior do cilindro mencionado na Figura 3.3 exposta ao campo elétrico é, portanto, uma função do tempo. Durante o intervalo de tempo  $t$ , o valor dessa área total é dado por:

$$A(t) = (\pi/2) (r_2^2 - r_1^2) (4t/T) \quad (3.2)$$

Da aplicação da lei de Gauss tem-se:

$$-E_0 A(t) = [q(t) / \xi_0] \quad (3.3)$$

Sendo  $q(t)$  a carga total na superfície sob consideração.

Substituindo-se a Equação 3.2 na Equação 3.3 e isolando-se  $q(t)$  tem-se:

$$q(t) = -[2\pi (r_2^2 - r_1^2)t/T] E_0\xi_0 \quad (3.4)$$

Durante o intervalo de tempo  $0 \leq t \leq T/4$ , tem-se:

$$q(t) = -[2\pi (r_2^2 - r_1^2)t/T] E_0\xi_0 \quad (3.5)$$

Durante o intervalo de tempo  $T/4 \leq t \leq T/2$ , tem-se:

$$q(t) = -\pi (r_2^2 - r_1^2) E_0\xi_0(1 - 2t/T) \quad (3.6)$$

O valor da carga máxima coletada é:

$$|q_{\max}| = \pi/2(r_2^2 - r_1^2) E_0\xi_0 \quad (3.7)$$

Se o dispositivo mostrado na Figura 3.2 for conectado a um amplificador de sinal que tenha o circuito de entrada equivalente a um capacitor e um resistor em paralelo, conforme mostrado na Figura 3.5, e considerando que a capacitância parasita dos discos de metal do dispositivo é desprezível em comparação com a capacitância do capacitor  $C$ , pode-se esboçar o gráfico, mostrado na Figura 3.6, da diferença de potencial  $V$  entre os pontos M e N como uma função do tempo  $t$ , durante um período de rotação do disco superior.

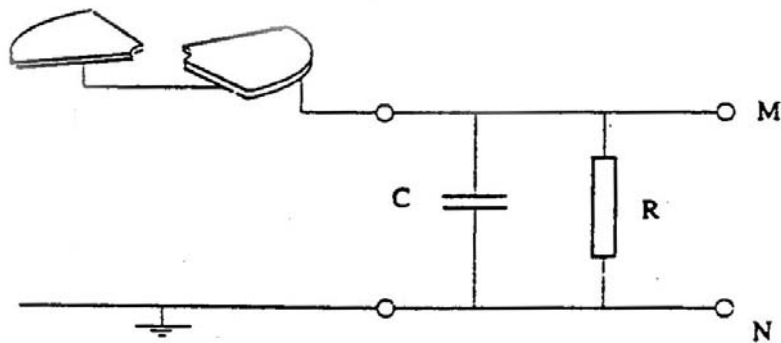


FIGURA 3.5. - Circuito para medida do sinal de tensão.

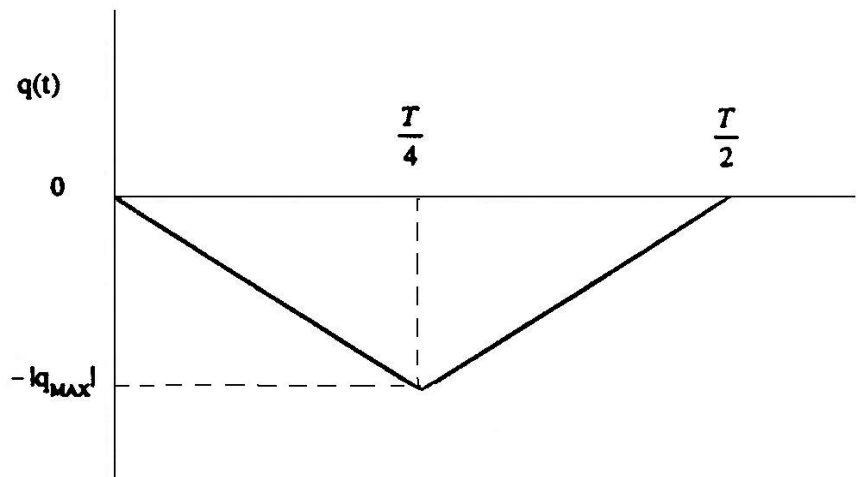


FIGURA 3.6. - Carga induzida no estator em função do tempo.

Considere-se duas situações relativas ao período de rotação:

1)  $T = T_a \lll CR$

Nessa situação, o tempo utilizado numa rotação, ou o período, é muito menor que a constante de tempo do circuito, correspondendo a um sinal de alta frequência. A impedância do capacitor é muito pequena e a maior parte da corrente flui através dele. A voltagem de saída  $V_0$  é igual à voltagem do

capacitor  $V_c$ . Nesse caso o capacitor é rapidamente carregado até sua voltagem máxima e, da mesma forma, rapidamente descarregado até zero.

A voltagem máxima do Capacitor (C) é dada por:

$$V_0 = V_{\max} = q_{\max} / C \quad (3.8)$$

Conhecendo a voltagem de saída  $V_0$  nos terminais do amplificador de sinal, o campo elétrico, sendo um campo uniforme, será dado por:

$$E = 2V_0 C / \pi (r_2^2 - r_1^2) \xi_0 \quad (3.9)$$

A Figura 3.7 mostra o gráfico da corrente e de tensão, respectivamente, em função do tempo para um sinal de alta frequência.

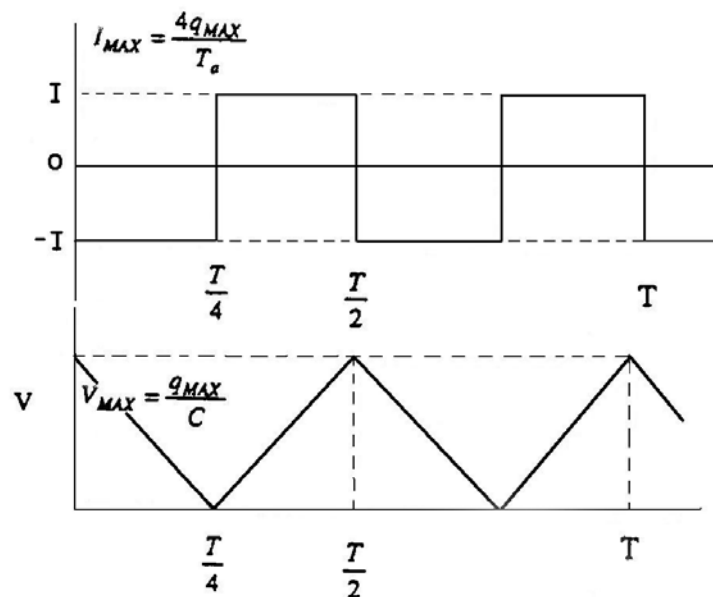


FIGURA 3.7. - Gráfico da corrente e tensão para  $T = T_a \lll CR$ .

2)  $T = T_b \ggg CR$

Nessa situação, o tempo utilizado numa rotação, ou o período, é muito maior que a constante de tempo do circuito, correspondendo a um sinal de muito baixa frequência. A impedância do capacitor é muito grande e a maior parte da corrente flui através do resistor. A voltagem de saída  $V_0$  é igual à voltagem do resistor  $V_R$ .

A corrente do sinal de entrada é dada por:

$$I_{\max} = 4q_{\max} / T_b \quad (3.10)$$

E a voltagem de saída é:

$$V_0 = V_R = V_{\max} = 4 q_{\max} R / T_b \quad (3.11)$$

A Figura 3.8 mostra o gráfico da corrente e de tensão, respectivamente, em função do tempo para um sinal de baixa frequência.

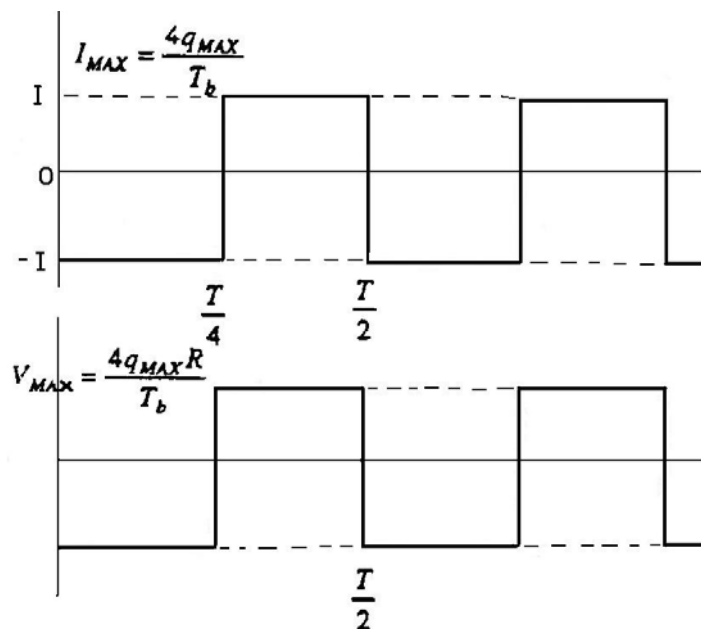


FIGURA 3.8. - Gráfico da corrente e tensão para  $T = T_a \gg \gg CR$ .

Conhecendo a voltagem de saída  $V_0$  nos terminais do amplificador de sinal, o campo elétrico, sendo um campo uniforme, será dado por:

$$E = (V_0/2)T_b / \pi(r_2^2 - r_1^2)\xi_0R \quad (3.12)$$

### **3.1.1.3 Escolha do Local de Instalação**

O local de instalação ideal para o EFM é uma grande área aberta e perfeitamente plana, sem construções, árvores, arbustos ou outras obstruções. Como um local que reúna todas essas características ao mesmo tempo e, ainda, esteja disponível para a instalação do equipamento é muito difícil de encontrar, tem-se que é necessário adequar a instalação ao local disponível.

#### **3.1.1.3.1 Critérios para Escolha do Local de Instalação**

O local de instalação deve ser estável (não sujeito a vibrações, choques mecânicos, etc.), ter acesso fácil e ser tão livre de obstruções à passagem e deformação dos sinais quanto possível. O fabricante do equipamento recomenda, em relação às possíveis obstruções, que é razoável que elas estejam afastadas do EFM de uma distância igual ou maior que duas vezes a sua própria altura. Por exemplo, uma construção com 9 metros de altura deve estar afastada do equipamento, no mínimo, 18 metros. A distância de afastamento pode não ser crítica uma vez que as construções, na sua maioria, afetam o campo elétrico de uma maneira estável, desde que elas não mudem sua forma ou movam-se. Uma compensação no ganho do instrumento pode ser feita de modo a eliminar ou atenuar o efeito da obstrução na medida da intensidade do campo.

Obstruções instáveis devem ser eliminadas do local de instalação do EFM. São instáveis as obstruções que mudam sua forma (isto é, árvores, arbustos, etc.) e as que se movem (isto é, pessoas, carros, etc.). Não é possível compensar os efeitos de obstruções instáveis uma vez que seus efeitos no campo elétrico variam com relação ao tempo.

Fontes de corona prejudicam especialmente o desempenho do EFM. Estruturas pontiagudas podem produzir uma carga no espaço circunvizinho chamada corona. Essa carga pode flutuar no ar e, ao passar sobre o EFM, influenciar o valor da sua saída. São fontes comuns de corona torres altas, linhas de transmissão de energia e as muitas pontas das folhas das árvores do tipo coníferas. A fumaça é uma fonte comum de cargas livres na atmosfera. Portanto, fontes de fumaça como chaminés, veículos automotores e outros, não devem estar próximos do EFM.

#### **3.1.1.3.2 Montagem no Topo de Edifícios**

A instalação no topo de edifícios apresenta algumas vantagens com relação à instalação no solo. No topo do edifício o EFM estará afastado de muitas das obstruções que poderiam afetar seu desempenho tais como pessoas, carros e arbustos. Devem-se escolher edifícios com superfície desobstruída no seu topo em detrimento daqueles com muitas irregularidades tais como caixas d'água, torres, casa de máquinas, etc. É importante observar que todos os edifícios afetarão o campo elétrico, porém esse efeito pode, e deve ser compensado, conforme explicado no item 3.1.1.2.1. Deve-se escolher o ponto mais próximo possível do centro do edifício, evitando-se as laterais, uma vez que nas bordas ocorre uma mudança brusca na forma do edifício o que afeta com maior intensidade o campo elétrico.

#### **3.1.2 Medida da Intensidade do Campo Magnético Gerado por um Relâmpago**

A Figura 3.9 mostra uma antena tipo bobina imersa num campo magnético.



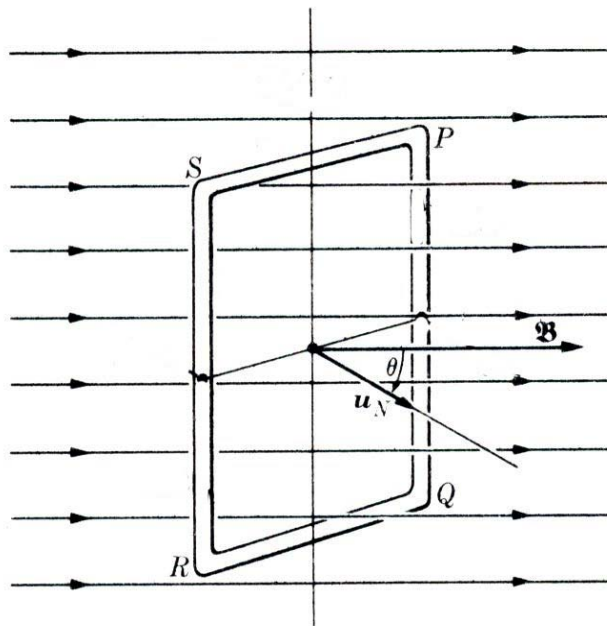


FIGURA 3.9. - Esquema Simplificado de uma Antena tipo Bobina.

FONTE: Uman, M. A. (1987).

A voltagem induzida em uma antena tipo bobina de área  $A$ , orientada com seu plano perpendicular a uma densidade de fluxo magnético  $B$ , devido à taxa de variação da densidade de fluxo magnético é dada pela equação:

$$V_{antena} = A \, dB/dt \quad (3.1.13)$$

Na Equação 3.1.13 é assumido que  $A$  é constante e  $B$  é essencialmente uniforme sobre a área  $A$ . Desse modo, a variação da densidade de fluxo magnético pode ser medida pela conexão apropriada da antena tipo bobina a um osciloscópio. De modo a medir diretamente a densidade de fluxo magnético, a antena é conectada em série com uma resistência  $R$  e um capacitor  $C$ .

A Figura 3.10 mostra o esquema simplificado de uma antena tipo bobina formada por uma única espira de cabo coaxial de  $93 \, \Omega$  de impedância conectada a um circuito

integrador diferencial, usada para obter a voltagem de saída proporcional ao campo magnético.

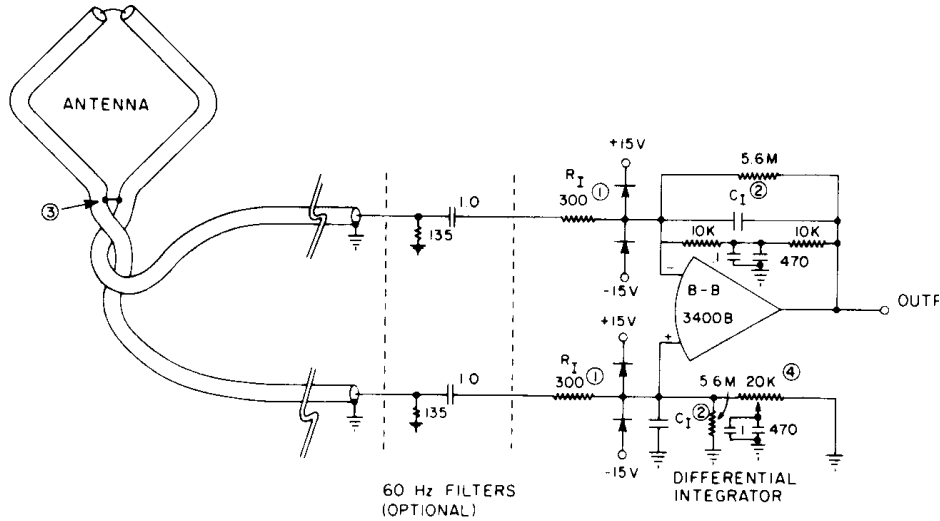


FIGURA 3.10. - Esquema Simplificado de uma antena tipo bobina conectada a um circuito amplificador.

FONTE: Uman, M. A. (1987).

A equação para a corrente  $i$  fluindo no circuito em série é:

$$A \, dB/dt = Ri + (1/C) \int_0^t i \, dt' \quad (3.1.14)$$

Na Equação 3.1.14 a capacitância é considerada estar inicialmente descarregada. Considere-se o caso no qual  $R$  e  $C$  são escolhidos de tal modo que:

$$Ri \gg (1/C) \int_0^t i \, dt' \quad (3.1.15)$$

Isto é, a impedância  $1/(wC)$  de um sinal de onda senoidal é pequena comparada a  $R$  para todas as efetivas frequências  $w$  presentes devido à variação do campo magnético. Usando a Equação 3.1.14 pode-se resolver a Equação 3.1.15 para a corrente:

$$i \approx (A/R) (dB/dt) \quad (3.1.16)$$

Se o sinal de saída é a voltagem através da capacitância, esse sinal será dado pela equação:

$$V_c = (A/RC) \int_0^t (dB/dt) dt' = (A/RC) B(t) \quad (3.1.17)$$

Então, a densidade de fluxo magnético pode ser medida como uma função do tempo. A antena magnética tipo bobina deve ser bem protegida de campos elétricos se o sinal medido é significativo.

### **3.1.3 Método para a Determinação do Campo Elétrico Variável Gerado por um Relâmpago**

A intensidade do campo elétrico no solo pode ser obtida pela medida da voltagem entre uma antena e o terra.

A antena mostrada na Figura 3.11 é composta por um disco plano, paralelo ao solo, perpendicular ao vetor campo elétrico, ou seja, o disco encontra-se sobre uma superfície equipotencial. O campo elétrico é assumido ser uniforme. A antena está a uma altura  $h$  acima do solo. Na ausência de qualquer carga na antena (Figura 3.11 a) o campo elétrico próximo a ela é  $E$  (o valor que existiria na ausência da antena) e a diferença de potencial entre o solo e a antena é  $V_g = Eh$ . A capacitância entre a antena e a nuvem é  $C_c$ , entre a antena e o solo é  $C_g$ , onde  $C_g \gg C_c$  (Uman, 1987). A diferença de potencial entre nuvem e solo é  $V$ . Por nuvem pode-se entender o efetivo centro de cargas o qual dá origem a  $E$ .

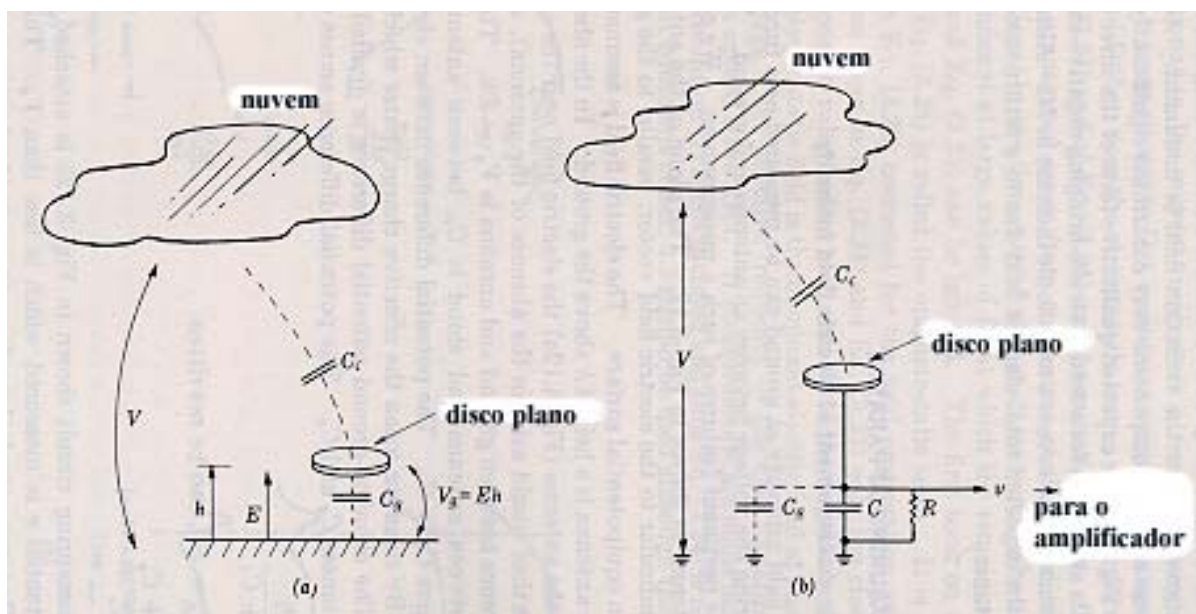


FIGURA 3.11. - Esquema simplificado de uma antena tipo disco estático.

FONTE: Uman, M. A. (1987).

A diferença de potencial entre nuvem e solo é dividida entre os dois capacitores  $C_c$  e  $C_g$ . A diferença de potencial através de  $C_g$  é dada pela equação:

$$V_g = V C_c / (C_g + C_c) \quad (3.1.18)$$

Sendo  $V_g = Eh$ , a Equação 3.1.18 pode ser reescrita como:

$$V = Eh (C_g + C_c) / C_c \quad (3.1.19)$$

Quando o circuito de medida mostrado na Figura 3.11 b é conectado à antena, o potencial  $v$ , menor que  $V_g$ , é medido. Isso é devido ao circuito  $RC$  conectado carregar a antena. Será assumido que  $R$  é uma impedância muito grande comparada a  $C$ , de modo que é necessário somente considerar os efeitos do capacitor  $C$  na determinação de  $v$ .

Uma vez que  $C$  e  $C_g$  estão em paralelo, a voltagem  $v$  é dada por:

$$v = V C_c / (C_g + C_c + C) \quad (3.1.20)$$

Pode-se eliminar a desconhecida tensão  $V$  substituindo a Equação 3.1.19 na Equação 3.1.20.

$$v = Eh(C_c + C_g) / (C_g + C_c + C) \quad (3.1.21)$$

Sendo  $C_g \gg C_c$  a Equação 3.1.21 tem uma boa aproximação por:

$$v = Eh C_g / (C_g + C) \quad (3.1.22)$$

A medida da voltagem é proporcional ao campo elétrico  $E$ . As constantes de proporcionalidade podem ser medidas ou calculadas. Na prática  $C > C_g$  e, portanto,  $C$  pode ser usado para controlar a magnitude da voltagem medida. O efeito de  $R$  é permitir a voltagem  $v$  decair com a constante de tempo  $R(C_g + C)$  ou  $RC$  se  $C \gg C_g$ . Se  $RC$  é considerado grande comparado com os tempos de interesse, o efeito de  $R$  nas medidas pode ser negligenciado.

### 3.1.4 *Thunderstorm Sensor 928 (TSS 928)*

Na Figura 3.12 é mostrado o equipamento instalado no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). É um equipamento do tipo model TSS 928, de fabricação da *Global Atmospheric Inc.*, do grupo *Vaisala Inc.*

As definições, dados e conceitos contidos nesse subitem baseiam-se no *User's Guide* da *Global Atmospheric, Inc.*, 2003, a menos que esteja explicitamente indicada outra referência bibliográfica.



FIGURA 3.12. - *Thunderstorm Sensor model TSS 928.*

FONTE: *User Guide – Thunderstorm Sensor model TSS 928* (2003).

O sensor permite interação com um operador através do uso de um computador padrão IBM/PC. Classifica o relâmpago Nuvem-Solo (NS) por meio de faixas (logo acima – “*overhead*”, próximo – “*near*”, e distante – “*distant*”) e, para relâmpago próximo e distante, através de octante direcional. As faixas que cobrem a classificação dada são:

- Logo acima (*overhead*)      0-5 milhas (0-8 km)
- Próximo (*near*)              5-10 milhas (8-16 km)
- Distante (*distant*)          10-30 milhas (16-48 km)

O sensor tem alta eficiência de detecção (tipicamente 90%) para relâmpagos NS dentro da faixa de 10 milhas (16 km).

Um alarme sonoro entrará em operação quando o relâmpago NS ocorre logo acima do equipamento (*overhead*).

O Sensor usa antenas de campo elétrico e de campo magnético com o objetivo de descobrir e determinar a direção dos relâmpagos.

### 3.1.4.1 Princípio de Operação

É importante salientar que o sensor não tem como objetivo a medida exata da forma de onda da radiação elétrica gerada pelas descargas, mas sim a sua identificação em detrimento de tantos outros sinais elétricos captados pela antena.

As enormes correntes elétricas associadas com as descargas de retorno de relâmpagos irradiam energia em radiofrequência através de um amplo espectro. O processo de detecção de relâmpagos começa quando o sensor detecta a energia de radiofrequência produzida por uma descarga de retorno, usando antenas e receptores eletrônicos com uma banda entre, aproximadamente, 1 kHz e 350 kHz. Conforme mostra a Figura 3.13, os sinais de entrada são analisados pelo circuito lógico de discriminação do sensor e os sinais que não obedecem à forma de onda produzida por uma descarga de retorno serão rejeitados.

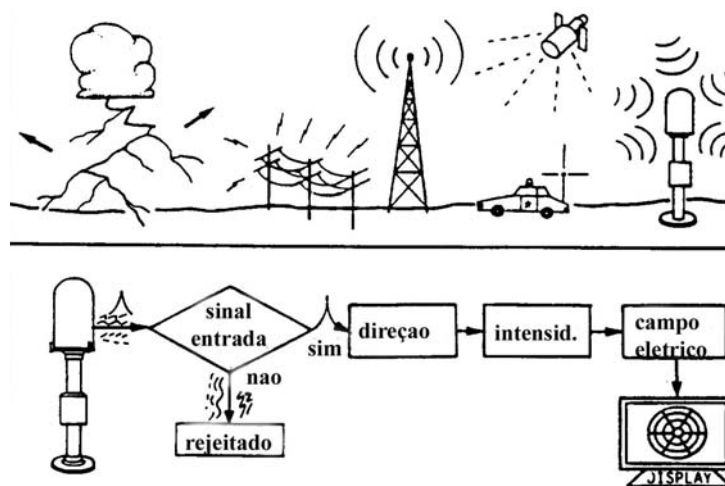


FIGURA 3.13. - Processo de discriminação da forma de onda.

FONTE: Global Atmospheric (2003).

Esse processo de discriminação da forma de onda é essencial pois, sem ele, sinais elétricos que não foram gerados por descargas de retorno podem causar falsas reportagens de relâmpagos. Uma vez que um relâmpago pode ser composto por um certo número de descargas de retorno, o algoritmo de processamento deve associar todas as descargas de retorno com o respectivo relâmpago. Uma vez que todas as descargas de retorno que ocorreram durante um relâmpago foram detectadas e reconhecidas como se referindo àquele específico relâmpago, o algoritmo de processamento computa a direção e a distância aproximada do ponto de impacto do relâmpago e marca essa posição no respectivo octante na tela de um computador padrão IBM/PC, conforme mostrado na Figura 3.19 adiante.

A direção do relâmpago é determinada por uma antena de campo magnético que é formada por duas bobinas, alinhadas na direção norte-sul e leste-oeste, que são sensibilizadas pela variação do campo magnético de banda larga irradiada por um relâmpago NS. A distância é estimada baseada no processamento da variação dos sinais do campo elétrico que é detectado por uma antena formada por discos planos.

Com o objetivo de otimizar a precisão da medida da direção, a direção magnética é determinada no exato momento em que o campo gerado pela descarga de retorno alcança o seu pico inicial. O pico se dá quando do encontro do líder escalonado com a descarga conectante e isso ocorre a, aproximadamente, 100 m do solo, com a descarga de retorno deslocando-se verticalmente. Portanto, qualquer erro na localização, devido ao movimento horizontal da corrente, é minimizado e erros devidos às reflexões na ionosfera são eliminados. Essa técnica de processamento resulta numa precisão angular da ordem de  $\pm 1^\circ$  para relâmpagos que ocorrem a uma distância de até 100 milhas náuticas (185 km) do sensor.

#### **3.1.4.1.1 Processamento do Relâmpago**

Como mencionado, uma vez que um relâmpago pode ser composto por um certo número de descargas de retorno, o algoritmo de processamento deve associar todas as



descargas de retorno que ocorreram durante um relâmpago e reconhecê-las como se referindo àquele específico relâmpago antes de iniciar o processamento propriamente dito.

Para fazer isso, a primeira função do algoritmo de processamento é atribuir o tempo exato de ocorrência, baseado no relógio (*clock*) do sistema, para cada descarga detectada. Depois, o algoritmo de processamento do relâmpago associa as descargas aos eventos de relâmpagos baseado na consistência do tempo e do ângulo. Descargas detectadas dentro do intervalo de tempo de 1 segundo e +/- 2,5° de azimute são associadas ao mesmo relâmpago.

Uma vez que todas as descargas de retorno que ocorreram foram associadas ao respectivo evento de relâmpago, o algoritmo de processamento computa as características de intensidade do sinal da primeira descarga de retorno do relâmpago. Esse processamento é essencial para a coerência na determinação da distância estimada, uma vez que as características de intensidade da primeira e das subseqüentes descargas de retorno são completamente diferentes. Como consequência, esse processo provê informações consistentes, uma vez que algumas tempestades apresentam um grande número de descargas de retorno por relâmpago enquanto outras podem ter, principalmente, relâmpagos com uma única descarga de retorno. Em média, um relâmpago NS negativo múltiplo possui de 3 a 6 descargas de retorno subseqüentes, podendo esse número chegar a algumas poucas dezenas (Pinto Jr. e Pinto, 2000).

As características de intensidade da primeira descarga de retorno são comparadas, então, com características-padrão de intensidade obtidas da média de inúmeras medições, efetuadas durante longo tempo, de inúmeros eventos de relâmpagos. O algoritmo de processamento pode, então, estimar a distância de ocorrência de cada relâmpago normalizada em relação às características-padrão.

### 3.1.4.2 Escolha do Local de Instalação

O local de instalação do sensor TSS 928 deve ser escolhido com especial cuidado com relação à mínima distorção da forma de onda do sinal magnético de entrada e o mínimo ruído de fundo, bem como se levando em conta a facilidade de suprimento de energia elétrica para alimentação de potência e comunicação de dados para o equipamento.

Distorções na forma de onda podem ser causadas por condutores energizados próximos tais como edificações e linhas de transmissão de potência e por características do terreno tais como montanhas, *canyons* e depressões do solo. Um local com características desfavoráveis pode fazer com que o sinal pareça vir de uma direção diferente da que realmente veio.

Ruídos de fundo são devidos, principalmente, ao funcionamento de equipamentos elétricos próximos. Equipamentos tais como transformadores de potência e motores elétricos são particularmente “ruidosos”. Alto ruído de fundo significa baixa eficiência na detecção e decréscimo na precisão ou, em casos extremos, pode tornar o equipamento inoperante.

O local ideal para instalação do equipamento é ao nível do solo e no centro de uma grande área aberta. O equipamento deve estar, no mínimo, distante 60 metros de qualquer construção ou outra possível fonte de ruído e não deve estar mais próximo que quatro vezes a altura de qualquer construção, antena ou torre de montagem de instrumentos. O sensor deve estar 150 metros distante de linhas telefônicas, linhas de transmissão de potência ou antenas de transmissão.

A Figura 3.14 mostra o critério definido pelo fabricante do equipamento, baseado na altura da obstrução, para definição do local de instalação do sensor.

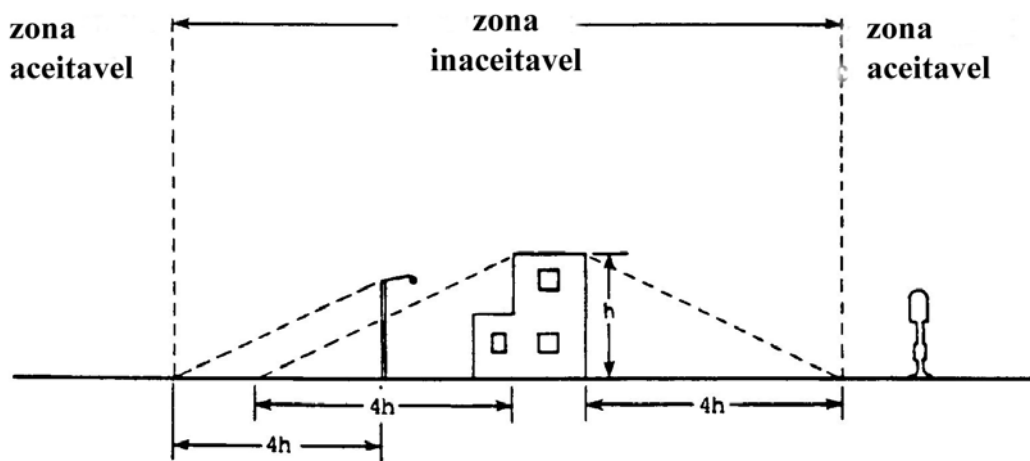


FIGURA 3.14. - Critérios para escolha do local de instalação do sensor TSS 928.

FONTE: *User Guide – Thunderstorm Sensor model TSS 928* (2003).

### 3.1.4.3 Componentes Principais do Sensor TSS 928

O Sensor é constituído de quatro componentes principais:

#### Antena

Recebe e envia sinais à Placa do Processador Principal que está, juntamente com o Módulo de Eletrônica e o Módulo de Potência/Comunicação, localizada num compartimento anexo. O aspecto físico da montagem da antena é melhor descrito como duas placas circulares de circuito impresso, de dupla face, mantidas fixas e paralelas por quatro espaçadores. Como pode ser observado na Figura 3.15, o conjunto da antena é constituído por três componentes:

- uma antena de campo elétrico;
- uma antena, tipo bobina, de campo magnético alinhada na direção leste-oeste;
- e

- uma antena, tipo bobina, de campo magnético alinhada na direção norte-sul.

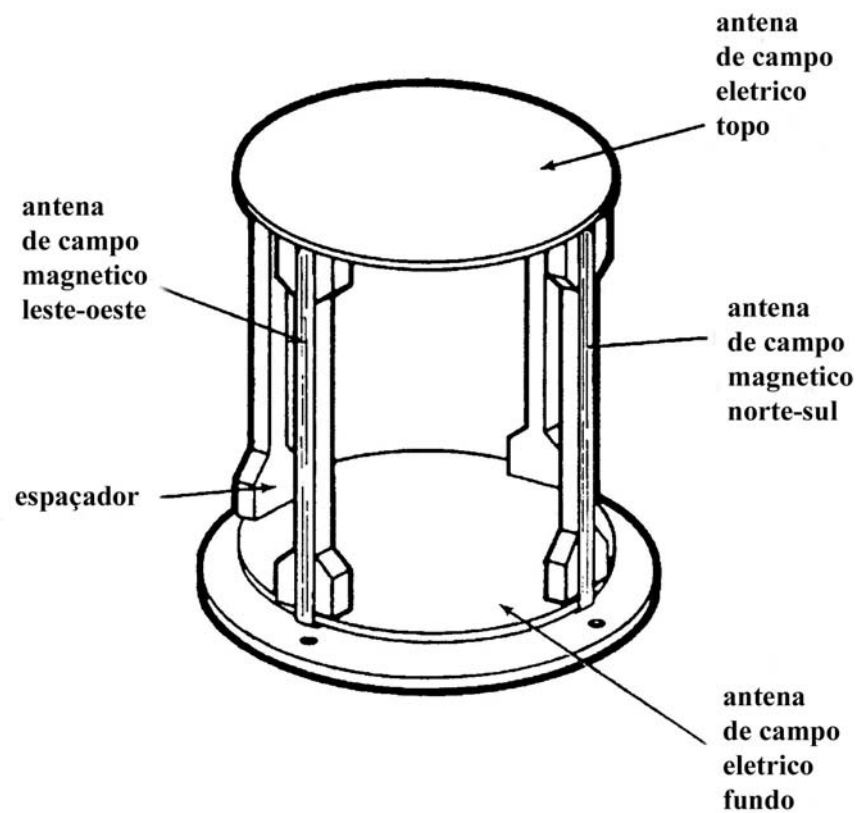


FIGURA 3.15. - Disposição das antenas do sensor TSS 928.

FONTE: Global Atmospherics (2003).

A Figura 3.16 mostra que a antena de campo elétrico é formada por duas placas instaladas nos extremos dos separadores, essas placas possuem lâminas metálicas em cima das suas superfícies. As antenas de campo magnético, como mencionado, consistem de duas bobinas planas formadas por duas placas de circuito impresso de dupla face, apoiadas longitudinalmente nos espaçadores verticais, sendo que parte da sua bobina está instalada no lado de baixo dos discos que formam a antena de campo elétrico. As antenas de campo magnético estão rotacionadas, uma em relação à outra, de precisos noventa graus.

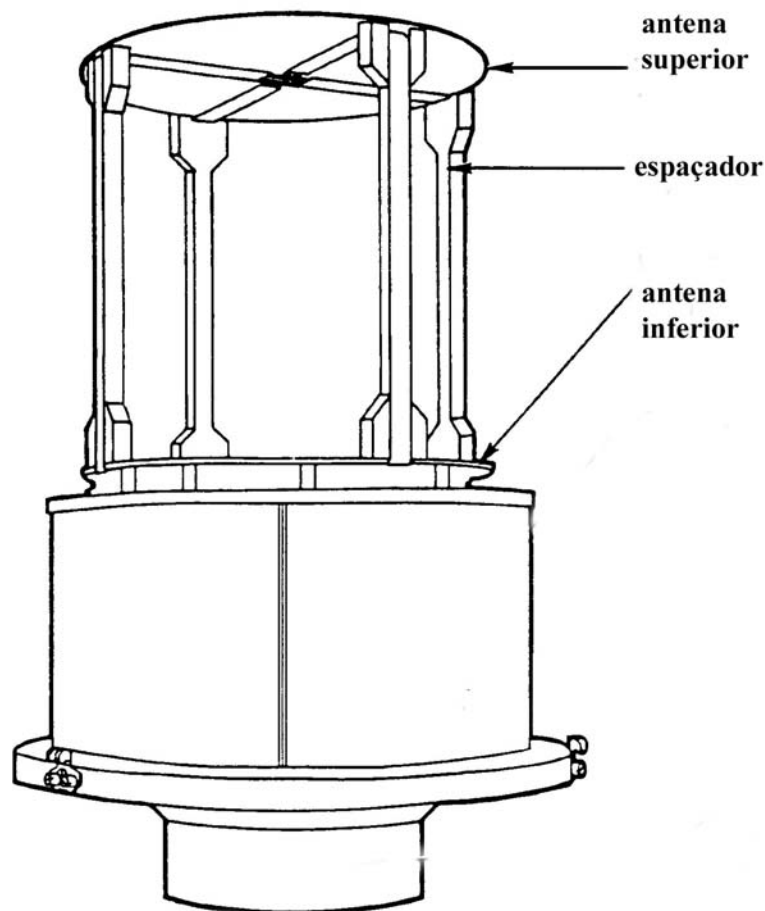


FIGURA 3.16. - Disposição das antenas do sensor TSS 928.

FONTE: Global Atmospheric (2003).

Para o alinhamento preciso das antenas de campo magnético nas direções norte-sul e leste-oeste, é utilizado um acessório denominado “*gnomon*”. O *gnomon* é uma haste de aço precisamente usinada, posicionada com precisão no centro do disco montado no topo da antena com o propósito de alinhá-la com referência ao norte geográfico. Isso é obtido girando a montagem da antena até que a sombra do *gnomon* seja projetada entre as marcas de calibração existentes no disco de topo no horário em que o sol esteja num azimute conhecido. O horário exato do alinhamento é determinado por uma carta solar obtida através de um software fornecido com o equipamento. Todo esse processo é mostrado na Figura 3.17.

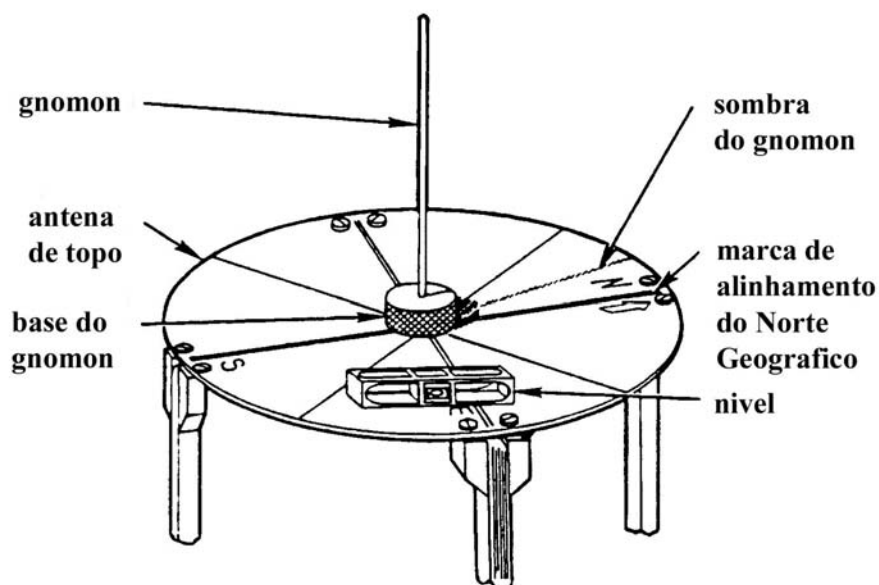


FIGURA 3.17. - Alinhamento do sensor TSS 928 utilizando um “gnomon”.

FONTE: Global Atmospheric (2003).

### Autoteste e Calibração

Aos zero minutos de cada hora, se tempestades não estão presentes, o sensor inicia um ciclo de autoteste e calibração que dura cerca de 15 segundos. Estando tempestades presentes, o sensor esperará pelo instante em que nenhum quadrante indique mais que 5 relâmpagos e, então, o ciclo de autoteste será iniciado. Na hipótese da situação anterior não ocorrer, o autoteste iniciará 24 horas depois do último ciclo de autoteste realizado, mesmo durante a presença de uma tempestade.

Sempre que um ciclo de autoteste é iniciado, a CPU do sensor injeta uma série de sinais controlados simulando relâmpagos na antena do sensor. A CPU declara o sensor operacional se a série de sinais detectados estiver dentro das tolerâncias pré-definidas.

As informações do autoteste também são usadas para calibrar os circuitos analógicos do sensor devido à mudanças de temperatura, ventos e outras variações.

## **3.2 Metodologia**

Foram utilizados nesse estudo os dados gerados pelo sistema de monitoramento do ambiente eletromagnético instalado no Centro de Lançamento de Alcântara em agosto de 2003 e os dados climatológicos disponíveis na Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do CTA.

### **3.2.1 Etapas da Pesquisa**

As seguintes etapas foram executadas em ordem cronológica:

- a) Entre janeiro e abril de 2003 buscou-se uma familiarização, através da consulta aos manuais técnicos, com o sistema a ser implantado no Centro de Lançamento de Alcântara, estudando os princípios de funcionamento e características dos principais equipamentos que o compõe.
- b) Orientação quanto o local de instalação dos equipamentos no Centro de Lançamento de Alcântara e acompanhamento das obras de infra-estrutura necessárias para a instalação entre maio e julho de 2003.
- c) Instalação do sistema e início da colocação em operação (*setup*) em agosto de 2003.
- d) Aquisição de dados até maio de 2004.

### **3.2.2 Período dos Dados**

Os dados provenientes do sistema de monitoramento do ambiente eletromagnético cobrem o período de final de janeiro a maio de 2004. Apesar de ter entrado em operação em 20 de agosto de 2003, o sistema permaneceu desligado entre o final de setembro de 2003 e o final de janeiro de 2004 devido à ocorrência do acidente com o

VLS-PT3 em 22 de agosto de 2003 e os procedimentos de segurança adotados após este infeliz evento. Porém, como pode ser observado na Tabela 3.1 a seguir, o período de aquisição de dados cobre o período de maior precipitação em 2004.

TABELA 3.1 – Precipitação no Primeiro Semestre de 2004.

	PRECIPITAÇÃO [mm]					
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Climatologia	103,1	189,8	357,9	326,9	175,5	128,0
2004	167,0	419,5	400,4	303,1	216,5	39,8

FONTE: Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE/CTA.

Os dados meteorológicos obtidos junto a ACA/IAE cobrem um período de 11 anos (1993 a 2003) fornecidos pela estação meteorológica do Centro de Lançamento de Alcântara e de 41 anos (1951 a 1991) pela estação meteorológica de São Luis/MA.

### 3.2.3 Aquisição dos Dados

Podem ser utilizados, para a apresentação dos dados gerados pelo sistema implantado no Centro de Lançamento de Alcântara, dois *softwares*. O *software* “*DISPLAY*” é o que possui interface mais iterativa para o usuário do sistema. Porém, através dele não é possível a obtenção dos dados necessários para a realização do trabalho proposto. Esse *software* recebe as informações do EFM e da TSS 928, e apresenta-as através de uma forma gráfica para o usuário do sistema, conforme mostrado na Figura 3.18.



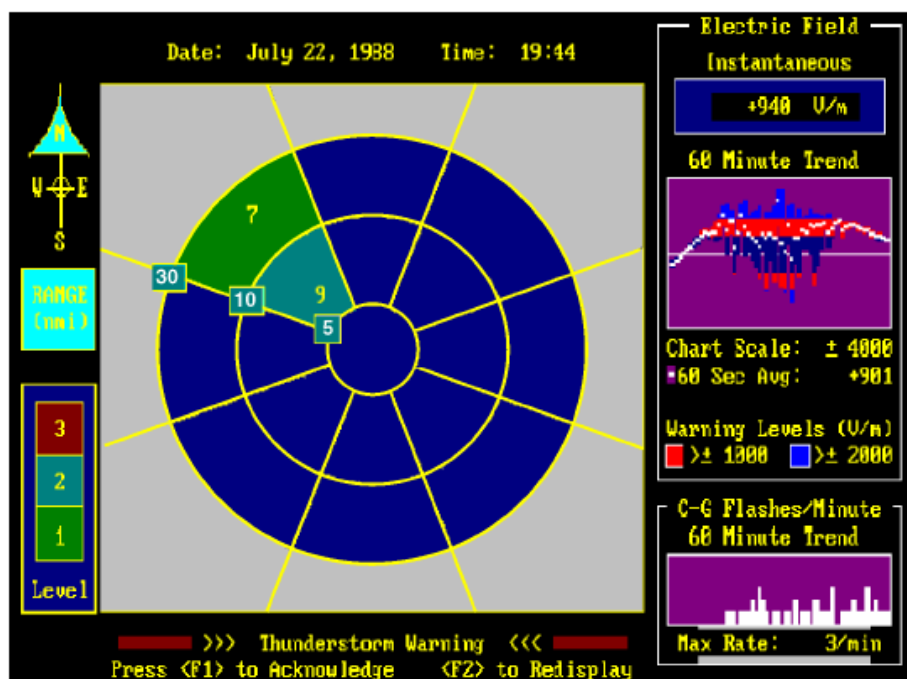


FIGURA 3.18. - Tela do Sistema.

FONTE: Global Atmospherics (2003).

Através do *software* “PROCOM” podem ser apresentados, separadamente e não de forma gráfica, os dados fornecidos pelo EFM e pela TSS 928. Existem algumas possibilidades de configuração do equipamento para apresentação dos dados utilizando-se esse *software*.

### 3.2.3.1 Dados Obtidos a Partir da TSS 928

Utilizando-se o *software* “PROCOM”, uma configuração é escolhida para apresentação dos dados fornecidos pela TSS 928 de modo que, a cada minuto, seja mostrado na tela um resumo dos eventos ocorridos, indicando o número de relâmpagos diferenciando-os entre relâmpagos que envolvem o solo e os que ocorrem na nuvem, a direção de ocorrência, a faixa de distância, o número total de relâmpagos desde o último *reset* e outros dados que não serão utilizados nesse estudo. É apresentada, a seguir, uma mensagem enviada pela TSS 928 como exemplo.

```

NEAR: N 0  NE 0  E 0  SE 0  S 0  SW 0  W 0  NW 0
DIST: N 0  NE 0  E 0  SE 0  S 0  SW 1  W 6  NW 0
OVHD 0  CLOUD 3  TOTAL 10  P 00H 36 C 1 0 0 0 0 8.926

```

A cada ocorrência de relâmpago uma mensagem é enviada, independentemente do momento em que o mesmo ocorra. A mensagem informa, primeiramente, se o relâmpago envolve o solo ou é intra-nuvem. A seguir é informado o intervalo de tempo entre o início e o fim do relâmpago dado em segundos contados desde o último *reset*, com precisão de milissegundos. Depois é informada a faixa de ocorrência do relâmpago (0=logo acima, 1=próximo, 2=distante e 3=intra-nuvem). A próxima informação é a multiplicidade (número de descargas que compõe o relâmpago) e, por fim, a direção de ocorrência. É mostrado, abaixo, exemplos dessa mensagem para um relâmpago envolvendo o solo e para um intra-nuvem, respectivamente.

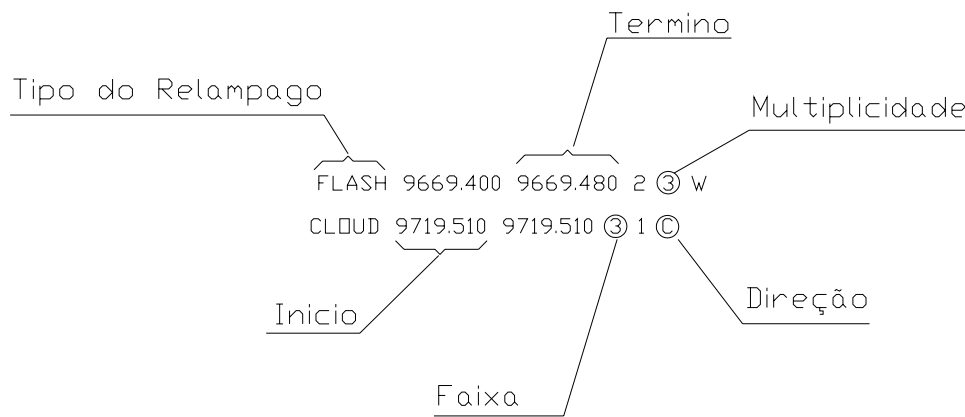


FIGURA 3.19. - Exemplo de informação sobre ocorrência de um evento de relâmpago.

FONTE: Global Atmospheric (2003).

Utilizando-se esses dados foram elaborados planilhas e gráficos de modo a se avaliar as características de interesse para o estudo.

### **3.2.3.2 Dados Obtidos a Partir do EFM**

O valor da intensidade do campo elétrico atmosférico, em kilovolts por metro, é mostrado a cada minuto na tela do aplicativo. Utilizando esses dados foram elaborados planilhas e gráficos de modo a se avaliar as características de interesse para o estudo.



## CAPÍTULO 4

### CLIMATOLOGIA DA REGIÃO DE ALCÂNTARA

A climatologia da região de Alcântara está caracterizada no Atlas Climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) elaborado pela Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), edição de 2002, e em outros trabalhos que abordam aspectos específicos do clima da região, tais como Fisch (1997) e Coutinho (1999).

Os dados nos quais se baseiam os trabalhos mencionados foram coletados, entre outras, pela estação meteorológica de superfície do CLA, localizada na latitude  $02^{\circ} 22' S$ , longitude  $44^{\circ} 23' W$ , constituídos por séries temporais de 06 (seis) anos (1993 – 1999). Além dessas informações, também foram utilizados nos estudos dados coletados pela estação meteorológica do aeroporto de São Luís – MA, constituídos por uma série temporal de 40 (quarenta) anos, e dados da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) localizada em Alcântara na latitude  $02^{\circ} 33' S$  e longitude  $44^{\circ} 40' W$ , numa série temporal de 02 (dois) anos (1997 – 1999).

Alcântara está situada muito próxima do equador geográfico (latitude  $02^{\circ} 22' S$ , longitude  $44^{\circ} 23' W$ ). A região tropical brasileira tem como características altas temperaturas sem muita variação durante o ano, índices pluviométricos elevados e, nos níveis baixos (800 hPa – 750 hPa), ventos predominantes de leste, denominados Ventos Alísios que são fortes e persistentes. Já nos níveis mais altos (250 hPa – 200 hPa) predominam os ventos do oeste (Coutinho, 1999).

O Centro de Lançamento de Alcântara apresenta características climatológicas típicas da região de Alcântara, pois possui uma região de rugosidade abrupta (superfície lisa próxima à superfície rugosa). Apresenta, também, uma relativa variação topográfica (falésias do mar), com desnível em torno de 50m. O local onde se encontra instalada a Torre Móvel de Integração (TMI), de onde são feitos os lançamentos, está situada a 50m

de distância da costa e a uma altitude de 42 m. Nessa situação os foguetes sofrem influência de forte turbulência causada pelos fenômenos climatológicos descritos nos itens a seguir.

#### **4.1 Apresentação dos Dados Coletados em Alcântara**

São coletados no Centro de Lançamento de Alcântara dados sobre a temperatura do ar em graus Celsius (°C), umidade relativa em porcentagem (%), pressão ao nível do mar em hecto-Pascal (hPa), direção do vento em graus, velocidade do vento em metros por segundo (m/s), cobertura de nuvens em oitavos, distribuição de chuva (casos) e precipitação em milímetros (mm) (Atlas Climatológico do CLA, 2002).

##### **4.1.1 Temperatura do Ar**

Segundo o Atlas Climatológico do CLA, “os elementos climáticos de temperatura do ar não apresentam variações sazonais e seus valores são típicos da atmosfera tropical.”

Os dados de temperatura do ar, mostrados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, obtidos da estação de superfície do Centro de Lançamento de Alcântara indicam que entre os meses de setembro e dezembro ocorrem temperaturas do ar entre 29,8 °C e 30,3 °C, durante os horários das 12:00 às 14:00 horas local. As temperaturas do ar no período da noite são em torno de 25,3 °C e 26,4 °C.

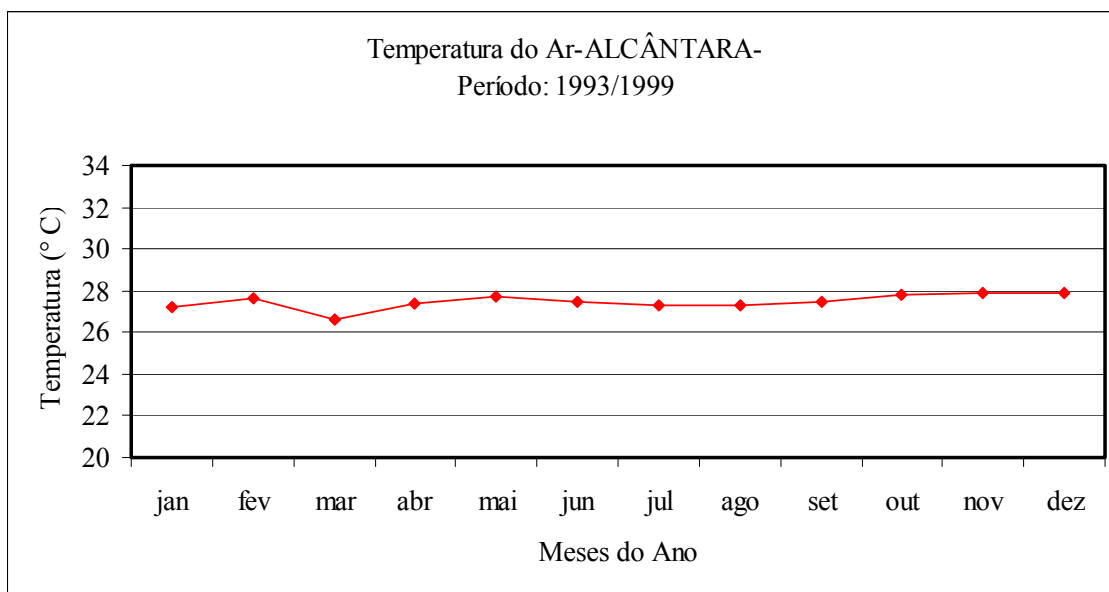


FIGURA 4.1. - Média mensal da Temperatura do Ar ao longo do ano em Alcântara – MA. Período de 1993 a 1999.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 6).

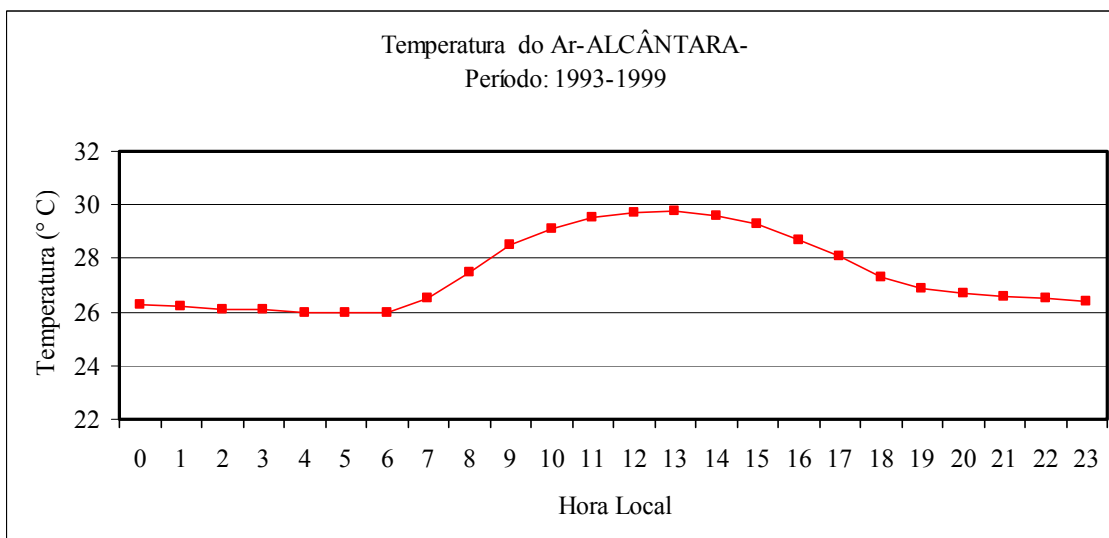


FIGURA 4.2. - Média horária da Temperatura do Ar ao longo do dia em Alcântara – MA. Período de 1993 a 1999.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 6).

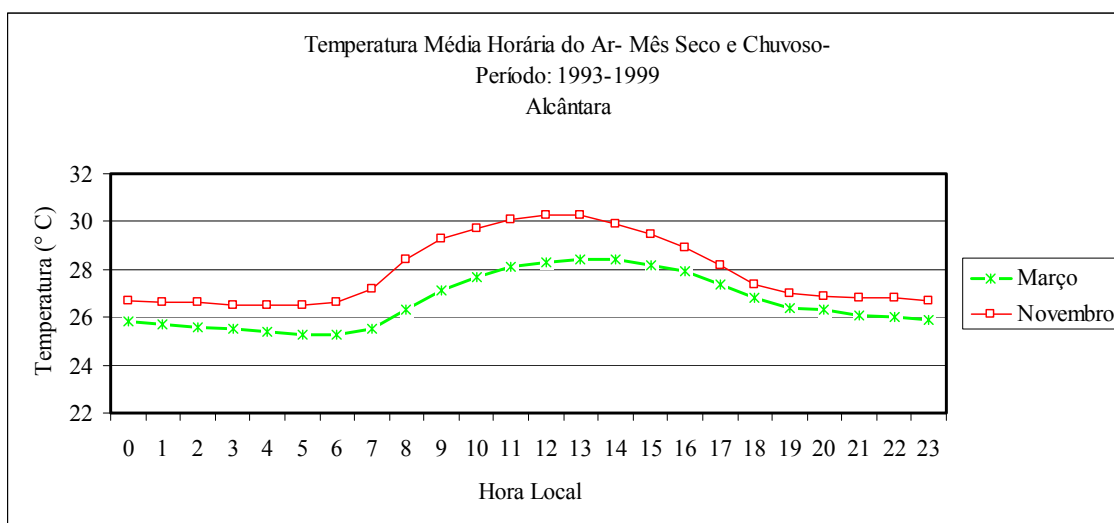


FIGURA 4.3. - Curva média horária de Temperatura do Ar para um mês seco (novembro) e chuvoso (março) em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 7).

#### 4.1.2 Umidade Relativa

Segundo o Atlas Climatológico do CLA, “os elementos climáticos de umidade relativa não apresentam variações sazonais e seus valores são típicos da atmosfera tropical”.

Os dados obtidos da estação de superfície do Centro de Lançamento de Alcântara, mostrados na Figura 4.4, indicam que a umidade relativa do ar apresenta uma amplitude anual de 12%, estando em concordância com os obtidos pela estação do aeroporto de São Luís. Ambas apontam os meses de março e abril como os mais úmidos (valor médio de 89% para a estação do CLA) e os meses de outubro e novembro como os mais secos (valor médio de 77% para a estação do CLA).



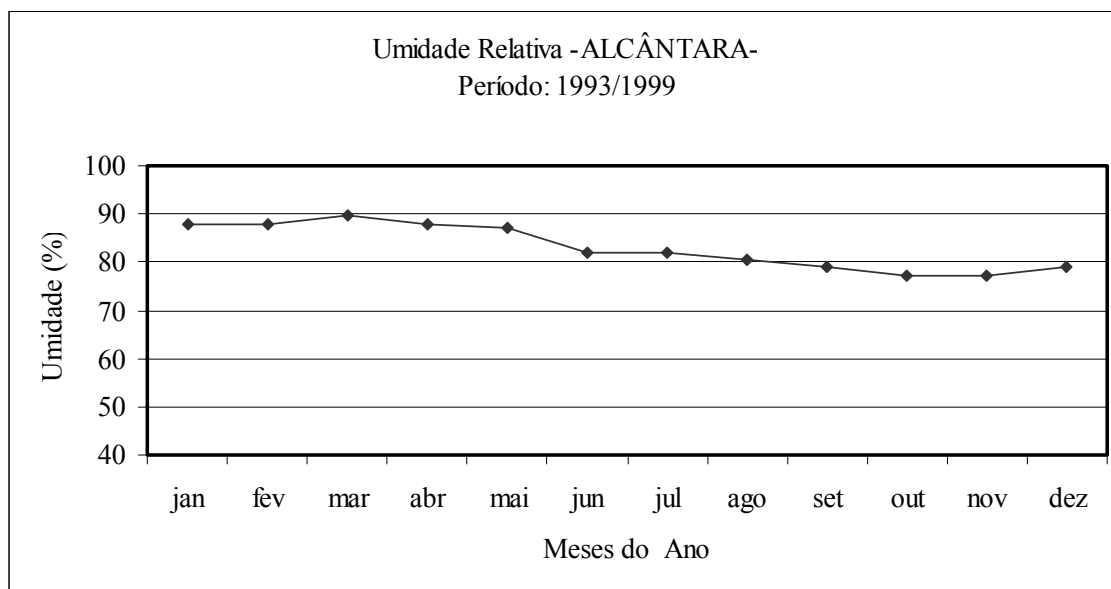


FIGURA 4.4. - Média mensal da Umidade Relativa do Ar em Alcântara - MA. Período 1993-99.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 11).

Com relação ao ciclo diário, os dados da estação do CLA, mostrados na Figura 4.5, e do aeroporto de São Luís também apresentam excelente concordância, indicando valores de mínima umidade relativa (73% para a estação do CLA) ocorrendo nos horários de máxima temperatura (por volta das 13:00 horas local) e valores de máxima umidade relativa (89% para a estação do CLA) ocorrendo nos horários de mínima temperatura (por volta das 04:00 e 05:00 horas local).

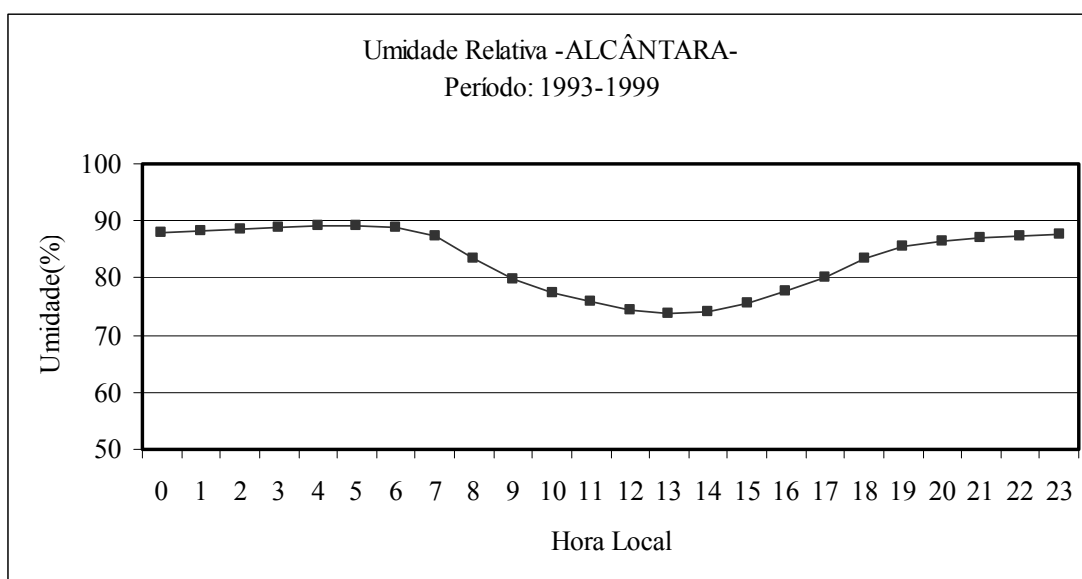


FIGURA 4.5. - Média horária da Umidade Relativa do Ar em Alcântara - MA. Período 1993-99.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 11).

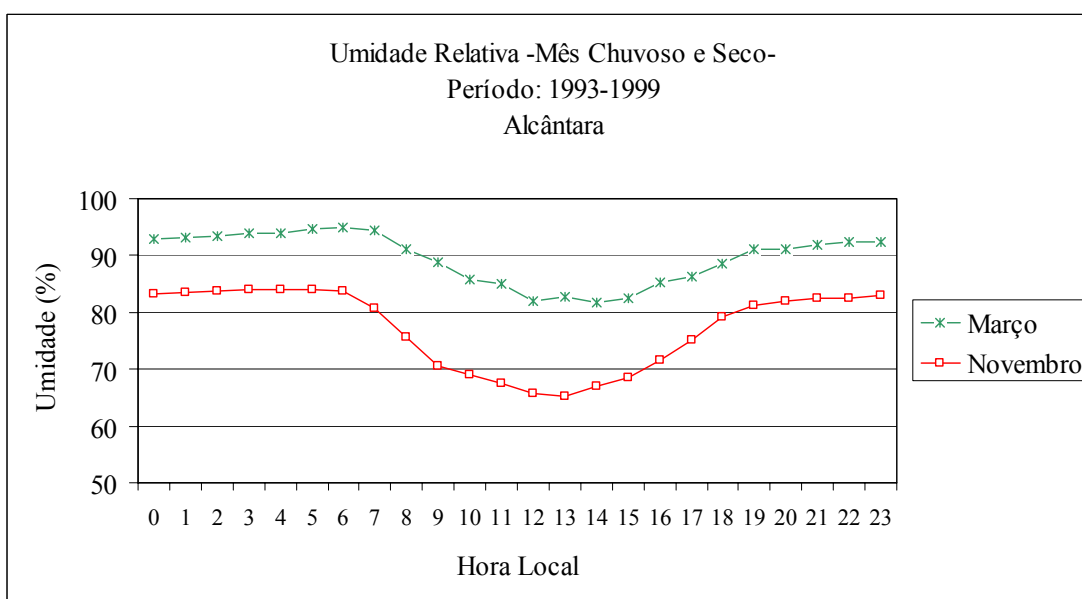


FIGURA 4.6. - Média horária da Umidade Relativa do Ar para um mês chuvoso (março) e um seco (novembro) em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 12).

### 4.1.3 Distribuição de Chuva

Segundo o Atlas Climatológico do CLA está bem caracterizada uma estação chuvosa de janeiro a junho e uma estação seca de julho a dezembro. Há ocorrência de transição entre o período chuvoso e o seco no mês de junho e entre o período seco e o chuvoso no mês de dezembro. Os máximos de precipitação ocorrem nos meses de março e abril, enquanto que os valores mínimos se apresentam nos meses de setembro, outubro e novembro. Novamente os dados das estações de superfície do CLA e do aeroporto de São Luís, mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8 respectivamente, apresentam excelente concordância.

O período de maior ocorrência de chuvas coincide com a posição mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

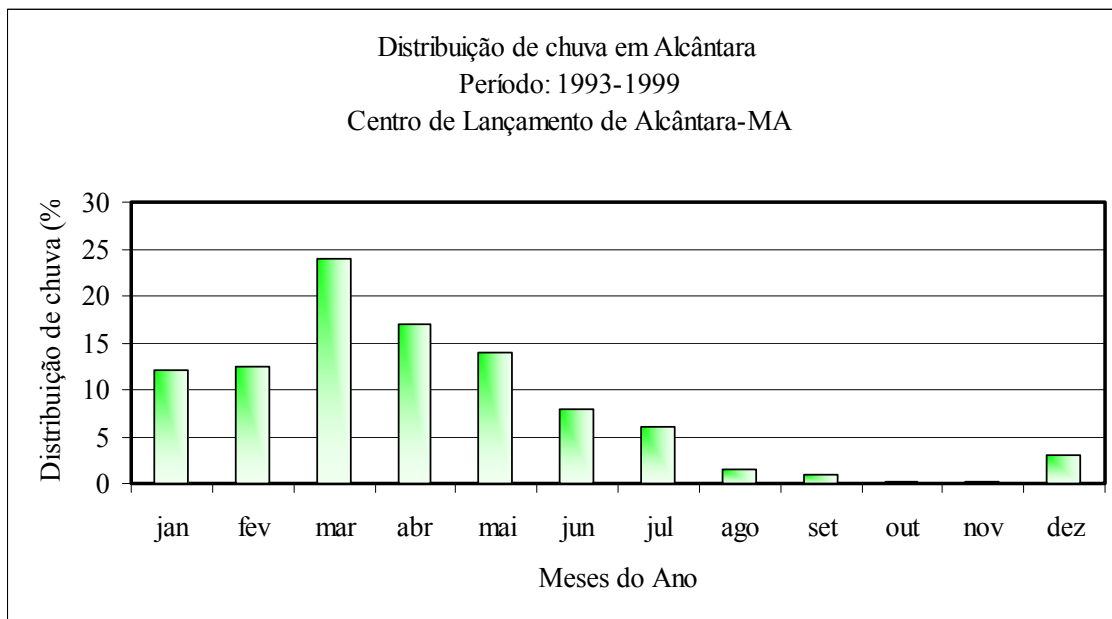


FIGURA 4.7. - Distribuição mensal de Chuva em Alcântara - MA. Período de 1993 a 1999.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 17).

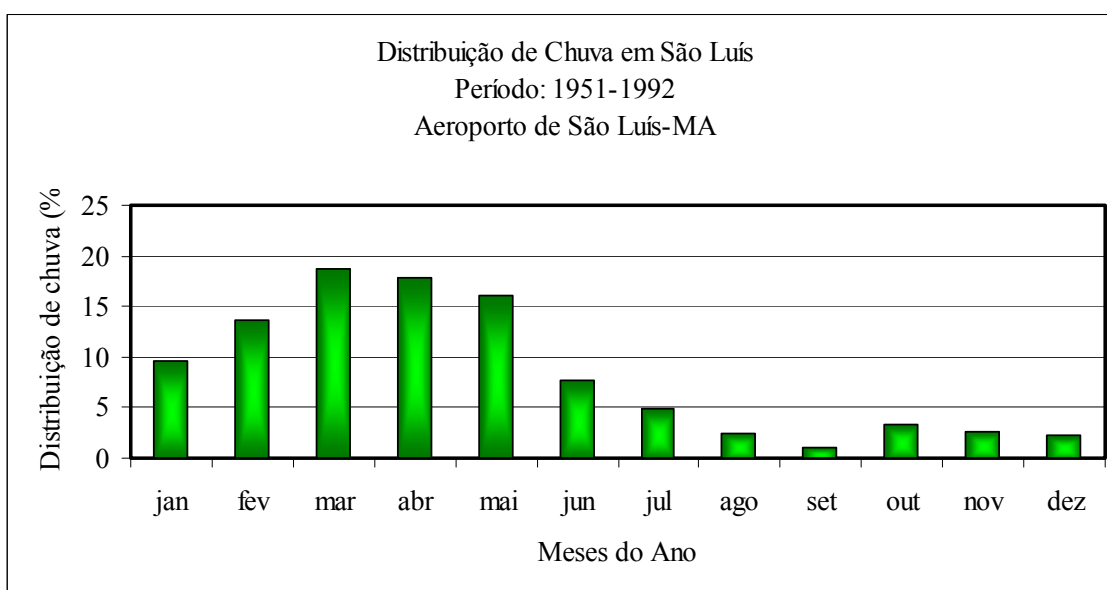


FIGURA 4.8. - Distribuição mensal de Chuva em São Luís - MA. Período de 1951 a 1992.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 37).

#### 4.1.4 Ocorrência de Trovoada/Relâmpago

Segundo observação contida no Atlas Climatológico do CLA, “as informações relativas à ocorrência de trovoadas e relâmpagos foram obtidas de observações meteorológicas visuais (subjetivas) e, portanto, sujeitas a erros estatísticos maiores do que os elementos climáticos baseados em medidas quantitativas (objetivas)”.

Levando-se em conta a subjetividade das mesmas, serão utilizados os dados da estação do aeroporto de São Luís, mostrados na Figura 4.9, que, por abrangerem uma série temporal maior que a de Alcântara, minimizam os efeitos de prováveis erros decorrentes de falhas de observação. Na Figura 4.9 observa-se que a maior ocorrência de relâmpagos e trovoadas está relacionada com o período chuvoso, uma vez que os relâmpagos ocorrem associados a nuvens cumulonimbus, apresentando maior frequência em março e maio. Em termos horários a maior atividade de descargas

apresenta-se no final da tarde e início da noite, sendo o período das 07:00 às 10:00 horas o menos ativo.

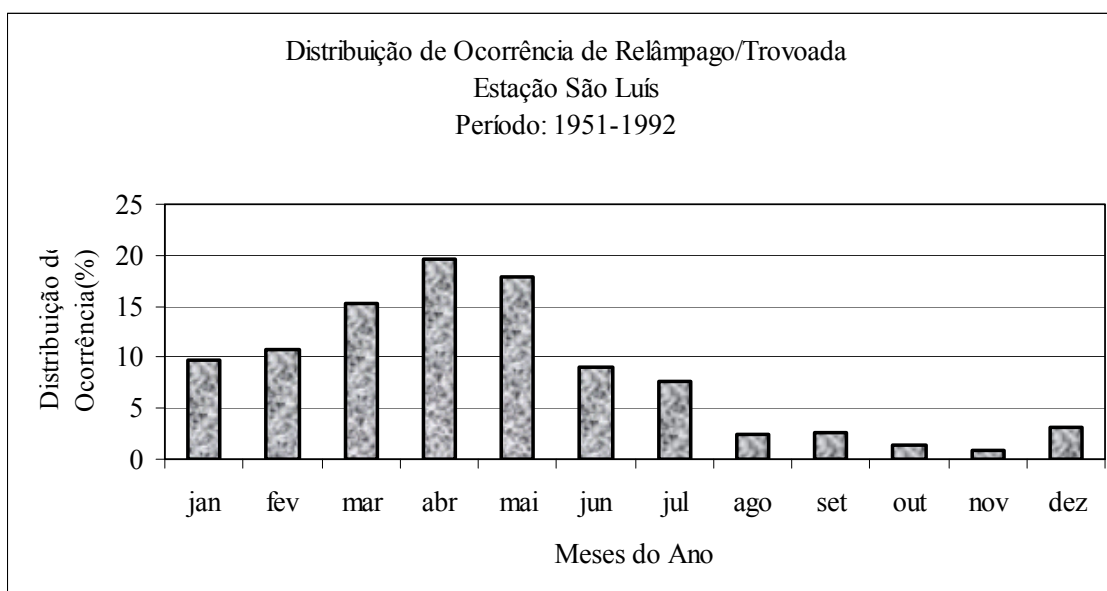


FIGURA 4.9. - Frequência de ocorrência de Trovoadas e Relâmpagos em São Luís - MA. Período de 1951 a 1992.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 38).

#### 4.1.5 Cobertura de Nuvens

Os dados que levaram à obtenção dos gráficos mostrados a seguir foram obtidos a partir do *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP-C1) com imagens de satélites meteorológicos geoestacionários e órbita polar, produzidos a cada 3 horas, com resolução espacial de 2,5° x 2,5° de latitude e longitude.

Para este trabalho, o Atlas Climatológico do CLA informa que foi necessário definir-se dois setores de 2,5° x 2,5° de latitude e longitude, para verificar o comportamento da nebulosidade.

Na Figura 4.10 se observa dois setores: o **setor S1**, centrado em **1,25°S e 43,75°W**, que corresponde a **linha 12 e coluna 41** dos dados do ISCCP e contém Alcântara e a interface entre continente-oceano; o setor S2, centrado em **3,75°S e 43,75°W**, que corresponde a **linha 13 e coluna 41** dos dados do ISCCP que inclui a parte continental ao sul de Alcântara.

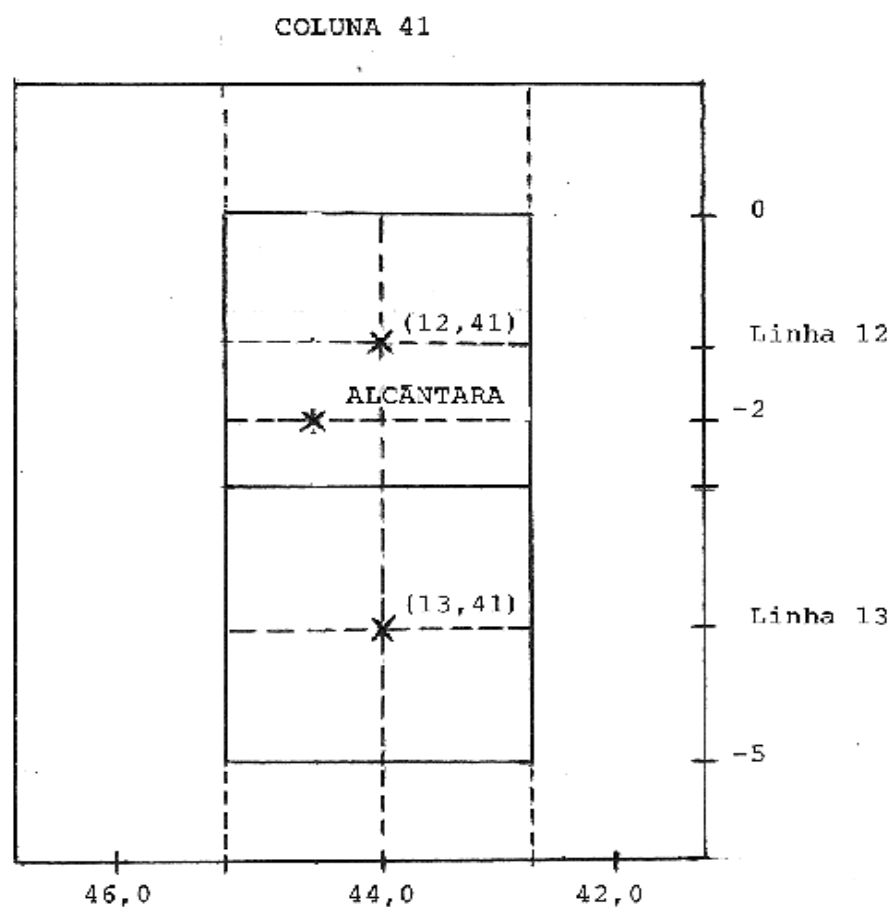


FIGURA 4.10. - Definição dos setores para análise da cobertura de nuvens e sua localização.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 4).

Para a determinação da variação anual mostrada nas Figuras 4.11 e 4.12, a cobertura de nuvens é obtida da relação entre o número de “*pixels*” com nuvens e o número total de “*pixels*” de cada setor. A cobertura de nuvens altas foi definida como nuvens com topo

superior a 560 hPa (aproximadamente 4.800m) e a cobertura de nuvens convectivas como nuvens com topo acima de 310 hPa (aproximadamente 9.100m).

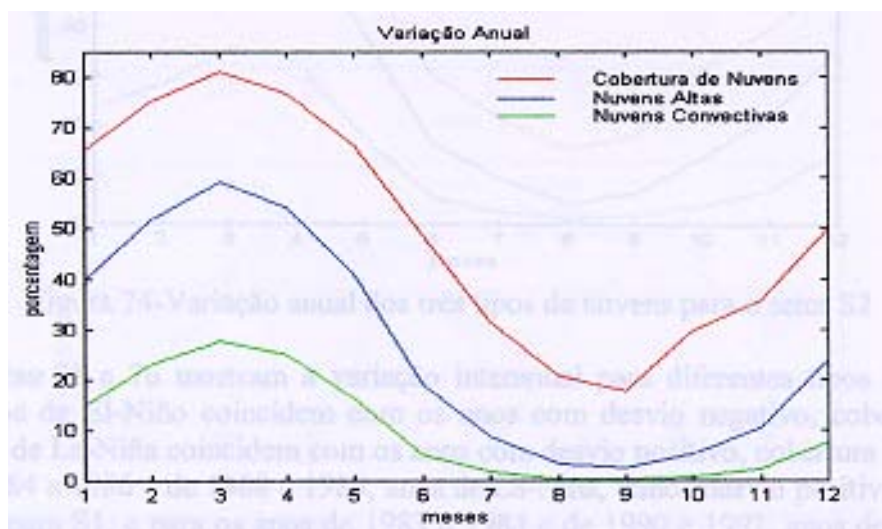


FIGURA 4.11. - Variação anual da Cobertura de Nuvens para o Setor S1.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 55).

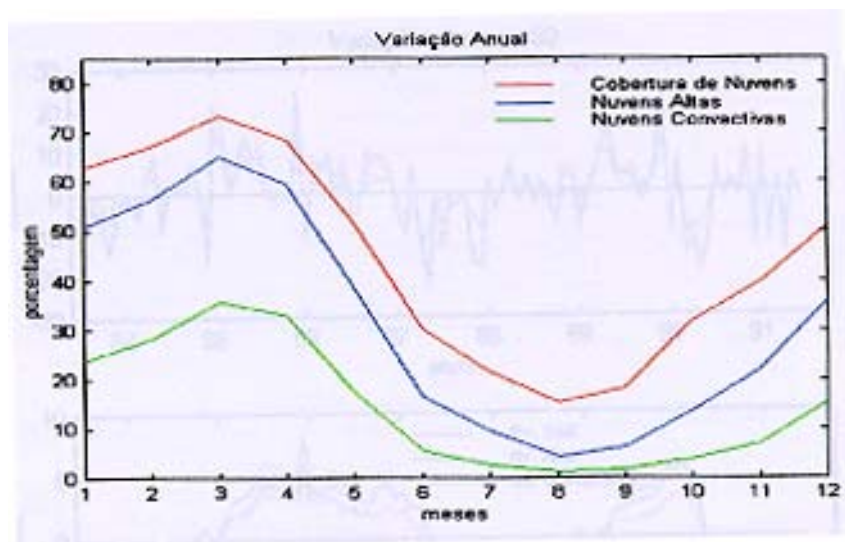


FIGURA 4.12. - Variação anual da Cobertura de Nuvens para o Setor S2.

FONTE: Atlas Climatológico do CLA (2002, p. 56).

A Tabela 4.1 a seguir mostra a comparação, mês a mês, da porcentagem total de cobertura de nuvens em relação à porcentagem de nuvens convectivas na região de Alcântara.

TABELA 4.1 – Relação entre a Porcentagem Total de Cobertura de Nuvens e a Porcentagem de Nuvens Convectivas.

mês	total	Convec.	%
1	63	25	40
2	68	28	41
3	73	38	52
4	69	37	54
5	51	19	37
6	30	7	23
7	21	3	14
8	15	1	7
9	19	3	16
10	32	5	16
11	40	8	20
12	50	15	30
média	44	16	37

#### 4.2 Sistemas Atmosféricos que Afetam a Região de Alcântara

O clima na região de Alcântara é bastante complexo, pois se encontra na transição entre o clima do nordeste brasileiro e a região amazônica, envolvendo a influência de vários sistemas atmosféricos, tais como os Padrão de Dipolo do Atlântico, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Linhas de Cumulonimbus (LCbs) (Coutinho, 1999).

Serão abordadas, a seguir, algumas das características desses sistemas e como eles afetam, de modo geral, o clima da região de Alcântara.



#### **4.2.1 Padrão de Dipolo do Atlântico**

O padrão de dipolo do Atlântico tropical é caracterizado pela manifestação simultânea de anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) com sinais opostos sobre áreas do Atlântico tropical norte e sul (padrão de dipolo norte/sul). O dipolo quente é caracterizado pela ocorrência simultânea de anomalias da TSM positivas no Atlântico tropical norte e anomalias da TSM negativas no Atlântico tropical sul. Ocorre o inverso com o dipolo frio que é caracterizado pela ocorrência simultânea de anomalias da TSM negativas no Atlântico tropical norte e anomalias da TSM positivas no Atlântico tropical sul. Como consequência do dipolo norte/sul um gradiente termal inter-hemisférico meridional estabelece-se no Atlântico equatorial. As variações na TSM relacionadas, ventos provocados e a Pressão ao Nível do Mar (PNM) são cruciais em direcionar a intensidade e posicionamento da nebulosidade e a faixa de precipitação associada com a ZCIT. Para o padrão de dipolo quente, a ZCIT tende a uma posição predominantemente ao norte da sua posição climatológica. Já o padrão de dipolo frio, a ZCIT tende a uma posição predominantemente ao sul da sua posição climatológica (Souza *et al.*, 2000). Dessa maneira, o padrão de dipolo da TSM norte/sul no Atlântico influi diretamente na precipitação da região onde se encontra o Centro de Lançamento de Alcântara (Souza *et al.*, 2000).

#### **4.2.2 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)**

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) localiza-se na região onde ocorrem interações entre vários sistemas atmosféricos e oceânicos, tais como a zona de convergência dos ventos alísios, a zona de máxima temperatura da superfície do mar e zona de máxima cobertura de nuvens convectivas. Sabe-se que a ZCIT possui um deslocamento meridional ao longo do ano, alcançando sua máxima latitude em torno de 1° no hemisfério sul e 8° no hemisfério norte, conforme mostra a Figura 4.13. Esses períodos coincidem com os períodos chuvosos e de seca na região de Alcântara sendo, por esse motivo, o principal sistema gerador de precipitação nesta região (Coutinho, 1999).

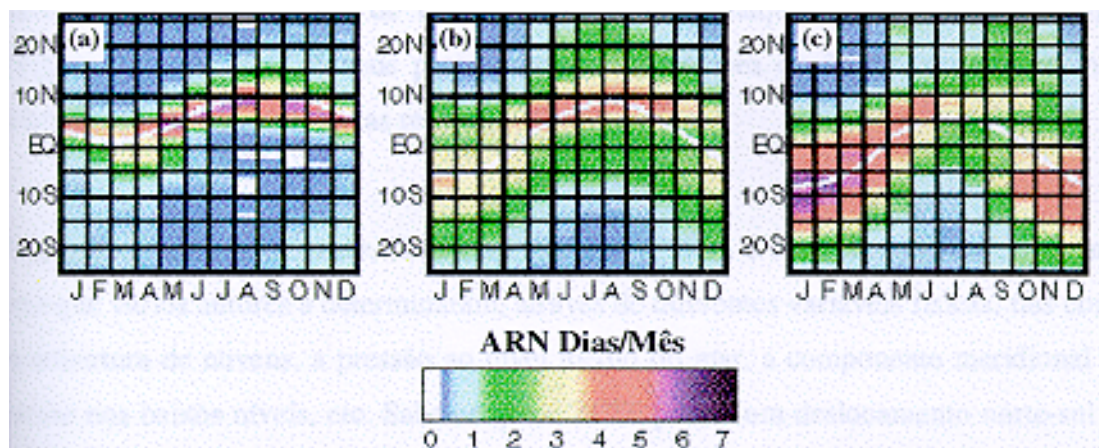


FIGURA 4.13. - Ciclo anual da migração da ZCIT. (a) Oceano Atlântico entre 10-40°W; (b) Global entre 0-359°E e (c) América do Sul entre 45-75°W. FONTE: Coutinho, E. C. (1999, p. 9).

#### 4.2.3 Linhas de Instabilidade (LI)

Nuvens convectivas formam-se ao longo de toda a costa norte-nordeste da América do Sul, desde as Guianas até o Maranhão (Coutinho, 1999). Essas nuvens podem mover-se para dentro do continente como uma Linha de Instabilidade (LI) ou dissipar-se próximo à costa. A formação da LI próximo à costa está relacionada com a penetração da brisa marinha.

Esse sistema, na costa brasileira, tem como características: a) a máxima frequência ocorre em abril e agosto; b) a velocidade média de deslocamento está entre 12 e 16 m/s; e c) a dimensão horizontal média é 1.400 km de comprimento e 170 km de largura (Coutinho, 1999).

Coutinho (1999) também relata que a região de formação das LI sofre um deslocamento meridional no mesmo sentido e época da ZCIT, e que as LI são responsáveis por cerca de 45% da chuva ocorrida na parte leste do estado do Pará.

## CAPÍTULO 5

### ASPECTOS SOBRE AS OCORRÊNCIAS DE RELÂMPAGOS DURANTE O LANÇAMENTO DE FOGUETES

#### 5.1 Porque se Preocupar com Relâmpagos?

O principal fator, como já foi comentado no Capítulo 1, é que um foguete e sua carga útil são extremamente caros e sua perda como resultado da manifestação de uma descarga atmosférica é indesejável no programa da missão. Algumas condições, tal como lançamento somente sob condições climatológicas adequadas, podem ser atingidas. No entanto, mesmo que as condições climáticas sejam propícias, não são asseguradas a prevenção e a proteção contra relâmpagos (Uman, M. A., 1972; Gabrielson, B. C., 1983). Além disso, longos atrasos devido às condições climatológicas podem ser prejudiciais do ponto de vista da operação, de custos e cronograma. Para minimizar o impacto de incertezas climáticas, é necessário adotar algum tipo de sistema para prevenção e/ou proteção contra descargas de origem atmosféricas.

Portanto, do ponto de vista da atividade elétrica de origem atmosférica, torna-se indispensável a instalação de sistema que permita o monitoramento contínuo do ambiente eletromagnético da região do lançamento e seja capaz de fornecer alerta antecipado de relâmpagos quando da identificação de condições favoráveis à sua ocorrência.

#### 5.2 Aspectos sobre a Probabilidade de Ocorrência de uma Descarga Atmosférica

É difícil, se não impossível, estabelecer uma probabilidade para ocorrência de relâmpago com alto grau de confiança. A literatura e os testes existentes realizados para estabelecer essas probabilidades são, em princípio, orientados para situações específicas mais que uma situação genérica, que é o desejado (Gabrielson, B. C., 1983).

A razão primária para fazer uma análise da probabilidade é determinar se há uma chance razoável de que um relâmpago atinja o foguete.

### 5.3 Índice Ceráunico

O parâmetro normalmente usado em todo o mundo para informações sobre relâmpagos é o número de dias de tempestade, ou índice ceráunico, tabulado pela *World Meteorological Organization (WMO)*. Um dia de tempestade é definido como o dia calendário no qual um trovão é ouvido.

Existem limitações relacionados ao uso das informações dos dias de tempestade em todas as áreas porque é possivelmente inexato quando se deseja saber o número de relâmpagos ocorrido, por exemplo. Trovões raramente são ouvidos a distâncias que excedem 25 km do canal do relâmpago (Gabrielson, 1983; Uman, 1987; Pinto Jr. e Pinto, 2000) e o limite médio de audibilidade prático parece ser cerca de 15 km (Gabrielson, 1983; Pinto Jr. e Pinto, 2000). O problema, portanto, é que, exceto para áreas densamente povoadas, irão ocorrer trovões que não serão ouvidos por pessoa alguma. Existem estimativas que apontam que em algumas localidades norte-americanas o valor real dos dias de tempestade é 10 a 100 vezes maior que o indicado usando as informações tabuladas dos dias de tempestade (Gabrielson, B. C., 1983).

Um segundo problema com as informações do índice ceráunico é que elas não contêm informações sobre a intensidade ou duração de uma tempestade, ou se uma ou várias descargas ocorreram.

Por outro lado Uman (1987) relata que os dias de tempestades são mais facilmente obtidos (por exemplo pelos funcionários das estações meteorológicas, usinas e subestações de energia elétrica) e, além disso, existem registros colhidos ao longo de vários anos na maioria das estações meteorológicas ao redor do mundo que não podem ser desprezados. Essa situação é similar à da região de Alcântara/MA, com onze anos de

dados, e de São Luis/MA, com 53 anos de dados coletados (Atlas Climatológico do CLA, 2002).

#### **5.4 Densidade de Descargas**

Segundo Prentice (1977), citado por Uman (1987), a melhor relação entre o número de dias de trovoadas (T) e a densidade de descargas nuvem-solo ( $N_g$ ), é dada pela seguinte forma:

$$N_g = aT^b \text{ [km}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{]} \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, a e b são constantes empíricas que, segundo Uman (1987), tipicamente valem  $0,1 < a < 0,2$  e  $b = 1$ . A norma NBR-5419, revisada em 2001, define que a densidade de descargas para o solo será obtida pela equação:

$$N_g = 0,04 T^{1,25} \text{ [km}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{]} \quad (5.2)$$

##### **5.4.1 Densidade de Descargas a Partir da Norma NBR-5419**

Da norma NBR-5419 tem-se que, para a região de Alcântara, o número de dias de trovoadas é 30. Substituindo-se esse valor na Equação 5.2 encontra-se:

$$N_g = 0,04 (30)^{1,25} \text{ [km}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{]}$$

$$N_g = 2,8 \text{ [km}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{]}$$

##### **5.4.2 Densidade de Descargas a Partir dos Dados da ACA/IAE**

A Equação 5.2 também será utilizada para a determinação da densidade de descargas para o solo na região de Alcântara utilizando-se os dados do número de dias de trovoadas

existentes na Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do CTA.

A Tabela 5.1 mostra a série temporal da densidade de descargas nuvem-solo para Alcântara, no período de 1993 a 2003.

TABELA 5.1 – Densidade de Descargas Nuvem-Solo para Alcântara.

Ano	ndt	Densidade de Descargas
-----	--	$N_g$ [relâmpago/km <sup>2</sup> ano]
1993	3	0,2
1994	40	4,0
1995	18	1,5
1996	13	1,0
1997	1	0,1
1998	5	0,3
1999	17	1,4
2000	53	5,7
2001	32	3,0
2002	30	2,8
2003	16	1,3

FONTE: ndt obtidos junto à Divisão de Ciências Atmosféricas do IAE/CTA.

O valor médio da densidade de descargas nuvem-solo para a região de Alcântara é 1,9 com desvio padrão de 1,8.

#### 5.4.3 Densidade de Descargas a Partir dos Dados da TSS 928

A partir do número de descargas para o solo fornecido na Tabela 6.1, ocorridas na área coberta pelo sensor TSS 928, pode-se calcular a densidade de descargas para a região de Alcântara, admitindo-se que:

- Serão consideradas as descargas ocorridas dentro da área definida pelo círculo de raio 8 km, uma vez que, segundo o fabricante, para essa área, o sensor possui eficiência superior a 90%, portanto:

$$A = \pi R^2 \text{ [km}^2\text{]}$$

$$A = \pi(8)^2 \text{ [km}^2\text{]}$$

$$A = 201,1 \text{ [km}^2\text{]}$$

- O número total de descargas ocorrido no período de fevereiro a junho de 2004, dentro do círculo de raio 8 km (overhead) é 318. Conforme informa o Atlas Climatológico do CLA (2002), o período medido abrange cerca de 70% da média anual total do número de dias com trovoadas. Portanto, ao número de descargas registrado pelo sensor TSS 928 será aplicado um fator de 1,3 de modo a se levar em conta as descargas ocorridas nos demais meses do ano, uma vez que as densidades de descargas calculadas anteriormente são anuais.

Tem-se, portanto, que a densidade de descargas obtida a partir dos dados fornecidos pelo sensor TSS 928 é:

$$N_g = (318 \times 1,3) / (201,1) \text{ [km}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{]}$$

$$N_g = 2,1 \text{ [km}^{-2}\text{ano}^{-1}\text{]}$$

A Tabela 5.2 apresenta um resumo da densidade de descargas para o solo, na região de Alcântara, em função das diferentes fontes de origem dos dados.

TABELA 5.2 – Densidade de Descargas Nuvem-Solo para Alcântara em Função da Fonte de Dados.

Fonte	Densidade de Descargas
-----	$N_g$ [relâmpago/km <sup>2</sup> ano]
NBR-5419	2,8
ACA/IAE	1,9
TSS 928	2,1

Cada uma das fontes traz embutida uma imprecisão. Foram comentadas anteriormente as limitações do índice ceráunico, utilizado para obter a densidade de descargas tanto a partir da NBR-5419, bem como da estimativa da ACA/IAE. Já a densidade de descargas cuja fonte é o sensor TSS 928 é um valor médio obtido em apenas um período chuvoso. Porém, conforme informado no item 3.2.2, o regime de chuvas de 2004 foi mais intenso quando comparado com a climatologia da região de Alcântara. Os índices mais altos de precipitação ocorreram nos meses de fevereiro (aumento de 121 % em relação à climatologia), março (aumento de 12 %) e maio (aumento de 23 %). O mês de abril apresentou uma redução de 7 % na precipitação em relação à climatologia. Em média, houve um aumento de 28 % no índice de precipitação para o período de final de janeiro e maio, durante o qual foram colhidos os dados pelo sensor TSS 928. O mês de junho, que já se encontra fora do período de aquisição de dados, apresentou redução de 31 % na precipitação em relação à climatologia, o que indica a transição do período chuvoso para o período seco. No futuro, com uma série temporal mais longa, o valor da densidade de descargas nuvem-solo obtida a partir dos dados colhidos pelo sensor TSS 928 pode se alterar.

A informação do índice ceráunico fornecida pela NBR-5419 refere-se a áreas de grandes dimensões. As regiões norte/nordeste do país apresentam densidade demográfica baixa e, nessas condições, conforme mostrado no subitem 5.3, a probabilidade do índice ceráunico apresentar imprecisão é significativa. Por outro lado, o valor da densidade de descargas obtido a partir dos dados de número de dias de



trovoada coletados pela estação meteorológica do CLA e armazenados na ACA/IAE, é bastante próximo do valor obtido através do registro das descargas efetuado pelo sensor TSS 928 no verão/outono de 2004. Em virtude do exposto será adotado o valor de 2,0 [descargas km<sup>-2</sup>ano<sup>-1</sup>] como representativo da densidade de descargas para a área do Centro de Lançamento de Alcântara.

### **5.5 Tempo de Exposição**

Tempo de exposição é o período durante o qual um foguete está vulnerável aos efeitos de uma descarga que ocorra diretamente ou próxima ao mesmo. Descargas atmosféricas podem ocorrer até uma altitude de cerca de 20 km.

A soma do tempo utilizado em cada operação realizada com o VLS completamente integrado é considerado o tempo de exposição.

### **5.6 Avaliação da Probabilidade de uma Descarga Direta (Situação de Risco Mínimo)**

A probabilidade de ocorrência de descargas diretas sobre um foguete no solo é muito difícil de determinar. As vizinhanças do terreno e a orientação física do veículo durante a tempestade são considerações chaves. Para que seja possível estimar uma probabilidade, uma hipótese será feita de que o foguete sempre será atingido por uma descarga quando a oportunidade existir. Para simplificar os cálculos, será considerado que a probabilidade é igual à probabilidade de uma descarga nuvem-solo sobre qualquer área superficial de tamanho aproximadamente igual à área de exposição equivalente, dada pela área da base do cone cuja altura é a do foguete sobre a mesa de lançamento, conforme mostrado na Figura 5.1. Pode ser encontrado em Uman (1972) uma revisão de vários estudos de descargas para o solo por unidade de área. Porém, um local específico para lançamento requer valores mais precisos se desejamos uma probabilidade estimada mais confiável. Gabrielson (1983) mostra que a probabilidade de incidência de descarga

próxima ( $P_n$ ) afetando o foguete, baseado somente nos dias de tempestade, pode ser estimada usando a seguinte Equação:

$$P_n = (\text{densidade de descargas} \times \text{área de exposição equivalente} \times \text{tempo de exposição}) \quad (5.4)$$

Usando como exemplo as dimensões do Veículo Lançador de Satélite (VLS) já montado na mesa de lançamento, mostrado na Figura 5.1, serão analisadas as situações em que o risco do veículo lançador ser atingido por uma descarga direta é mínimo e a situação em que esse risco é significativo.

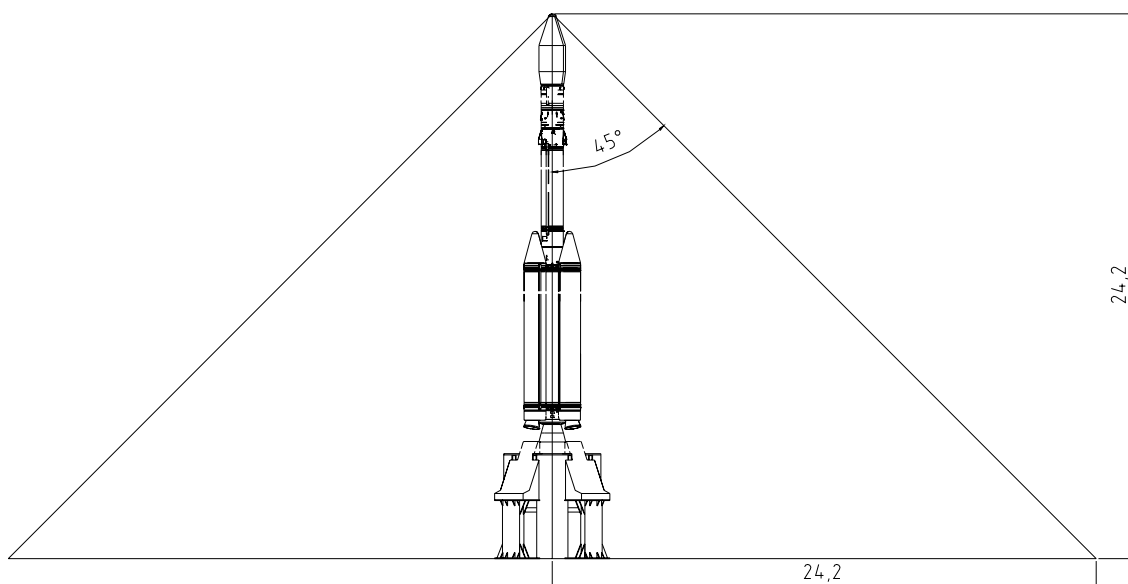


FIGURA 5.1 - VLS montado na mesa de lançamento.

Segundo informação da gerência do VLS, numa campanha de lançamento são executadas as operações mostradas na Tabela 5.3, bem como a duração prevista para cada uma.

Durante todo o período de uma missão, as situações nas quais o veículo lançador está mais exposto a problemas com descargas elétricas são as ocorridas após a integração completa, com todos os estágios e coifa montados.

Será computado como tempo de exposição a soma do tempo utilizado em cada operação realizada com o VLS completamente integrado, conforme pode ser observado na Tabela 5.3. O tempo total de exposição é, portanto:

$$T = 16 \text{ h} \rightarrow T = (16 / 8760) \text{ ano}$$

TABELA 5.3 – Operações Realizadas com o VLS Completamente Montado.

<b>OPERAÇÃO</b>	<b>TEMPO</b>
Descrição	Horas
Recuo de 12 m da TMI para verificação do alinhamento e verticalidade dos estágios.	
Recuo da TMI	0,5
Serviços	1
Retorno da TMI	0,5
Recuo de 12 m da TMI para ensaio dos sistemas elétricos.	
Recuo da TMI	
Serviços	0,5
Retorno da TMI	3
	0,5
Recuo de 12 m da TMI para alinhamento da plataforma inercial.	
Recuo da TMI	
Serviços	0,5
Retorno da TMI	1
	0,5
Recuo de 53 m da TMI para simulação de lançamento.	
Recuo da TMI	2
Serviços	1
Retorno da TMI	2
Recuo de 53 m da TMI para lançamento.	
Recuo da TMI	2
Preparação para lançamento	1

FONTE: Gerência do VLS.

A situação analisada é a que oferece risco mínimo pois estão sendo levados em consideração os seguintes fatores:

- a) O VLS permanece o tempo todo na mesa de lançamento.
- b) A descarga atinge diretamente o VLS.

Assumindo a densidade de descargas para a região anteriormente calculada:

$$d = 2,0 \text{ descarga/km}^2\text{ano}$$

Área equivalente da base do cone:

$$A = \pi r^2 = \pi (0,0242)^2 \rightarrow A = 0,00184 \text{ km}^2$$

Tempo de exposição:

$$T = 16 \text{ h} \rightarrow T = (16 / 8760) \text{ ano}$$

Logo:

$$P_n = 2,0 \times 0,00184 \times (16/8760) \rightarrow P_n = 0,0000067$$

Ou seja, aproximadamente 1 em cada 150.000 lançamentos será atingido por um relâmpago numa região cuja densidade de descargas é de 2,0 descargas/km<sup>2</sup>ano.

### **5.7 Descarga Induzida por Foguete (Situação de Risco Máximo)**

Poderia parecer, do valor de  $P_n$  estimado anteriormente, que a probabilidade de uma descarga nuvem-solo afetar um foguete não é grande. No entanto, o foguete não permanece no solo e relâmpagos, mesmo não atingindo diretamente o veículo espacial,

podem afetar a operação dos seus sistemas, haja vista os acidentes mencionados no Capítulo 1 ocorridos com a Apollo 12, em 1969, e com o foguete *Atlas/Centaur*, em 1987. O sistema instalado classifica como ocorridos logo acima do sensor – “*overhead*” – os relâmpagos cujo ponto de impacto esteja dentro do círculo de raio 8 km. Portanto, considera-se que todos esses relâmpagos ocorreram muito próximo do foguete e, conseqüentemente, afetarão os sistemas do mesmo.

Pode-se analisar o processo da descarga induzida pelo foguete examinando os efeitos de uma massa metálica relativamente grande, possivelmente carregada, passando quase verticalmente através de uma região de gotículas de água super-congeladas e cristais de gelo carregados, deixando no seu rastro uma exaustão turbulenta de gases quentes ionizados, e contaminantes, condutivos parcialmente carregados.

Para que um foguete, ou partes pontiagudas de um avião, dispare um relâmpago, fluxos (“*streamers*”) devem ser gerados a partir da sua extremidade em direção à atmosfera nas vizinhanças, ou em direção a uma concentração de carga próxima. Portanto, o próprio foguete age como um eletrodo que aumenta o potencial à medida que aumenta sua velocidade e altitude (ver no sub-item 2.5).

Quando a densidade de carga alcança um nível crítico, a ionização do ar adjacente na direção do campo aplicado permite o volume de carga crescer naquela direção. Pode-se prever que o foguete irá, eventualmente, carregar a um potencial suficiente para criar um fluxo necessário para a quebra da rigidez de modo a ocorrer o disparo.

Uma vez que o disparo pode ocorrer na presença de nuvens que não são de tempestade (Pinto Jr. e Pinto, 2000), pode-se supor que descargas de alguma magnitude quase sempre ocorrerão em nuvens ou em condições nubladas ou quando o foguete é lançado distante poucos quilômetros de tais condições.

Portanto, a situação que oferece risco máximo leva em consideração os seguintes fatores:

- a) O foguete não permanece o tempo todo no solo e, durante sua ascensão, o risco de ser atingido por um relâmpago induzido aumenta.
- b) O foguete não precisa ser atingido diretamente. Uma descarga próxima pode causar falha em diversos de seus sistemas, conforme descrito no Capítulo 1.
- c) Todas as nuvens convectivas podem estar eletrificadas o suficiente para que uma descarga seja induzida, não apenas as *cumulonimbus*.

O Atlas Climatológico de Alcântara informa que, em média, durante todo o ano, a cobertura de nuvens no Centro de Lançamento de Alcântara é superior a 4,0 oitavos, sendo o valor médio mínimo 2,5 oitavos para o mês de agosto e o valor médio máximo 5,9 oitavos para o mês de março. Porém, não são todos os tipos de nuvens que se encontram eletrificadas e, ainda, existe uma sazonalidade na porcentagem de cobertura de nuvens, a Tabela 4.1 mostra que, em média, durante o ano, do total da cobertura de nuvens, aproximadamente 37% são nuvens convectivas e estas sim estão eletrificadas.

Logo, a probabilidade de indução de um relâmpago com o lançamento de um foguete no CLA não é desprezível, pois sempre estão presentes nuvens eletrificadas e, portanto, não pode ser negligenciada.

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 6.1 Relação entre Relâmpagos Intra-nuvem e Nuvem-Solo

É bastante aceita a hipótese de que o percentual de relâmpagos Intra-Nuvem (IN) varia com a latitude. Embora Boccippio et al. (2001), analisando um conjunto de dados abrangendo quatro anos (1995 a 1999), tenha encontrado evidências de “uma fraca dependência latitudinal” da relação IN/NS entre as latitudes 25° e 50° N sobre o território dos Estados Unidos, vários outros autores, em estudos anteriores, defendem que o número de relâmpagos IN sofre influência latitudinal significativa.

A relação entre descargas IN e NS é dada, segundo Prentice e Mackerras (1977), citado por Uman (1987), pela equação sugerida por:

$$N_c/N_g = 4,16 + 2,16 \cos 3\lambda \quad (6.1)$$

Na Equação 6.1,  $N_c$  é a densidade de relâmpagos intra-nuvem,  $N_g$  é a densidade de relâmpagos nuvem-solo e  $\lambda$  é a latitude (para Alcântara 2° 22' S).

Substituindo na Equação 6.1 a latitude em que se encontra o Centro de Lançamento de Alcântara, o valor da relação  $N_c/N_g$  é 6,3. Pinto Jr. e Pinto (2000) informam que, para baixas latitudes, por exemplo Alcântara, os relâmpagos intra-nuvem podem representar cerca de 90% do total de relâmpagos. Atribui-se essa constatação ao fato de que, em baixas latitudes, os centros de carga das nuvens se encontram em regiões mais altas. Isso ocorre porque a tropopausa, nas baixas latitudes, atinge seu ponto mais alto (entre 15 e 18 km). Com isso, as isotermas encontram-se a maiores altitudes e, como os centros de carga estão associados àquelas, esses se formam em regiões mais altas da troposfera.

Do exposto acima, de modo geral, a menos da questão da dependência latitudinal ser mais ou menos intensa, há consenso sobre o fato de que a porcentagem de relâmpagos intra-nuvem em relação aos relâmpagos nuvem-solo varia com a latitude.

A TSS 928 utiliza um sensor óptico em conjunto com as antenas de campo magnético e campo elétrico descritas no capítulo 3 para diferenciar entre relâmpagos IN e NS. A partir dos dados obtidos pelo sensor, a relação entre relâmpagos IN e NS encontrada para a região de Alcântara no período chuvoso de 2004, mostrada na Tabela 6.1, é de 3,2 (para maio a relação é de 3,8).

TABELA 6.1 - Relâmpagos IN e NS para a Região de Alcântara no Período Chuvoso de 2004.

Mês/2004	Relâmpagos IN	Relâmpagos NS	IN/NS
Fevereiro	97	29	3,2
Março	568	300	1,9
Abril	2627	737	3,6
Maio	1180	315	3,8
Total	4472	1381	3,2

Pode ser encontrado em Solórzano (2003), que existe a possibilidade do lançamento de um foguete ocasionar a iniciação de relâmpagos intra-nuvem. Como o que se busca, no caso do CLA, é exatamente a situação inversa, ou seja, evitar a indução de relâmpagos durante o lançamento, isso faz com que a presença de relâmpagos intra-nuvem seja um fator importante na definição dos critérios a serem adotados.



## 6.2 Propriedades Fenomenológicas dos Relâmpagos em Relação aos Parâmetros Meteorológicos

### 6.2.1 Direção com Maior Número de Ocorrência de Relâmpagos

Como o sensor TSS 928 encontra-se instalado a, aproximadamente, 100 m do litoral e possui capacidade, como foi descrito no capítulo 4, de detectar relâmpagos num raio de, aproximadamente, 50 km agrupando-os em octantes de acordo com a direção de ocorrência dos mesmos, pode-se identificar a direção com maior número de ocorrência de relâmpagos.

A Figura 6.1 mostra a região do Centro de Lançamento de Alcântara e São Luis, com a área coberta pela TSS 928 e a orientação geográfica dos octantes.

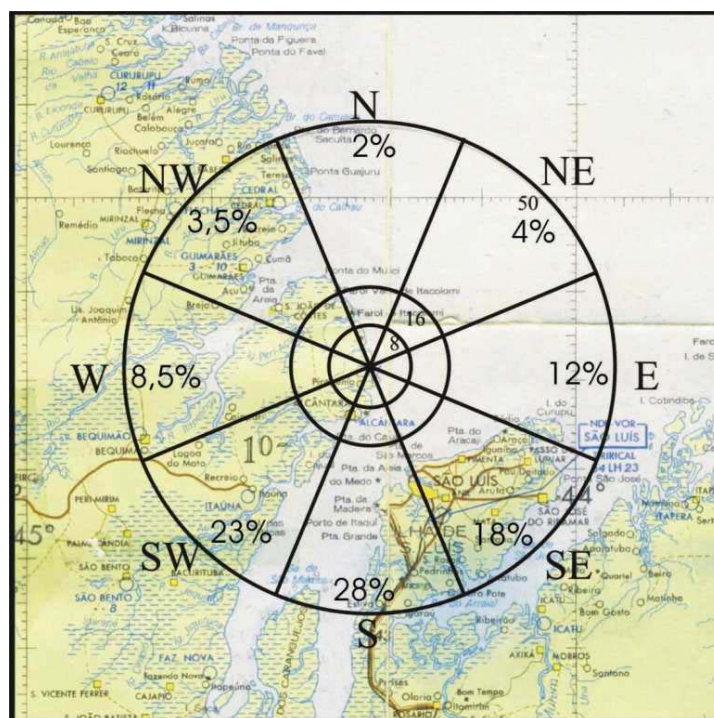


FIGURA 6.1 - Área coberta pela TSS 928 a partir do CLA.

Como pode ser observado na Figura 6.1 acima, os quadrantes N, NE e E estão sobre o Oceano Atlântico enquanto que os quadrantes SE, S, SW, W e NW encontram-se sobre o continente e baía de São Marcos. Desse modo pode-se identificar, para a área coberta pela antena, a direção com maior número de ocorrência de relâmpagos.

A Tabela 6.2 mostra o número de relâmpagos ocorridos logo acima do equipamento (overhead – OVHD) e em cada octante, mês a mês, para o período chuvoso de 2004. Mostra, também, o número total de relâmpagos para o período chuvoso de 2004.

TABELA 6.2 – Número de Relâmpagos em cada Octante.

Mês/2004	OVHD	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
Fevereiro	2	0	0	1	3	21	2	0	0	29
Março	33	2	3	10	28	139	60	25	0	300
Abril	185	11	15	106	126	100	140	40	14	737
Maió	98	12	23	12	34	42	44	26	24	315
Total	318	25	41	129	191	302	246	91	38	1381

A Tabela 6.2 mostra que 51% do número de relâmpagos ocorrem sobre os octantes S e SW, 70% ocorrem nos octantes SE, S e SW. Por outro lado, apenas 2% do número de relâmpagos ocorrem sobre o octante N e 4% sobre o octante NE, direções preferenciais para lançamento do ponto de vista da atividade de relâmpagos.

### 6.2.2 Relação entre a Atividade de Tempestades e os Fenômenos *El Niño*, *La Niña* e Padrão de Dipolo do Atlântico

O fenômeno climático *El Niño* é caracterizado pelo deslocamento de águas quentes do Pacífico Oeste para a área central, com o conseqüente aumento da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nesta região acima da média histórica. Já o fenômeno *La Niña* caracteriza um período no qual o efeito é oposto, com a intensificação do deslocamento

das águas quentes para a região do Pacífico Oriental, provocando um resfriamento das águas do Pacífico Leste.

Os fenômenos alteram de maneira oposta o fluxo de vapor d'água da superfície para a atmosfera, provocando, desse modo, mudanças na temperatura e circulação dos ventos em escala global. Essas mudanças provocam alterações nas condições meteorológicas de várias regiões de mundo afetando, por exemplo, a ocorrência de relâmpagos.

Por outro lado, o padrão de dipolo do Atlântico, ocorrendo simultaneamente com o *El Nino* ou *La Nina*, pode afetar as condições meteorológicas da região de Alcântara fazendo ocorrer um aumento ou diminuição na precipitação pluviométrica dependendo da combinação de ocorrência desses eventos. Souza *et al.* (2000) relata que o *El Nino* e o dipolo quente no Atlântico, para o verão, têm um forte efeito combinado na redução da precipitação sobre o centro-norte e oeste e um aumento na precipitação no leste da Amazônia Legal (região de Alcântara), sendo que a combinação dos dois eventos tem efeito mais intenso que cada fenômeno agindo individualmente.

As Tabelas do Anexo A mostram os períodos de ocorrência de *La Niña* e *El Niño* e a intensidade do fenômeno. Já a Tabela 6.3, abaixo, mostra os anos de ocorrência do padrão de dipolo do Atlântico indicando, ainda, se o dipolo foi quente ou frio.

TABELA 6.3 – Anos de Ocorrência do Padrão de Dipolo do Atlântico.

Fenômeno:	EL NIÑO	LA NIÑA	DIPOLO QUENTE	DIPOLO FRIO
Anos de ocorrência:	63, 65, 68, 69, 72, 76, 79, 82, 86, 87, 91, 94, 97	61, 64, 67, 70, 71, 73, 75, 84, 85, 88, 95	66, 70, 78, 79, 80, 81, 92, 97	64, 65, 71, 72, 73, 74, 77, 85, 86, 89, 94

FONTE: Souza *et al.* (2000).

Como os dados coletados pela estação meteorológica do aeroporto de São Luís – MA, são constituídos por uma série temporal de 41 (quarenta e um) anos, temos cobertos vários períodos em que ocorreram os fenômenos *El Niño*, *La Niña* e padrão de dipolo do Atlântico. Pode-se, portanto, comparar o número total de dias de trovoada em cada ano (indicador da atividade de tempestades) com cada tipo de fenômeno, conforme mostrado na Figura 6.3 a seguir.

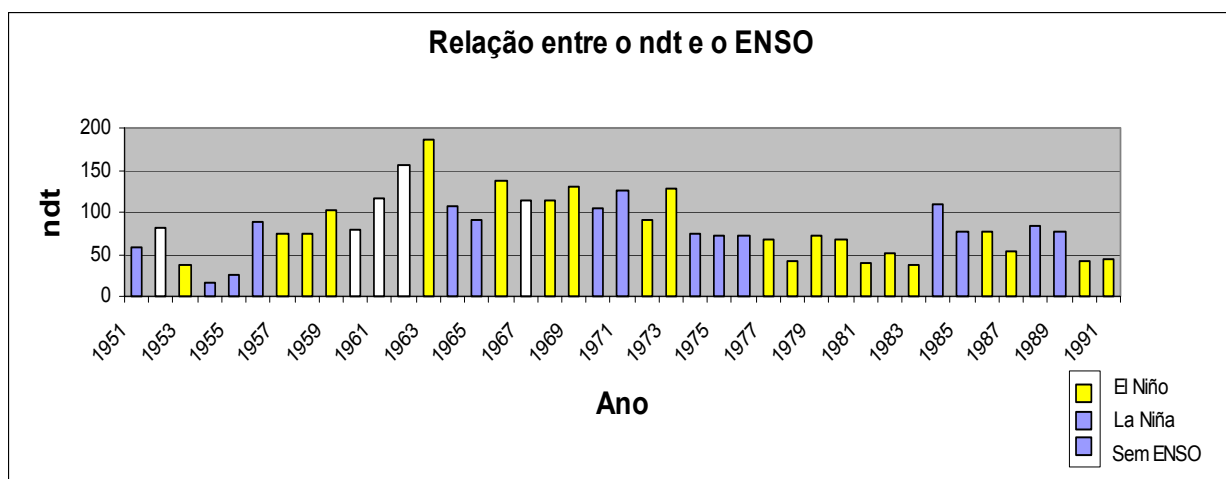


FIGURA 6.3. - Relação entre os fenômenos *El Niño* e *La Niña* e o número de dias de trovoada para a estação meteorológica de São Luís.

Pode-se, também, comparar a atividade de tempestades, representada pela média do número de dias de trovoada nos anos em que ocorreu cada fenômeno ou quando ocorreu a associação deles, e a ocorrência simultânea ou não dos diversos fenômenos, conforme mostrado na Tabela 6.4 a seguir.

TABELA 6.4 – Relação entre a Ocorrência dos Fenômenos e a Atividade Elétrica Atmosférica.

Ocorrência dos Fenômenos	ndt médio	Desvio padrão	nº de anos
Anos sem ocorrência de Fenômenos	78	68	3
Anos em ocorreu somente El Nino	93	53	7
Anos em que ocorreu somente La Nina	99	20	5
Anos em ocorreu somente Dipolo Quente	72	46	4
Anos em que ocorreu somente Dipolo Frio	73	5	3
Anos de ocorrência simultânea de El Nino + Dipolo Quente	71	-x-	1
Anos de ocorrência simultânea de El Nino + Dipolo Frio	86	8	3
Anos de ocorrência simultânea de La Nina + Dipolo Quente	105	-x-	1
Anos de ocorrência simultânea de La Nina + Dipolo Frio	110	24	4

Como o nível de atividade de tempestade, indicado pelo numero de dias de trovoadas médio, para os anos de ocorrência de Dipolo Quente e Dipolo Frio ficou próximo do nível de atividade de tempestade para os anos sem ocorrência de fenômenos, eles serão agrupados sob a mesma denominação.

Da mesma forma, como existe apenas uma ocorrência simultânea do Dipolo Quente com *El Nino* e de Dipolo Quente com *La Nina* no período considerado, serão agrupadas as ocorrências simultâneas de *El Nino* com Dipolo Quente e Frio sob a denominação *El Nino + Dipolo* e as ocorrências simultâneas de *La Nina* com Dipolo Quente e Frio sob a denominação *La Nina + Dipolo*.

Considerando esses novos agrupamentos, foram recalculadas as médias e desvio padrão conforme mostrado na Tabela 6.5 mostrada a seguir.

TABELA 6.5 – Relação entre a Ocorrência Agrupada dos Fenômenos e a Atividade Elétrica Atmosférica.

Ocorrência dos Fenômenos	ndt médio	Desvio padrão	nº de anos
Anos sem ocorrência de Fenômenos	74	41	10
Anos em ocorreu somente El Nino	93	53	7
Anos em que ocorreu somente La Nina	99	20	5
Anos de ocorrência simultânea de El Nino + Dipolo	82	10	4
Anos de ocorrência simultânea de La Nina + Dipolo	109	21	5

A Figura 6.4, a seguir, mostra os valores médios do número de dias de trovoadas para cada evento e as respectivas barras de incerteza, expressas em função do desvio padrão.

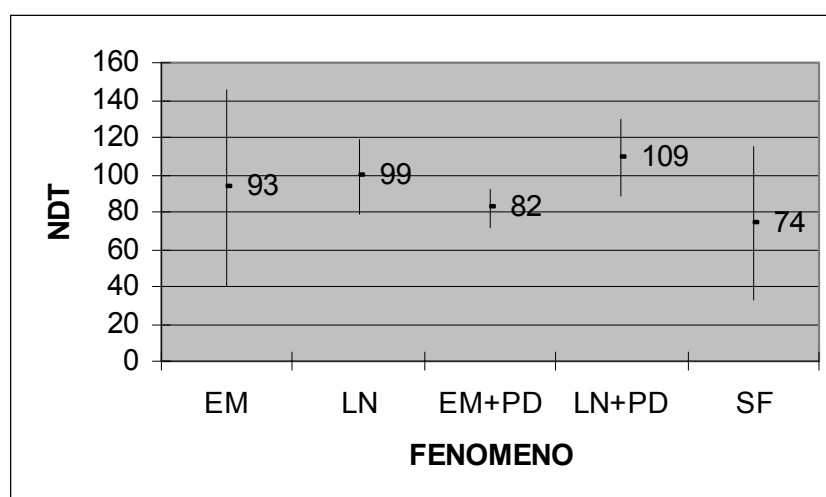


FIGURA 6.4. - Valores médios do número de dias de trovoadas para cada evento e as respectivas barras de incerteza, expressas em função do desvio padrão.

Da Figura 6.4 verifica-se a ocorrência de superposição das barras de incerteza de cada fenômeno indicando que não há independência entre a ocorrência de cada um.

Em vista do exposto serão agrupados os anos de ocorrência de El Nino numa única denominação bem como os anos de ocorrência de La Nina para comparação com os anos sem ocorrência de fenômenos, conforme mostrado na Tabela 6.6 a seguir.

TABELA 6.6 – Relação entre a Ocorrência de *El Niño* e *La Niña* e a Atividade Elétrica Atmosférica.

Ocorrência dos Fenômenos	ndt médio	Desvio padrão	nº de anos
Anos sem ocorrência de Fenômenos	74	41	10
Anos em ocorreu somente El Niño	89	42	11
Anos em que ocorreu somente La Niña	104	20	10

A Figura 6.5, a seguir, mostra os valores médios do número de dias de trovoada para cada evento e as respectivas barras de incerteza, expressas em função do desvio padrão.

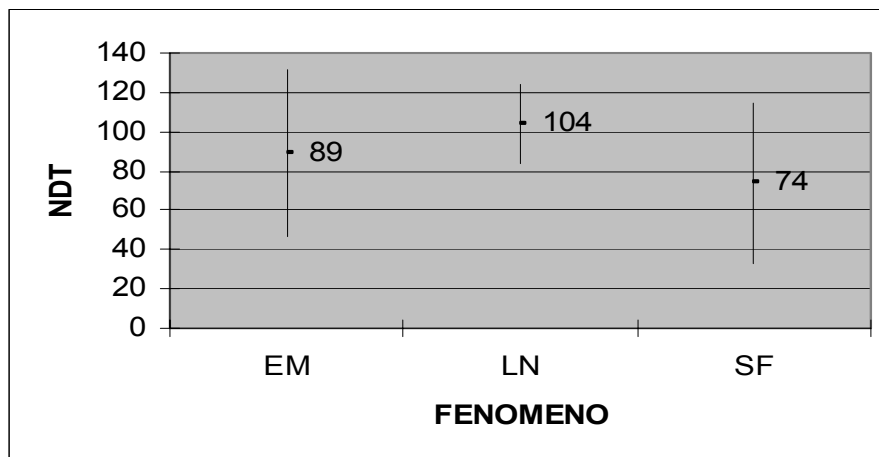


FIGURA 6.5. - Valores médios do número de dias de trovoada para cada evento e as respectivas barras de incerteza, expressas em função do desvio padrão.

Da Figura 6.5 verifica-se a superposição das barras de incerteza de cada fenômeno indicando que não há independência entre a ocorrência de cada um.

Portanto, não há como estabelecer uma relação entre os fenômenos *El Niño*, *La Niña* e Padrão de Dipolo do Atlântico e a atividade de tempestade na região de Alcântara a partir dos dados sobre o número de dias de trovoada para o período considerado, apesar de Souza *et al.* (2000), mostrar que o Padrão de Dipolo do Atlântico tem influência na

ocorrência de processos convectivos na região de Alcântara e, conseqüentemente, na ocorrência de relâmpagos. Souza *et al.* (2000) relata, ainda, que durante a ocorrência do Padrão de Dipolo Frio, a ZCIT tende a uma posição predominantemente ao sul da sua posição climatológica o que provoca um aumento na precipitação e, conseqüentemente, na atividade de tempestades na região de Alcântara.

Conforme informa a página na Internet do CPTEC/INPE, acessada em agosto de 2004, a temperatura da superfície do mar na região do Pacífico Equatorial oscilou ligeiramente acima e abaixo da média histórica (0,5 °C ou pouco mais) durante o ano de 2003 e o primeiro semestre de 2004. Essa situação não caracteriza um período típico de *El Niño* ou de *La Niña*.

Também, para o período entre o segundo semestre de 2003 e o primeiro semestre de 2004, não há indícios que caracterizem a ocorrência de Padrão de Dipolo do Atlântico. Portanto, a atividade de tempestades no período chuvoso de 2004 não está associada à ocorrência desses fenômenos.

### **6.3 Campo Elétrico**

Serão apresentados, a seguir, os resultados e discussões referentes aos dados obtidos a partir do equipamento de medição do campo elétrico atmosférico, Electric Field Mill (EFM), instalado próximo à plataforma de lançamento no Centro de Lançamento de Alcântara.

#### **6.3.1 Campo Elétrico de Tempo Bom**

Como mencionado no subitem 3.2.3.2 do Capítulo 3, o valor da intensidade do campo elétrico atmosférico, em kV/m, é mostrado a cada minuto na tela do aplicativo. Foram esses os dados utilizados na elaboração das planilhas e gráficos nos quais estão baseadas as discussões e comentários apresentados a seguir.



A Figura 6.6 mostra a variação média diária do campo elétrico de tempo bom em torno do seu valor médio. O gráfico mostrado a seguir foi obtido a partir da média das leituras, registradas pelo EFM segundo a segundo, de um conjunto de dez dias cujo campo elétrico foi considerado como sendo de tempo bom. O critério para classificar um determinado dia como sendo um dia com campo elétrico de tempo bom foi o de que, em nenhum instante, o campo elétrico apresentou mudança de polaridade.

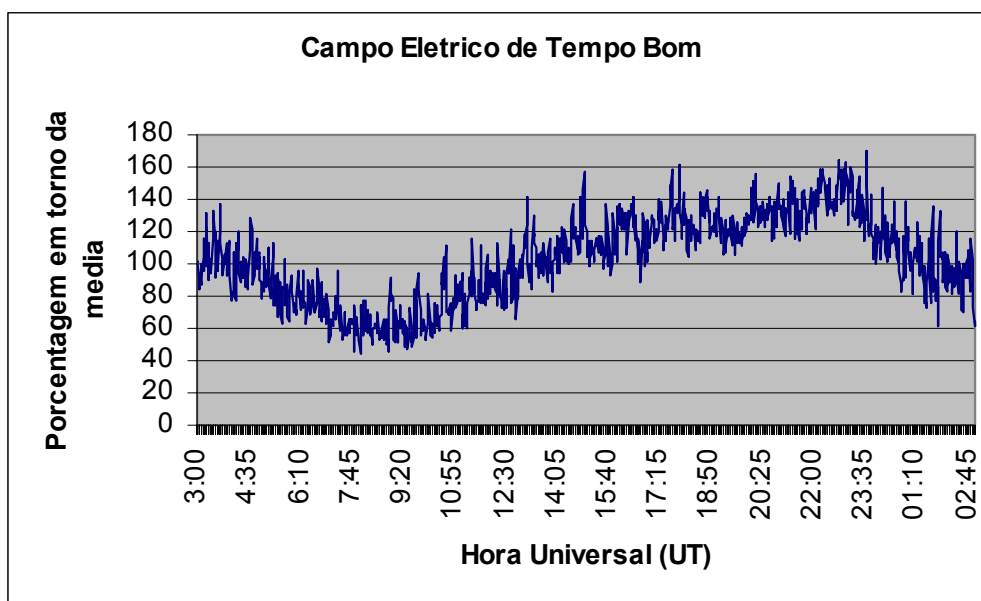


FIGURA 6.6. - Variação média diária do campo elétrico de tempo bom em relação ao seu valor médio.

O campo elétrico atmosférico de tempo bom apresentou variação diária típica em função da hora universal (UT – Universal Time) similar à curva de Carnegie, apresentada na Figura 6.7, com valor médio de 177 V/m, valor máximo de 292 V/m ocorrendo por volta das 20:39h LT (23:39 UT) e valor mínimo de 76 V/m ocorrendo por volta das 5:01 h LT (8:01 UT).

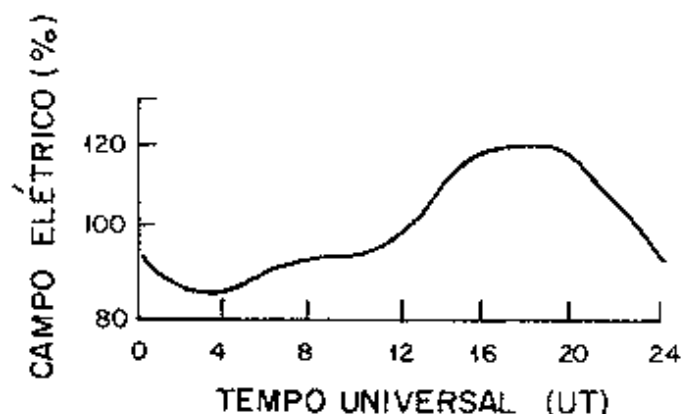


FIGURA 6.7. - Curva de Carnegie.

FONTE: Pinto Jr. e Pinto (2000, p. 32).

### 6.3.2 Definição do Nível Crítico para o Campo Elétrico

Como o valor da intensidade do campo elétrico medido pelo sensor EFM é função da distância em que o aparelho encontra-se em relação ao local de ocorrência do relâmpago, não foi possível estabelecer uma relação entre a variação da intensidade do campo elétrico e a ocorrência da descarga atmosférica que lhe deu origem, pois não é possível, com os equipamentos instalados em Alcântara, definir com precisão a distância entre o ponto de ocorrência do relâmpago e o sítio de instalação do EFM.

Para que um estudo dessa natureza fosse realizado seria necessário ter à disposição uma rede de EFM instalados em locais convenientemente escolhidos, de modo que dois ou mais equipamentos registrassem a variação do campo relativa a um determinado evento e que pelo menos um registrasse o evento na região de 0 a 8 km (logo acima – overhead). Por exemplo, a NASA possui instalada uma rede com cerca de 30 EFM na área ao redor da plataforma de lançamento do Cabo *Canaveral*.

O valor do campo elétrico observado ao nível do solo que assegura uma alta probabilidade de sucesso no disparo de relâmpagos provocados por foguetes varia com a topografia da região onde o lançamento é realizado. Segundo Uman (1987) parece ser

necessário um menor valor de campo ao nível do mar que em regiões montanhosas. Porém é necessário que o foguete alcance maiores altitudes quando lançado ao nível do mar que em regiões montanhosas para que o relâmpago seja disparado.

É apresentada, a seguir, a Tabela 6.7 com os valores médios dos campos elétricos ao nível do solo que garantem uma alta probabilidade de disparo de relâmpago devido ao lançamento de um foguete do tipo utilizado em experimentos de iniciação de relâmpagos em vários locais do mundo. Os foguetes são leves, feitos de material plástico e têm 0,83 m de comprimento. A Figura 6.8 contém a foto de um foguete utilizado nos experimentos de indução.



FIGURA 6.8. - Foguete utilizado nos experimentos de indução.

FONTE: INPE/CEA/DGE - ELAT.

TABELA 6.7 – Campo Elétrico Necessário para Induzir um Relâmpago com o Lançamento de um Foguete.

Local	Latitude	Campo Elétrico ao nível do solo		
		Mínimo	Médio	Máximo
	Graus	kV/m	kV/m	kV/m
Hokuriku/Japão	43N	4	7,4	11,5
St. Privat d'Allier/França	44N	6	10	15
Socorro/New Mexico/EUA	34N	5	8,8	13
Melbourne/Florida/EUA	28N	2,6	6,3	8,1
Cacchoeira Paulista/SP/Brasil	22S	7,5	8,6	11

FONTE: Uman, M. A. (1987) e Solórzano, N. N. (2003).

Pode-se observar que o menor valor de campo elétrico atmosférico para o qual foi possível a indução de um relâmpago foi 2,6 kV/m na Flórida. Tendo em vista que o objetivo é estabelecer um nível crítico de intensidade do campo elétrico medido no solo de modo que valores inferiores a esse apresentem probabilidade baixa ou ínfima de provocar o disparo de um relâmpago devido ao lançamento de um foguete, é razoável partir do valor de 2,0 kV/m adotado como nível crítico pelo fabricante do equipamento instalado no CLA (valor “*default*” do equipamento). Por outro lado, o valor de 1,5 kV/m é adotado como nível crítico pela NASA, acima do qual existe uma probabilidade inaceitável de que um relâmpago atinja o foguete. Os critérios de tempo (clima) adotados pela NASA para lançamento de aeronaves espaciais podem ser encontrados no endereço eletrônico [http://chandra.harvard.edu/launch/status/weather\\_criteria.html](http://chandra.harvard.edu/launch/status/weather_criteria.html).

Porém, como é desconhecida a existência de estudos extensos realizados na região do equador, deve-se ser conservativo na definição de um nível crítico para essa região, pois, conforme visto anteriormente, os centros de carga formam-se em altitudes maiores nas baixas latitudes. Portanto, para uma mesma carga na nuvem o campo medido ao nível do solo no equador é menor que o medido em latitudes maiores. Logo, para a

mesma intensidade de campo medido, o risco do lançamento de um foguete provocar o disparo de um relâmpago no equador é maior que em latitudes mais altas.

O campo elétrico é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a carga que o gerou e o ponto onde está sendo medido (Uman, 1987).

$$E \propto 1/d^2 \quad (6.4)$$

Pode-se encontrar uma relação entre o campo medido no *Kennedy Space Center* (KSC) e em Alcântara fazendo-se uso da altura da isoterma de  $-10^\circ\text{C}$  nesses dois locais. Pode ser obtido do Uman (1987) que para a *Flórida* (latitude aproximada de  $25^\circ\text{ N}$ ) a isoterma de  $-10^\circ\text{C}$  encontra-se a, aproximadamente,  $d_{\text{Flor}} = 6,0\text{ km}$  enquanto que radiossondagem realizada no Centro de Lançamento de Alcântara (latitude aproximada de  $2^\circ\text{ S}$ ) indica a isoterma de  $-10^\circ\text{C}$  a, aproximadamente,  $d_{\text{Alcant}} = 6,6\text{ km}$ . Assim, temos:

$$E_{\text{Alcant}} = E_{\text{Flor}} (d_{\text{Flor}} / d_{\text{Alcant}})^2 \quad (6.5)$$

$$E_{\text{Alcant}} = 1,5 (6,0 / 6,6)^2$$

$$\mathbf{E_{\text{Alcant}} = 1,2\text{ kV/m}}$$

Ou seja, admitindo que toda a infra-estrutura de equipamentos para medição e acompanhamento do campo elétrico atmosférico fosse a mesma, o nível crítico do campo elétrico de origem atmosférica para o Centro de Lançamento de Alcântara seria  $1,2\text{ kV/m}$ , e não  $1,5\text{ kV/m}$  como no *Kennedy Space Center*.

Porém, a infra-estrutura não é a mesma. Como existe apenas um EFM instalado no CLA não faz sentido referir-se a “média de um minuto da rede de EFM” como mencionado no critério adotado pela NASA. A leitura de apenas um EFM implica numa maior dificuldade na sua interpretação pois, por exemplo, um determinado valor de campo elétrico lido pode ter origem num grande centro de carga que se encontra, ainda,

distante ou num pequeno ou médio centro de carga que se encontra bastante próximo. Como o critério deve restringir-se às informações fornecidas pelo equipamento instalado próximo ao local de lançamento, ele deve ser mais restritivo. Como exemplo, no *Centre Spatial Guyanais* instalado em *Kourou* (5,23° N / 52,77° W) na Guiana Francesa, existem instalados quatro EFM's e o valor do campo elétrico de origem atmosférica adotado como nível crítico é 1,0 kV/m. (Donet, 2004).

Os critérios propostos levam em conta que o nível crítico deve estar acima do máximo obtido para o campo elétrico médio diário de tempo bom de 292 V/m, de modo a se evitar falsas e constantes situações de alarme. Por outro lado, o nível crítico deve estar abaixo do valor de 1,2 kV/m que seria o aceitável se a infra-estrutura fosse adequada.

Considerando que o valor máximo obtido para o campo elétrico médio diário de tempo bom de 292 V/m foi obtido em apenas um período chuvoso, o que representa uma série temporal curta, e seguindo o raciocínio de evitar-se um valor de nível crítico que provoque constantes reportagens de falso alarme, sugere-se tomar a média entre esse valor e 1,0 kV/m, nível crítico adotado em *Kourou* ou seja:

- intervalo entre *Kourou* e o valor máximo em Alcântara:  $1000 - 292 = 708$  V/m;

- valor médio do intervalo:  $708/2 = 354$  V/m;

- nível crítico sugerido:  $292 + 354 = 646$  V/m ou, ainda, 0,65 kV/m.

É importante salientar que, a cada ano, tendo a série temporal de valores medidos do campo elétrico atmosférico na região de Alcântara se tornado mais longa, o nível crítico deverá ser reavaliado. O mesmo deverá ser feito caso sejam instalados um maior número de medidores de campo elétrico.

## **6.4 Proposição de Critérios para o CLA Baseados na Atividade Elétrica de Origem Atmosférica da Região de Alcântara**

No CLA, durante uma campanha de lançamento do Veículo Lançador de Satélites (VLS), desenvolvido no CTA/IAE, são efetuadas várias operações que devem ser executadas sob condições climáticas seguras. Dentre essas condições climáticas se encontra a atividade elétrica atmosférica.

Será apresentado, nos itens a seguir, um resumo contendo as principais operações desenvolvidas durante as várias fases de uma campanha de lançamento para as quais serão propostos critérios relativos à da atividade elétrica de origem atmosférica.

### **6.4.1 Operações Envolvidas numa Campanha de Lançamento do VLS**

- **Transporte dos Motores do Foguete do Aeródromo de Alcântara ao Prédio de Preparação de Propulsores (PPP).**

Como a maioria dos foguetes norte-americanos utilizam propelente líquido, a NASA adota critérios específicos durante a operação de abastecimento do foguete.

Atualmente, os motores dos foguetes de sondagem e veículos lançadores de satélite brasileiros utilizam propelente sólido. Portanto, não há abastecimento do foguete na plataforma de lançamento.

Os motores, bem como o propelente que eles utilizam, são fabricados em São José dos Campos – SP e transportados por via aérea até o Centro de Lançamento de Alcântara. A operação de transporte dos motores, um a um, do aeroporto em Alcântara até o PPP é uma operação delicada para a qual é necessária a definição de critérios relativos às atividades elétricas atmosféricas de modo que ela seja executada da maneira mais segura possível.

- **Transporte dos Componentes Pirotécnicos do Aeródromo de Alcântara ao Prédio de Preparação de Propulsores (PPP).**

Outra operação que deve ser realizada somente quando critérios relativos à atividade elétrica atmosférica forem satisfeitos, de modo a garantir sua execução segura, é o transporte dos componentes pirotécnicos utilizados no foguete.

- **Atividades de Montagem no PPP.**

Por solicitação da Gerência do VLS, qualquer variação nas condições do ambiente eletromagnético deve ser informada durante as atividades de montagem dos diversos módulos do foguete (saias, coifa, baia de equipamentos, etc.) no PPP.

- **Transporte dos Motores do PPP à Torre Móvel de Integração (TMI).**

A operação de transporte dos motores, um a um, do PPP até a TMI também é uma operação delicada para a qual é necessária a definição de critérios relativos às atividades elétricas atmosféricas de modo que ela seja executada da maneira mais segura possível. Como a temperatura também é um fator crítico, geralmente o transporte é realizado nas primeiras horas da manhã ou ao entardecer. Levando-se em conta que ocorrem relâmpagos com maior frequência no horário vespertino (Atlas Climatológico de Alcântara, 2002), reforça-se a necessidade de realizar-se a movimentação nas primeiras horas da manhã.



- **Transporte dos Módulos (Saias, Coifa, Baia de Equipamentos, etc.) do PPP à Torre de Móvel de Integração (TMI).**

Do mesmo modo que a operação de transporte dos motores, a movimentação dos diversos módulos do PPP até a TMI também é uma operação delicada para a qual é necessária a definição de critérios relativos às atividades elétricas atmosféricas de modo que ela seja executada da maneira mais segura possível. A essa operação também se aplicam as observações feitas quanto ao horário mais conveniente para realizá-la, sendo mais conveniente realizar-se a movimentação nas primeiras horas da manhã.

- **Carregamento da Baia de Controle no Prédio de Operações Perigosas (POP).**

A baia de controle, utilizada para realizar eventuais correções de trajetória do foguete durante o voo, é carregada com dimetil hidrazina assimétrica e tetróxido de nitrogênio. Essas substâncias são altamente instáveis e sua manipulação muito perigosa. Portanto, a Gerência do VLS determinou que qualquer variação nas condições do ambiente eletromagnético deve ser informada durante a atividade de carregamento da baia de controle no POP.

- **Transporte da Baia de Controle do POP à TMI.**

Do mesmo modo que a operação de transporte dos motores e dos módulos, a movimentação da baia de controle do POP até a TMI também é uma operação delicada para a qual é necessária a definição de critérios relativos às atividades elétricas atmosféricas de modo que ela seja executada da maneira mais segura possível.

- **Atividades na TMI.**

Por determinação da Gerência do VLS, qualquer variação nas condições do ambiente eletromagnético deve ser informada durante as atividades de integração e montagem realizadas na TMI.

- **Atividades Realizadas no VLS com Recuo da TMI de 12 m.**

Diversas atividades realizadas durante a montagem do VLS exigem o deslocamento da TMI para uma posição afastada de 12 m da mesa de lançamento. Durante o período em que a TMI permanece afastada do VLS esse se encontra particularmente exposto, sujeito à incidência de uma descarga atmosférica. A própria TMI, durante o afastamento e durante o retorno, tem os cabos de descida do seu sistema de proteção contra descargas atmosféricas desconectados da malha de terra, o que a torna vulnerável à descargas atmosféricas.

As seguintes atividades exigem o afastamento da TMI para a posição de 12 m:

- verificação do alinhamento e verticalidade dos estágios;
- ensaios funcionais dos sistemas elétricos;
- alinhamento da plataforma inercial.

- **Atividades Realizadas com Recuo da TMI de 53 m.**

Algumas atividades exigem o deslocamento da TMI para uma posição afastada de 53 m da mesa de lançamento. Nessas operações ocorre a situação mais aguda de exposição do VLS e da própria TMI à incidência de uma descarga atmosférica.

As seguintes atividades exigem o afastamento da TMI para a posição de 53 m:

- simulação de lançamento; e
- preparação do lançamento.

- **Lançamento e Acompanhamento do Vôo até a Altura de 20 km.**

Desde o instante do lançamento até a altura de aproximadamente 20 km existe o risco de indução de relâmpagos pelo próprio VLS. Portanto, é necessária a definição de critérios relativos à atividade elétrica atmosférica existente na direção do caminho de vôo previsto.

#### **6.4.2 Critérios Propostos**

Como o programa espacial brasileiro utiliza apenas foguetes não retornáveis, pode-se apresentar apenas os critérios utilizados para o lançamento e, dentro do enfoque desse trabalho, os critérios serão ainda mais específicos, apresentando apenas os que envolvam o ambiente eletromagnético da área de lançamento.

##### **6.4.2.1 Critérios Relativos ao Campo Elétrico Atmosférico**

Dentre as operações envolvidas numa campanha de lançamento, segundo a gerência do VLS, a que expõe o veículo por um maior período de tempo, conforme a Tabela 6.7, tem duração de 5 horas.

Portanto, baseado nas considerações anteriores, os critérios para início de uma operação ou lançamento, baseados no campo elétrico de origem atmosférica, propostos para o Centro de Lançamento de Alcântara são:

- E.1 - O valor do campo elétrico atmosférico indicado pelo EFM não deve exceder 0,65 kV/m ou -0,65 kV/m dentro das 5 horas que antecedem a operação ou o lançamento.
- E.2 - O valor do campo elétrico atmosférico indicado pelo EFM alcançou -1 kV/m ou +1 kV/m durante o transcorrer das atividades ou operações.

Porém, o atual sistema de monitoramento instalado no Centro de Lançamento de Alcântara informa para o operador apenas os valores do campo elétrico registrados na última hora.

Em função dessa limitação, poderiam ser adotados os seguintes critérios:

- E.1 - O valor do campo elétrico atmosférico indicado pelo EFM não deve exceder 0,65 kV/m ou -0,65 kV/m dentro de 1 hora que antecede a operação ou o lançamento.
  
- E.2 - O valor do campo elétrico atmosférico indicado pelo EFM alcançou -1 kV/m ou +1 kV/m durante o transcorrer das atividades ou operações.

Esses critérios são utilizados conforme a Tabela 6.8 mostrada adiante.

É importante salientar que o critério do campo elétrico não deve ser o único a ser considerado quando da decisão de se lançar ou não um foguete. Outros critérios, como os relativos à relâmpagos, direção e velocidade do vento, etc., devem ser considerados conjuntamente.

#### **6.4.2.2 Critério Relativo às Descargas Intra-Nuvem e Nuvem-Solo**

Como mencionado no Capítulo 2, as evidências indicam que as nuvens de tempestade que se formam sobre a região do Centro de Lançamento de Alcântara (2° 22' de latitude Sul) têm, em média, uma maior porcentagem de relâmpagos intra-nuvem do que as que se formam na região do KSC (25° de latitude Norte). Portanto, os critérios a serem adotados com relação à presença de relâmpagos intra-nuvem, ou de atividade elétrica atmosférica de uma maneira geral, devem ser mais críticos que os adotados pela NASA.

Critério proposto para o Centro de Lançamento de Alcântara:

- R.1 - Não lançar ou realizar outras operações delicadas se for detectado relâmpago intra-nuvem ou nuvem-solo, na última hora, num raio de 50 km.

## 6.5 - Tabela Resumo

A Tabela 6.8 apresenta um resumo das principais operações desenvolvidas durante as várias fases de uma campanha de lançamento do Veículo Lançador de Satélites (VLS) e os critérios propostos para cada uma delas relativos às condições do ambiente eletromagnético.

É importante salientar que os critérios propostos estão baseados na análise dos dados fornecidos pelo sistema atualmente instalado no CLA, registrados no verão/outono de 2004.

Portanto, conforme já mencionado no item 6.3.2, a cada ano, tendo a série temporal de valores medidos do campo elétrico de origem atmosférica na região de Alcântara se tornado mais longa, os critérios deverão ser reavaliados.

Deve ser observado, também, que os critérios propostos levam em conta as limitações do atual sistema implantado, tais como:

- o alcance do sensor de detecção e localização de relâmpago (TSS 928) é limitado a 50 km de raio, com eficiência não declarada pelo fabricante para a faixa entre 16 km e 50 km;
- é utilizado apenas um sensor para monitoramento do campo elétrico de origem atmosférica, com alcance de, aproximadamente, 10 km.

Logo, caso o sistema tenha seu alcance ampliado com a substituição ou aumento do número de sensores, novamente os critérios deverão ser reavaliados.

TABELA 6.8 – Resumo das Operações e Critérios para uma Campanha de Lançamento do VLS.

OPERAÇÃO	TEMPO	CRITERIO	
		Relâmpago	Campo Elétrico
Descrição	horas		
Transporte do aeródromo ao Prédio da Preparação de Propulsores (PPP):			
Motores	3	R.1	*
Pirotécnicos	1,5	R.1	*
Montagem dos módulos (saias, coifa, baia de equipamentos, etc.) no PPP. Obs.: Informativo para a Gerência/Coordenação do VLS.	Dia todo	**	E.2
Transporte do PPP à TMI:			
Motores	1,5	R.1	E.1
Módulos (saias, coifa, baia de equipamentos, etc.)	1	R.1	E.1
Carregamento da Baia de Controle com Hidrazina e Tetróxido de Nitrogênio no Prédio de Operações Perigosas (POP). Obs.: Informativo p/ a Gerência/Coordenação do VLS.	Dia todo	**	E.2
Transporte do POP à TMI da Baia de Controle.	1,5	R.1	E.1
Atividades na TMI. Obs.: Informativo para a Gerência/Coordenação do VLS.	Dia todo	**	E.2

(continua)

TABELA 6.8 – Conclusão

Recuo de 12 m da TMI para verificação do alinhamento e verticalidade dos estágios.			
Recuo da TMI	0,5	R.1	E.1
Serviços	1	R.1	E.1
Retorno da TMI	0,5	R.1	E.1
Recuo de 12 m da TMI para ensaio dos sistemas elétricos.			
Recuo da TMI	0,5	R.1	E.1
Serviços	3	R.1	E.1
Retorno da TMI	0,5	R.1	E.1
Recuo de 12 m da TMI para alinhamento da plataforma inercial.			
Recuo da TMI	0,5	R.1	E.1
Serviços	1	R.1	E.1
Retorno da TMI	0,5	R.1	E.1
Recuo de 53 m da TMI para simulação de lançamento.			
Recuo da TMI	2	R.1	E.1
Serviços	1	R.1	E.1
Retorno da TMI	2	R.1	E.1
Recuo de 53 m da TMI para lançamento.			
Recuo da TMI	2	R.1	E.1
Preparação para lançamento	1	R.1	E.1
Lançamento e acompanhamento do voo até a altura de 20 km	0,2	R.1	E.1

Obs.:

\* Não se aplica. O alcance do Electric Field Mill, instalado na Casamata, não atinge a região do aeroporto.

**\*\* Informação sobre a ocorrência de relâmpagos para dar apoio à Gerência/Coordenação do VLS sobre a execução ou não dos serviços de montagem.**

Neste trabalho só foram contemplados os critérios que dizem respeito às atividades elétricas dadas pelos sensores TSS e field mill. Cabe salientar que existe a possibilidade que outras nuvens, que não de tempestade, possam vir a induzir uma descarga em um foguete, sem indícios de atividade elétrica detectáveis através destes sistemas. Nesse sentido, sugere-se que, além do uso desse equipamento, no futuro sejam utilizadas, também, outras tecnologias, tais como radar, maior número de field mill, rede de detecção de relâmpagos, similar ao que é feito no KSC da NASA.

Além do equipamento de monitoramento das condições elétricas da atmosfera, também é importante frisar a necessidade, em paralelo, de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas protegendo toda a área da plataforma de lançamento.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 7.1 Conclusões

As principais conclusões decorrentes do trabalho realizado são:

- 1) A partir dos dados obtidos pelo sensor TSS 928, a relação entre relâmpagos IN e NS encontrada para a região de Alcântara no verão/outono de 2004, mostrada na Tabela 6.1, é de 3,2 (para maio esta relação é de 3,8).
- 2) A Tabela 5.2 apresenta um resumo da densidade de descargas para o solo, na região de Alcântara, em função das diferentes fontes de origem dos dados.

TABELA 5.2 – Densidade de Descargas Nuvem-Solo para Alcântara.

Fonte	Densidade de Descargas
-----	$N_g$ [relâmpago/km <sup>2</sup> ano]
NBR-5419	2,8
ACA/IAE	1,9
TSS 928	2,1

Cada uma das fontes traz embutida uma imprecisão. Foram comentadas anteriormente as limitações do índice cerâmico, utilizado para obter a densidade de descargas tanto a partir da NBR-5419 como da ACA/IAE. Já a densidade de descargas cuja fonte é o sensor TSS 928 é um valor médio obtido em apenas um período chuvoso. No futuro, com uma série temporal mais longa, esse valor pode se alterar.

- 3) 52% do número de relâmpagos ocorrem sobre os octantes S e SW, 70% ocorrem nos octantes SE, S e SW. Por outro lado, apenas 2% do número de

relâmpagos ocorrem sobre o octante N e 4% sobre o octante NE, direções preferenciais para lançamento.

- 4) O campo elétrico atmosférico de tempo bom apresentou variação diária típica em função da hora universal (UT – Universal Time) similar à curva de Carnegie, com valor médio de 177 V/m, valor máximo de 292 V/m ocorrendo por volta das 20:39h LT (23:39 UT) e valor mínimo de 76 V/m ocorrendo por volta das 5:01 h LT (8:01 UT).

### 7.1.1 Critérios

A partir dos resultados obtidos foi possível propor critérios relativos ao campo elétrico de origem atmosférica e relâmpagos a serem aplicados durante as missões de lançamento de foguetes de sondagem ou do veículo lançador de satélites, de modo a melhorar a segurança das operações envolvidas.

É importante salientar que os critérios propostos estão baseados na análise dos dados fornecidos pelo sistema atualmente instalado no CLA, registrados no verão/outono de 2004.

Portanto, conforme já mencionado no item 6.3.2, a cada ano, tendo a série temporal de valores medidos do campo elétrico de origem atmosférica na região de Alcântara se tornado mais longa, os critérios deverão ser reavaliados.

Deve ser observado, também, que os critérios propostos levam em conta as limitações do atual sistema implantado, tais como:

- o alcance do sensor de detecção e localização de relâmpago (TSS 928) é limitado a 50 km de raio, com eficiência não declarada pelo fabricante para a faixa entre 16 km e 50 km;

- é utilizado apenas um sensor para monitoramento do campo elétrico de origem atmosférica, com alcance de, aproximadamente, 10 km.

Logo, caso o sistema tenha seu alcance ampliado com a substituição ou aumento do número de sensores, novamente os critérios deverão ser reavaliados.

#### **7.1.1.1 Critérios Relativos ao Campo Elétrico Atmosférico**

- E.1 - O valor do campo elétrico atmosférico indicado pelo EFM não deve exceder 0,65 kV/m ou -0,65 kV/m dentro de 1 hora que antecede a operação ou o lançamento.
- E.2 - O valor do campo elétrico atmosférico indicado pelo EFM alcançou -1 kV/m ou +1 kV/m durante o transcorrer das atividades ou operações.

#### **7.1.1.2 Critério Relativo às Descargas Intra-Nuvem e Nuvem-Solo**

- R.1 - Não lançar ou realizar outras operações delicadas se for detectado relâmpago intra-nuvem ou nuvem-solo, na última hora, num raio de 50 km.

### **7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

A implantação no Centro de Lançamento de Alcântara de um sistema que permite o monitoramento do ambiente eletromagnético, e a definição de critérios relativos a esse ambiente de modo que a realização das diversas operações envolvidas numa campanha de lançamento possam ser desenvolvidas com maior segurança, são inéditas no país.

De maneira a dar continuidade ao trabalho apresentado, ampliando-se o sistema implantado com a instalação de uma antena do tipo IMProved Accuracy from Combined Technology (IMPACT) cujo alcance, precisão e gama de informações são

maiores) para detecção e localização de relâmpagos e um número maior de EFM, seria possível a realização dos seguintes trabalhos futuros:

- 1) *Pesquisas das características das descargas na região norte do Brasil.* A ampliação do sistema permite o acesso a novos dados que viabilizam estudos, entre outras características, da intensidade da corrente, multiplicidade, polaridade e densidade das descargas na região norte do Brasil.
  
- 2) *Integração do sistema implantado ao sistema do SIVAM/SIPAM.* A ampliação sugerida do sistema permite, também, a integração do mesmo ao sistema já implantado do Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM). Dessa forma as informações sobre relâmpagos seriam em maior número pelo fato do sistema integrado cobrir uma área muito maior. Assim, as pesquisas sugeridas no item anterior poderiam basear-se num número muito maior de dados, ganhando em confiabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Boccippio, D. J.; Cummins, K. L.; Christian, H. J.; Goodman, S. J. Combined satellite-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 01, p. 108-122, Jan. 2001.

Brook, M.; Kitagawa, N. Electric-field changes and the design of lightning-flash counters. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 7, p. 1927-1931, July 1960.

Coutinho, E. C. **Estudo dos ventos em altitude na região do Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA)**. 1999. 141 p. (INPE-8149-TDI/754). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.

Donet, I. Lightning risk forecasts and characteristics at Europe's Spaceport. In: International Lightning Detection Conference, 18. (ILDC), 2004, Helsinki, Finland. **Proceedings...** Helsinki: ILDC, 2004.

Fisch, G. F. Ventos em altitude na costa litorânea do Maranhão. **Boletim de Monitoramento do Tempo, Clima e Recursos Hídricos** – Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado do Maranhão, v. 2, Ano II, p. 43-47, 1997.

Centro Técnico Aeroespacial (CTA). **Atlas climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, 2002. 190 p.

Gabrielson, B. C. Lightning protection in rocket design. In: National Aerospace & Electronics Conference, 10., 1983, Dayton, OH, USA. **Proceedings...** Dayton: IEEE, 1983.

Global Atmospheric, Inc. **Electric field mill model II**. Tucson, Arizona – USA, 2003. User's Guide

Global Atmospheric, Inc. **Thunderstorm sensor** – models TSS-924C and TSS-928. Tucson, Arizona – USA, 2003. User's Guide.

Global Atmospheric, Inc. **Thunderstorm sensor** – model TSS-928. Tucson, Arizona – USA, 2003. Installation Guide.

Iribarne, J. V.; Cho, H.-R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1980. 212 p.

Kennedy Space Center – NASA. **Critérios de tempo da NASA para lançamento de aeronaves espaciais**. Disponível em:  
[http://chandra.harvard.edu/launch/status/weather\\_criteria.html](http://chandra.harvard.edu/launch/status/weather_criteria.html). Acesso em: jul. 2002.

Kennedy Space Center – NASA. **The Kennedy Space Center story**. Disponível em:  
[http://www\\_pao.ksc.nasa.gov/ksepao/kscstory](http://www_pao.ksc.nasa.gov/ksepao/kscstory). Acesso em: Feb. 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR-5419 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro, Fev. 2001.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2000. 196 p.

Rakov, V. Lightning return stroke modeling: recent developments. In: International Conference on Ground and Earthing, (GROUND'2002) & Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, 3. (WAE), 2002, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** Rio de Janeiro: SB-RAI:Brazilian Society for Electrical Protection Lightning, Earthing and EMC, 2002. p. 85-96.

Solórzano, N. N. **Primeiras medidas de relâmpagos induzidos no Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Souza, E. B.; Kayano, M. T.; Tota, J.; Pezzi, L.; Fisch, G. F.; Nobre, C. On the influences of the El Nino, La Nina and Atlantic's dipole pattern on the amazonian rainfall during 1960-1998. **ACTA Amazônica**, v. 30, n. 02, p. 305-318, 2000.

Uman, M. A.; McLain, D. K. **Lightning criteria relative to space shuttles: currents and electric field intensity in Florida lightnings**. Washington: National Aeronautics and Space Administration – NASA – CR-2161, Nov. 1972, USA.

Uman, M. A. **The lightning discharge**. New York, USA: Academic Press Inc., 1987. 377 p.





## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Bering III, E. A.; Few, A. A.; Benbrook, J. R. The global electric circuit. **Physics Today** - American Institute of Physics, v. 51, n. 10, p. 24-30, Oct. 1998.

Ferraz, E. C. **Desenvolvimento e aplicação de instrumentação e estudo de relâmpagos nuvem-solo negativos no verão 1998 – 1999**. 2001. 112 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Galeski, J. M. **All about electric fields: knowing when to trigger**. Disponível em: <http://bat.nmt.edu/galeski/project.htm>. Acesso em: Aug. 2003.

Galeski, J. M. **Triggering lightning using small rockets**. Disponível em: [http://bat.nmt.edu/galeski/triggering\\_lightning\\_using\\_small\\_rockets.htm](http://bat.nmt.edu/galeski/triggering_lightning_using_small_rockets.htm). Acesso em: Aug. 2003.

Kennedy Space Center – NASA. **Lightning and the space program**. Disponível em: [http://www\\_pao.ksc.nasa.gov/kscpao/release/1990/72\\_90.htm](http://www_pao.ksc.nasa.gov/kscpao/release/1990/72_90.htm). Acesso em: Aug. 2003.

Krider, E. P.; Jacobson, E. A. Electrostatic field changes produced by Florida Lightnings. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, n. 01, p. 103-117, Jan. 1976.

MacGorman, D. R.; Rust, W. D. **The electrical nature of storms**. New York, USA: Oxford University Press, 1998. 422 p.

Naccarato, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. 2000. 165 p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

Orville, R. E.; Huffines, G. R. Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: 1995-97. **American Meteorological Society**, Annual Summary, p. 2693-2703, Nov. 1999.

Orville, R. E.; Huffines, G. R. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-98. **American Meteorological Society**, Annual Summary, p. 1179-1193, May 2001.

Pinto, I. R. C. A. **Estudos sobre campos elétricos e condutividade associados a nuvens eletrificadas na região da América do Sul**. 1988. 129 p. (INPE-4487-TDI/325). Tese (Doutorado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1988.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Editora Brasiliense, 1996. 105 p.

Rycroft, M. J.; Israelsson, S.; Price, C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 06, n. 17-18, p. 1563-1576, 2000.

Saba, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. 1997. 151 p. (INPE-6675-TDI/625). Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

Souza, E. B.; Nobre, P. Uma revisão sobre o padrão de dipolo no Atlântico tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n 1, p. 31-44, 1998.

Uman, M. A. **Lightning**. New York, USA: Dover Publications Inc., 1984. 264 p.

Uman, M. A. **All about lightning**. New York, USA: Dover Publications Inc., 1986. 167 p.

## APÊNDICE A

### OCORRÊNCIA E INTENSIDADE DOS FENÔMENOS EL NIÑO E LA NIÑA

A Tabela a seguir mostra os anos de ocorrência e a intensidade dos fenômenos El Niño e La Niña.

<b>EL NIÑO</b>		<b>LA NIÑA</b>	
<b>Ano</b>	<b>Intensidade</b>	<b>Ano</b>	<b>Intensidade</b>
1877 - 1878	Forte	1886	Forte
1888 - 1889	Moderado	1903 - 1904	Forte
1896 - 1897	Forte	1906 - 1908	Forte
1899	Forte	1909 - 1910	Forte
1902 - 1903	Forte	1916 - 1918	Forte
1905 - 1906	Forte	1924 - 1925	Moderado
1911 - 1912	Forte	1928 - 1929	Fraco
1913 - 1914	Moderada	1938 - 1939	Forte
1918 - 1919	Forte	1949 - 1951	Forte
1923	Moderada	1954 - 1956	Forte
1925 - 1926	Forte	1964 - 1965	Moderada
1932	Moderada	1970 - 1971	Moderada
1939 - 1941	Forte	1973 - 1976	Forte

1946 – 1947	Moderada	1983 – 1984	Fraco
1951	Fraco	1984 – 1985	Fraco
1953	Fraco	1988 – 1989	Forte
1957 – 1959	Forte	1995 – 1996	Fraco
1963	Fraco	1998 - 2001	
1965 – 1966	Moderada	Foi durante o verão do hemisfério sul em 1998 -99, 1999-00 moderado durante 2000 -01	
1968 – 1970	Moderada	<b>Fontes de Informações -</b>	
1972 – 1973	Forte	Rasmusson e Carpenter 1983, Monthly Weather Review, Ropelewski e Halpert 1987, Monthly Weather Review.	
1976 – 1977	Fraco	Cold episode sources Ropelewski e Halpert 1989, Journal of Climate. Climate Diagnostics Bulletin. A intensidade dos ventos é baseada no padrão e magnitude das anomalias da TSM do Pacífico Tropical.	
1977 – 1978	Fraco		
1979 – 1980	Fraco		
1982 – 1983	Forte		
1986 – 1988	Moderado		
1990 – 1993	Forte		
1994 – 1995	Moderada		
1997 – 1998	Forte		
<b>Fontes de Informações -</b>			
Rasmusson e Carpenter 1983, Monthly Weather Review, Ropelewski e Halpert 1987, Monthly Weather Review. Cold episode sources Ropelewski e Halpert 1989, Journal of Climate. Climate Diagnostics Bulletin. A intensidade dos ventos é baseada no padrão e magnitude das anomalias da TSM do Pacífico Tropical.			