



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12181-TDI/975

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS ATRAVÉS DA ANÁLISE COMPARATIVA DE OBSERVAÇÕES POR MÚLTIPLAS TÉCNICAS

Fernando Júnio de Miranda

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Júnio e Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 09 de agosto de 2004.

551.294.22

MIRANDA, F. J.

Estudo das características de relâmpagos nuvem-solo negativos através da análise comparativa de observações por múltiplas técnicas / F. J. Miranda. – São José dos Campos: INPE, 2004.

192p. – (INPE-12181-TDI/975).

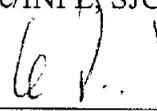
1.Eletricidade atmosférica. 2.Descargas nuvem-solo. 3.Descargas elétricas. 4.Campos elétricos. 5.Radiação eletromagnética. 6.Relâmpagos. 7.Tempestades. I.Título.

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

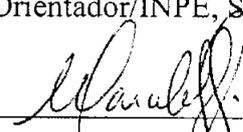
Dr. Ênio Bueno Pereira


Presidente/INPE, SJCampos-SP

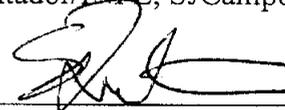
Dr. Osmar Pinto Junior


Orientador/INPE, SJCampos-SP

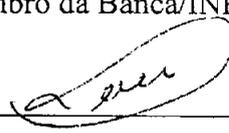
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba


Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Severino L. Guimarães Dutra


Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dra. Neusa Maria Paes Leme


Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria


Convidado/ CTA-IAE, SJCampos-SP

Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino


Convidado/ Universidade Federal de Minas Gerais - MG

Aluno: Fernando Júnio de Miranda

São José dos Campos, 09 de agosto de 2004.

But Jesus Said: *It is written:*
Man shall not live by bread alone,
but by every word that proceedeth
out of the mouth of God.

Mathew 4:4

Jesus, porém, respondeu: *Está escrito:*
Não só de pão viverá o homem,
mas de toda a palavra que
procede da boca de Deus.

Mateus 4:4

A Deus e a meus pais, dedico.

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos:

Ao Deus Trino porque é meu Deus, e a meus pais porque são meus pais, e isto já fala tudo. Agradecê-los-ia, mesmo que não tivessem feito nada por mim. Agradeço também meus irmãos pela torcida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte financeiro de suma importância a este projeto, n. 99/11751-8, e aos orientadores, Doutores Osmar Pinto Jr. e Marcelo Magalhães Fares Saba, pela importante orientação no decorrer deste trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas de trabalho, ao Mestre Erasmo G. Munuera, pela importante contribuição no desenvolvimento do sistema de digitalização utilizado neste trabalho; ao Mestre Evandro de Carvalho Ferraz, pela importante contribuição no desenvolvimento dos projetos eletrônicos também utilizados neste trabalho; ao Mestre Kleber Pinheiro Naccarato, pela atenção e importantes discussões no decorrer do trabalho e à Doutora Natália Nunes Solorzano, pelo bom convívio durante as campanhas em que trabalhamos juntos.

À Marilúcia Gonzaga Cursino, pelo carinho e pela compreensão a mim concedidos nesta fase em minha vida.

Aos amigos, Dr. Esfhan Alam Kherani, Dr. Daylton Gilberto Guedes, Mestre Widinei Alves Fernandes, Mestre Roberto Pinto Souto e José Álvaro e família, por me ouvirem quando eu precisei apenas ser ouvido e falarem quando eu precisei ouvir.

Aos Doutores Esfhan Alam Kherani, Leila Maria G. Fonseca e Iara R.C.A. Pinto, por terem me ajudado nos momentos em que meus orientadores estavam impossibilitados de fazê-lo.

Aos doutores membros da banca que certamente contribuíram para o trabalho e, em especial, aos Doutores F.C.P. Bizarria e José Osvaldo Saldanha Paulino, pela aceitação do convite para a participação nesta Banca de tese.

RESUMO

Pela primeira vez no Brasil, foi desenvolvida uma antena para registro de campo elétrico da radiação dos relâmpagos, com resolução igual a $1,25 \mu\text{s}$. A partir de tempestades ocorridas em São José dos Campos, entre Fevereiro e Março de 2003, informações sobre relâmpagos, sincronizadas com a hora GPS, foram obtidas simultaneamente por esta antena, por uma câmera rápida com resolução igual a 1 ms e pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos (SDR) brasileiro (RINDAT). Uma análise comparativa destas informações foi feita pela primeira vez. Características dos relâmpagos tais como, multiplicidade e tempo entre descargas de retorno foram comparados a partir dos dados de campo elétrico, câmera rápida e RINDAT, assumindo os resultados da câmera rápida como reais. Tempos de subida e largura dos Pulsos foram comparadas a partir dos dados de campo elétrico e do SDR. A relação entre os picos de corrente e de campo elétrico também foi investigada. Os principais resultados obtidos foram: valores de multiplicidade média iguais a 4,00, a partir das imagens da câmera rápida e 4,38 a partir dos registros de campo elétrico; valores de média geométrica para o intervalo de tempo entre descargas de retorno foram iguais a 83 ms a partir das imagens da câmera rápida e 76 ms a partir dos registros de campo elétrico. Estes valores são similares àqueles obtidos em outros lugares. Foi verificado que, embora observações a partir da câmera rápida sejam menos prováveis de perder descargas de retorno durante o registro, é possível perder descargas de retorno devido a ocorrência de um canal bifurcado para fora do campo visual da câmera, resultando em erros na multiplicidade. Para correção destes erros, sugere-se uma associação entre dados de campo elétrico e câmera rápida. As distribuições dos tempos de subida são similares para observações a partir do campo elétrico e do SDR. Porém, em muitos casos as larguras de pulsos observadas pelo SDR são maiores, talvez devido ao menor nível de ruído dos sensores do SDR. Foi observado que os tempos de subida e as larguras dos pulsos não dependem da distância de propagação dentro da região em consideração, não havendo a necessidade de aplicações de modelos para correção dos efeitos de propagação. A eficiência do SDR na detecção de descargas de retorno em relação às observações a partir da antena de campo elétrico foi igual a 58%. Todavia, é importante observar que, no período do estudo, os sensores do SDR localizados em São José dos Campos e Cachoeira Paulista, não estavam em operação. Para relâmpagos distantes, a relação entre os picos de corrente das descargas de retorno estimados pelo SDR e os picos de campo elétrico observados pela antena de campo elétrico é linear, indicando que, o modelo utilizado pelo SDR para estimar o pico de corrente, é válido para a região de estudo.

STUDY OF NEGATIVE CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING FEATURES FROM COMPARATIVE ANALYSIS OF OBSERVATIONS BY MULTIPLE TECHNIQUES

ABSTRACT

For the first time in Brazil, an electric field antenna for lightning radiation, with $1.25 \mu\text{s}$ resolution was developed. From thunderstorms over Sao José dos Campos, between February and March of 2003, information of lightning synchronized to GPS time, were simultaneously obtained by this antenna, by a 1ms resolution high-speed camera and by the Brazilian Lightning Detection System (SDR or RINDAT). A comparative analysis of this information was done for the first time. Lightning features as multiplicity and return strokes time intervals were compared from electric field, high-speed fast camera and SDR data set, assuming the high-speed camera results as the most realistic reference. Electric field rise times and pulse widths were compared from electric field and SDR data set. The current peak versus electric field peak relation also was investigated. The main results obtained were: average multiplicity values were 4.00 from images of high-speed camera and 4.38 from electric field data; geometric mean values for the return stroke time intervals were 83 ms from images of high-speed camera and 76 ms from electric field data. These values are similar to those obtained in another places. It was verified that although high-speed camera observations are less likely to miss return strokes during recording, it may happen when close lightning with multiple channels have one or more channels out of view field of the high-speed camera, leading to errors in multiplicity. An electric field and high-speed camera data association is suggested to correct these errors. Rise times distributions are similar for both electric field and SDR observations. But, in many cases pulse widths from SDR observations were larger, perhaps due to lower noise level of SDR sensors. No dependence of rise time and pulse width on propagation distance was found for the considered region. It means that are not necessary to apply corrections models for propagation effects on rise times and pulse widths. The return stroke detection efficiency of SDR was 58% respect to electric field observations. However it is important to consider that at the period of this research, the sensors of SDR located at São José dos Campos and Cachoeira Paulista were not in operation. Current peaks of return strokes measured by the SDR and electric field peaks measured by the electric field antenna show a linear relation for distant lightning, indicating that the model used by the SDR to estimate current peaks is correct to the region of study.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	21
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	23
1.1 - Aspectos Gerais sobre Relâmpagos	23
1.2 – Objetivos deste Trabalho	32
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1 - Técnicas de Observações de Relâmpagos de Interesse neste Trabalho	37
2.2 - Multiplicidade e Intervalo de Tempo entre Descargas de Retorno de um Relâmpago	47
2.3 - Tempo de Subida das Descargas de Retorno dos Relâmpagos	57
2.4 - Largura de Pulso das Descargas de Retorno dos Relâmpagos	61
2.5 - Relação entre os Picos de Corrente (I_p) e os Picos de Campo Elétrico (E_p)	66
2.6 - Performance dos Sistemas de Detecção de Relâmpagos	69
2.7 - Relâmpagos Bifurcados	72
2.8 - Peculiaridades da Estrutura Fina da Forma de Onda de Campo Elétrico de Descargas de Retorno Bifurcadas e não Bifurcadas	75
2.9 - Ocorrência de Picos de Campo Elétrico de DR's Subseqüentes Maiores do que seus Respetivos Picos de Campo Elétrico de Primeiras DR's	76
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO	79
3.1 - Metodologia	79
3.2 - Instrumentação	84
3.2.1 - Sistema de Aquisição de Registro de Campo Elétrico	84
3.2.2 - Câmera Rápida	90
3.2.3 - O Sistema de Detecção de Relâmpagos	90
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1 - Identificação de Descargas de Retorno e Multiplicidade de um Relâmpago a Partir do Registro de Campo Elétrico Obtido por uma Única Antena	91
4.1.1 - Aplicação do Critério das Amplitudes na Detecção de um Pulso de Descarga de Retorno	92
4.1.2 - Identificação de Pulsos de Descarga de Retorno e Multiplicidade do Relâmpago a Partir da Análise da Forma de Onda de Campo Elétrico dos Pulsos – Critério da Largura dos Pulsos e da Separação Temporal entre os Pulsos	96

4.2 - Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através do Registro de Campo Elétrico, da Câmera Rápida e do Sistema de Detecção de Relâmpagos	110
4.2.1 - Valores de Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através da Câmera Rápida e do Registro de Campo Elétrico.....	110
4.2.2 - Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através da Câmera Rápida e do Sistema de Detecção de Relâmpagos	122
4.2.3 - Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através do Registro de Campo Elétrico, da Câmera Rápida e do Sistema de Detecção de Relâmpagos	125
4.3 - Investigação da Relação entre Picos de Corrente (I_p) e de Campo Elétrico (E_p) .	127
4.3.1 - Observação da Relação entre o Pico de Corrente (I_p) e o Pico de Campo Elétrico (E_p) para Eventos Próximos (até 30 km) e Distantes (entre 30 e 350 km)	127
4.4 - Observação da Performance do Sistema de Detecção de Relâmpagos.....	138
4.4.1 - Eficiência dos Cenários E e H na Detecção de Descargas de Retorno	138
4.4.2 - Medidas do Tempo de Subida a Partir da Antena de Campo Elétrico e do Sistema de Detecção de Relâmpagos.....	140
4.4.3 - Medidas de Largura de Pulsos de Campo Elétrico a Partir da Antena de Campo Elétrico e do Sistema de Detecção de Relâmpagos.....	144
4.5 - Erro na Multiplicidade de um Relâmpago Associado a Observações feitas através de uma Câmera Rápida e Ocorrência de Picos de Campo Elétrico de Descargas de Retorno Subseqüentes Maiores do que os Picos de Campo Elétrico de suas Descargas de Retorno de Primeira Ordem	148
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171
APÊNDICE A - PICOS DE CAMPO ELÉTRICO DE DESCARGAS DE RETORNO REGISTRADOS PELA ANTENA DE CAMPO ELÉTRICO E SUAS DISTÂNCIAS DE PROPAGAÇÃO ...	181
APÊNDICE B - CURVAS DE RESPOSTA EM AMPLITUDE E FASE DO FILTRO PASSA-ALTA DE BUTTERWORTH COM FREQUÊNCIA DE CORTE IGUAL A 5 kHz.	187
APÊNDICE C - ALGORITMO PARA DETECÇÃO DE RELÂMPAGOS E SUAS MULTIPLICIDADES	189

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Forma dipolar para a estrutura de uma nuvem de tempestade.....	24
1.2 - Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	27
1.3 – Registro de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, ocorrido no verão a uma distância desconhecida. PB é o pulso de <i>breakdown</i> , LE é o líder escalonado e DR é a descarga de retorno.	29
1.4 – Registro de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, ocorrido a 25 km de distância da estação de observação. Tem-se que PB é o pulso de <i>breakdown</i> , LE é o líder escalonado e DR é a descarga de retorno.	29
1.5 - Geometria da antena utilizada como um canal ideal de um relâmpago utilizada no modelo TL.....	30
2.1 - Esquema de bobinas magnéticas.....	39
2.2 - Esquema de estimativa da posição de uma descarga de retorno. S_i ($i=1,2,3$) são os sensores operando com a tecnologia MDF.....	41
2.3 – Esquema para a estimativa da posição da descarga de retorno através da tecnologia TOA. S_i ($i=1,2,3,4$) são os sensores.	42
2.4 – Distribuição dos sensores de descargas de retorno no território brasileiro, componentes do SDR (RINDAT) até junho de 2003.....	44
2.5 – Distribuição dos sensores de descargas de retorno no território brasileiro, componentes do SDR (RINDAT) após junho de 2003.....	45
3.1 - Torre localizada no CTA, em São José dos Campos, onde foram instalados os equipamentos para registro de campos elétricos gerados pelos relâmpagos e a câmera rápida para as filmagens.	81
3.2 – Diagrama em blocos do sistema de aquisição de formas de onda de campo elétrico desenvolvido.	84
3.3 – Antena capacitiva desenvolvida e utilizada na coleta de dados.	85
3.4 – Circuito processador do sinal proveniente da antena. Primeiro bloco: integrador passivo ($R = 1\text{ M}\Omega$, $C = 150\text{ pF}$). Segundo bloco: Isolador (Circuito Integrado TL 081, alimentação $=\pm 12\text{ V}$).	87

3.5 - Curva de resposta em frequência do integrador utilizado, com uma constante de decaimento igual a 261 μ s.	88
4.1 – Resultado da aplicação do critério $\bar{x} \pm 3\sigma$ duas vezes sobre todo o registro gráfico superior do relâmpago ocorrido no dia 21/02/2003, às 00:52:29,539 horas (UT), em uma tempestade sobre São José dos Campos. Neste gráfico e nos demais, As setas indicam as descargas de retorno filmados e numeração a ordem destas descargas de retorno.	94
4.2 – Aprovação de descargas dentro da nuvem (IN) e subestimação de pulsos (2 e 3) pela aplicação do critério $\bar{x} \pm 3\sigma$ duas vezes sobre todo o registro do relâmpago ocorrido no dia 19/03/2003, às 19:32:19,645 horas (UT).	95
4.3 – Distribuição das amplitudes de campo elétrico medidas pelo sistema de aquisição desenvolvido neste trabalho, durante o período de aquisição de dados.	100
4.4 – Ocorrência de rampa devido ao conteúdo rico em baixas frequências no registro de campo elétrico de um relâmpago próximo.	101
4.5 – Resultados da aplicação de um filtro passa-alta sobre o sinal de campo elétrico original para frequências de corte iguais a 1, 2, 3, 4 e 5 kHz.	102
4.6a – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 0,6 ms.	103
4.6b – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 2 ms.	103
4.6c – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 5 ms.	104
4.6d – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 10 ms.	104
4.7 – Esquema da localização temporal dos pulsos encontrados, dentro de cada arquivo (faixa superior) e dentro do arquivo único (faixa inferior).	107
4.8 – Comparação entre as multiplicidades obtidas pelas técnicas: Câmera rápida e Campo elétrico.	111

4.9 – Imagem infra-vermelha do satélite GOES apresentando a distribuição de nuvens sobre o Brasil. Canal 8 – 05/03/2003, 16:09 UT.....	112
4.10 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “b”, ocorrido às 17:08:37,364 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.....	113
4.11 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “a”, ocorrido às 00:52:30,045 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 21/02/03.....	115
4.12 – Cobertura de nuvens em um período pouco antes do instante de ocorrência do relâmpago “a”.....	116
4.13 - Cobertura de nuvens em um período pouco após do instante de ocorrência do relâmpago “a”.....	117
4.14 - Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “c” ocorrido às 17:11:46,359 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.....	118
4.15 - Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “d” ocorrido às 17:20:45,801 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.....	119
4.16 - Cobertura de nuvens em um período contendo o instante de ocorrência do relâmpago “d”.....	120
4.17 – Distribuições dos intervalos de tempo entre DR’s dos 8 relâmpagos filmados, obtidas a partir dos registros de campo elétrico e de câmera rápida.....	121
4.18 – Distribuições da multiplicidade dos 36 relâmpagos filmados (vermelho), 22 relâmpagos detectados pelo cenário E (verde-cE), 20 relâmpagos detectados pelo cenário H (azul escuro-cH) e 23 relâmpagos detectados em Tempo Real (azul claro-TR). A diferença entre o número de relâmpagos filmados e o número de relâmpagos detectados por um certo cenário corresponde ao número de relâmpagos filmados que o cenário não detectou.....	123
4.19 – Distribuições dos intervalos de tempo entre DR’s dos 36 relâmpagos filmados (verde), 22 relâmpagos detectados pelo cenário E (azul escuro-cE), 20 relâmpagos detectados pelo cenário H (azul claro-cH) e 23 relâmpagos detectados em Tempo Real (rosa-TR). As diferenças entre o número total de intervalos de tempo entre DR’s observado pela câmera rápida e o número total de intervalos de tempo entre DR’s observado pelos cenários do SDR, está associado ao fato do SDR não ter detectado todos os relâmpagos e DR’s filmados.....	124
4.20 – Ajustes de curvas para a relação $I_p \times E_p$. a) Para DR’s ocorridas até 30 km de distância da antena; b) Para DR’s ocorridas entre 30-350 km de distância da antena.	129

4.21 – Formas de onda de pulsos de DR's selecionadas e descartadas na investigação para o estudo de verificação da influencia do campo eletrostático e da distância na relação $I_p \times E_p$	132
4.22 – Relação $I_p \times E_p$ para picos iniciais de campo elétrico não contaminados ou pouco contaminados pelo campo eletrostático.....	137
4.23 – Histogramas das distâncias dos pulsos detectados pelo SLT através dos cenários E e H.	139
4.24 – Esquema da detecção do tempo de subida e da largura do pulso de campo elétrico feita pelas antenas IMPACT componentes do SDR. E_p = Pico de campo elétrico, E_t = Campo de trigger, T_t = Tempo de trigger, T_p = Tempo do pico, T_F = Tempo em que o pulso cruza o campo de trigger durante o decréscimo do sinal, T_S = Tempo de subida, LP = Largura do pulso.....	141
4.25 – Distribuição dos tempos de subida ($0-E_p$) medidos pela antena de campo elétrico e pelo SDR (cenários E (cE) e H (cH)).	142
4.26 – Ajuste linear dos tempos de subida das DR's com suas respectivas distância, para os dados provenientes da antena de campo elétrico e do SDR (cenários E e H).....	144
4.27 – Distribuição das Larguras dos Pulsos (LP).	145
4.28 – Ajuste linear das larguras dos pulsos em relação às suas respectivas distâncias, para os dados provenientes da antena de campo elétrico e do SDR(cenários E e H).....	147
4.29 – Filmagem das DR's de um relâmpago ocorrido no dia 05/03/2003 às 00:52:30,045 Horas (UT), a cerca de 15 km da torre de observação.....	151
4.30 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “b”, ocorrido às 17:08:37,364 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.	152
4.31 – Formas de onda de campo elétrico e suas derivadas para os pulsos de DR's do relâmpago apresentado na FIGURA 4.30. Os pulsos 1,4 e 5 foram filmados e são apresentados na FIGURA 4.29.....	153
4.32 – Descargas de retorno de um relâmpago RNC, ocorrido no dia 05/03/2003 às 17:20:45,801 horas (UT), a cerca de 10 km da torre de observação.....	157
4.33 - Descargas de retorno de um relâmpago RNC, ocorrido no dia 19/03/2003 às 19:29:43,071 horas (UT), a cerca de 25 km da torre de observação.	158

LISTA DE TABELAS

2.1 – Resumo dos Resultados de Observação de Multiplicidade Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.	50
2.2 – Resumo dos Resultados de Observação de Intervalos de Tempo entre DR'S obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.	55
2.3 – Resumo dos Resultados de Observação de Tempos de Subida Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.	58
2.4 – Resumo dos Resultados de Observação de Larguras de Pulsos Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.	62
4.1 – Resultado da análise dos métodos dos mínimos quadrados para os parâmetros Tempo Morto e Limiar de Largura dos pulsos.	105
4.2 – Resultados da aplicação do algoritmo final sobre o conjunto de arquivos contendo o arquivo do relâmpago C.	109
4.3 – Distância entre as DR's dos pulsos 2, 3 e 4, em relação à primeira DR associada ao pulso 1.	114
4.4 – Resultados estatísticos das distribuições estimada e real dos intervalos de tempo entre DR's.	121
4.5 – Médias geométricas para a multiplicidade e o intervalo de tempo entre DR's dos 8 relâmpagos observados simultaneamente pela câmera rápida e pela antena de campo elétrico desenvolvida neste trabalho. Os valores observados pela câmera rápida são adotados como reais.	126
4.6 - Médias geométricas para a multiplicidade e o intervalo de tempo entre DR's observadas pela Câmera Rápida e pelo SDR. Os valores observados pela Câmera Rápida são adotados como reais. Os valores observados pelo SDR, são provenientes do cenário E (cE). Estes são resultados de um banco de dados proveniente dos 36 relâmpagos filmados.	126
4.7 – Valores dos coeficientes angular (a), linear (b) e de correlação (R) para os ajustes apresentados na FIGURA 4.20. N é o número de eventos utilizados nos ajustes e $\langle Er \rangle$ é o valor médio das barras de erros apresentadas na FIGURA 4.20.	130
4.8 – Percentual e intervalo de ocorrência de formas de onda de DR's com rampa associada ao componente eletrostático.	134

4.9 – Valores dos coeficientes angular (a), linear (b) e de correlação (R) para o ajuste apresentado na FIGURA 4.22. N é o número de eventos utilizados no ajuste e $\langle Er \rangle$ é o valor médio das barras de erros apresentadas na FIGURA 4.22.	137
4.10 – Eficiência de detecção de DR'S para os cenários E-H, em relação à antena de campo elétrico.	140
4.11 – Classificação dos relâmpagos observados quanto à geometria do canal.	155
4.12 – Relação entre a ocorrência de $DR_{sub} > DR_p$ e a geometria do canal. O termo $DR_{sub} > DR_p$ significa DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que as amplitudes de suas primeiras DR's.	160

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALDIS	- Austrian Lightning Detection Information System
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange
cE	- Cenário E
CE	- Campo Elétrico
CEMIG	- Companhia Energética de Minas Gerais
cH	- Cenário H
CI	- Circuito Integrado
CTA	- Centro Técnico Aeroespacial
DR	- Descarga de Retorno
DR _p	- Descarga de Retorno de Primeira Ordem ou Primeira Descarga de Retorno
DR _{sub}	- Descarga de Retorno Subseqüente
ELAT	- Grupo de Eletricidade Atmosférica
GAI	- Global Atmospheric Inc.
GPS	- Global Positioning System
IMPACT	- Improved Accuracy from Combined Tecnology
IN	- Relâmpago Intra-Nuvem ou dentro da nuvem
LE	- Líder Escalonado
LF	- Low Frequency
LP	- Largura de Pulso
LP2000	- Lightning Processor Module (APA2000)
LPATS	- Lightning Positioning and Tracking System
MDF	- Magnetic Direction Finder
NLDN	- National Lightning Detection Network
NS	- Relâmpago Nuvem-Solo
PB	- Pulsos de Breakdown
RINDAT	- Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RMC	- Relâmpagos de Múltiplos Canais
RNC	- Relâmpagos com Novos Canais
RCA	- Relâmpagos de Canais Alterados
RCS	- Relâmpagos de Canal Simples
SDR	- Sistema de Detecção de Relâmpagos
SIMEPAR	- Sistema Meteorológico do Paraná
sqd	- soma dos quadrados das discrepâncias
SN	- Relâmpago Solo-Nuvem
TL	- Transmission Line (Modelo de Linha de Transmissão)
TOA	- Time of Arrival (Tempo de Chegada)
TR	- Tempo Real
TS	- Tempo de Subida
UHF	- Ultra High Frequency
UT	- Universal Time
VLF	- Very Low Frequency

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais sobre Relâmpagos

Os relâmpagos são descargas elétricas intensas que ocorrem na atmosfera, como consequência da separação localizada de cargas elétricas no espaço, a qual geralmente ocorre nas nuvens de tempestades. A formação de uma nuvem de tempestade inicia-se com a elevação de uma parcela de ar úmido por aquecimento ou por um agente forçante (montanhas, frentes frias etc). Durante essa elevação, a parcela de ar experimenta decréscimos de pressão e temperatura característicos da troposfera (até aproximadamente 15 km de altura), de forma que, em um certo instante o vapor de água começa a condensar-se com a ajuda de partículas presentes no ar, as quais são chamadas de núcleo de condensação. Como resultado desse processo são formados gotículas de água, água super-resfriada, cristais de gelo e granizo, os quais adquirem carga elétrica por atrito e colisão resultantes dos movimentos associados às correntes ascendentes e ou descendentes dentro da nuvem, dependendo do seu estágio de desenvolvimento.

Simultaneamente ao surgimento de cargas nas partículas e também associada à dinâmica interna da nuvem, ocorre também a separação destas cargas em centros de cargas positivas e negativas (Uman, 1987; Pinto Jr. e Pinto, 1996; Pinto Jr. e Pinto, 2000). Tem-se simplificada dois centros principais de cargas, um positivo no topo da nuvem e um negativo na base da nuvem. Há também um pequeno centro de cargas positivas logo abaixo do centro de cargas negativas e camadas de blindagens nas bordas inferior e superior, resultantes da atração entre os centros principais e os íons existentes na atmosfera. Esta estrutura é tal que, para um observador distante apresenta-se como um dipolo elétrico como pode ser visto na FIGURA 1.1.

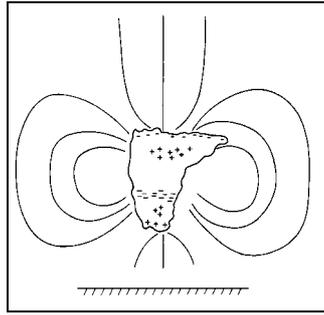


FIGURA 1.1 - Forma dipolar para a estrutura de uma nuvem de tempestade.

FONTE: Adaptada de Pinto Jr. e Pinto (1996, p.43).

Quando as cargas elétricas da nuvem são intensas, o campo elétrico gerado por elas dentro da nuvem, pode tornar-se intenso o suficiente para romper a rigidez dielétrica do meio onde elas se encontram (cristais de gelo, gotas de água, granizo etc) e iniciar-se uma descarga elétrica dentro da nuvem, conhecida como descargas de *Breakdown*, iniciando assim o relâmpago.

Os relâmpagos podem iniciar-se na nuvem e fluírem para o solo (relâmpago nuvem-solo - NS), iniciarem-se no solo e fluírem para a nuvem (relâmpago solo-nuvem - SN) ou ocorrerem dentro da nuvem de tempestade ou a partir de um ponto na nuvem para outro ponto não localizado no solo (relâmpago intra-nuvem - IN). Os relâmpagos NS podem ser classificados quanto ao tipo de carga neutralizada na nuvem. São classificados como negativos caso sejam neutralizadas cargas do centro de cargas negativas e como relâmpagos positivos, caso sejam neutralizadas cargas do centro de cargas positivas. Entre todos os tipos de relâmpagos, os que ocorrem dentro da nuvem, também chamados de relâmpagos no céu (por não tocarem o solo), ocorrem com maior frequência, cerca de 90%. Entre os relâmpagos envolvendo o solo, os negativos são mais freqüentes do que os positivos, o que associado ao seu caráter destrutivo aumenta a sua periculosidade e faz com que maior parte da atenção seja voltada a eles. Porém, características peculiares dos relâmpagos NS positivos, tais como os elevados picos de corrente já observados, têm atraído uma crescente atenção sobre estes relâmpagos.

O relâmpago de interesse neste trabalho é o NS negativo, dado que, o banco de dados pelo qual este trabalho foi desenvolvido é composto quase que 100% de relâmpagos

deste tipo. Por isso, uma informação mais detalhada será dada sobre os relâmpagos NS negativo no decorrer deste capítulo e ao leitor interessado em conhecer um pouco mais sobre relâmpagos NS positivos e ou IN, sugere-se como boas fontes de informações as obras de Pinto Jr e Pinto (1996, 2000) e Uman (1987).

Os relâmpagos nuvem-solo negativos iniciam-se com descargas de *Breakdown* no centro de cargas negativas. Logo após, estas descargas saem da nuvem e passam a propagar-se pela atmosfera (FIGURA 1.2a). Esta descarga percorre 50 m em 1 μ s, pára durante 50 μ s e assim sucessivamente, sendo este processo chamado de líder escalonado. Durante cada passo, o líder escalonado procura um caminho que apresente maior condutividade, o que resulta em ramificações e tortuosidade nos relâmpagos (FIGURA 1.2b). Após algumas dezenas de milissegundos, o líder escalonado que propaga-se a uma velocidade da ordem de 10^5ms^{-1} , tem seu extremo inferior próximo ao solo, a algumas centenas de metros. Estabelece-se assim uma enorme diferença de potencial entre o solo e o extremo inferior do líder escalonado, surgindo a partir do solo uma descarga ascendente e com carga oposta à do líder escalonado denominada descarga conectante (FIGURA 1.2c).

No instante em que a descarga conectante encontra o líder escalonado, ocorre uma descarga mais intensa, denominada Descarga de Retorno (DR) - FIGURA 1.2d, cujo valor médio do pico de corrente é 30 kA, podendo a mesma atingir picos maiores do que 100 kA em alguns casos. Esta corrente propaga-se a uma velocidade entre 10^7 m/s e 10^8 m/s. A corrente da descarga de retorno leva cerca de 100 μ s para atingir a base da nuvem (Iribarne e Cho, 1980). Se durante a ocorrência do relâmpago ocorrer apenas uma DR o relâmpago é chamado de *simples*, porém, há casos em que, algumas dezenas de milissegundos após a primeira DR, uma nova descarga da nuvem para o solo pode ocorrer aproveitando o canal ionizado remanescente (FIGURA 1.2e). Sua origem é próxima do local de origem do líder escalonado. Esta nova descarga flui em movimento contínuo a uma velocidade de 2×10^6 m/s, aproximadamente 10 vezes mais rápida do que o líder escalonado e 20 vezes mais lenta do que a primeira DR. Denominada líder contínuo, ela precede outra DR chamada de subseqüente (FIGURA 1.2f), caracterizando o relâmpago como *múltiplo* e podendo as etapas ilustradas pelas FIGURAS 1.2e e 1.2f

ocorrerem mais vezes. Algumas vezes, após a última DR ou entre DR's consecutivas de relâmpago, pode-se ter uma corrente suave, de natureza não impulsiva, de aproximadamente 100 ampères, com duração de décimos de segundos e denominada corrente contínua. Esta corrente apresenta menor luminosidade do que a DR e contribui na preservação do canal.

Neste trabalho, a primeira DR de um relâmpago será referida como primeira DR ou de primeira ordem, enquanto que, as DR's posteriores serão referidas como subseqüentes. O número de DR's por relâmpago é conhecido como multiplicidade e segundo Rakov (1999), após a primeira DR geralmente ocorrem 3 a 5 DR's subseqüentes separadas entre si por dezenas de milissegundos e precedidas por líderes contínuos. Os intervalos de tempo entre DR's consecutivas não dependem da ordem das DR's (Schonland, (1956); Thomson, 1980; Thomson et al., 1984 e Miranda, 2000), além disso, seguem uma distribuição log normal (Thomson et al., 1984 e Miranda, 2000). As DR's e a multiplicidade de um relâmpago são primordiais, uma vez que constituem objetos de estudo neste trabalho.

O caminho visível, construído pelo líder escalonado, geralmente tortuoso e podendo ser ramificado, pelo qual a DR viaja, é conhecido como sendo o canal do relâmpago, o qual é composto por um plasma e possuindo um diâmetro de algumas unidades de centímetro, pode atingir uma temperatura de cerca de 30.000 °C. Este rápido e intenso aquecimento do ar na região do canal resulta em uma súbita expansão do ar dentro do canal e em sua vizinhança, a ponto de gerar um som ruidoso conhecido como trovão.

Um comportamento observado em relâmpagos múltiplos é a ocorrência de bifurcação do canal. A bifurcação consiste em um novo canal construído por uma DR subseqüente do relâmpago. Neste caso o relâmpago pode apresentar 2 ou mais pontos de contato com o solo, dependendo do número de bifurcações. Este fenômeno geralmente está associado a um decaimento da ionização de uma região no antigo canal ou a "aniquilação total" desta região do canal, as quais podem estar associadas, por exemplo, à varreduras de matéria ionizada por ventos. As observações de multiplicidade de um relâmpago através de uma câmara podem ser prejudicadas pelo efeito de bifurcação da

DR, caso o seu canal se bifurque para fora do campo visual da câmara. A observação das bifurcações em relâmpagos é um objeto de estudo neste trabalho, o que também torna as bifurcações primordiais.

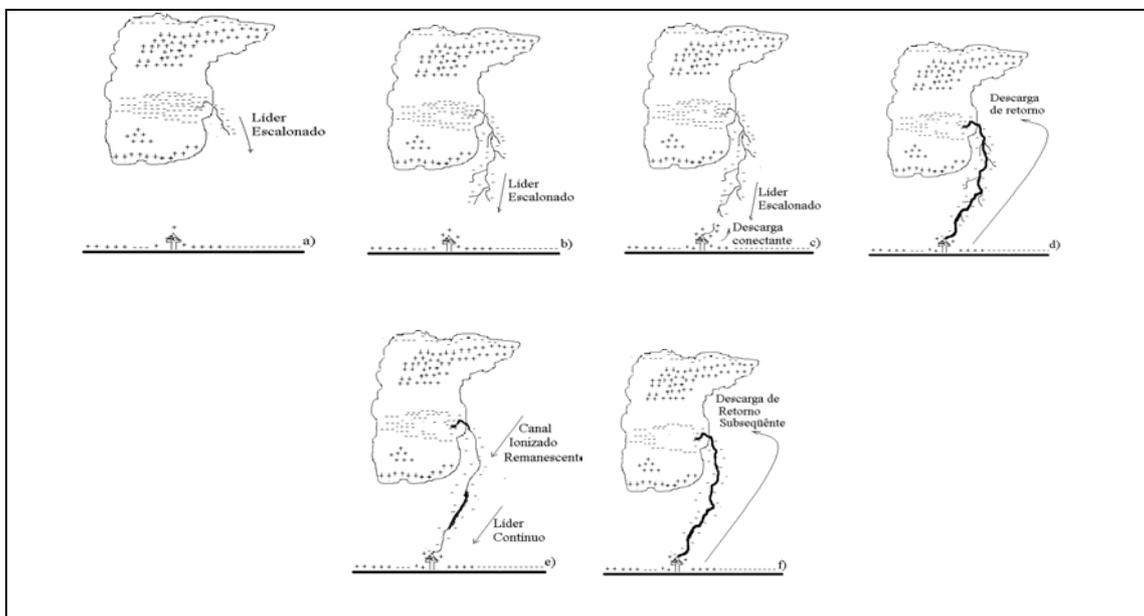


FIGURA 1.2 - Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

FONTE: Miranda (2000).

As DR's emitem radiação eletromagnética, a qual parte dela encontra-se na faixa visível do espectro luminoso. O tempo em que a forma de onda da radiação emitida (campos elétrico e magnético) leva para variar desde o seu início até o seu valor de pico, é basicamente conhecido como tempo de subida. A duração do pulso de radiação é basicamente conhecida como largura do pulso de radiação, muito embora há outras definições na literatura, para o tempo de subida e para a largura de pulso como será visto mais adiante. Estes parâmetros são importantes, pois são grandezas que caracterizam a forma de onda da radiação, e do ponto de vista prático, são utilizados na detecção de pulsos DR's pelos sistemas de detecção de relâmpagos. Além disso, constituem objetos de estudo neste trabalho.

A FIGURA 1.3 mostra uma forma de onda ou registro de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, em escala de microssegundos e observada no solo.

Tipicamente ela inicia-se com uma seqüência de Pulsos de *Breakdown* (PB) na nuvem, cuja polaridade inicial geralmente é a mesma que à da DR que a segue. Algumas vezes, os pulsos PB podem ter amplitudes comparáveis às amplitudes dos pulsos das DR's, como pode ser visto na FIGURA 1.4. As FIGURAS 1.3 e 1.4 mostram também os pulsos associados aos Líderes Escalonados (LE) e às DR's. As variações de campo elétrico associadas ao líder escalonado podem durar desde algumas dezenas a algumas centenas de microssegundos e possuem amplitudes que são uma a duas ordens de grandeza menor do que as amplitudes das DR's correspondentes.

Entre DR's consecutivas em um relâmpago nuvem-solo negativo e após a última DR, podem ocorrer pequenas descargas dentro da nuvem, separadas entre si por alguns milissegundos, as quais são chamadas de descargas K. As variações de campo elétrico devidas às descargas K são conhecidas como variações K.

As etapas dos relâmpagos emitem radiação eletromagnética característica, em uma faixa que pode variar desde VLF (*Very Low Frequency*) até UHF (*Ultra High Frequency*), através da qual elas podem ser observadas. Há na literatura muitos estudos das formas de onda da radiação eletromagnética dos relâmpagos, os quais dividem-se basicamente na observação dos campos elétrico e magnético da radiação, porém, observações de formas de onda de campo elétrico são predominantes na literatura. Uman et al. (1975) apresentam um modelo que relaciona os campos elétrico e magnético da radiação do relâmpago com a corrente da descarga de retorno emissora desta radiação. Este modelo é conhecido como modelo de Linha de Transmissão (*Transmission Line* – TL) e considera o relâmpago como sendo uma antena finita, na qual o pulso de descarga de retorno viaja por essa antena como se estivesse propagando-se em uma linha de transmissão. As suposições feitas nesse modelo são a verticalidade e linearidade do canal do relâmpago e o solo como sendo um condutor perfeito.

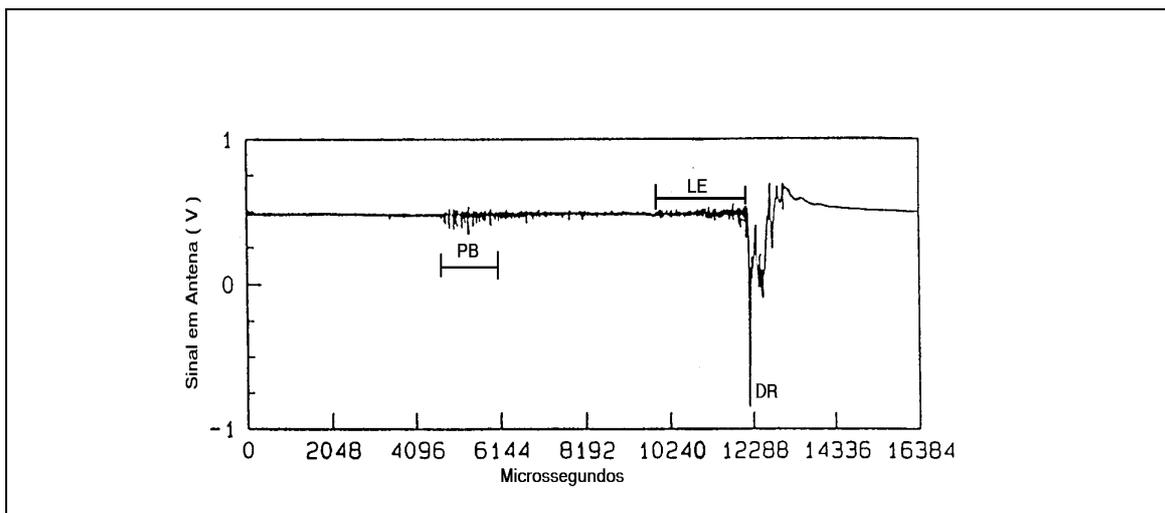


FIGURA 1.3 – Registro de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, ocorrido no verão a uma distância desconhecida. PB é o Pulso de *Breakdown*, LE é o Líder Escalonado e DR é a Descarga de Retorno. FONTE: Adaptada de Rakov (1999).

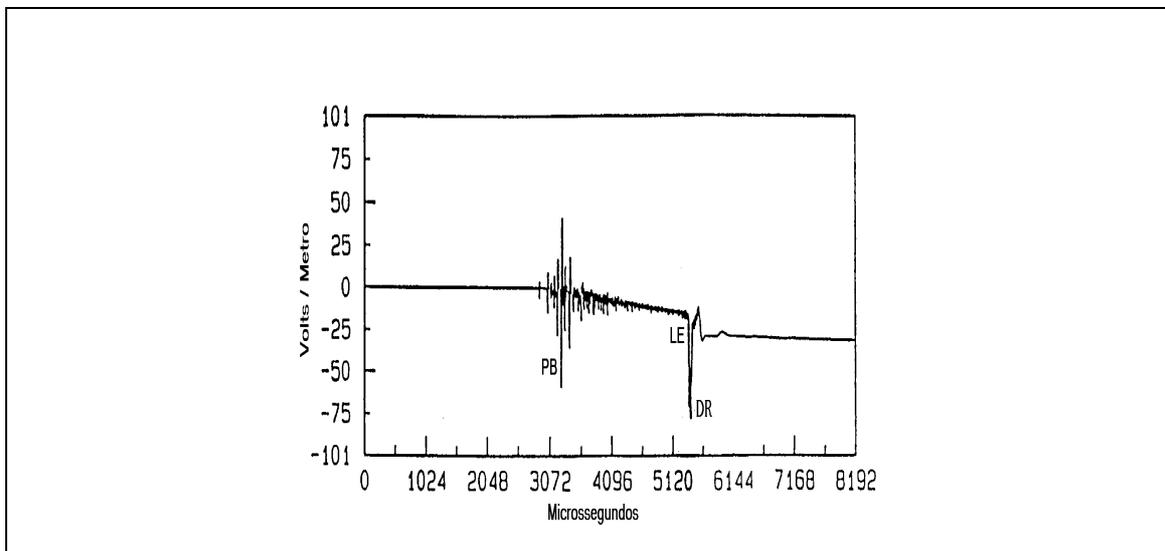


FIGURA 1.4 – Registro de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, ocorrido a 25 km de distância da estação de observação. Tem-se que PB é o Pulso de *Breakdown*, LE é o Líder Escalonado e DR é a Descarga de Retorno. FONTE: Adaptada de Rakov (1999).

A FIGURA 1.5 mostra a geometria da antena e as condições de contorno no plano são satisfeitas ao adicionar a imagem da antena. A FIGURA 1.5 é apresentada em coordenadas cilíndricas onde:

H = altura do canal ou da antena

$l(t)$ = região da antena alcançada pela corrente

$i(z,t)$ = corrente na altura z e no instante t

D = distância horizontal entre o observador e o relâmpago

$$R = (D^2 + H^2)^{1/2}$$

\hat{a}_θ = vetor unitário da coordenada θ

\hat{a}_r = vetor unitário da coordenada radial (r)

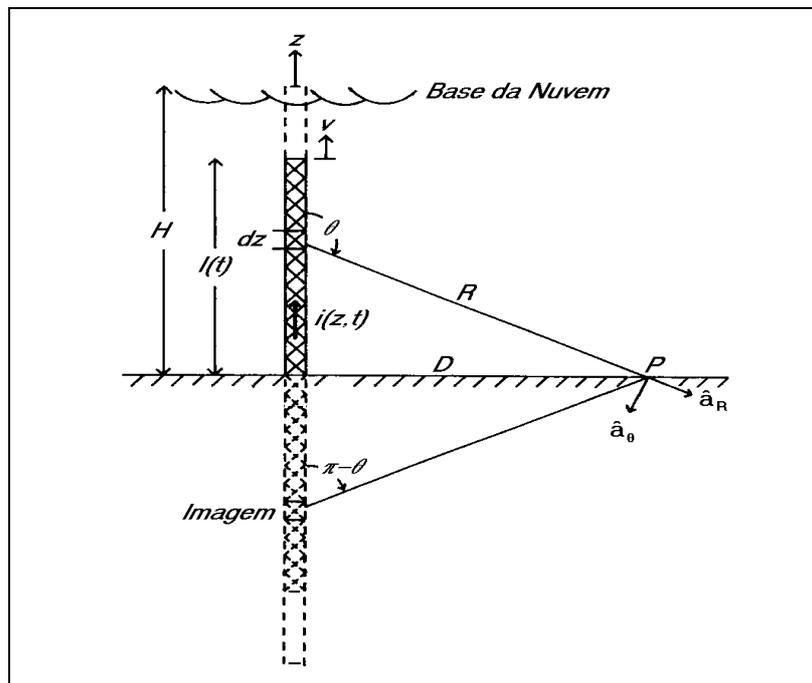


FIGURA 1.5 - Geometria da antena utilizada como um canal ideal de um relâmpago utilizada no modelo TL.

FONTE: Adaptada de Ogawa (1994, p.116).

Considerando um dipolo de corrente vertical infinitesimal de comprimento dz associado a um pulso de corrente $i(z, t)$, os valores infinitesimais dos campos elétrico e magnético em um ponto de observação a uma distância D da base da antena, são a soma dos campos gerados pelos dipolos infinitesimais real e imagem. Os componentes vertical do campo elétrico e horizontal do campo magnético em função de t e D são obtidos pela integração dos campos infinitesimais sobre o canal e como resultados tem-se as equações abaixo para os campos.

$$E_v(D, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \int_0^H \frac{2-3\sin^2\theta}{R^3} \int_0^t i(z, \tau - R/c) d\tau dz + \int_0^H \frac{2-3\sin^2\theta}{cR^2} i(z, \tau - R/c) dz - \int_0^H \frac{\sin^2\theta}{c^2 R} \frac{\partial i(z, \tau - R/c)}{\partial t} dz \right\} \quad (1.1)$$

$$B_h(D, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \int_0^H \frac{\sin\theta}{R^2} i(z, \tau - R/c) dz + \int_0^H \frac{\sin\theta}{cR} \frac{\partial i(z, \tau - R/c)}{\partial t} dz \right\} \quad (1.2)$$

onde

ϵ_0 e μ_0 = Permissividade elétrica e permeabilidade magnética do espaço livre, respectivamente;

c = velocidade da luz.

Na Equação (1.1) o primeiro termo é chamado de componente ou campo eletrostático e é devido à integral da corrente $i(z, t-R/c)$ no tempo, a qual corresponde a uma carga eletrostática. O segundo termo é chamado de componente ou campo elétrico de indução e está associado à existência da corrente $i(z, t-R/c)$ no canal. O terceiro termo é chamado de componente ou campo de radiação, associa-se ao fato de que cargas elétricas em aceleração emitem radiação e é descrito em termos da derivada da corrente. Na Equação (1.2) o primeiro termo é chamado de componente ou campo de indução e o segundo de termo é chamado de componente ou campo de radiação, ambos possuem origens

similares às anteriores, porém considerando agora o campo magnético. Embora Uman et al. (1975), não tenham feito um estudo detalhado de identificação das regiões de domínio dos componentes eletrostático e de radiação, eles afirmaram a partir dos resultados obtidos através do modelo proposto por eles, que a 1 km de distância do relâmpago domina o componente eletrostático e a 10 km de distância o componente de radiação.

A seguir, no Item 1.2 são apresentados os objetivos deste trabalho. Uma revisão bibliográfica detalhada sobre as características dos relâmpagos nuvem-solo negativos, primordiais neste trabalho e das técnicas de observações de interesse nesse trabalho, é apresentada no Capítulo 2. No Capítulo 3, são apresentadas a metodologia e a instrumentação desenvolvida e utilizada neste trabalho. No Capítulo 4 os resultados são apresentados e discutidos. O trata do desfecho deste trabalho, onde são apresentadas as conclusões e são feitas sugestões para trabalhos futuros.

1.2 Objetivos deste Trabalho

A Eletricidade Atmosférica é uma área em crescimento no Brasil e tem como primeiro estudo, o trabalho de Pinto (1988) tratando de observações de campos elétricos e condutividade associados a nuvens eletrificadas na região da América do Sul. A partir de então, novos trabalhos foram feitos e posteriormente foi fundado o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). No decorrer dos anos, o grupo ELAT têm utilizado várias técnicas na observação dos relâmpagos e suas características. Como exemplo podem-se citar: medidas diretas da corrente do relâmpago em torres (Lacerda, 1998; Guedes, 2003); observação a partir de Sistemas de Detecção de Relâmpagos (Pinto Jr. et al., 1999; Pinto et al., 1999; Faria, 2002); indução de relâmpagos (Solorzano, 2003; Pinto Jr. e Cardoso, 2004); observações a partir de informações de satélites (Faria, 2002), observações a partir da radiação do relâmpago (Miranda, 2000; Ferraz, 2001 e Miranda et al., 2003) e a utilização de uma câmera rápida nas observações de características dos relâmpagos (Saba, et al., 2004).

Entre estas técnicas, as observações das características dos relâmpagos a partir de sua radiação por Miranda (2000), Ferraz (2001) e Miranda et al. (2003) e as observações de filmagens obtidas por uma câmera rápida por Saba et al. (2004), são as primeiras desta natureza a serem realizadas no Brasil. As observações de Miranda (2000), Ferraz (2001) e Miranda et al. (2003) foram feitas a partir da derivada do campo elétrico da radiação gerada pelo relâmpago, com uma resolução igual a $37 \mu\text{s}$, o que permitiu analisar eventos em escala de milissegundos, tais como a multiplicidade e tempo entre descargas de retorno dos relâmpagos. Isto motivou no presente trabalho, novas observações com uma resolução superior, podendo então observar detalhes na forma de onda de campo elétrico.

Outros fatores motivadores foram: a necessidade de conhecer-se mais sobre estas técnicas e a influência de suas limitações nos resultados, o caráter inédito de medições e observação de formas de onda de campo elétrico no Brasil e a associação destas medidas com registros feitos por uma câmera rápida e pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos (SDR), todos sincronizados com a hora proveniente do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*-GPS).

Os objetivos deste trabalho podem ser divididos em 2 categorias, sendo de caráter científico e técnico. Os objetivos de caráter científico visam observar características físicas dos relâmpagos e são:

- 1) Observação da multiplicidade dos relâmpagos e dos tempos entre suas DR's observados através de registros com alta resolução temporal, sendo $1,25 \mu\text{s}$ para registros de campo elétrico e 1 ms para registros de câmera rápida;
- 2) Investigação da relação entre o pico de corrente de uma DR observado pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos e o pico de campo elétrico desta DR medido pela antena de campo elétrico e a relação e a influência da distância sobre esta relação;

- 3) Observação do Tempo de Subida e da Largura do pulso de campo elétrico a partir de registros com alta resolução temporal, uma observação que não foi possível nos trabalhos de Miranda (2000), Ferraz (2001) e Miranda et al. (2003), devido à baixa resolução temporal dos seus registros de derivadas de campo elétrico.

Já os objetivos de caráter técnico, visam comparar os resultados obtidos pelas diferentes técnicas consideradas neste trabalho, procurando soluções para a melhoria destas técnicas, e são:

- 1) Desenvolvimento de um sistema para digitalização de formas de onda de campo elétrico com uma resolução temporal igual a $1,25 \mu\text{s}$, sincronizado à hora GPS;
- 2) Avaliação de critérios para detecção de relâmpagos e suas multiplicidades, a partir de registros obtidos por uma única antena de campo elétrico. Esta avaliação será realizada a partir da comparação de resultados obtidos pelo processamento dos registros de campo elétrico por um algoritmo contendo os critérios avaliados, com resultados obtidos pela câmera rápida. Este objetivo busca o aperfeiçoamento da técnica de observação de características dos relâmpagos através de sua radiação;
- 3) Comparação entre valores de multiplicidade dos relâmpagos e dos tempos entre suas DR's, observados através de registros de campo elétrico, imagens de câmera rápida e pelo SDR, observando a eficiência destas técnicas, as influências de suas limitações nos resultados e como estas técnicas podem ser melhoradas;
- 4) Avaliação da eficiência do SDR na detecção de DR's em relação à antena de campo elétrico;
- 5) Avaliação da qualidade dos tempos de subida e larguras dos pulsos da forma de onda de campo elétrico, registrados pelo SDR;

- 6) Observação da influência das bifurcações dos relâmpagos, na detecção da multiplicidade através de registros de câmera rápida.

A relevância deste trabalho encontra-se no fato de que, além da contribuição no entendimento do fenômeno relâmpago, ele contribui com uma maior familiarização com as técnicas de observação através de registros de campo elétrico e imagens de câmera rápida, recentemente adotadas pelo ELAT, avaliando as suas limitações e influências sobre os resultados e apresentando sugestões para melhorias destas técnicas e maior confiabilidade nos resultados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Técnicas de Observações de Relâmpagos de Interesse neste Trabalho

Além das técnicas de observações de relâmpagos já citadas, pode-se citar: medidas fotoelétricas, medidas de campo magnético, observações por registros fotográficos, utilização de espectrômetros e interferômetros, observações através de filmagens e outras (Uman, 1987). Porém, as técnicas de interesse neste trabalho utilizam medidas de campo elétrico da radiação do relâmpago e filmagens, as quais serão abordadas no decorrer deste capítulo.

A obtenção da forma de onda de campo elétrico da radiação gerada por um relâmpago requer uma antena. Consideremos primeiramente a antena de campo elétrico. Esta antena consiste em um sensor metálico com o fim de ser excitado pela radiação que chega até ele. Esta excitação varia de acordo com a radiação que por sua vez comporta-se de acordo com o evento no relâmpago que a gerou. Este sensor metálico pode ser na forma de um disco (antena prato) ou de uma haste (antena *whip*). As antenas *whip* não são desejáveis quando a tempestade está próxima, pois o seu formato provoca maiores distorções e intensificações das linhas de campo elétrico em sua vizinhança, causando um fluxo de cargas a partir delas, conhecido como corrente corona. A corrente corona pode contaminar as medidas, e por isso, as antenas prato são mais preferíveis uma vez que os efeitos devido às correntes coronas são menos acentuados. As antenas prato são chamadas também de capacitivas, pois na verdade são dois discos metálicos dispostos na horizontal e separados entre si por uma certa distância “ d ”, sendo um dos discos aterrados. Este sensor deve ser conectado a um circuito eletrônico integrador. O campo elétrico da radiação induz na antena capacitiva uma certa carga Q , que ao ser descarregada tem-se a sua corrente integrada ao passar pelo circuito eletrônico. Esta integração resulta em uma tensão em função do tempo $V(t)$, a qual como será visto mais adiante é proporcional ao campo elétrico $E(t)$ na antena. Após esta integração, o sinal resultante pode ser armazenado em algum dispositivo, na forma analógica, ou ainda

pode ser primeiramente digitalizado e então armazenado. O mais comum atualmente é a digitalização do sinal e o seu armazenamento é feito de acordo com as conveniências. Uma boa alternativa para o armazenamento de dados pode ser a utilização de discos rígidos e microcomputadores.

Há estudos a partir de campo elétrico gerado por relâmpagos que datam de pelo menos 46 anos atrás; como exemplo tem-se o trabalho de Kitagawa e Kobayashi (1958). De lá até hoje, observações de registro de formas de onda de campo elétrico gerado por relâmpagos tem sido amplamente utilizadas nos estudos sobre relâmpagos em várias partes do globo terrestre, a exemplo de trabalhos mais recentes podem-se citar os trabalhos de Willett et al. (1995), Willett et al. (1998) e Popov et al. (2000). Porém, no Brasil as primeiras observações da radiação dos relâmpagos foram feitas por Miranda (2000), Ferraz (2001) e Miranda et al. (2003). Mais detalhes sobre antena de campo elétrico serão abordados no Capítulo 3.

O esquema para a medição do campo magnético gerado pelo relâmpago é similar ao esquema para a medição do campo elétrico, à exceção da antena que neste caso é uma bobina metálica aberta (FIGURA 2.1a). Este método está fundamentado na lei de Faraday, que relaciona um fluxo de campo magnético variável no tempo através de uma bobina a um campo elétrico não conservativo gerador de uma corrente nesta bobina. Logicamente se a bobina não for fechada como na FIGURA 2.1, poder-se-á medir uma diferença de potencial entre suas extremidades. Aplicando-se a lei de Faraday a 2 bobinas perpendiculares entre si, submetidas a um mesmo campo magnético variável no tempo, pode-se determinar além das tensões nos extremos de cada bobina, a direção da radiação em relação às bobinas. Este método é comumente conhecido como Localização da Direção Magnética (*Magnetic Direction Finder-MDF*).

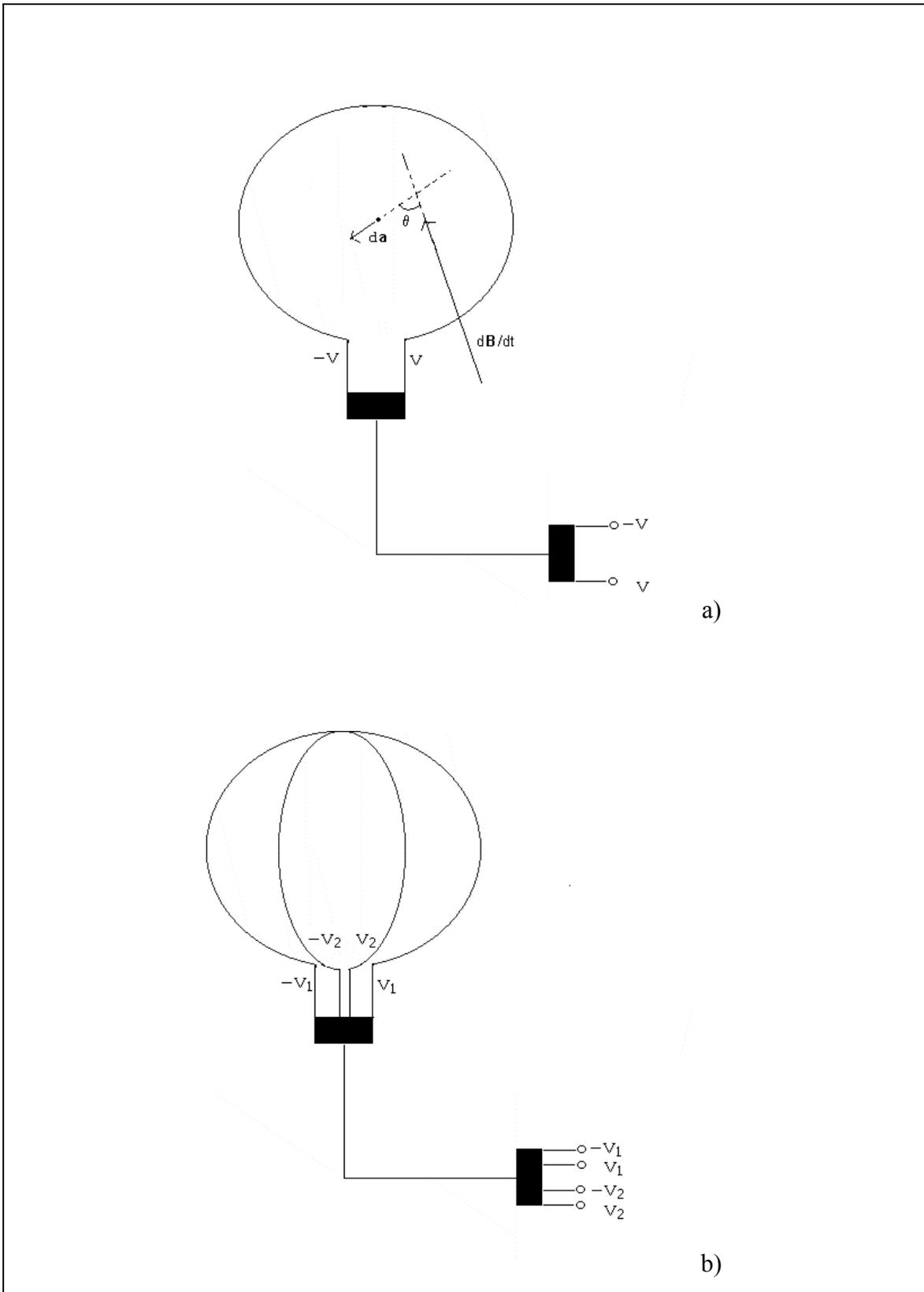


FIGURA 2.1 – Esquema de bobinas magnéticas.

Outra técnica de observação dos relâmpagos é a utilização de uma rede de sensores referida aqui neste trabalho como Sistema de Detecção de Relâmpagos ou SDR. Para medição dos campos elétrico e magnético da radiação dos relâmpagos, os sensores do SDR usam os mesmos mecanismos já comentados (antenas capacitivas e ou bobinas magnéticas), porém possuem dispositivos eletrônicos que as tornam “especiais”, permitindo outras realizações além da medição das formas de onda dos campos. Como exemplo, pode-se citar o registro do instante de ocorrência dos eventos, sincronizado à hora GPS. Há 3 tecnologias para localização de relâmpagos e são elas o método MDF já comentado, o método de Tempo de Chegada (*Time of Arrival* – TOA) e a tecnologia *Improved Accuracy from Combined Technology* (IMPACT). A rede de detecção pode ser composta por 3 tipos de sensores. Aqueles que operam segundo a tecnologia MDF e são referidos como sensores MDF. Aqueles que operam segundo a tecnologia TOA e são referidos como *Lightning Positioning and Tracking System* (LPATS) e os sensores que operam segundo as tecnologias TOA e MDF simultaneamente e são referidos como IMPACT.

Para a localização das DR's, cada sensor MDF determina a direção pela qual a radiação do relâmpago chega até o sensor. Esta direção consiste em uma linha formada por todos os pontos possíveis de serem a localização do relâmpago e a intersecção entre as direções determinadas por 2 sensores, fornece um ponto mais provável de ser a localização do relâmpago. A localização não é possível quando o relâmpago ocorre sobre a linha que une os dois sensores. Para evitar este problema utiliza-se no mínimo 3 sensores, pois desta forma sempre é possível encontrar para estes casos, pelo menos duas direções diferentes que se interceptem. Porém, ao utilizar-se pelo menos 3 sensores, determina-se uma área contendo o ponto de ocorrência do relâmpago como mostra a FIGURA 2.2. Cada sensor MDF, além da detecção da direção de propagação da radiação, detecta características da forma de onda da radiação (tempo de subida, largura do pulso de radiação, amplitude etc) e as envia para uma central de processamento de dados que, através de um algoritmo de otimização, estima a posição do relâmpago dentro da área estabelecida pelos 3 ou mais sensores.

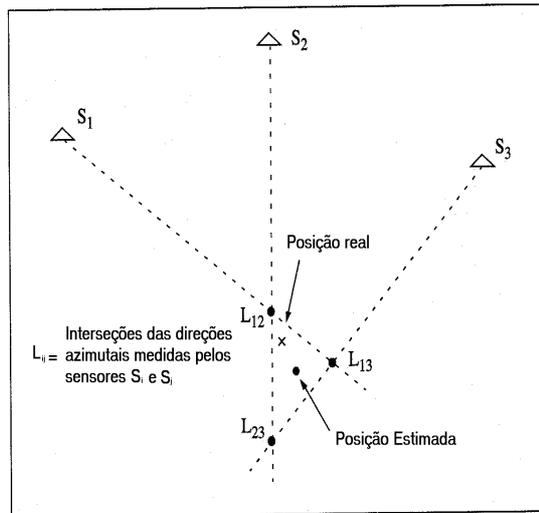


FIGURA 2.2 – Esquema de estimativa da posição de uma descarga de retorno. S_i ($i=1,2,3$) são os sensores operando com a tecnologia MDF.

Os sensores LPATS são dotados de uma antena capacitiva para a medição do campo elétrico em função do tempo e um dispositivo eletrônico para o registro do instante em que a radiação gerada pela DR de um relâmpago chega até o sensor. O conjunto de instantes de chegada medidos pelos vários sensores LPATS constituintes do SDR é utilizado no cálculo da posição da DR. Os sensores LPATS detectam o campo elétrico gerado pelos relâmpagos e após um rápido processamento onde detectam o tempo de chegada, tempo de subida e largura do pulso do campo elétrico, enviam as informações à central de processamento. Na central de processamento, os instantes em que a radiação chegou até cada sensor são utilizados na estimativa do instante de ocorrência da DR. Com o intervalo de tempo entre a ocorrência da DR e a chegada da radiação ao sensor, determina-se um círculo correspondente à todas as possíveis localizações da descarga. A interseção entre os círculos determinados por cada sensor determina uma estimativa para a localização da DR, como pode ser visto na FIGURA 2.3. A precisão na localização da DR depende do número de sensores e da disposição geométrica entre eles. O maior número de sensores implica no fato de que, a interseção entre todos os círculos seja um ponto cada vez mais provável de ser a posição do relâmpago.

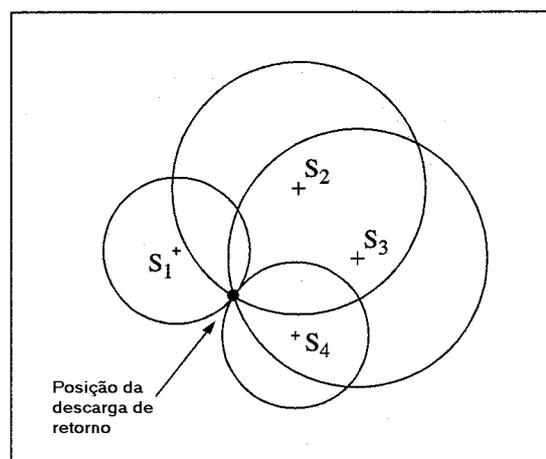


FIGURA 2.3 – Esquema para a estimativa da posição da descarga de retorno através da tecnologia TOA. S_i ($i=1,2,3,4$) são os sensores.

O sensor IMPACT é uma combinação das duas tecnologias já discutidas. Este sensor cruza as informações obtidas pelas tecnologias MDF e TOA, obtendo também informações sobre a forma de onda da radiação (tempo de subida, largura do pulso da descarga de retorno, amplitude de pico etc). As duas tecnologias são utilizadas na estimativa da localização das DR's.

As primeiras versões dos sensores de tecnologias MDF e TOA (sensores LPATS) detectam apenas descargas nuvem-solo. Porém, os sensores IMPACT possuem tecnologia para detectar não apenas as descargas nuvem-solo, mas também, descargas no céu, também classificadas como IN. Além disso, as últimas versões dos sensores baseados na tecnologia TOA (LPATS III e LPATS IV) podem discriminar as descargas como sendo do tipo NS ou IN. A diferença entre o LPATS III e IV, é que versão IV não envia as informações dos relâmpagos discriminados como IN para a central de processamento, ao contrário do que faz a versão III. Isto diminui a possibilidade de contaminação dos dados por IN's, os quais podem ser confundidos pelos sistemas LPATS como relâmpagos positivos. As informações com menor possibilidade de contaminação por descargas IN's são em primeiro lugar, as dos sensores IMPACT, seguidas pelas informações dos sensores LPATS IV e as mais passíveis de contaminações são as informações dos sensores LPATS III. Maiores detalhes sobre o

Sistema de Detecção de Relâmpagos podem ser encontrados no trabalho de Naccarato (2001).

No Brasil, em 2004 um convênio de cooperação técnico-científico foi firmado entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), FURNAS Centrais Elétricas e o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), unificando os SDR's pertencentes a cada uma destas instituições, formando a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). Embora o convênio tenha sido firmado em 2004, os dados dos diferentes sensores já vinham sendo integrados. O RINDAT conteve até junho de 2003, um total de 22 sensores, sendo 10 sensores LPATS III, 6 sensores LPATS IV e 6 sensores IMPACT. O RINDAT passou por um melhoria a partir de Junho de 2003, sendo acrescentados à distribuição de sensores, outras 2 antenas do tipo IMPACT de propriedade do INPE, estando elas localizadas em Campo Grande/MS e Pirassununga/SP. As FIGURAS 2.4 e 2.5 mostram as distribuições dos sensores componentes do RINDAT.

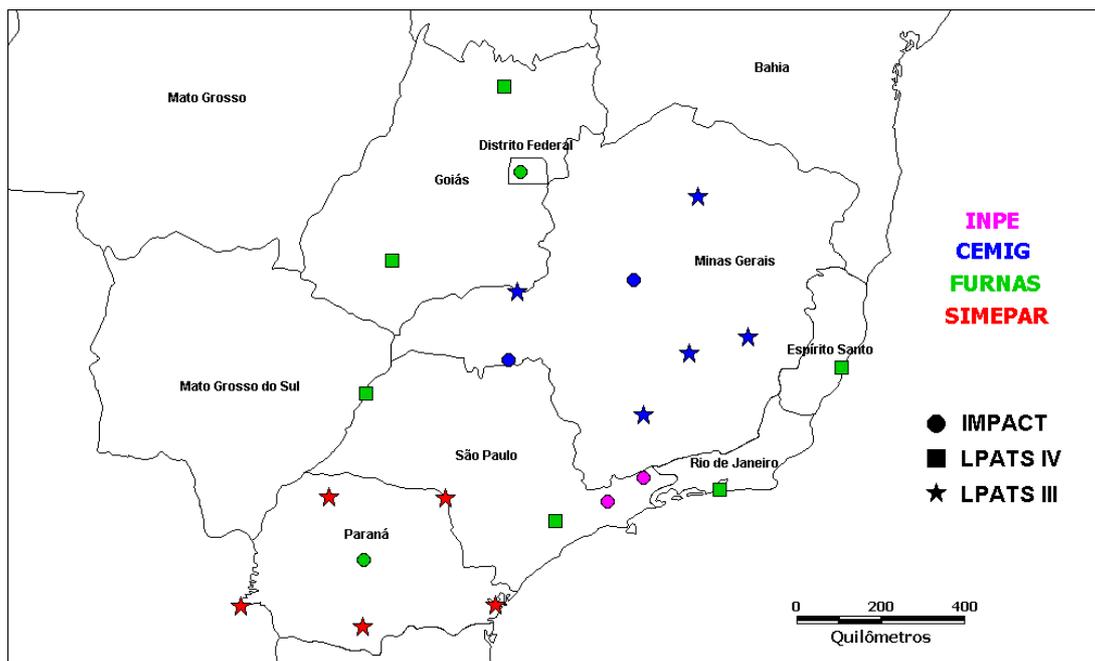


FIGURA 2.4 – Distribuição dos sensores de descargas de retorno no território brasileiro, componentes do SDR (RINDAT) até junho de 2003.
 FONTE: Naccarato (2002).

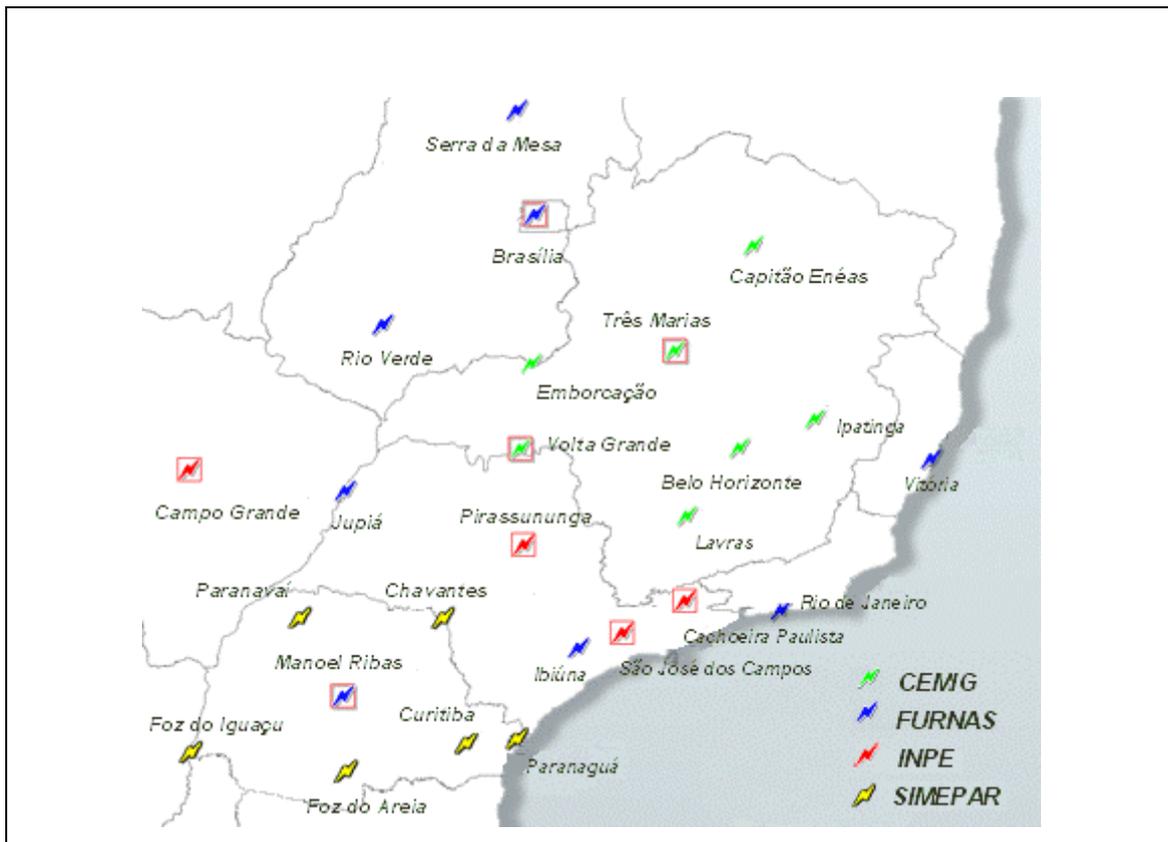


FIGURA 2.5 – Distribuição dos sensores de descargas de retorno no território brasileiro, componentes do SDR (RINDAT) após junho de 2003.

FONTE: http://www.dge.inpe.br/elat/hp2003_800/index.html
(26/03/2004).

O interesse neste trabalho está na configuração apresentada na FIGURA 2.4. A justificativa para este interesse está no fato de que os dados analisados neste trabalho foram obtidos entre Janeiro e Março de 2003. A partir de agora, as abordagens relacionadas ao RINDAT serão referentes à FIGURA 2.4. Além disso, o termo SDR referir-se-á ao RINDAT, porém, a referência a um sistema de detecção que não seja o brasileiro, constituir-se-á pelo nome do sistema de detecção ou pelo termo SDR acompanhado pelo nome do sistema de detecção.

As informações sobre a radiação obtidas e processadas por cada sensor são enviadas através de linha dedicada para 3 centrais de processamento de dados, localizadas em Belo Horizonte/MG (administrada pela CEMIG), Rio de Janeiro/RJ (administrada pela

Furnas Centrais Elétrica) e Curitiba/PR (administrada pelo SIMEPAR), que por sua vez retornam as estimativas sobre a localização, o instante de ocorrência, o tipo de relâmpago e outras características do relâmpago (Naccarato, 2001). Os dados do SDR são classificados como *dados em Tempo Real* ou *dados Reprocessados*. Na obtenção dos dados em tempo real, as informações provenientes dos sensores são processadas pelas centrais através de um programa (LP2000) cujos parâmetros de configuração são fixos (Naccarato, 2001). As informações dos sensores são armazenadas em ordem cronológica em um banco de dados para utilização posterior. As informações em tempo real podem ser menos precisas do que as reprocessadas, pois, por parte da estação de processamento, há um tempo limite de espera das informações enviadas pelos sensores. As informações que superarem este tempo de espera serão desconsideradas no processo de otimização e podem influenciar nos resultados obtidos. Como exemplo de causa de atraso no envio de informações pode-se citar a ocorrência de problemas na linha telefônica. Porém, em se tratando de dados reprocessados, as informações atrasadas podem ser consideradas, resultando em maior precisão nos resultados otimizados. Além disso, os parâmetros de configuração do Módulo LP2000 da central de processamento podem ser variados, de forma a se escolher a melhor configuração. Um cenário corresponde a uma configuração específica dos parâmetros de configuração do Módulo LP2000, sendo único para o modo em tempo real e variável para o modo de reprocessamento (Naccarato, 2001). Os cenários de interesse nesse trabalho são o cenário E (cE) e o cenário H (cH). Para o reprocessamento das informações de um dado relâmpagos são necessárias informações de pelo menos 4 instantes de tempo para o cenário E e pelo menos 3 instantes de tempo e 1 valor de ângulo para o cenário H (o que implica na obrigatoriedade da participação de pelo menos 1 sensor IMPACT).

Entre os dados fornecidos pelo SDR podem-se citar a localização do relâmpago e suas DR's em coordenadas geográficas, bem como suas localizações temporais sincronizadas à hora GPS, com precisões médias iguais a 500 m e 300 ns respectivamente, para eventos dentro da área cujo perímetro é definido pelas linhas que ligam os sensores.

Outra técnica utilizada na observação dos relâmpagos e de interesse neste trabalho baseia-se na utilização de câmeras de vídeo. Esta técnica é utilizada não apenas na

localização do relâmpago, mas como também na observação de eventos e propriedades do relâmpago dentro da escala temporal correspondente à resolução da câmera. Propriedades tais como multiplicidade, número de canais por relâmpagos (bifurcações nos canais do tipo NS), tempo entre DR's e duração do relâmpago já foram observadas por esta técnica (Winn et al., 1973; Brantley et al., 1975; Clifton e Hill, 1980 e Thomson et al., 1984). As primeiras observações associando imagens de vídeo e registros de campo elétrico de relâmpagos foram feitas por Thomson et al. (1984), com o objetivo de investigar os erros nos valores de multiplicidade, número de canais por relâmpago e tempo entre DR's obtidos a partir de sistemas de TV e vídeo. Recentemente, Saba et al. (2004) apresentaram resultados estatísticos para a multiplicidade, número de relâmpagos bifurcados e tempo entre DR's a partir de observações feitas por uma câmera rápida com uma resolução temporal igual a 1 ms, e concluíram favoravelmente a respeito do potencial de uma câmera rápida na análise das características dos relâmpagos e no monitoramento da performance do SDR.

2.2 Multiplicidade e Intervalo de Tempo entre Descargas de Retorno de um Relâmpago

Denomina-se multiplicidade de um relâmpago, ao número de DR's pertencentes a este relâmpago. A multiplicidade de um relâmpago pode variar dependendo da técnica de observação. No caso de observação da multiplicidade através de filmagens, há 2 limitações que podem levar a erros na detecção da multiplicidade do relâmpago. A primeira delas está associada à resolução temporal da câmera. No caso de uma câmera de vídeo comum, cuja resolução temporal é cerca de 33 ms, há a possibilidade de perda de eventuais DR's que ocorram em um intervalo de tempo da ordem de alguns milissegundos. Dado que o tempo entre DR's dura cerca de várias dezenas de milissegundos a algumas centenas de milissegundos, a utilização de uma câmera rápida com resolução igual a 1 ms, praticamente extingue a possibilidade de perda de DR's associadas à resolução temporal. Outra limitação na observação de multiplicidade através de registros de câmeras, está associada à limitação do campo visual da câmera.

Uma ou mais DR's de 1 relâmpago pode(m) bifurcar-se para fora do campo de visão da câmera, ou pode(m) ser obscurecida(s) por árvores ou pela própria chuva. Estas 2 limitações podem resultar em subestimação da multiplicidade.

No caso de observação da multiplicidade através de registros de campo elétrico, uma limitação associada corresponde à possibilidade, em tempestades severas, de formas de onda de campo elétrico de duas DR's de diferentes relâmpagos encontrarem-se no mesmo registro de campo elétrico, podendo levar a uma superestimação da multiplicidade. Além disso, uma baixa resolução temporal do registro de campo elétrico, pode contribuir para perdas ou desconsideração de fracas DR's dentro do alcance da antena, porém à distâncias maiores, o que pode levar a subestimação da multiplicidade. A utilização de registros de campo elétrico com alta resolução temporal da ordem de 1 microssegundo, em conjunto com registros de câmera rápida com resolução temporal da ordem de 1 ms, permite superar as limitações associadas a ambas as técnicas, conferindo alta confiabilidade na detecção de DR's, relâmpagos e suas multiplicidades.

No caso do SDR, a multiplicidade de um relâmpago pode ser influenciada pela eficiência da detecção de DR's, a qual depende de características dos sensores tais como nível de *trigger*, disposição geométrica, distância entre os sensores e também da organização das DR's detectadas, em grupos de relâmpagos, o que por sua vez, depende do algoritmo e seus critérios utilizados no agrupamento das DR's. Com relação à detecção e discriminação de uma DR, a faixa de trabalho dos sensores que utilizam a tecnologia MDF varia de 1 a 350 kHz, o suficiente para preservar as principais características da forma de onda do campo medido. Estes sensores separam os sinais devidos a descargas do tipo NS das descargas do tipo IN ou ruídos, através do “algoritmo de discriminação da forma de onda” discutido por Krider et al. (1980). A discriminação da forma de onda baseia-se em vários critérios em que a forma de onda deve satisfazer. Nem todos os detalhes são disponíveis sobre estes critérios os quais são até certo grau, informações confidenciais dos fabricantes destes sensores (Diendorfer et al., 1998a). Porém, sabe-se que um dos critérios avaliados na forma de onda do campo é a largura do pulso de radiação, comentado mais adiante.

Os critérios do algoritmo de agrupamento das DR's em relâmpagos, levam em conta aspectos espaciais e temporais, a fim de decidir quais DR's pertencem ou não a um relâmpago, e assim detectar a sua multiplicidade. O SDR após estimar a localização da DR detectada, calcula uma elipse conhecida como elipse de segurança. Esta elipse define uma área na qual há 50% de chance de que a DR tenha ocorrido nela. Segundo o algoritmo utilizado pelo SDR, as DR's são agrupadas em um relâmpago com duração máxima de 1 segundo, estando cada DR a uma distância de até 10 km do ponto de impacto da primeira DR e mantendo um intervalo máximo de 500 ms em relação à DR anterior. Além disso, há a definição de um raio de 50 km em relação à primeira DR, tal que, se uma outra DR estiver acima de 10 km de distância e abaixo de 50 km e se sua elipse de segurança estiver parcialmente dentro do raio de 10 km, esta DR será pertencente ao relâmpago. Se a DR ocorrer acima de 50 km ela será considerada de outro relâmpago independentemente da elipse possuir ou não intersecção com a região definida pelo raio de 10 km. O algoritmo ainda tem a condição de que o máximo valor de multiplicidade seja igual a 15, assim todas as DR's além da 15^a serão associadas a um novo evento (Naccarato, 2001). A localização do relâmpago e o valor de pico de corrente são os valores otimizados para a primeira DR. Estas são as mesmas condições presentes no algoritmo executado pelo *National Lightning Detection Network* (NLDN) dos Estados Unidos após uma atualização do sistema realizada entre 1994-1995 (Cummins et al., 1998; Rakov e Huffines, 2003).

A TABELA 2.1 resume resultados de observações de multiplicidade de relâmpagos obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. Na coluna 1 tem-se a indicação dos autores e dos locais de observação, e na coluna 2, as técnicas utilizadas por eles. O número e ou a polaridade dos eventos observados, estão indicados entre parênteses nas colunas 2 ou 3. Na TABELA 2.1 pode-se observar como a multiplicidade varia de acordo com a técnica de observação. Observe que os valores médios de multiplicidade de relâmpagos negativos, obtidos através de técnicas envolvendo registros fotográficos ou de vídeo variam entre 3,0 e 6,4. Já os mesmos valores obtidos através de técnicas envolvendo registros feitos por SDR's variam entre 2,1 e 2,9, enquanto os valores médios obtidos apenas por registros de derivada de

campo elétrico e logicamente de campo elétrico, variam entre 5,1 e 5,7. Segundo Rakov et al. (1994) a multiplicidade independe da localidade geográfica e é bem possível que as diferenças de multiplicidade apresentadas na TABELA 2.1 sejam devidas às diferenças entre as técnicas de observação.

TABELA 2.1 – Resumo dos Resultados de Observação de Multiplicidade Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.

Autor	Técnica utilizada	Multiplicidade (M)
Kitagawa et al. (1962) Socorro, Novo México	Registros de campo elétrico e fotográfico (193 relâmpagos)	$\langle M \rangle = 6,4$
Thomson et al. (1984) Tampa, Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (105 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 4,6$
Rakov et al. (1994) Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (76 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 4,6$
Diendorfer et al. (1998a) Áustria	Registros feitos pelo ALDIS (SDR austríaco) (46.420 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 2,7$
Pinto et al. (1999) Região sudeste do Brasil	Registros feitos pelo SDR brasileiro. Cerca de 1,1 milhões de relâmpagos (positivos e negativos)	$\langle M \rangle = 2,9$ (relâmpagos negativos) $\langle M \rangle = 2,2$ (relâmpagos positivos)
Pinto et al. (1999) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (24 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 5,1$
Miranda (2000) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (28 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 5,7$
Ferraz (2001) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (525 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 2,7$
Saba et al. (2004) São José dos Campos, Brasil	Câmera rápida (98 relâmpagos negativos)	$\langle M \rangle = 3,8$
Orville e Huffines (2001) EUA	Registros feitos pelo NLDN (SDR norte-americano). Acima de 216 milhões de relâmpagos ocorridos entre 1989 e 1998.	$\langle M \rangle_{\text{mensal}} = 2,1$ a $2,5$ (para relâmpagos negativos) $\langle M \rangle_{\text{mensal}} =$ cerca de $1,2$ (para relâmpagos positivos)

Segundo Rakov e Huffines (2003), apenas a utilização de registros de vídeo não é suficiente para uma contagem precisa do número de DR's de um relâmpago, dado que os intervalos de tempo entre as DR's de um relâmpago podem ser menores do que a resolução temporal da câmera de vídeo, ou as imagens podem ser pobremente definidas, por exemplo, graças ao obscurecimento pela água da chuva e estruturas tais como construções e árvores. Por outro lado, o uso apenas de registros de campo elétrico com baixa resolução temporal não é suficiente para discernimento de características do relâmpago em escala de microssegundos e inevitavelmente resulta em perdas de pequenas DR's. Segundo eles, até o momento do seu trabalho, apenas o trabalho de Kitagawa et al. (1962) utilizando registros de campo elétrico e registros fotográficos e os trabalhos de Beasley et al. (1982) e Master et al. (1984), ambos utilizando simultaneamente registros de campo elétrico e de vídeo, praticamente excluíram a possibilidade de perda de pequenas DR's. Assim, tem-se assumido técnicas de observação envolvendo registros de campo elétrico associados a registros fotográficos e ou de vídeos como confiáveis na detecção das multiplicidades dos relâmpagos. A seguir, tem-se um histórico resumido dos principais trabalhos de observação de multiplicidade.

Rakov et al. (1994) compararam seus resultados com os resultados de Kitagawa et al. (1962) e atribuíram a diferença entre o seu resultado e o resultado obtido por Kitagawa et al. (1962), às diferenças entre as técnicas de observação e diferentes espaços amostrais utilizados por eles. Rakov et al. (1994) comentaram que se Kitagawa et al. (1962) tivessem utilizado a mesma técnica que eles, teriam obtido resultados similares, o que os levou a postularem que as propriedades dos relâmpagos descritas em seu trabalho, entre as quais a multiplicidade é uma delas, são aplicáveis a qualquer localidade geográfica.

Diendorfer et al. (1998a) a partir de dados fornecidos pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos austríaco (*Austrian Lightning Detection and Information System – ALDIS*), determinou uma multiplicidade média igual a 2,7. Eles avaliaram estatisticamente características de relâmpagos ocorridos em uma área selecionada na Áustria com um raio de 100 km, ocorridos em 62 tempestades durante o ano de 1996.

Eles também avaliaram a multiplicidade média para vários dias individuais de tempestade, considerando a estação (verão/inverno) e o tipo de tempestade (convectiva/frontal), obtendo uma variabilidade significativa (1,2 a 4,2 DR's por relâmpago) em função destas considerações.

Orville e Huffines (2001) consideraram as distribuições de multiplicidade para relâmpagos negativos e positivos durante o período entre 1989 e 1998. A multiplicidade média mensal obtida a partir de dados fornecidos pelo SDR americano, o NLDN, variou entre 2,1 a 2,5 para relâmpagos negativos, dependendo da estação do ano, e o valor desta média para relâmpagos positivos foi igual a cerca de 1,2 independente da estação.

Entre 1994 e 1995, o NLDN passou por uma atualização na qual foram introduzidos sensores do tipo IMPACT e os algoritmos para processamento das informações foram reformulados. Antes desta atualização, a multiplicidade de um relâmpago era definida como o máximo número de DR's visto por um sensor do tipo MDF, sendo estas DR's separadas da primeira DR por até 2,5^o da primeira DR detectada e dentro de 1 segundo a partir do instante de detecção da primeira DR. Após a atualização do NLDN, o algoritmo para o agrupamento das DR's detectadas em relâmpagos passou a considerar os critérios de agrupamento comentados no início deste texto. A multiplicidade média obtida pelo NLDN entre 1995 e 2001 foi igual a 2,4 para relâmpagos ocorridos na Flórida e 2,11 para relâmpagos ocorridos no Novo México. Estes valores são consideravelmente inferiores aos valores precisos encontrados Rakov et al. (1994) e Kitagawa et al. (1962).

Pinto et al.(1999) analisaram características de relâmpagos ocorridos em 1993 na região sudeste do Brasil. Os dados foram obtidos por uma rede de sensores LPATS localizada no estado de Minas Gerais (Pinto Jr. et al. ,1999). Eles observaram uma multiplicidade média para os relâmpagos negativos maior do que a observada para relâmpagos positivos. Porém, os valores de multiplicidade para o inverno e para o verão foram similares. Os valores de multiplicidade média encontrados por Pinto et al. (1999) foram iguais a 2,9 para relâmpagos negativos e 2,2 para relâmpagos positivos, sendo que, estes valores permanecem os mesmos tanto no verão quanto no inverno. Segundo Pinto et al.

(1999), estes valores são similares aos valores anuais encontrados por Cook e Casper (1992) e Montandon et al. (1992) (citados por Pinto et al., 1999), os quais utilizaram a mesma técnica de medida. Pinto et al. (1999) também analisaram a multiplicidade de 24 relâmpagos negativos a partir da forma de onda de radiação obtida por um sensor de derivada de campo elétrico, instalado em uma torre de aproximadamente 30 m de altura localizada na cidade de São José dos Campos, e obtiveram uma multiplicidade média igual a 5,1, consideravelmente maior do que a obtida através de sistemas de localização e do que os valores apresentados na literatura, os quais estão entre 3 e 4. Este valor está próximo dos valores de multiplicidade obtidos por Diniz et al. (1996) (citados por Pinto et al., 1999) no sudeste do Brasil, através de medidas diretas de correntes de DR's incidentes sobre torres apropriadas. Os valores médios de multiplicidade obtidos por Pinto et al. (1999) através de registros de derivadas de campo elétrico e o valor obtido e por Diniz et al. (1996) (citados por Pinto et al., 1999), estão mais próximos dos valores encontrados por Schonland (1956) e Berger (1967), do que o valor obtido por eles próprios através da rede de sensores LPATS. Pinto et al. (1999) atribuem esta diferença nas multiplicidades médias, à possibilidade de uma baixa eficiência da técnica LPATS em detectar DR's subseqüentes mais fracas e ou a possibilidade de o sistema não discriminar DR's que ocorrem em intervalos de tempo bem pequenos, geralmente menores do que 7 ms, o qual era o menor tempo para a época em que a rede de LPATS podia discriminar 2 DR's, principalmente em momentos de alta atividade de relâmpagos. Miranda (2000) através de registros de radiação de 28 relâmpagos obtidos por uma antena de derivada de campo elétrico, observou uma multiplicidade típica igual a 7, embora por um erro de tipografia esteja apresentado um valor igual a 6. Valores iguais a 5,7, no caso em que se considera a contribuição dos relâmpagos simples, e 6,2 no caso em que se desconsidere esta contribuição, podem ser obtidos a partir da FIGURA 4.3 apresentada por Miranda (2000).

Naccarato (2001) obteve valores de multiplicidade média de relâmpagos ocorridos na região sudeste do Brasil durante os anos de 1999 e 2000, os quais foram iguais a 1,7 para relâmpagos negativos e 1,05 para relâmpagos positivos. Variações sazonais significativas da multiplicidade não foram registradas.

Saba et al. (2004) foram os precursores do uso de câmera rápida nas observações das características dos relâmpagos no Brasil, e talvez possa-se atribuir a eles o primeiro trabalho sistematicamente publicado, baseado em observações de relâmpagos através de uma câmera rápida. Durante os verões de 2003 e 2004 eles registraram imagens de 123 relâmpagos ocorridos em tempestades distribuídas em 15 dias. Eles utilizaram uma câmera rápida *Red Lake 8000S motion Scope*, com resolução igual a 1ms e instantes dos *frames* sincronizados à hora GPS. Eles obtiveram uma multiplicidade média igual a 3,8 para um espaço amostral composto por 98 relâmpagos negativos.

Outro parâmetro bastante observado nos relâmpagos é a distribuição dos intervalos de tempo entre DR's. Este parâmetro é importante, pois, um dos critérios utilizados pelo SDR no agrupamento das DR's detectadas em relâmpagos consiste em um limite para o tempo entre DR's consecutivas de um relâmpago. A TABELA 2.2 resume resultados de observações de intervalos de tempo entre DR's, obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. Na coluna 1 estão indicados os autores e os locais de observação. Na coluna 2 estão indicadas as técnicas de observação e o número de eventos observados. Na coluna 3 tem-se os valores de tempo entre DR's obtidos, onde o símbolo "< >" indica média aritmética e o sub índice "g" indica média geométrica. Na coluna 4 tem-se a conclusão dos autores com relação à dependência do tempo entre DR's com a ordem das DR's. Há ainda na coluna 4, a indicação de observação feita por alguns autores, da distribuição dos intervalos de tempo entre DR's como sendo do tipo log normal. Na TABELA 2.2 pode-se observar que, o tempo médio entre DR's dura cerca de várias dezenas de milissegundos, muito embora intervalos de tempo entre DR's da ordem de algumas centenas de milissegundos têm sido observados. Há uma controvérsia com relação à dependência ou não, dos intervalos de tempo entre DR's, porém maior parte dos autores não observou esta dependência, como pode ser visto na TABELA 2.2. Assim, tem-se assumido que os intervalos de tempo entre DR's não dependem da ordem em que ocorrem as DR's. Outra característica observada a partir da TABELA 2.2, é que a distribuição dos intervalos de tempo entre DR's é log normal. A seguir tem-se um histórico resumido das observações de intervalos de tempo entre DR's.

TABELA 2.2 – Resumo dos Resultados de Observação de Intervalos de Tempo entre DR’S Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.

Autor	Técnica utilizada	Tempo entre DR’s (t)	Dependência com a ordem da DR
Schonland (1956) África do Sul	Registro de campo elétrico (1482 relâmpagos)	$\langle t \rangle = 63,0$ ms $t_g = 51,0$ ms	Não
Kitagawa e Kobayashi (1958) Kanto - Japão	Registro de campo elétrico (102 relâmpagos)	--	Sim
Thomson et al. (1984) Tampa, Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (105 relâmpagos)	$\langle t \rangle = 90,0$ ms $t_g = 69,0$ ms	Não (Log normal)
Rakov e Uman (1990a) e Rakov et al. (1990) Tampa, Flórida	Registros de campo elétrico e vídeo (76 relâmpagos)	$t_g = 60,0$ ms	--
Ferraz (2001) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (525 relâmpagos negativos)	$\langle t \rangle = 74,0$ ms	Não (Log normal)
Miranda et al.(2003) São José dos Campos, Brasil	Registros de derivada de campo elétrico (26 relâmpagos negativos)	$t_g = 49,6$ ms	Não (Log normal)
Saba et al. (2004) São José dos Campos, Brasil	Registros feitos por câmera rápida (98 relâmpagos negativos)	$\langle t \rangle = 90,0$ ms $t_g = 67,0$ ms	--

Kitagawa e Kobayashy (1958) analisaram 102 relâmpagos de tempestades de verão ocorridas em Kanto (Japão), entre os anos de 1954 e 1956 e encontraram uma dependência entre o intervalo de tempo entre as DR’s e a ordem destas DR’s. Contudo, Schonland (1956) a partir de uma análise de 1482 relâmpagos ocorridos na África do Sul, não encontrou uma dependência do intervalo de tempo entre as DR’s e as suas ordens de ocorrência. Cerca de 87 % dos intervalos observados variaram entre 10 e 100 ms, tendo como intervalo mais freqüente 40 ms e intervalo de tempo médio igual a 63

ms. Thomson (1980) também não encontrou dependência do intervalo de tempo entre DR's e as suas ordens para relâmpagos ocorridos em Papua (Nova Guiné). Thomson et al. (1984), a partir de 310 intervalos de tempo entre DR's, provenientes de 105 relâmpagos ocorridos em 1979 em Tampa (Flórida), encontraram um valor médio de 90 ms e uma média geométrica de 69 ms para o intervalo de tempo entre DR's. Também observaram que os intervalos de tempo entre as DR's não dependem da ordem das DR's, em desacordo com Kitagawa e Kobayashi (1958), mas em acordo com Schonland (1956) e Thomson (1980). Além disso, o intervalo de tempo entre DR's segue uma distribuição log normal. Rakov e Uman (1990a) e Rakov et al. (1990), encontraram uma média geométrica de 60 ms para uma amostra de 270 intervalos de tempo entre DR's em 76 relâmpagos negativos ocorridos na Flórida. Esse valor é ligeiramente menor do que o valor obtido por Thomson et al. (1984), resultado este, atribuído à melhoria na técnica de processamento dos dados. Rakov et al. (1994) apresentam um resumo estatístico das características dos relâmpagos, com uma média geométrica igual a 60 ms para o intervalo de tempo entre DR's.

Em um estudo mais recente no Brasil, Miranda et al. (2003) a partir de registros da derivada de campo elétrico de 26 relâmpagos NS negativos, contendo um total de 131 DR's, obtiveram um valor médio igual a 69 ms e uma média geométrica igual a 49,6 ms para o intervalo de tempo entre DR's. Além disso, Miranda et al. (2003) observaram que o intervalo de tempo entre DR's não depende da ordem das DR's, em acordo com Thomson et al. (1994), os quais não encontraram quaisquer variações sistemáticas entre o intervalo de tempo entre DR's e a ordem das DR's. Miranda et al. (2003) também observaram que a distribuição dos intervalos de tempo entre DR's é log normal, em concordância com o resultado apresentado por Thomson et al. (1984).

Saba et al. (2004) também no Brasil, analisaram a distribuição de intervalos de tempos entre DR's a partir de imagens feitas por uma câmera rápida com resolução igual a 1 ms. Eles fizeram um estudo estatístico a partir de 259 intervalos de tempo de um grupo de 98 relâmpagos negativos contendo 372 DR's, e obtiveram um valor médio igual a 90 ms e uma média geométrica igual a 67 ms para o intervalo de tempo entre DR's. Eles

argumentaram que estes resultados são próximos aos resultados obtidos por Miranda et al. (2003).

2.3 Tempo de Subida das Descargas de Retorno dos Relâmpagos

Encontram-se na literatura 2 definições de tempo de subida (TS), as quais são, o “tempo de subida 10%-90%” (lê-se 10 a 90%) e o “tempo de subida 0- E_p (lê-se Zero até o Pico de campo elétrico ou simplesmente Zero a Pico)”. Na primeira definição, o tempo de subida corresponde ao tempo em que o pulso leva para variar desde 10% até 90% do valor do pico de campo elétrico. A segunda definição corresponde ao tempo em que o pulso de campo elétrico leva para variar desde o limiar de ativação dos sensores até o valor de pico, e esta é a definição utilizada pelos SDR's. A TABELA 2.3 resume resultados de observações de TS 's obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. Na coluna 1 estão indicados os autores e os locais de observação. Na coluna 2 estão indicadas as técnicas de observação e a definição de tempo de subida considerada pelos autores. Na coluna 3 tem-se os valores dos tempos de subida, onde o símbolo “< >” indica média aritmética e ainda na coluna 3, entre parênteses estão indicados o número e ou o tipo de eventos utilizados na obtenção dos valores dos TS 's. Observe na TABELA 2.3 que, o valor médio para o tempo de subida é cerca de alguns microssegundos. Além disso, pode-se observar que os valores de TS 's para primeiras DR's são superiores aos valores de TS 's de DR's subsequentes. Observe que os valores de TS 's obtidos pela definição 0- E_p são geralmente maiores do que o valor obtido pela definição 10-90%. Os resultados de Naccarato (2001) mostram uma dependência do TS médio com a polaridade dos relâmpagos e com a estação do ano. Observe na TABELA 2.3 que independentemente da estação (verão ou inverno) os relâmpagos positivos apresentam TS 's médios superiores aos apresentados pelos relâmpagos negativos. Observe também que, as DR's de relâmpagos negativos possuem um TS médio no verão superior ao TS médio no inverno, ao contrário dos relâmpagos positivos, que apresentam um valor de TS médio no inverno, superior ao valor apresentado no verão. A seguir tem-se um histórico resumido das principais observações de TS 's.

TABELA 2.3 – Resumo dos Resultados de Observação de Tempos de Subida Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.

Autor	Técnica utilizada	Tempo de Subida - TS (μs)
Tiller et al. (1976) Flórida	Registros de campo elétrico ($0-E_p$)	$\langle TS \rangle = 3,0 \mu\text{s}$ (62 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 2,6 \mu\text{s}$ (151 DR's subsequentes)
Fisher e Uman (1972) Pensilvânia	Registros de campo elétrico e vídeo ($0-E_p$)	$\langle TS \rangle = 3,6 \mu\text{s}$ (26 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 3,1 \mu\text{s}$ (26 DR's subsequentes)
Lin e Uman (1973) Flórida	Registros de campo elétrico ($0-E_p$)	$\langle TS \rangle = 4,0 \mu\text{s}$ (12 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 1,2 \mu\text{s}$ (83 DR's subsequentes)
Máster et al. (1984) Flórida	Registros de campo elétrico ($0-E_p$)	$\langle TS \rangle = 4,4 \mu\text{s}$ (105 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 2,8 \mu\text{s}$ (220 DR's subsequentes)
Máster et al. (1984) Flórida	Registros de campo elétrico (10%-90%)	$\langle TS \rangle = 2,6 \mu\text{s}$ (105 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 1,5 \mu\text{s}$ (220 DR's subsequentes)
Diendorfer et al. (1998a) Áustria	Registros feitos pelo ALDIS ($0-E_p$)	$\langle TS \rangle = 8,0 \mu\text{s}$ (13640 DR's de relâmpagos simples) $\langle TS \rangle = 8,9 \mu\text{s}$ (13115 primeiras DR's) $\langle TS \rangle = 8,3 \mu\text{s}$ (9899 DR's subsequentes)
Naccarato (2001) Brasil	Registros feitos pelo SDR ($0-E_p$)	$\langle TS \rangle = 4,9 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no verão) $\langle TS \rangle = 4,25 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no inverno) $\langle TS \rangle = 6,52 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no verão) $\langle TS \rangle = 7,11 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no inverno)

Tiller et al. (1976), a partir de registros de forma de onda de campo elétrico de relâmpagos a cerca de 25 km do observador, encontraram valores de tempo de subida ($0-E_p$), variando de 0,8 a 5,3 μs , os quais não pareceram correlacionados com as distâncias de suas respectivas DR's e nem com os picos de campo elétrico. Isto é coerente com o fato de que o tempo de subida não é uma função da distância de observação e com a pouca influência do efeito de propagação dado que as DR's ocorreram próximas do observador. Os valores médios para TS 's encontrados por eles estão apresentados na TABELA 2.3. Fisher e Uman (1972) observaram o fato dos valores médios para os tempos de subida $0-E_p$ (TABELA 2.3), das formas de onda de campo elétrico de primeiras DR's, serem superiores aos valores médios dos tempos de subida das formas de onda de campo elétrico de DR's subsequentes. Lin e Uman (1973), para relâmpagos provenientes de tempestades ocorridas a menos de 10 km de distância do observador sobre o *Kennedy Space Center*, obtiveram valores médios de tempo de subida ($0-E_p$) iguais a 4,0 μs (e desvio padrão (σ) igual a 2,2 μs) para 12 primeiras DR's, enquanto que, para 83 DR's subsequentes eles obtiveram um valor médio para o tempo de subida igual a 1,2 μs com σ igual a 1,1 μs . Uman et al. (1976) observaram um acréscimo no tempo de subida devido ao efeito de propagação para maiores distâncias de propagação. Observaram a ocorrência de um acréscimo de 1 μs em média devido a propagação da radiação por 200 km por sobre o solo (condutor finito) com condutividade entre 0,001 e 0,003 mho/m.

Cooray e Lundquist (1983) considerando a primeira definição de tempo de subida, em um estudo teórico, observaram o efeito da propagação da radiação sobre um solo com condutividade finita sobre o tempo de subida. Eles observaram que o acréscimo no tempo de subida devido ao efeito de propagação em um meio com condutividade finita, é inversamente proporcional ao valor inicial do TS antes de ter sofrido qualquer variação associada ao efeito de propagação. Observaram também que, a influência do efeito de propagação é menor no caso de pulsos mais estreitos de DR's. Assim, Cooray e Lundquist chamam a atenção para a importância de considerar-se o efeito de propagação na estimativa de parâmetros dos relâmpagos tais como o tempo de subida e o pico inicial de campo elétrico. Cooray e Lundquist (1983) compararam seus

resultados teóricos com experimentais e mostraram que um modelo matemático simples poderia ser utilizado na predição dos efeitos de propagação sobre os campos de radiação gerados pelos relâmpagos. Porém, nada discutiram a respeito das aproximações que os levaram a tal formulação e nem mesmo os erros conseqüentes desta aproximação. Estas discussões foram feitas por Cooray (1987).

Master et al. (1984) apresentaram valores médios para os tempos de subida ($0-E_p$) iguais a $4,4 \mu\text{s}$ para 105 primeiras DR's e $2,8 \mu\text{s}$ para 220 DR's subseqüentes, ocorridas na Flórida a um raio de 20 km do observador.

Hojo et al. (1985) observaram tempos de subida (10-90% e $0-E_p$) de formas de onda de campo elétrico de DR's positivas ocorridas a uma distância entre 15 e 50 km do observador, e observaram que em ambos os casos, em média os relâmpagos positivos apresentam tempos de subida maiores do que os apresentados pelos relâmpagos negativos.

Diendorfer et al. (1998a) observaram medidas de tempo de subida ($0-E_p$) a partir de dados provenientes do ALDIS. Eles apresentam valores médios de tempos de subida iguais a $8 \mu\text{s}$ para relâmpagos simples, $8,9 \mu\text{s}$ para primeiras DR's em relâmpagos múltiplos e $8,3 \mu\text{s}$ para DR's subseqüentes. Note que ao contrário de Master et al. (1984), Diendorfer et al. (1998a) apresentam valores bem próximos para os tempos de subida de primeiras DR's e DR's subseqüentes. Diendorfer et al. (1998a) argumentaram que esta diferença provavelmente fosse devida a efeitos de propagação mais pronunciados sobre os seus dados de relâmpagos ocorridos na Áustria do que nos dados de Master et al. (1984) de relâmpagos ocorridos na Flórida. Diendorfer et al. (1998a) observaram um crescimento no tempo de subida com o pico de campo elétrico para relâmpagos simples e múltiplos, tanto para primeiras DR's quanto para DR's subseqüentes.

Naccarato (2001) a partir de dados fornecidos pelo SDR brasileiro para relâmpagos ocorridos em 1999 e 2000, observou que os tempos de subida ($0-E_p$) para relâmpagos negativos são menores do que os tempos de subida para relâmpagos positivos, o que

está de acordo com Hojo et al. (1985). Segundo Naccarato (2001), o fato dos relâmpagos positivos geralmente serem mais intensos, faz com que o seu sinal de radiação leve maior tempo para atingir o valor de pico. Naccarato (2001) também observou que, quanto maior o valor médio do pico de corrente da DR, maior o tempo de subida. Os valores médios de tempo de subida apresentados por Naccarato (2001) foram iguais 4,90 μ s (verão) e 4,25 μ s (inverno) para relâmpagos negativos e 6,52 μ s (verão) e 7,11 μ s (inverno) para relâmpagos positivos. Uma das explicações para o fato dos tempos de subida observados por Naccarato (2001) ser maior do que os valores comumente apresentados na literatura é a possibilidade de maior influência de efeitos de propagação sobre a radiação, dado que o sensor mais próximo da DR, geralmente estava acima de 100 km de distância da fonte de radiação. O tempo de subida medido pela rede de sensores, corresponde ao tempo de subida medido pelo sensor mais próximo da DR, com o objetivo de minimização dos efeitos de propagação.

2.4 Largura de Pulso das Descargas de Retorno dos Relâmpagos

Há na literatura 2 definições para o parâmetro largura de pulso. A primeira pode ser encontrada no trabalho de Cooray e Lundquist (1985), como sendo o tempo entre o início da DR, a partir do ruído de fundo presente no registro de campo elétrico e o primeiro instante após o pico da DR, em que o campo retorna ao valor de início da DR. A segunda definição consiste na diferença entre o instante do pico de campo elétrico da DR e o primeiro instante após o pico da DR, em que o campo retorna ao valor de início da DR. A TABELA 2.4 resume resultados de observações de Largura de Pulso (*LP*) obtidos por diferentes autores e técnicas de observação em diferentes regiões. Na coluna 1 estão indicados os autores e os locais de observação. Na coluna 2 estão indicadas as técnicas de observação e a definição de largura de pulso considerada pelos autores. Na coluna 3 tem-se os valores das larguras dos pulsos, onde o símbolo “< >” indica média aritmética, e na coluna 3, entre parênteses estão indicados o número e ou o tipo de eventos utilizados na obtenção dos valores das *LP*'s.

TABELA 2.4 – Resumo dos Resultados de Observação de Larguras de Pulsos Obtidos por Diferentes Autores e Técnicas de Observação em Diferentes Regiões.

Autor	Técnica utilizada	Largura de Pulso – LP (μs)
Taylor (1963) Oklahoma	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 53 \mu\text{s}$ (47 primeiras e subseqüentes DR's)
Lin et al. (1979) Flórida	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 60 \mu\text{s}$ (7 primeiras DR's ocorridas a 50 km do observador) $\langle LP \rangle = 44 \mu\text{s}$ (20 DR's subseqüentes ocorridas a 50 km do observador) $\langle LP \rangle = 54 \mu\text{s}$ (46 primeiras DR's ocorridas a 200 km do observador) $\langle LP \rangle = 36 \mu\text{s}$ (77 DR's subseqüentes ocorridas a 200 km do observador)
Cooray e Lundquist (1985) Suécia	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 49 \mu\text{s}$ (102 primeiras DR's) $\langle LP \rangle = 39 \mu\text{s}$ (94 DR's subseqüentes)
Cooray e Lundquist (1985) Sri Lanka	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 89 \mu\text{s}$ (91 primeiras DR's) $\langle LP \rangle = 42 \mu\text{s}$ (143 DR's subseqüentes)
Cooray e Lundquist (1985) Sri Lanka	Registros de campo elétrico (Primeira definição)	$\langle LP \rangle = 13 \mu\text{s}$ (26 pulsos de descargas IN)
Naccarato (2001) Brasil	Registros feitos pelo SDR (Segunda definição)	$\langle LP \rangle = 20,18 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no verão) $\langle LP \rangle = 20,00 \mu\text{s}$ (para relâmpagos negativos no inverno) $\langle LP \rangle = 18,15 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no verão) $\langle LP \rangle = 18,51 \mu\text{s}$ (para relâmpagos positivos no inverno)

A partir da TABELA 2.4, pode-se observar que a largura dos pulsos de DR's dura cerca de várias dezenas de microssegundos. Porém, valores da ordem de algumas centenas de microssegundos têm sido apresentados na literatura. Além disso, os valores médios das *LP*'s de primeiras DR's são superiores aos os valores médios das *LP*'s de DR's subseqüentes. Os valores médios para as *LP*'s apresentadas na TABELA 2.4 variam entre 50 μ s e 90 μ s para primeiras DR's e entre 30 μ s e 50 μ s para DR's subseqüentes. Observe que os resultados de Naccarato (2001) indicam uma ligeira dependência da *LP* com a polaridade do relâmpago, sendo os pulsos de radiação de DR's em relâmpagos positivos, mais estreitos do que os pulsos de radiação de DR's em relâmpagos negativos. Os resultados de Naccarato (2001) não mostram uma dependência dos valores médios das *LP*'s com a estação (verão/inverno) do ano. A seguir, tem-se um histórico resumido das principais observações de *LP*'s, apresentado em duas partes. A primeira parte do histórico refere-se à primeira definição de *LP* e suas referências apresentam-se seguidas pelo símbolo "(PD)", referindo-se à Primeira Definição. A segunda parte do histórico refere-se à segunda definição de *LP* e suas referências apresentam-se seguidas pelo símbolo "(SD)", referindo-se à Segunda Definição.

Taylor (1963) (PD) estudou DR's ocorridas a cerca de 300 km de Oklahoma e encontrou um valor médio para a largura de pulso igual 53 μ s, considerando um espaço amostral composto simultaneamente por primeiras DR's e DR's subseqüentes. Este resultado a partir dos dados de Taylor (1963) (PD) é tendencioso, pois segundo Cooray e Lundquist (1985) (PD), devido à maior contribuição de DR's subseqüentes no cálculo do valor médio da largura de pulso, este valor médio de *LP* está deslocado em direção ao valor médio de *LP* para DR's subseqüentes, podendo o valor médio de *LP*'s das primeiras DR's dos dados de Taylor (1963) (PD) ser superior a 53 μ s.

Valores médios de *LP*'s para relâmpagos observados na Flórida foram publicados por Lin et al. (1979) (PD). Estes valores médios são iguais a 54 μ s para primeiras DR's e 36 μ s para DR's subseqüentes. Este valor para as primeiras DR's pode estar subestimado enquanto o valor para DR's subseqüentes provavelmente está correto (Cooray e Lundquist, 1985) (PD). A causa desta subestimação está associada ao fato de que, Lin et

al. (1979) (PD) utilizaram um osciloscópio com um *pré-trigger* igual a 2,5 μs para registrar formas de onda de campo elétrico das DR's. Este valor de *pré-trigger* foi suficiente para o registro integral de formas de onda de DR's subseqüentes, dado que elas não apresentam, ou quando apresentam variações lentas no início da DR, estas variações são pequenas o bastante para serem registradas com um *pré-trigger* de 2,5 μs . Porém este valor de *pré-trigger* não foi suficiente para registrar ou resultou em registro parcial do início das primeiras DR's, as quais apresentam variações lentas mais longas no seu início.

Cooray e Lundquist (1985) (PD) observaram *LP*'s de relâmpagos ocorridos durante 10 noites de tempestades em Sri Lanka e observaram que em média os valores de largura de pulso foram iguais a 89 μs para primeiras DR's e 42 μs para DR's subseqüentes. Além disso, em uma observação similar a partir de relâmpagos ocorridos em tempestades de verão na Suécia, eles encontraram valores médios de *LP*'s iguais a 49 μs e 39 μs para primeiras DR's e DR's subseqüentes respectivamente. Segundo Cooray e Lundquist (1985) (PD), o estudo mais detalhado dos campos de radiação de relâmpagos ocorridos na Flórida, foram devidos a Weidman e Krider (1978) (PD). Infelizmente eles não apresentaram valores das larguras dos pulsos nos seus dados. Porém segundo Cooray e Lundquist (1985) (PD), os dados de Weidman e Krider (1978) (PD) parecem indicar que os valores de largura de pulso para primeiras DR's na Flórida são maiores do que os valores apresentados por Lin et al. (1979) (PD). Cooray e Ludquist (1985) (PD) fizeram esta afirmativa baseados nas análises de exemplos de formas de ondas de DR's apresentadas no trabalho de Weidman e Krider (1978) (PD). Cooray e Lundquist (1985) (PD) observaram também características de registros de campo elétrico de relâmpagos do tipo IN e encontraram um valor médio igual a 13 μs ($\sigma = 4,9 \mu\text{s}$) para largura de pulsos de descargas do tipo IN, a partir de uma amostra contendo 26 formas de onda de campo elétrico.

Rakov (1999) (PD) em uma revisão das características de campos elétrico e magnético gerados por vários processos em relâmpagos do tipo NS (positivos e negativos) e do

tipo IN, argumentou que a duração da largura de pulso de DR's em relâmpagos negativos está entre 30 e 90 μs .

A segunda definição de largura de pulso é geralmente usada quando se trata de SDR's. Este parâmetro é utilizado no algoritmo de discriminação da forma de onda de um pulso de descarga de relâmpago, com o objetivo de distinguir as formas de onda como sendo devidas a descargas de retorno em relâmpagos NS ou devidas a descargas do tipo IN (Diendorfer et al. ,1998a) (SD). Cummins et al. (1998) (SD) fornecem alguns detalhes sobre o algoritmo utilizado na localização de DR's, porém nada ou pouco falam sobre os critérios de discriminação utilizados nesse algoritmo. Segundo Diendorfer et al. (1998a) (SD) nem todos os detalhes sobre os critérios são disponíveis em vista de serem até certo grau confidenciais ao fabricante dos sensores. Diendorfer et al. (1998a) (SD) relataram em seu trabalho que o ALDIS sofreu uma alteração no critério de discriminação, mudando o limiar de largura de pulso de 11 μs , valor padrão fornecido pelo fabricante, para 6 μs . Assim, qualquer pulso com largura menor do que 6 μs é considerado do tipo IN e os pulsos com larguras maiores ou iguais a 6 μs são considerados como do tipo DR. Esta mudança ocorreu com base na possibilidade de ocorrência de DR's com larguras de pulsos inferiores a 11 μs (Ishii e Hojo, 1989), particularmente durante tempestades de inverno. Dentre os critérios de seleção e discriminação de pulsos pelos sensores do ALDIS tem-se a razão entre as amplitudes dos campos elétrico (E) e magnético (B), o tempo de subida e a largura de pulsos. Os valores são apresentados abaixo:

$$E/B \in [0,2; 3]$$

$$\text{Tempo de Subida} \in [0; 24] \mu\text{s}$$

$$\text{Largura de Pulso} \in [6; 31] \mu\text{s}$$

A forma de onda do pulso detectada pelo sensor deve satisfazer estes critérios, afim de que seja classificada como uma DR e então enviada à central de processamento para estimativa de sua posição, pico de corrente etc.

Diendorfer et al. (1998b) (SD) observaram 233 pares de primeiras DR's e 233 de DR's subseqüentes, sendo cada par composto por uma DR observada na Áustria e outra na Flórida. Eles observaram que as larguras dos pulsos tanto das primeiras DR's quanto das subseqüentes na Áustria são cerca de 20% menores do que as larguras dos pulsos correspondentes ocorridos na Flórida, ao contrário dos tempos de subida de primeiras DR's na Áustria, os quais são cerca de 20% maiores do que os tempos de subida de primeiras DR's ocorridos na Flórida. Já os tempos de subida de DR's subseqüentes na Áustria e na Flórida não apresentam diferenças significativas. Com relação aos tempos de subida, as diferenças foram atribuídas a uma atuação diferenciada dos efeitos de propagação sob as diferentes condições de propagação (condutividade do solo) na Áustria e na Flórida. Já com relação a uma explicação para as diferenças entre larguras de pulsos observadas na Áustria e na Flórida, Diendorfer et al. (1998b) (SD) nada comentaram e afirmaram que explicações detalhadas sobre as causas destas diferenças estavam fora dos objetivos do seu trabalho.

Segundo Naccarato (2001) (SD), o seu trabalho apresenta a primeira análise de LP 's no Brasil a partir de dados de sistemas de localização em larga escala, o SDR. Segundo ele, as LP 's dependem da intensidade do pico de radiação, e os relâmpagos positivos apresentam formas de onda de pulsos de radiação mais altas e estreitas do que as formas de onda dos pulsos de radiação dos relâmpagos positivos.

2.5 Relação entre os Picos de Corrente (I_p) e os Picos de Campo Elétrico (E_p)

Atualmente, o estudo da relação entre o pico de corrente (I_p) medido na base do canal do relâmpago e o pico de campo elétrico de radiação associado, medido a diversas distâncias e instantes, tem sido um assunto de grande interesse (veja por exemplo Thottappillil e Uman (1993), Thottappillil et al. (1997) e Willett et al. (1998)).

Há vários estudos teóricos sobre a relação $I_p \times E_p$. Estes estudos são desenvolvimentos de modelos que representem a DR ou revisões sobre estes modelos. O modelo de uma DR corresponde a uma descrição matemática da corrente no canal, geralmente da

corrente medida na base do canal. Há uma diversidade de modelos de DR's e boas revisões sobre estes modelos são apresentadas por Rakov e Uman (1998) e Uman e Krider (1982). Talvez o modelo mais utilizado atualmente seja o modelo TL. Este modelo considera o canal do relâmpago como sendo uma linha de transmissão, pelo qual propaga-se a corrente de DR do relâmpago e a partir do qual ocorre emissão de radiação. Neste modelo as aproximações feitas são: canal reto e vertical, velocidade constante para a DR e uma condutividade infinita para o solo. Detalhes deste modelo são apresentados por Uman et al. (1975), sendo apresentadas as equações que relacionam os campos elétrico e magnético à corrente em função do tempo e da altura no canal. Estas equações foram obtidas teoricamente a partir da resolução das equações de Maxwell. Uman et al. (1975) mostram que para campos distantes, à distâncias maiores do que o comprimento do canal, o qual geralmente é igual a 4 km, a relação entre a corrente e os campos são lineares. A relação entre o campo elétrico e a corrente é dada pela equação abaixo:

$$E_V(D,t) = -(\mu_0 v / 2\pi D) \cdot i(t - D/c) \quad (2.1)$$

onde

D = distância entre o relâmpago e o observador

v = velocidade da DR no canal, suposta constante

c = velocidade da luz

μ_0 = Permeabilidade magnética no vácuo

E_V = campo elétrico vertical no instante t e observado à distância D do relâmpago

i = corrente na base do canal, no instante t

A partir de Uman et al. (1975) este modelo tem sido bastante utilizado, passando por melhorias ou até mesmo contribuindo para modelos mais sofisticados (Nucci et al.

,1990). A equação acima é importante não apenas do ponto de vista teórico, mas também do ponto de vista prático, uma vez que os SDR's utilizam uma relação similar para detectar o valor de pico de corrente das DR's a partir de picos de campo elétrico medidos pelos sensores. Uma incógnita presente na Equação (2.1) e de difícil medição é a velocidade da DR, a qual embora seja assumida como constante no modelo TL, sabe-se que ela decresce com a altura no canal em um relâmpago do tipo NS. Medidas de velocidades de DR's podem ser encontradas nos trabalhos de Idone e Orville (1982) e Mach e Rust (1989). Sabe-se que os valores de velocidades de DR's medidos para DR's próximas ao solo possuem valores típicos entre 1 e 3×10^8 m/s (Mach e Rust, 1989; 1993). Porém, Willett et al. (1989) observando 28 registros de campo elétrico de DR's de relâmpagos induzidos em 1987, observaram que para o modelo TL, a velocidade de $1,51 \times 10^8$ m/s fornece o melhor ajuste para as razões E_p/I_p .

Willett et al. (1998) em um estudo chamado por eles de semi-empírico, a partir da Equação (2.1) e da velocidade determinada por Willett et al. (1989) e de registros de picos de campo elétrico de DR's ocorridas sobre o mar, obtiveram um valor médio para o pico de corrente de relâmpagos negativos igual a 29 ± 15 kA, um resultado em acordo com o resultado obtido por Krider et al. (1996) para o valor médio de pico de corrente o qual foi igual a 28 ± 8 kA.

Além da relação teórica entre E_p e I_p para o modelo TL apresentado em vários trabalhos [Rakov e Uman (1998), Willett et al. (1998), Krider et al. (1996), Popov et al. (2000)], há também diversas expressões empíricas:

$$I_p = [27.0 - 26.6e^{(-0.07D)}]DE_p \quad \text{Rakov e Dulzon (1988)* *} \quad (2.2)$$

$$I_p = (-3.9 \times 10^{-2} DE_p) - (2.7 \times 10^3) \quad \text{Willett et al. (1989)} \quad (2.3)$$

$$I_p = 1.5 - 0.037DE_p \quad \text{Rakov et al. (1992)* *} \quad (2.4)$$

$$I_p = 0.053(DE_p)^{0.928} \quad \text{Cooray (1994)* *} \quad (2.5)$$

* * citados por Torres et al. (1996).

Os SDR's (RINDAT, NLDN, ALDIS, França) aproveitam desta relação linear para a estimativa dos picos de corrente de DR's a partir dos picos de radiação, porém, utilizam equações diferentes das comentadas até aqui, utilizando no lugar do campo elétrico, uma grandeza similar em uma escala estabelecida pelos fabricantes dos sensores IMPACT's e LPATS's. Os picos de corrente são determinados a partir dos picos de campo elétrico através da seguinte relação semi-empírica:

$$I_p = 0,23 S_n \quad (2.6)$$

onde

I_p = pico de corrente em kA

S_n = média das intensidades dos picos de campo elétrico normalizados para 100 km, medidos pelos sensores. Esta grandeza é dada em unidades LLP. O coeficiente 0,23 é um valor padrão fornecido pela *Global Atmospheric Inc.* –GAI (atualmente Vaisala), fabricante dos sensores.

Uma relação similar foi obtida por Idone et al. (1993) a partir de 56 relâmpagos induzidos na Flórida e de um ajuste linear entre picos de campos medidos em unidades LLP (S_n) e normalizados para 100 km. A equação é apresentada a seguir:

$$I_p = 4,2 + 0,17S_n \quad \text{Idone et al. (1993)} \quad (2.7)$$

Com coeficiente de correlação igual a 0,88 e um desvio padrão igual a 4,6 kA, esta relação é totalmente empírica e não se baseia em nenhum modelo de DR. A única suposição é uma similaridade suficiente entre valores dos picos de campos das DR's de relâmpagos induzidos e naturais. A correspondência entre as unidades LLP e a unidade de campo elétrico é $1158 \text{ LLP} = 52 \text{ V/m}$ (Diendorfer et al. (1998a)).

2.6 Performance dos Sistemas de Detecção de Relâmpagos

Há 2 importantes características a se considerar em se tratando da performance dos SDR's e são elas a precisão na localização da DR e a eficiência na detecção dos relâmpagos e suas DR's. A precisão na localização é uma inferência do quão próxima a

localização estimada pelo SDR está da localização real do ponto atingido pela DR. Já a eficiência em detecção de relâmpagos e DR's refere-se à habilidade do SDR em detectar e localizar relâmpagos e DR's, e é calculada como um percentual de relâmpagos ou DR's detectados dentro de um total de eventos ocorridos (Naccarato, 2001).

A estimativa da precisão de localização das DR's pelos SDR's é feita através da elipse de erro associada à localização estimada. Depois de localizada a DR, calcula-se esta elipse em torno da localização, assumindo o valor do seu semi-eixo maior como sendo a precisão na localização da DR. Esta elipse é tal que, a sua região interna possui uma chance de 50% de que a localização real da DR esteja dentro dela (Cummins et al., 1998). Estudos e medidas relacionados à precisão na localização de DR's são descritos por Murphy et al. (1996), Cummins et al. (1998) e Idone et al. (1998a).

As primeiras precisões de localização do NLDN estavam entre 8 e 16 km, e estavam associadas ao erro nos ângulos medidos pelos sensores do tipo MDF, os quais foram estimados entre 1° e 3°. No início de 1992, os sensores MDF foram calibrados e a precisão na localização foi determinada como estando entre 2 a 4 km nas vizinhanças da NASA Kennedy Space Center. Entre 1994 e 1995 o NLDN passou por uma atualização e um valor mediano igual a 500 m para a precisão na localização foi determinado para a maior parte da região continental dos Estados Unidos, com desvios padrões iguais a 1,5 μ s para as medidas do tempo de chegada (método TOA) e 0,9" para as medidas de ângulo (método MDF) (Cummins et al., 1998). Este resultado foi confirmado por Idone et al. (1998a), os quais fizeram comparações entre as posições determinadas pelo NLDN e através de imagens de vídeo de 970 DR's filmadas e detectadas pelo NLDN entre 1994 e 1995. Em 1994, de 751 DR's detectadas e filmadas, foram selecionadas 53 DR's cujo semi-eixo maior da elipse de erro fosse aproximadamente 500 m e para essas 53 DR's, os valores mediano e médio entre as separações entre as posições determinadas pelo NLDN e pelo vídeo, foram iguais a 2,61 km e 4,74 km respectivamente. Já para o ano de 1995, de um total de 219 DR's detectadas e filmadas, foram selecionadas 79 DR's considerando-se um semi-eixo maior da elipse de erro aproximadamente 200 m, e os valores mediano e médio para as separações entre as posições determinadas pelo NLDN e pelo vídeo, foram iguais a 435 m e 625 m respectivamente. Além disso, eles

argumentaram sobre algumas DR's denominadas por eles de "especiais", por atingirem estruturas com localização precisamente conhecidas. Para estes casos, os valores mediano e médio para as separações entre as posições determinadas pelo NLDN e pelo vídeo, foram iguais a 518 m e 484 m respectivamente.

A eficiência em detecção de relâmpagos ou de DR's é um importante parâmetro, dado que nem todas as DR's ocorridas poderão ser detectadas pelo SDR. Exemplo de DR's passíveis de não serem detectadas são as descargas fracas, cujas amplitudes de campo elétrico podem ser inferior ao limiar de ativação dos sensores ou descargas com formas de onda estranhas, as quais não satisfazem os critérios de discriminação. A eficiência de detecção de um SDR depende da eficiência individual de cada sensor em detectar a descarga, do número de sensores componentes do SDR e que contribuem na localização da descarga, da distribuição geométrica ou geográfica dos sensores e da distribuição dos picos de corrente das DR's.

Entre 1992 e 1994 a eficiência do NLDN na detecção de relâmpagos estava entre 65% e 80%. Entre 1994 e 1995 o NLDN passou por uma atualização com o objetivo de obter-se uma eficiência de detecção de primeiras DR's com picos de corrente maiores ou iguais a 5 kA, dentro de um intervalo de 80% a 90%. Idone et al. (1998b), com de auxílio de registros de vídeo associados às informações do NLDN, observaram as eficiências do NLDN entre 1993 e 1995. Para o ano de 1993, de 517 relâmpagos cuja ocorrência foi registrada em vídeos, o NLDN apresentou uma eficiência de detecção de relâmpagos igual a 67%. Para os anos de 1994 e 1995 eles observaram a eficiência de detecção não apenas de relâmpagos, mas também de DR's. Para o ano de 1994 eles observaram eficiências de detecção iguais a 86% para 893 relâmpagos filmados e 67% para 2162 DR's filmadas. Para o ano de 1995 as eficiências observadas foram iguais a 72% para 433 relâmpagos filmados e 47% para 1242 DR's filmadas. Os maiores valores de eficiências para o ano de 1994 em relação a 1995, são atribuídos ao maior número de sensores IMPACT's durante o estágio inicial do aperfeiçoamento do NLDN.

Diendorfer et al. (1998a), analisaram dados provenientes do Sistema de Detecção de Relâmpagos Austríaco (ALDIS), em uma área de raio igual a 100 km e com uma

eficiência de detecção de relâmpagos suposta acima de 90%, considerada até então uma das melhores eficiências já atingidas por sistemas desse tipo em todo o globo terrestre. Porém, uma análise do percentual de relâmpagos simples e da multiplicidade média fornecida pelo ALDIS, parece indicar que esta eficiência seja consideravelmente menor do que 90%. Eles analisaram dados provenientes de 62 dias de tempestade. Quarenta por cento de todos os relâmpagos foram simples, um valor consideravelmente maior do que os valores comumente apresentados na literatura, os quais variam entre 17 a 21%.

Saba et al. (2004) avaliaram a eficiência do SDR com o auxílio de registros de relâmpagos feitos por uma câmera rápida com resolução igual a 1 ms. Eles filmaram 118 relâmpagos durante o verão de 2003, ocorridos sobre a cidade de São José dos Campos, em 15 dias de tempestades, sendo que, desses 118 relâmpagos apenas 80 foram detectados pelo SDR, o que confere uma eficiência de detecção de relâmpagos igual a aproximadamente 68%. Estes 118 relâmpagos filmados continham 389 DR's das quais 183 foram detectadas pelo SDR, o que resulta em uma eficiência de detecção de DR's igual a aproximadamente 47% para o SDR. Estes valores de eficiências ficaram um pouco abaixo dos valores esperados (85-95% para detecção de relâmpagos e 50-60% para detecção de DR's).

2.7 Relâmpagos Bifurcados

Define-se por relâmpago bifurcado, àquele relâmpago múltiplo em que atinge o solo em 2 ou mais pontos diferentes, ou que pelo menos uma de suas DR's subsequentes atinja um ponto no solo diferente daquele atingida pela primeira DR.

As bifurcações dos relâmpagos e seus mecanismos têm sido estudados desde 1935 e Valine e Krider (2002) apresentam várias referências desde esta data. As primeiras observações de bifurcações dos relâmpagos através de câmera de vídeo foram realizadas por Winn et al. (1973) e Thomson et al. (1984). Winn et al. (1973) denominaram os relâmpagos que atingiram o solo em 2 ou mais pontos diferentes por Relâmpagos de Múltiplos Canais (RMC). Eles e Thomson et al. (1984) suspeitavam que os diferentes

canais desses relâmpagos fossem produzidos por diferentes DR's em um único processo de descarga elétrica, e então os intervalos de tempo entre estas DR's deveriam ser similares aos intervalos de tempo entre DR's dos relâmpagos com um único canal. Thomson et al. (1984) descobriram que estas distribuições de intervalos de tempo são similares e concluíram que a maior parte das bifurcações é produzida durante o desenvolvimento das DR's subseqüentes do relâmpago. A duração das variações dos registros de campo elétrico associadas ao processo de líder precedendo DR's criando novos canais (média geométrica = 15 ms) é menor do que a duração dos líderes que precedem primeiras DR's (média geométrica = 35 ms) e maior do que a duração dos líderes que precedem DR's subseqüentes comuns (média geométrica = 1,8 ms) (Rakov e Uman, 1990b).

Thottappillil et al. (1992) usando uma rede de TV mediram 33 distâncias entre DR's bifurcadas em 22 relâmpagos com múltiplos canais, observando variações entre 300 m e 7,3 km, com uma média geométrica igual a 1,7 km. As pequenas separações podem estar subestimadas, devido a dificuldades tais como à má visibilidade do canal causada por árvores em alguns casos.

Alguns estudiosos acreditam que líderes formadores de canais bifurcados, são devidos à variações do campo elétrico na nuvem ou devidos à cargas associadas à formação de canais parciais, que podem exercer importante papel na alteração da geometria dos canais e resultar em bifurcações.

Kitagawa et al. (1962) sugeriram que após a corrente contínua, uma baixa condutividade no canal é mantida entre 7 e 100 ms, período no qual geralmente a DR subseqüente não se bifurca, mas após este período a DR provavelmente se bifurcará. Porém Rakov e Uman (1990a) não encontraram bifurcações após a quarta DR subseqüente no seu banco de dados. Além disso, em 22 dos 115 casos analisados por eles, foram observadas DR's subseqüentes separadas entre si por mais de 100 ms, com ausência de corrente contínua entre si e que não ocorreram bifurcações. Também observaram que a fração de líderes subseqüentes geradores de bifurcações decresce rapidamente com a ordem da DR e que, nenhuma bifurcação foi observada a partir da quinta DR. Estas observações de Rakov e

Uman (1990a) levaram a Rakov et al. (1994) a afirmar que, um canal inalterável em um dado relâmpago, é aparentemente estabelecido apenas após pelo menos 4 DR's consecutivas terem participado do condicionamento do canal. Porém Shao et al. (1995) descreveram um relâmpago que produziu 2 bifurcações após a quinta DR.

Em um estudo mais recente, Valine e Krider (2002) analisaram registros de vídeo de 136 relâmpagos bifurcados, cujas separações entre as bifurcações eram dezenas de metros ou mais. Os registros foram obtidos no verão de 1997 nas proximidades de Tucson (Arizona). Assim como Winn et al. (1973), Valine e Krider (2002) denominaram estes relâmpagos como Relâmpagos de Múltiplos Canais ou RMC. Destes, 88 exibiram 2 ou mais canais completamente separados e distintos entre a base da nuvem e o solo. Estes eles chamaram de Relâmpagos com Novos Canais (RNC) e 37 dos RMC's possuíram uma parte do canal comum, a cima de uma certa altitude, até a nuvem. Estes foram chamados de Relâmpagos de Canais Alterados (RCA). E 11 relâmpagos do tipo RMC, apresentaram canais com ambos os tipos de comportamentos (RNC e RCA). Considerando o número total de relâmpagos (bifurcados e não bifurcados) o qual é igual a 386, o número médio de canais por relâmpago NS obtido por Valine e Krider (2002) foi igual a 1,45. Cerca de 67% dos novos pontos atingidos no solo ocorreram na segunda DR. Segundo Valine e Krider (2002), a presença de uma longa luminosidade contínua nos 3 primeiros (ou mais) *frames* consecutivos após a primeira DR, parece estar associada à uma redução na probabilidade de formação de um novo canal ou alterar o canal na segunda DR (de 47% para 33%), mas a estatística deles foi limitada pela baixa resolução temporal de suas filmadoras.

Saba et al. (2004) a partir da análise de registros de 67 relâmpagos negativos feitos por câmera rápida com resolução igual a 1 ms, encontraram 23 casos (34%) em que os relâmpagos atingiram o solo em 2 ou mais pontos separados entre si por centenas de metros ou mais, sendo esse percentual igual ao percentual encontrado em Tucson (Arizona) por Valine e Krider (2002).

2.8 Peculiaridades da Estrutura Fina da Forma de Onda de Campo Elétrico de Descargas de Retorno Bifurcadas e não Bifurcadas

A estrutura fina da forma de onda de campo elétrico de uma DR foi descrita pela primeira vez por Weidman e Krider (1978). Eles mostraram que as formas de onda de campo elétrico das DR's primárias a viajarem por um canal possuem vários picos de campo elétrico após o pico inicial, os quais são grandes, ao passo que nas formas de onda de campo elétrico das DR's subseqüentes, tais picos são suaves e menos proeminentes. Neste trabalho, são definidas por DR's primárias, àquelas as quais, cronologicamente são as primeiras DR's no relâmpago e àquelas cronologicamente subseqüentes, as quais são as primeiras a viajarem por um novo canal (bifurcado). Weidman e Krider (1978) sugeriram que os multi-picos apresentados nas primeiras DR's, estão provavelmente associados às ramificações do canal, as quais geralmente não ocorrem em DR's subseqüentes.

Vários investigadores mostraram que cerca de 50% dos relâmpagos NS tocam o solo em 2 ou mais pontos diferentes [ex. Rakov et al. (1994)] e tem-se assumido que as DR's primárias sempre emitem radiação cuja forma de onda de campo elétrico corresponde à forma de onda de campo elétrico de uma primeira DR (Guo e Krider, 1982; Master et al., 1984 e Rakov e Uman, 1994).

Muito embora Weidman e Kreider (1978) foram os primeiros a utilizar a estrutura fina de formas de onda de DR's para descrevê-las como bifurcadas ou não, Willett et al. (1995) foram os primeiros a associarem as características da estrutura fina das derivadas de campo elétrico das DR's com o fato delas serem ou não uma DR primária a percorrerem o canal. Segundo Willett et al. (1995) uma DR que viaje pela primeira vez em um canal pode ser distinguida das demais a viajarem neste canal apenas pela estrutura fina da derivada do campo elétrico da radiação emitida pela DR e assim detectar se a DR foi bifurcada ou não. Willett et al. (1995) chegaram a esta conclusão através da análise de registros de vídeo e de campo elétrico simultâneos de 32 relâmpagos NS na Flórida. Destes 32 relâmpagos foram obtidas 52 formas de campo elétrico de DR's e suas derivadas, juntamente às imagens dos respectivos canais. Destas

52 formas de onda, 34 foram caracterizadas pelo registro de campo elétrico, como sendo emitidas por DR's cronologicamente classificadas como primeiras DR's. Através da análise das imagens, 8 destas 34 formas de ondas, foram observadas como sendo radiadas por DR's cronologicamente classificadas como subseqüentes, porém sendo as primeiras a se propagarem por um novo canal ou bifurcação. Os 18 casos restantes classificados pelas formas de onda como sendo resultados de radiação por DR's subseqüentes, foram confirmados pela análise das imagens como sendo devido a radiação emitida por DR's subseqüentes propagando-se por um canal antigo. Em resumo, o trabalho de Willett et al. (1995) confirma a possibilidade de distinguir DR's bifurcadas das não bifurcadas, através da estrutura fina da forma de onda de campo elétrico da radiação emitida e de sua derivada.

2.9 Ocorrência de Picos de Campo Elétrico de DR's Subseqüentes Maiores do que seus Respetivos Picos de Campo Elétrico de Primeiras DR's.

Rakov e Uman (1990a) apresentaram estatística sobre picos de campo elétrico de DR's de 76 relâmpagos NS ocorridos próximos a Tampa (Flórida) em 1979. Eles encontraram médias geométricas para picos de campos elétricos normalizados para 100 km, iguais a 6,2 V/m para 63 primeiras DR's em relâmpagos múltiplos, 4,7 V/m para 13 DR's em relâmpagos simples, 4,1 V/m para 38 DR's subseqüentes bifurcadas e 2,7 V/m para 232 DR's subseqüentes não bifurcadas.

Thottappillil et al. (1992) analisaram registros de vídeo e campo elétrico simultâneos, de 46 relâmpagos múltiplos ocorridos próximos a Tampa (Flórida) em 1979. As localizações das DR's foram obtidas através das filmagens feitas por uma rede de TV's e as distâncias das DR's em relação à antena de campo elétrico variaram de 3,7 km a 11 km, com erros de algumas centenas de metros. Entre os aspectos observados por eles estava a ocorrência de picos de campo elétrico de DR's subseqüentes superiores aos picos de campo elétrico de suas respectivas primeiras DR's.

Cerca de 15 (33%) dos 46 relâmpagos tinham pelo menos 1 e no máximo 5 DR's subseqüentes, com picos de campo elétrico superiores ao pico de campo elétrico da primeira DR. Destes 15 relâmpagos, 9 relâmpagos apresentaram DR's subseqüentes com picos de campo elétrico superiores ao pico de campo elétrico da primeira DR, as quais foram exclusivamente não bifurcadas, 5 relâmpagos apresentaram tais DR's exclusivamente bifurcadas, viajando em canais diferentes do canal da primeira DR e 1 relâmpago apresentou tais DR's, bifurcadas e não bifurcadas. Em termos de contagem de tais DR's, 13 DR's não foram bifurcadas e 12 DR's foram bifurcadas, viajando em um canal diferente do canal da primeira DR.

Thottappillil et al. (1992) também observaram a ocorrência de picos de correntes de DR's subseqüentes superiores aos picos de correntes de suas respectivas primeiras DR's, a partir de medidas diretas de 33 relâmpagos múltiplos negativos que atingiram uma torre instrumentada na Suíça. Segundo Thottappillil et al. (1992), estas medidas foram obtidas a partir de um Atlas de correntes de relâmpagos publicado por Berger em 1972. De 33 relâmpagos NS negativos que atingiram a torre, 5 (15%) continham 1 ou 2 DR's subseqüentes com picos de corrente maiores do que os picos de corrente de suas respectivas primeiras DR's. Em termos de contagem de DR's, os 33 relâmpagos continham um total de 115 DR's subseqüentes dentre as quais 8 destas DR's (7%) apresentaram picos de corrente mais intensos do que os picos de corrente das suas respectivas primeiras DR's.

Thottappillil et al. (1992) finalizam seu trabalho argumentando a partir dos resultados de suas estatísticas, que a ocorrência de DR's subseqüentes com picos de campo elétrico ou corrente maiores do que os correspondentes picos de primeiras DR's não é um fato raro ou excepcional.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

3.1 Metodologia

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de 3 fontes: uma antena de campo elétrico, uma câmera rápida e o SDR. Estes dados correspondem a informações de relâmpagos ocorridos em Fevereiro e Março de 2003. Com relação às informações provenientes da antena de campo elétrico, esta é a primeira vez em que um sistema para medição do campo elétrico da radiação do relâmpago, sincronizado à hora GPS e com resolução igual a $1,25 \mu\text{s}$ é desenvolvido no Brasil. Não apenas este equipamento, mas também as medidas realizadas por ele são inéditas no Brasil. Uma análise mais profunda dos trabalhos de Pinto et al. (1999) e Miranda (2000) mostra que as medidas feitas pelo equipamento chamado por eles de “antena de campo elétrico” na verdade eram derivadas do campo elétrico da radiação do relâmpago, embora isto não invalide seus resultados. Também, pela primeira vez, fez-se uma associação entre medidas de campo elétrico com tais características, registros de câmera rápida com uma resolução igual a 1 ms e dados provenientes do SDR. A metodologia do trabalho pode ser dividida em 6 etapas: desenvolvimento do equipamento, aquisição de dados, redução, desenvolvimento de programas para processamento dos dados, análise dos dados e redação da tese.

O sistema de aquisição de registro de campo elétrico desenvolvido pode ser dividido em 2 partes: a antena de campo elétrico e o sistema de digitalização. O sistema de digitalização por sua vez é composto pela placa de digitalização e um programa para o gerenciamento da aquisição e acoplamento entre a placa e a antena de GPS. A primeira etapa foi o desenvolvimento do sistema de digitalização, iniciado em março de 2000 onde foi feita inicialmente a instalação da placa e posteriormente o seu acoplamento com a antena de GPS. Durante este período vários testes foram feitos em laboratório com o objetivo de verificar a performance da digitalização e a confiabilidade da forma de onda em função da taxa de aquisição. No verão de 2000 para 2001 o equipamento

acoplado a uma antena *whip* foi testado em campanha, onde foram obtidas formas de onda de derivadas de campo elétrico. Estes testes mostraram confiabilidade na digitalização a uma elevada resolução, porém indicavam a necessidade de aperfeiçoamento do programa responsável pelo acoplamento entre a placa e a antena de GPS e do programa utilizado na conversão dos dados em formato binário para o formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Assim, desde abril de 2001 inúmeros testes e aperfeiçoamentos de tais programas foram realizados, até que em março de 2002 um resultado satisfatório foi obtido. Iniciou-se nova etapa no desenvolvimento do sistema para medição de campo elétrico – o desenvolvimento de uma antena de campo elétrico, o qual apresentou resultados satisfatórios em outubro de 2002. Esta etapa foi a de desenvolvimento do equipamento. Em 2003, com todo o aparato já em funcionamento, foram obtidos os dados utilizados neste trabalho.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos de 4 tempestades, sendo uma ocorrida em fevereiro e as outras 3 em março de 2003. O tempo total de registro de ocorrência de relâmpagos é igual a 12 minutos. Os dados obtidos foram registros de campo elétrico, filmagens de relâmpagos por câmera rápida com resolução igual a 1 ms e dados provenientes do SDR brasileiro. Para os registros de campo elétrico e filmagens dos relâmpagos, o sistema de medição de campo elétrico e uma câmera rápida, foram instalados em uma torre de 28 m de altura, localizada no Centro Técnico Aeroespacial (CTA), em São José dos Campos (45,864° W; 23,215° S), a uma altitude de 630 m. A FIGURA 3.1 mostra esta torre.



FIGURA 3.1 - Torre localizada no CTA, em São José dos Campos, onde foram instalados os equipamentos para registro de campos elétricos gerados pelos relâmpagos e a câmera rápida para as filmagens.

FONTE: Adaptada de Miranda (2000).

Esta torre apresenta a vantagem de estar em uma área aberta e livre de possíveis geradores de ruídos. Além disso, possui uma forma hexagonal e janelas em quase todos os lados, permitindo um monitoramento de ocorrência de tempestades em praticamente 360°. Registros de campo elétrico e filmagens dos relâmpagos foram obtidos simultaneamente, ambos sincronizados à hora GPS. Cada aquisição feita pelo sistema de aquisição durou 90 segundos e não mais, para evitar que a uma alta resolução de 1,25 μ s, o banco de dados ficasse extenso a ponto de tornar-se de difícil manipulação. Enquanto isso, a filmadora apontada para a tempestade em modo *stand by* foi manualmente ativada durante a ocorrência de um relâmpago dentro de seu campo de visão. A câmera foi configurada para registrar imagens relativas a um período de 2 segundos, no qual o instante de ativação do registro de imagens encontra-se no centro deste intervalo. Os registros de campo elétrico com duração de 90 segundos, correspondentes à filmagem de um certo relâmpago, eram preservados no banco de dados, enquanto os outros eram aniquilados a fim de amenizar o consumo de espaço. Cada arquivo de 90 segundos de aquisição encontra-se em formato binário (forma bruta) e foi convertido para o formato ASCII em 90 arquivos de 1 segundo por um programa de conversão comentado mais adiante. Geralmente o registro de campo elétrico de um

relâmpago filmado esteve inteiramente contido em apenas um arquivo convertido de 1 segundo. Dos 8 relâmpagos filmados, 7 apresentaram seus registros de campo elétrico em um único arquivo e 1 apresentou o seu registro parcialmente em 2 arquivos consecutivos. Assim, dos 12 minutos de registros de campo elétrico de relâmpagos, 9 segundos continham registros de campo elétrico dos 8 relâmpagos filmados e 711 segundos continham registros de campo elétrico de relâmpagos que não foram filmados, mas associados às informações provenientes do SDR. Esta etapa foi a de aquisição de dados.

A associação entre as filmagens dos relâmpagos e seus respectivos registros de campo elétrico, foi feita pelos tempos sincronizados à hora GPS registrados por ambos os equipamentos (sistema de medição de campo elétrico e câmera rápida). A associação dos relâmpagos com as informações (localização, pico de campo elétrico, pico de corrente, *TS* etc) também foi feita pelos instantes de ocorrência das DR's sincronizados à hora GPS, registrados pelo sistema de aquisição e pelo SDR com precisões de milésimos de segundo.

Para a associação dos pulsos de DR's contidos nos registros de campo elétrico com as informações provenientes do SDR, foram analisados 720 arquivos de registros de campo elétrico. Para cada evento no registro de campo elétrico, foi verificada a sua ocorrência no banco de dados do SDR. Os registros de campo elétrico e filmagens simultâneos foram utilizados em testes de um algoritmo desenvolvido para o processamento de um banco de dados composto pelos relâmpagos que não foram filmados.

Para o processamento dos dados foram desenvolvidos programas para, em primeiro lugar calcular-se com precisão a distância dos relâmpagos em relação ao observador a partir da localização do evento fornecida pelo SDR. Isto foi necessário pelo fato de que a localização fornecida pelo SDR é em coordenadas geodésicas, e para o cálculo da distância entre o evento e o observador foi utilizado o método de Vincenty (Vincenty, 1975). Logo após, foram selecionados para o desenvolvimento do trabalho, todos os pulsos de DR's detectados pelo SDR e presentes nos registros de campo elétrico,

localizados dentro do alcance da antena (350 km). O próximo passo foi o desenvolvimento de um algoritmo para detectar-se DR's e relâmpagos (agrupamento das DR's detectadas). Com este algoritmo foram testados alguns critérios (comentados adiante) para a discriminação de formas de onda e de agrupamento de DR's, utilizados pelos SDR's, com o fim de verificar-se a suas aplicabilidades em registros de campo elétrico provenientes de uma única antena, como a desenvolvida neste trabalho, a qual opera em um contexto diferente do contexto de operação dos sensores do SDR. Esta etapa foi a de desenvolvimento de programas para processamento dos dados.

Após o desenvolvimento dos programas, eles foram utilizados no processamento dos dados e a partir daí iniciou-se a análise dos dados, cujos resultados e discussão são apresentados no Capítulo 4 deste documento.

A antena foi calibrada com o SDR. Para calibração, foram utilizados 37 picos de pulsos de campo elétrico, na verdade, picos de tensão, medidos pela antena de campo elétrico e também detectados pelo SDR. Estes pulsos ocorreram em distâncias variadas dentro do alcance da antena. Valores de picos de campo elétrico associados aos picos de tensão foram determinados a partir da Equação (2.1), onde os picos de corrente e as distâncias das DR's em relação ao observador foram determinados pelo SDR. O valor de velocidade utilizado foi igual a $1,1 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, medido por Idone e Orville (1982) através de um banco de dados composto por primeiras DR's e subseqüentes. Foram obtidas as razões entre os picos de campo elétrico determinados e os picos de tensão medidos pela antena de campo elétrico. A média entre essas razões constitui o fator de calibração da antena com o SDR e é igual a $6,8 \text{ m}^{-1}$ ($\sigma = 0,9 \text{ m}^{-1}$). Assim, cada registro de campo elétrico foi convertido de tensão (V) para campo elétrico (V/m), através da multiplicação pelo fator de calibração.

3.2 Instrumentação

3.2.1 Sistema de Aquisição de Registro de Campo Elétrico

Neste trabalho, o termo “antena ou antena de campo elétrico” refere-se ao conjunto formado pelo sensor metálico e pelo circuito processador do sinal. O termo “antena capacitiva”, refere-se apenas ao sensor metálico em si, um capacitor com capacitância (C_a) igual a 111,2 pF, composto por 2 pratos (discos) metálicos dispostos paralelamente entre si, na direção horizontal. Os pratos que compõem a antena capacitiva são feitos de alumínio, possuem um raio igual a 20 cm, sendo separados entre si por uma distância igual a 1 cm. A separação entre os pratos é feita por meio de 4 barras isolantes de nylon e a área (A) de cada prato é igual a aproximadamente $0,13 \text{ m}^2$. Segundo Uman (1987), o uso da antena prato ou capacitiva é recomendado com o interesse reduzir o efeito corona que é mais intenso na ponta da antena *whip*, e pela facilidade de obter-se a sua capacitância a qual é importante na conversão da tensão induzida no sensor metálico (pratos ou haste) no campo elétrico que gerou tal tensão.

A FIGURA 3.2 é um diagrama em blocos do “sistema de aquisição” de formas de onda de campo elétrico, composto pela antena e pelo “sistema de digitalização” das formas de onda de campo elétrico.

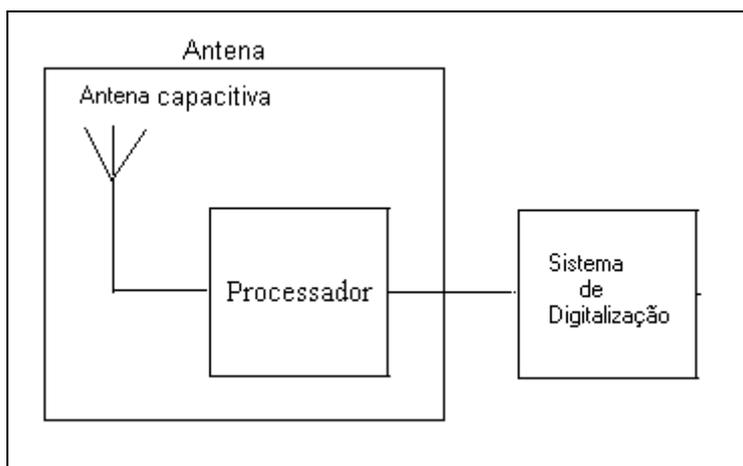


FIGURA 3.2 – Diagrama em blocos do sistema de aquisição de formas de onda de campo elétrico desenvolvido.

A FIGURA 3.3 mostra a antena capacitiva usada neste trabalho. A antena capacitiva é conectada ao processador (caixa retangular abaixo do sensor metálico) por um cabo coaxial. O prato inferior é aterrado conectando-se à malha, enquanto a alma do cabo conectada ao prato superior conduz o sinal induzido ao processador.



FIGURA 3.3 – Antena capacitiva desenvolvida e utilizada na coleta de dados.

O campo elétrico da radiação emitida pelo relâmpago carrega a antena capacitiva com uma certa carga (Q) e estabelece uma tensão (V) entre os pratos da antena capacitiva. Ao ser descarregada, a antena capacitiva alimenta o processador com uma derivada de potencial. Este sinal é integrado por um integrador passivo no processador, cujo sinal de saída é a tensão que o campo elétrico da radiação do relâmpago induziu na antena capacitiva. Este sinal é então digitalizado pelo sistema de digitalização. A relação entre a tensão nos pratos da antena capacitiva e o campo elétrico que a gerou é explicada a seguir. Primeiramente, a relação entre esta tensão e a carga induzida na antena capacitiva é descrita pela Equação (3.1).

$$V=Q/C_a \quad (3.1)$$

A partir das condições de contorno, o campo elétrico próximo à superfície dos pratos, que constituem um capacitor de placas paralelas, é perpendicular e o seu módulo é fornecido pela Equação (3.2).

$$E=Q/\epsilon_0 A \quad (3.2)$$

Eliminando-se Q a partir das Equações (3.1) e (3.2), tem-se

$$E=(C_a/\epsilon_0 A)V \quad (3.3)$$

Assim, a amplitude do campo elétrico (E) pode ser obtida a partir da medição da tensão (V) induzida nos pratos da antena capacitiva, pela radiação do relâmpago. A geometria da antena capacitiva favorece com uma facilidade na determinação da constante de proporcionalidade, o que não é verdade para o caso da antena *whip*.

A FIGURA 3.4 mostra em maiores detalhes o circuito do processador de sinal apresentado na FIGURA 3.2, o qual é dividido em 2 blocos. O primeiro bloco destacado com bordas pretas, consiste no circuito integrador do sinal, um integrador passivo formado pela associação de um resistor com resistência (R) igual a $1\text{ M}\Omega$ em paralelo a um capacitor com capacitância (C) igual a 150 pF . O capacitor do integrador e a antena capacitiva estão em paralelo. Assim, a capacitância resultante do integrador é igual a aproximadamente 261 pF , o que resulta em uma constante de decaimento (τ) igual a $261\text{ }\mu\text{s}$. Este valor de constante de decaimento, foi escolhido com o objetivo de observar-se variações rápidas, tais como TS's da forma de onda de campo elétrico das DR's, as quais duram algumas unidades de microssegundos. Além disso, esta constante de decaimento é bem maior do que as maiores variações de interesse na forma de onda de campo elétrico das DR's, as quais são as LP's, que possuem duração média de aproximadamente $50\text{ }\mu\text{s}$.

A FIGURA 3.5 mostra a curva de resposta em frequência do integrador utilizado, onde a atenuação do sinal (eixo das ordenadas) é apresentada na escala de decibéis (dB). A atenuação igual a 3 dB corresponde a uma frequência igual a 610 Hz . A atenuação máxima observada foi igual a 54 dB , atenuação a partir da qual, o sinal de entrada de máxima amplitude observado na antena, mistura-se com o ruído do sistema de aquisição, cuja amplitude média é igual a 20 mV . Assim, a faixa de frequência em que a antena de campo elétrico trabalha, corresponde a um intervalo contendo frequências iguais a até 316 kHz . Além disso, as formas de onda de campo elétrico estão livres do efeito de *Aliasing*, uma vez que a taxa de digitalização é de 800 kHz , obedecendo assim o teorema de *Nyquist*, o qual diz que a frequência de aquisição deve ser pelo menos duas vezes a máxima frequência observada.

Estes valores característicos da antena de campo elétrico utilizada são similares aos valores característicos da antena utilizada por Kitagawa e Brook (1960) na observação de variações rápidas de campo elétrico associadas a líderes escalonados. Eles utilizaram uma constante de decaimento igual a $70 \mu\text{s}$, uma resposta em frequência variando até 1 MHz, correspondendo a uma atenuação menor ou igual a até 80 dB.

O segundo bloco, também destacado com bordas pretas, contém um circuito isolador, a fim de que a baixa impedância do sistema de digitalização ($50 \text{ k}\Omega$) não interfira na constante de decaimento do integrador. Este isolador é composto por um circuito integrado (CI) TL 081, com uma tensão de alimentação igual a $\pm 12 \text{ V}$. Este CI foi escolhido por possuir elevada impedância de entrada ($10^{12} \Omega$) e por apresentar boa resposta na faixa de frequência de observada. A ligação entre os pinos 2 e 6 garante ganho unitário para o sinal através do isolador. Assim, o isolador permite o acoplamento entre o integrador e o digitalizador, sem haver interferência da impedância do digitalizador sobre a impedância do integrador.

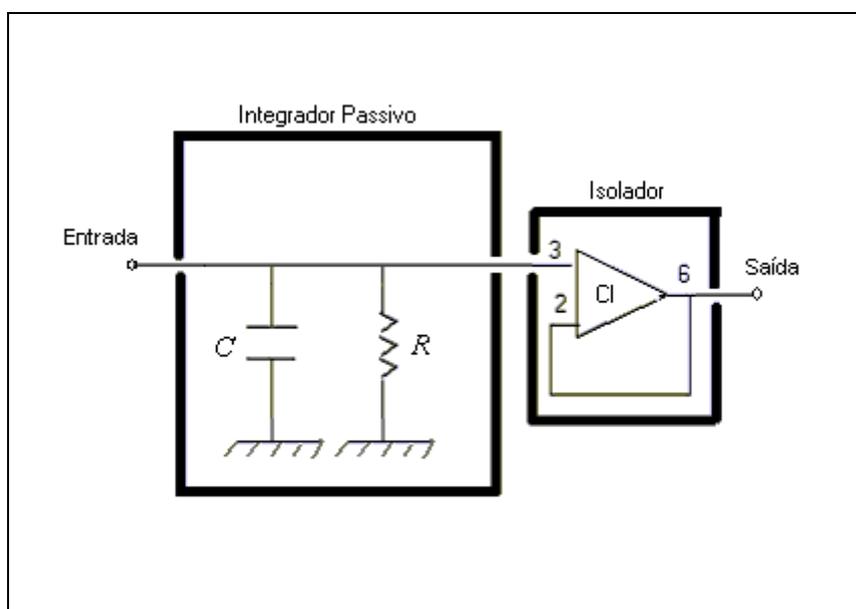


FIGURA 3.4 – Circuito processador do sinal proveniente da antena. Primeiro bloco: integrador passivo ($R = 1 \text{ M}\Omega$, $C = 150 \text{ pF}$). Segundo bloco: Isolador [Circuito Integrado (CI) TL 081, alimentação = $\pm 12 \text{ V}$].

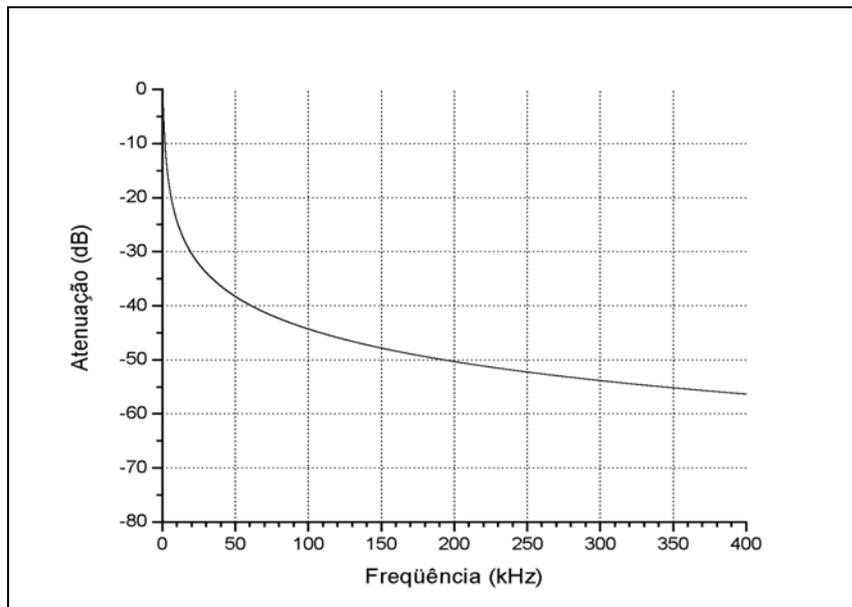


FIGURA 3.5 – Curva de resposta em frequência do integrador utilizado, com uma constante de decaimento igual a $261\mu\text{s}$.

O sistema de digitalização de formas de onda de campo elétrico com a hora com precisão de milésimos de segundo pode ser dividido basicamente em duas partes que trabalham em conjunto: a primeira trata da digitalização da forma de onda de campo elétrico e a segunda trata da obtenção da hora com precisão de milésimos de segundo. A digitalização do sinal analógico recebido da antena é executada por uma placa DAP5200a, com uma resolução igual a $1,25\mu\text{s}$. Esta placa possui 16 canais de entrada para sinais analógicos e 16 canais para saída de sinais digitais. Ela é dotada do sistema operacional DAPL2000, com 32Mb de memória interna. As máximas amplitudes de tensão suportadas pela placa são iguais a $\pm 5\text{ V}$. A segunda parte do sistema de digitalização é composta por uma antena de GPS e um programa fornecido pela *National Marine Electronics Association* (NMEA) como interface, e trata do ajuste da hora do microcomputador com a hora proveniente do GPS. Neste trabalho, este programa é referido simplesmente como “*Software NMEA*”. O *Software NMEA* recebe todas as informações provenientes da antena de GPS, inclusive a hora universal com precisão de milionésimos de segundo e acerta a hora do microcomputador, cujo relógio possui precisão de milésimos de segundo.

A performance da placa de digitalização é gerenciada por um programa em linguagem DAP, o qual configura a placa estabelecendo parâmetros tais como a taxa de aquisição e ordenando à placa a leitura e o registro da hora inicial da aquisição a partir do relógio do microcomputador, o qual já possui sua hora ajustada pela segunda parte do sistema.

A aquisição é gerenciada por um programa escrito em linguagem C++. Este programa tem como funções, a inicialização do programa em linguagem DAP que gerencia a placa de digitalização, a integração entre a primeira parte e a segunda parte do sistema de digitalização, e a configuração da saída de dados (local de saída e formato dos dados). O sinal de campo elétrico digitalizado juntamente à hora inicial da aquisição são gravados no disco rígido na forma de arquivos binários classificados como brutos. A aquisição é contínua dentro do intervalo de tempo de aquisição estabelecido pelo operador do sistema de aquisição, de forma que as informações registradas em instantes em que não ocorrem relâmpagos são consideradas como “lixo”. Tem-se então um programa para a conversão do arquivo bruto em ASCII, o qual, simultaneamente à conversão e a partir dos parâmetros duração do relâmpago e valor de *trigger*, constrói arquivos contendo pulsos de descargas de relâmpagos ou “relâmpagos”. Definidos a duração e um valor de *trigger* do “relâmpago” pelo operador do sistema, o programa de conversão inicia a leitura do arquivo bruto, e quando encontra um valor de registro maior ou igual ao valor de *trigger*, ele passa a converter a partir daí todos os valores do sinal dentro do período definido como a duração do “relâmpago”, criando-se então um novo arquivo de “relâmpago”. Esse procedimento é contínuo até o término da varredura do arquivo bruto. Assim, o arquivo de conversão separa a partir do arquivo bruto os arquivos de “relâmpago” dos arquivos “lixo”.

O ajuste do relógio do microcomputador pelo *Software* NMEA é feito a cada minuto, sendo esta frequência de ajuste considerada razoável, a fim de evitar-se uma considerável defasagem da hora do microcomputador em relação à hora GPS e a perturbação da performance da placa de digitalização para maiores frequências de ajuste.

3.2.2 Câmera Rápida

Neste trabalho foi utilizada uma câmera rápida *Red Lake 8000S Motion Scope High Speed*. Cada frame é dotado do seu instante sincronizado com a hora GPS e a taxa de aquisição utilizada nos registros foi igual a 1000 *frames* por segundo. As imagens foram armazenadas primeiramente na memória da câmera e posteriormente em um disco rígido de um microcomputador, a fim de liberar espaço na memória da câmera para novos registros. Durante as aquisições, a câmera foi colocada em *stand by* direcionada para a tempestade. O *trigger* foi feito manualmente no instante da ocorrência de um relâmpago no campo visual da câmera, estando a câmera ajustada para registrar 1 segundo antes e após o instante de *trigger*. Após a liberação da memória, a câmera era novamente colocada em *stand by* para um novo registro de relâmpago.

3.2.3 O Sistema de Detecção de Relâmpagos

O Sistema de Detecção de Relâmpagos brasileiro utilizado neste trabalho foi comentado no Item 2.1 e sua configuração apresentada na FIGURA 2.4. Durante o período de aquisição de dados entre Janeiro e Março de 2003, as antenas IMPACT de São José dos Campos e Cachoeira Paulista, por problemas técnicos, não participaram na detecção e localização das DR's ocorridas nas tempestades observadas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Identificação de Descargas de Retorno e Multiplicidade de um Relâmpago a Partir do Registro de Campo Elétrico Obtido por uma Única Antena

A identificação de um relâmpago e das DR's contidas nele a partir do registro de campo elétrico, envolve basicamente 2 etapas. A primeira etapa é a detecção das DR's e a segunda etapa é o agrupamento destas DR's em relâmpagos. Como já foi comentado no capítulo anterior, os SDR's detectam os relâmpagos e suas DR's executando estas duas etapas e vários estudos tem sido feitos em busca de melhores resultados quanto a performance do SDR. Porém, nenhum trabalho tem sido direcionado na elaboração de uma metodologia para a detecção de DR's e relâmpagos, a partir do registro de campo elétrico de uma única antena como a desenvolvida neste trabalho.

As principais dificuldades encontradas nas etapas de detecção de DR's e seus agrupamentos são a possibilidade de ocorrência de descargas K com amplitudes comparáveis às das DR's, e com menor possibilidade, a ocorrência de 2 relâmpagos diferentes quase simultâneos, de forma que seus registros de campo elétrico possam se superpor em um só arquivo, dando a idéia de um só relâmpago com um maior número de DR's. Para evitar isto são utilizados critérios tanto na detecção das DR's quanto no agrupamento destas DR's em relâmpagos. No caso do SDR, na etapa de detecção de uma DR, o pulso que excita os sensores IMPACT, por exemplo, primeiramente é classificado como sendo do tipo DR ou IN, por um critério de discriminação que considera a sua largura. Logo após, as informações sobre este pulso são enviadas para a central de processamento, a fim de estimar-se a sua localização, caso seja classificado como de DR. Após a detecção e localização das DR's, a segunda etapa consiste no agrupamento destas DR's como já foi comentado no capítulo anterior, e as condições consideradas neste processo são tratadas aqui neste trabalho como critérios de agrupamento.

Este item trata da avaliação de critérios utilizados na detecção de DR's e relâmpagos, a partir do registro de campo elétrico feito por uma única antena. Para tal, foi desenvolvido um algoritmo que executa 2 fases: a detecção das DR's e o agrupamento das DR's detectadas em relâmpago. Para a avaliação dos critérios, o algoritmo foi aplicado sobre os registros de campo elétrico de 8 relâmpagos filmados. A multiplicidade obtida por este procedimento, foi comparada com o valor obtido através da câmera rápida, e através da maior ou menor discrepância entre os dados reais, os parâmetros eram ajustados.

Para a fase de detecção de DR's foram avaliados os critérios das amplitudes dos pulsos e o critério das larguras de pulsos. O critério das amplitudes é estatístico, enquanto o critério da *LP* baseia-se na análise da forma de onda do pulso.

Para a fase de agrupamento das DR's em relâmpagos, foram considerados como critérios, um valor máximo para a separação temporal entre as DR's consecutivas do relâmpago e a duração máxima deste relâmpago.

4.1.1 Aplicação do Critério das Amplitudes na Detecção de um Pulso de Descarga de Retorno

O critério das amplitudes é baseado na média e no desvio padrão das amplitudes dos pulsos presentes no registro de campo elétrico e esta idéia foi sugerida por Miranda et al. (2003), os quais usaram um critério estatístico para a detecção de descargas K presentes em registros de campo elétrico similares aos registros analisados neste trabalho. Para um dado registro, ou forma de onda de campo elétrico de um relâmpago, Miranda et al. (2003) primeiramente eliminaram do registro de campo elétrico, os pulsos de campo elétrico associados a descargas de retorno e os possíveis candidatos a tal, restando apenas pulsos de ruído e de descargas K. O valor médio (\bar{x}) e o desvio padrão (σ) das amplitudes remanescentes foram obtidos e limites superior e inferior foram estabelecidos como sendo $\bar{x} + 3\sigma$ e $\bar{x} - 3\sigma$ respectivamente. Das amplitudes remanescentes, as localizadas dentro do intervalo delimitado por esses limites foram

consideradas ruído e as localizadas externamente foram consideradas descargas K. Os resultados provenientes desse método apresentam um erro associado à subjetividade na detecção e eliminação das descargas de retorno. Acredita-se ser pequeno este erro, dado que Miranda et al. (2003) obtiveram resultados coerentes com os resultados apresentados na literatura. O objetivo é a verificação da possibilidade de aplicação desse critério na discriminação dos pulsos de campo elétrico como sendo devidos às descargas do tipo DR ou outros tipos quaisquer.

Neste trabalho, a aplicação deste critério consiste em primeiro calcular a amplitude média e o desvio padrão, considerando todos os valores de amplitudes (ruídos, descargas K e de retorno etc) em que o sinal assume em todo o período de duração do registro. Em segundo lugar, limites superior e inferior ($\bar{x} + 3\sigma$ e $\bar{x} - 3\sigma$ respectivamente) são estabelecidos. Todos os pulsos com amplitudes localizadas dentro do intervalo limitado pelos limites superior e inferior, são estatisticamente com 98% de chance, considerados ruídos, uma vez que a amostra a partir da qual foram obtidos tais limites, é constituída em maior parte por ruídos que ocorrem dentro da nuvem e pelo ruído do equipamento. Assim, fora deste intervalo, resta uma população composta por descargas de retorno e descargas K, sendo esta população predominada em grande parte pelas descargas K. Em terceiro e último lugar, aplica-se novamente este critério considerando-se apenas esta população remanescente, de forma que as amplitudes localizadas dentro do intervalo delimitado pelos novos limites inferior e superior obtidos da nova população, são estatisticamente com 98% de chance, considerados descargas K e os pulsos com amplitudes localizadas fora deste intervalo são as descargas de retorno.

Dentre 8 registros (36 descargas de retorno filmadas) de campo elétrico analisados segundo este critério, em 4 registros contendo 28 pulsos de descargas de retorno filmadas, nenhuma foi detectada e este critério então não é aconselhável. A FIGURA 4.1 é um exemplar que se encaixa neste quadro. O gráfico superior corresponde a um registro de campo elétrico de um relâmpago ocorrido no dia 21/02/2003, às 00:52:29,539 horas (UT – *Universal Time*), em uma tempestade sobre São José dos Campos, contendo 7 pulsos de descargas de retorno filmadas. Estes pulsos estão

indicados pelas setas e estão enumerados. Os valores de média e desvio padrão para a obtenção dos limites foram $\bar{x} = 10,7$ V/m e $\sigma = 6,6$ V/m respectivamente, tendo como valores finais para os limites superior e inferior, amplitudes de campo elétrico iguais a 30,6 V/m e -9,2 V/m respectivamente. Para observar o resultado da aplicação do critério, após o estabelecimento dos limites inferior e superior, o programa varreu todo o registro de campo elétrico e construiu um “novo” registro de campo elétrico preservando apenas os pulsos que fossem classificados pelo critério como DR’s. O gráfico inferior corresponde ao novo arquivo formado durante a aplicação do critério e mostra que nenhum pulso foi detectado e classificado como descarga de retorno, isto provavelmente devido aos altos valores obtidos para os limites.

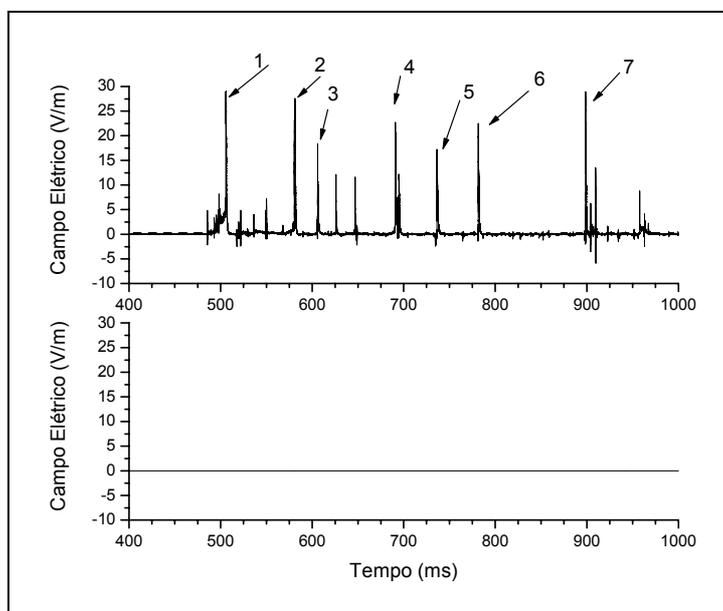


FIGURA 4.1 – Resultado da aplicação do critério $\bar{x} \pm 3\sigma$ duas vezes sobre todo o registro gráfico superior do relâmpago ocorrido no dia 21/02/2003, às 00:52:29,539 horas (UT), em uma tempestade sobre São José dos Campos. Neste gráfico e nos demais, As setas indicam as descargas de retorno filmados e numeração a ordem destas descargas de retorno.

A FIGURA 4.2 mostra outra possibilidade observada neste estudo. A filmagem correspondente ao registro de campo elétrico mostrado na FIGURA 4.2 mostra que o primeiro pulso corresponde a uma descarga do tipo IN, enquanto os outros pulsos (1,2 e

3) correspondem a descargas de retorno do relâmpago filmado. O gráfico inferior da FIGURA 4.2 mostra que descargas IN com amplitudes comparáveis à das DR's podem ser classificadas pelo critério como DR's. Além disso, a FIGURA 4.2 evidencia a possibilidade de subestimação da multiplicidade do relâmpago. Apenas 1 dos 3 pulsos de descargas de retorno do relâmpago foi classificado como sendo do tipo DR. Os valores dos parâmetros considerados pelo critério foram $\bar{x} = 8,1$ V/m e $\sigma = 5,3$ V/m, resultando em valores de limites superior e inferior iguais a 24,2 V/m e $-7,9$ V/m respectivamente.

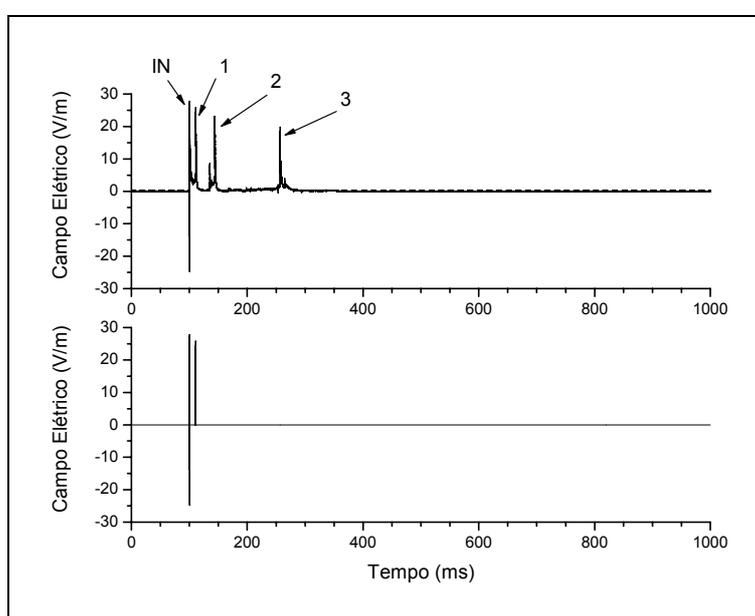


FIGURA 4.2 – Aprovação de descargas dentro da nuvem (IN) e subestimação de pulsos (2 e 3) pela aplicação do critério $\bar{x} \pm 3\sigma$ duas vezes sobre todo o registro do relâmpago ocorrido no dia 19/03/2003, às 19:32:19,645 horas (UT).

Com relação à aplicação do critério das amplitudes para a detecção e discriminação de DR's de todos os relâmpagos filmados, em cerca de 50% dos casos nenhuma DR foi identificada, a exemplo tem-se a FIGURA 4.1. Na outra metade dos casos, nem todas as DR's foram identificadas, o que resultou em subestimação da multiplicidade (FIGURA 4.2). Além disso, para casos de 2 pulsos verificados através das filmagens como sendo devidos a descargas do tipo IN, o critério os classificou como sendo pulsos de DR's

(FIGURA 4.2). Este critério foi observado como sendo inadequado para detecção e discriminação de descargas e logo foi abandonado.

4.1.2 Identificação de Pulsos de Descarga de Retorno e Multiplicidade do Relâmpago a Partir da Análise da Forma de Onda de Campo Elétrico dos Pulsos – Critério da Largura dos Pulsos e da Separação Temporal entre os Pulsos

No item anterior foi observado que, a primeira etapa do algoritmo a qual trata da detecção dos pulsos e suas discriminações quanto a serem devidos à descargas do tipo DR ou IN, não apresentou bons resultados ao considerar-se o critério das amplitudes. Neste item, será considerado como critério para discriminação dos pulsos, as suas larguras. A priori este trabalho pode não parecer original, mas o é. Na verdade, o conhecimento da tecnologia e dos algoritmos utilizados pelo SDR é limitado, uma vez que a partir de certo ponto constituem informações confidenciais. Mas, sabe-se que o algoritmo para a discriminação da forma de onda do pulso é mais complexo do que apenas a utilização da largura do pulso, uma vez que as antenas do SDR, IMPACT's, por exemplo, consideram não apenas a largura do pulso, mas também a razão entre as amplitudes dos campos elétrico e magnético e o tempo de subida do pulso. Além disso, deve considerar-se as diferentes características entre as antenas do SDR e a antena desenvolvida neste trabalho e as diferentes formas de operação entre ambos os sistemas. Com relação às diferenças entre ambas as antenas, as antenas do SDR podem registrar campos elétricos e ou magnético. Além disso, os sensores do SDR possuem uma resolução da ordem de nanossegundos, enquanto o sensor desenvolvido neste trabalho, é da ordem de microssegundos. As faixas de frequência também são diferentes, sendo 1 kHz a 350 kHz para os sensores do SDR e 1 Hz a 50 kHz para a antena de campo elétrico. Com relação às diferentes formas de operação entre ambos os sistemas, as primeiras informações tais como a detecção do instante de chegada da radiação até ele, a discriminação da forma de onda do pulso como sendo do tipo DR ou IN, a detecção da amplitude do sinal e a direção pela qual a radiação chegou até ele, são obtidas pelos próprios sensores do SDR, os quais possuem internamente complexos circuitos com os quais executam estas tarefas. Logo após, estas informações são enviadas a uma central

de processamento, onde são otimizadas e também calculados o instante de ocorrência da DR e a sua localização. O agrupamento das DR's localizadas também é feito pela central de processamento. Quanto à antena desenvolvida neste trabalho, sua função é apenas de obter o registro de campo elétrico da radiação emitida pelo relâmpago. Qualquer informação extraída do banco de dados, deve ser feita após o período de aquisição e através de manipulação do registro.

No algoritmo desenvolvido neste trabalho, primeiramente deve-se identificar os pulsos presentes no registro de campo elétrico, o que é feito através da leitura do registro de campo elétrico e de uma condição de “ativação” do algoritmo. Inicia-se a leitura do registro de campo elétrico e para um valor de amplitude maior ou igual a 1 V/m (condição de ativação) estabelece-se um intervalo de tempo conhecido por tempo morto, dentro do qual não apenas a leitura é realizada, mas é feita uma comparação entre todas as amplitudes lidas, no sentido de detectar-se a maior amplitude, definida como valor de pico. No instante correspondente ao tempo morto, o valor de pico, o tempo de início da descarga e a localização temporal do valor de pico da descarga (T_p), são armazenados em vetores para posterior manipulação no decorrer do algoritmo. Após o tempo morto, a leitura do arquivo continua apenas com a finalidade de encontrar-se uma nova amplitude que ative o algoritmo, repetindo-se novamente todas as execuções correspondentes ao tempo morto. Este procedimento é realizado até a leitura completa do registro de campo elétrico. Após a leitura completa do registro de campo elétrico, a aplicação uma única vez do critério de amplitude $\bar{x} \pm 3\sigma$ é realizada com a finalidade de eliminar-se eventuais ruídos que tenha sido classificados como pulsos. Após a identificação dos pulsos, estes devem ser discriminados em pulsos de descargas do tipo DR ou do tipo IN o que foi feito pelo critério da largura dos pulsos. Para cada pulso, a partir do seu valor de pico, lê-se a amplitude de campo elétrico e o tempo final do pulso (T_f), os quais são o valor de amplitude e seu respectivo tempo após o pico, que retorne ou cruze o nível ruído do sistema de aquisição. A largura do pulso (ΔL) é definida como $\Delta L = T_f - T_p$.

Esta etapa de identificação e discriminação dos pulsos de descargas apresenta parâmetros que devem ser ajustados, sendo eles o tempo morto e o limiar entre as

larguras que discriminam os pulsos entre pulsos de DR's e pulsos IN. O tempo morto deve ser escolhido com cuidado, a fim de evitar-se a interpretação de dois pulsos de diferentes descargas dentro do tempo morto, como sendo apenas um pulso. Encontra-se na literatura a evidência de pulsos de descargas de retorno separadas entre si por até 1 ms (Rakov e Uman, 1994), porém, sabe-se que a possibilidade desta ocorrência é pequena (Valine e Krider, 2002). Uma observação do banco de dados incluindo todos os relâmpagos filmados mostra um baixo percentual (4%) de ocorrência de descargas de retorno com menos de 10 ms de separação entre si. Os valores de tempo morto escolhidos para a avaliação na detecção de pulsos de descargas foram: 0,6 ms, 2 ms, 5 ms e 10 ms. Com relação à discriminação dos pulsos de descargas detectados, os valores avaliados foram: 6 μ s, 10 μ s e 15 μ s e foram escolhidos com base na literatura previamente revisada no capítulo de revisão bibliográfica.

A estrutura deste algoritmo, ainda não faz nenhuma consideração às incertezas na aceitação de pulsos detectados, como pertencentes ou não, aos relâmpagos ocorridos dentro do raio de observação. Estas incertezas são devidas ao fato dos picos de campo elétrico das DR's, serem diretamente proporcionais aos picos das correntes das DR's, e inversamente proporcionais à distância de propagação. Assim, um intenso relâmpago de uma tempestade mais distante (fora da região de observação), que ocorra simultaneamente ou quase simultaneamente a um relâmpago típico dentro da região de observação, poderá ter os sinais de campo elétrico de suas DR's apresentados no mesmo registro de campo elétrico, em que se encontram os sinais de campo elétrico das DR's do relâmpago dentro da região de observação, podendo ainda ter amplitudes comparáveis às amplitude dos picos de campo elétrico do relâmpago dentro da região de observação, e assim serem confundidos com os pulsos pertencentes ao relâmpago dentro da região de observação. Neste caso poderá ocorrer a superestimação da multiplicidade. Por outro lado, relâmpagos dentro da região de observação podem ser fracos de forma que, seus picos de campo elétrico fossem similares e confundidos com picos de campo elétrico de relâmpagos típicos fora da região de observação, e nesse caso ocorre subestimação da multiplicidade. Felizmente, embora a primeira situação exista, ela é menos provável e geralmente ocorre em casos de tempestades mais severas. Foi

observado que, os relâmpagos filmados ocorreram a uma distância média de 17 km e possuíram uma corrente média igual a -30 kA, resultando em um valor médio para o pico de campo elétrico medido pela antena de campo elétrico igual a 26 V/m.

A FIGURA 4.3 mostra a distribuição das amplitudes de campo elétrico medidas pela antena, em função das distâncias das suas respectivas DR's em relação à antena. O apêndice A mostra a seqüência de dados a partir da qual a FIGURA 4.3 foi originada. Uma observação da FIGURA 4.3 e uma contagem a partir do apêndice A, mostram que apenas 3% dos pulsos com amplitudes maiores ou iguais a 10 V/m, ocorreram acima de 50 km do observador, e esta é a incerteza ao assumir quaisquer pulsos com amplitudes maiores ou iguais a 10 V/m, como sendo localizados até 50 km do observador. Pode-se da mesma forma observar que, apenas 7% dos pulsos com amplitudes menores a 10 V/m, ocorreram até no máximo 50 km do observador, e esta é a incerteza ao assumir quaisquer pulsos com amplitudes abaixo de 10 V/m, como sendo localizados acima de 50 km. Assim, a condição de mínima amplitude, que atribui dentro das margens de incertezas já discutidas, uma distância de até no máximo 50 km a quaisquer pulsos com amplitudes maiores ou iguais a 10 V/m, foi inserida no algoritmo.

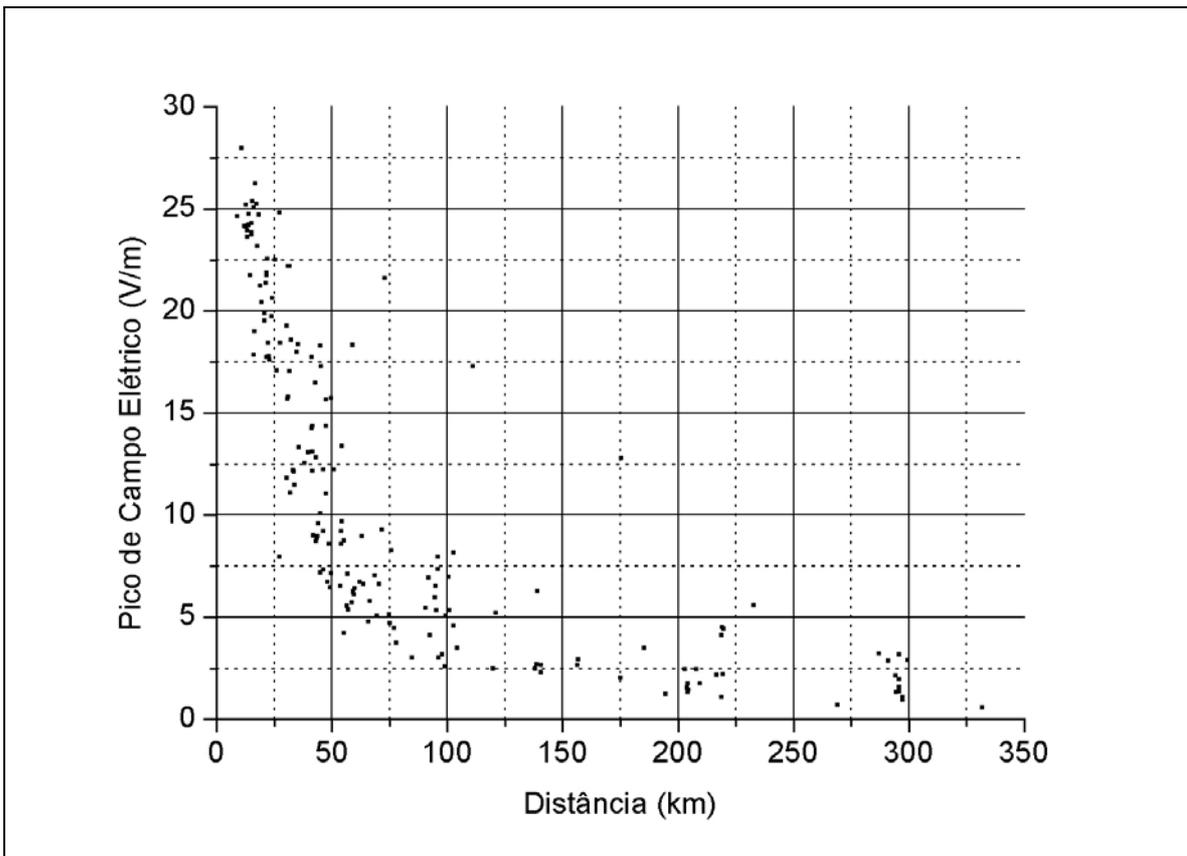


FIGURA 4.3 – Distribuição das amplitudes de campo elétrico medidas pelo sistema de aquisição desenvolvido neste trabalho, durante o período de aquisição de dados.

A segunda consideração refere-se à distribuição das larguras de pulsos de DR's de próximas. A largura do pulso de descargas de retorno dura desde várias dezenas a algumas poucas centenas de microssegundos. Isto quando há predominância do campo de radiação, como no caso de relâmpagos distantes, nos quais os sinais são ricos em altas frequências e pobres em baixas frequências. Porém, para relâmpagos próximos como no caso de relâmpagos filmados, há predominância do campo eletrostático com rico conteúdo em baixas frequências, resultando na rampa apresentada na FIGURA 4.4, que por sua vez resulta em larguras de até 1 ms ou mais.

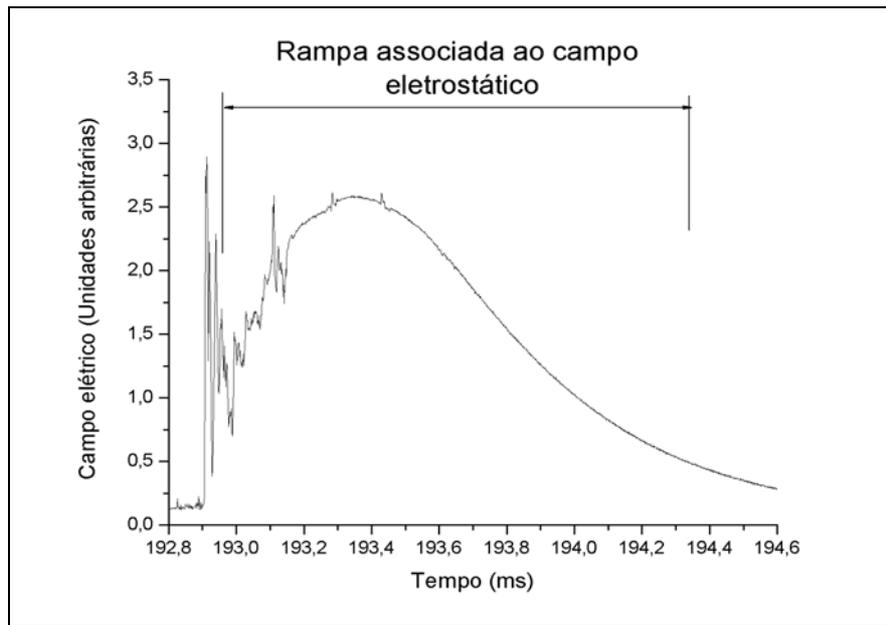


FIGURA 4.4 – Ocorrência de rampa devido ao conteúdo rico em baixas frequências no registro de campo elétrico de um relâmpago próximo.

A solução para a obtenção de larguras de pulsos coerentes com a literatura foi a filtragem do conteúdo de baixa frequência, responsável pela rampa eletrostática presente nos dados. A FIGURA 4.5 mostra como melhor opção para a solução do problema, a aplicação de um filtro passa-alta com frequência de corte igual a 5 kHz.

Assim, um processo de filtragem dos dados por um filtro passa-alta de Butterworth com frequência de corte igual a 5 kHz, foi inserido no algoritmo anteriormente ao processo de detecção e discriminação dos pulsos. As curvas de resposta em amplitude e fase deste filtro passa-alta são apresentadas no apêndice B. A condição de mínima amplitude para a aceitação de uma DR como pertencente a um relâmpago ocorrido até 50 km do observador, foi inserida como o primeiro comando a ser executado no agrupamento de DR's em grupos de relâmpagos.

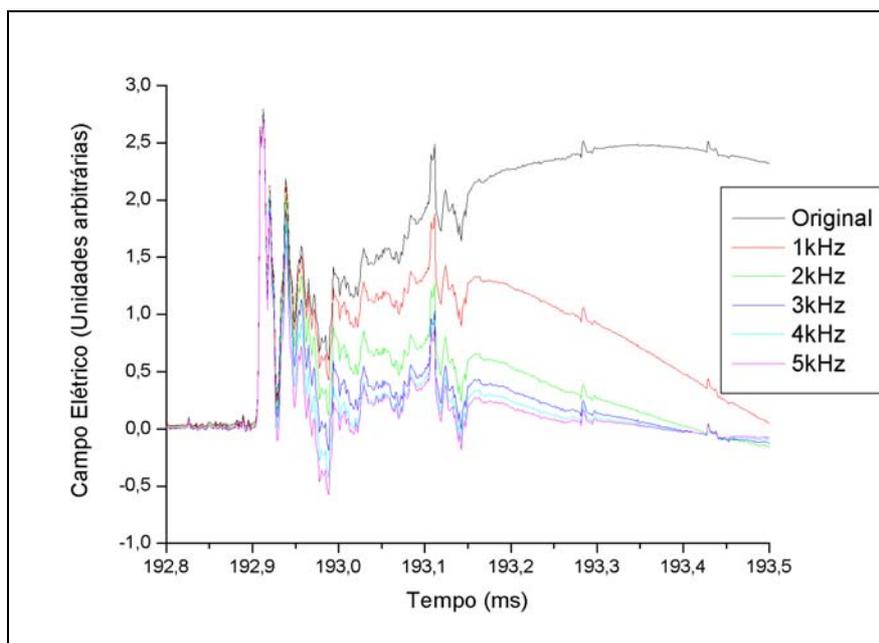


FIGURA 4.5 – Resultados da aplicação de um filtro passa-alta sobre o sinal de campo elétrico original para frequências de corte iguais a 1, 2, 3, 4 e 5 kHz.

A FIGURA 4.6 mostra a comparação entre as multiplicidades obtidas pela câmera rápida e pelo registro de campo elétrico, levando-se em conta os critérios descritos, para os 8 relâmpagos. Nas FIGURAS 4.6a,b,c,d, os símbolos localizados no lado direito e na parte superior, para o primeiro gráfico no sentido ascendente, indicam que estes gráficos referem-se a dados obtidos pela Câmera Rápida (CR), enquanto que, para os gráficos superiores, eles mostram primeiramente o limiar de largura em microssegundos (μ s) e que estes gráficos referem-se aos resultados obtidos através da aplicação do algoritmo sobre os registros de Campo Elétrico (CE) dos relâmpagos filmados. À direita de cada figura tem-se o tempo morto (ou varredura) utilizado na avaliação. Nas ordenadas tem-se a multiplicidade e na abscissa os 8 relâmpagos filmados representados por letras (a-h).

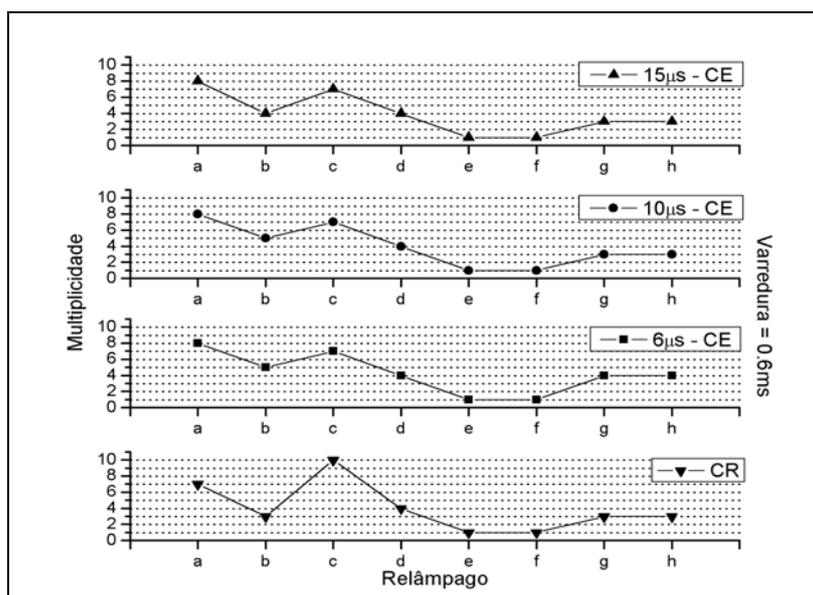


FIGURA 4.6a – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 0,6 ms.

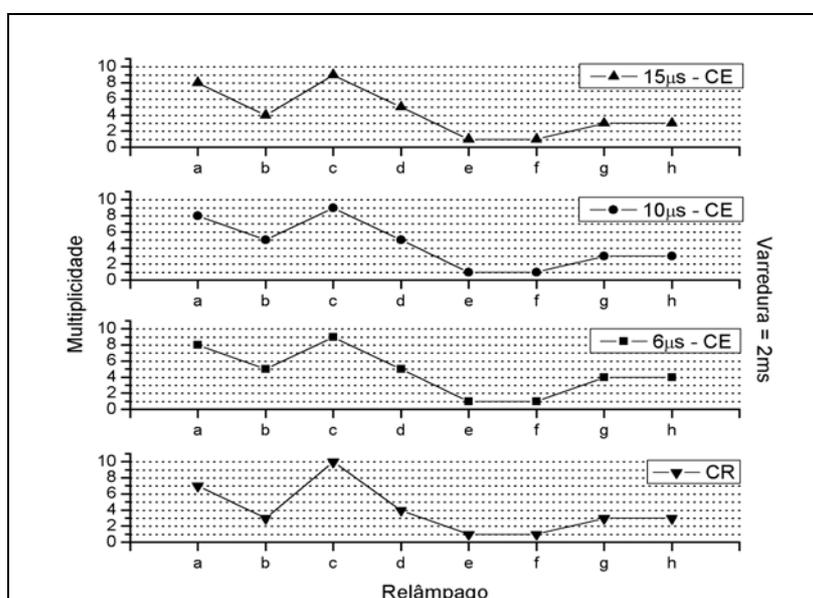


FIGURA 4.6b – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 2 ms.

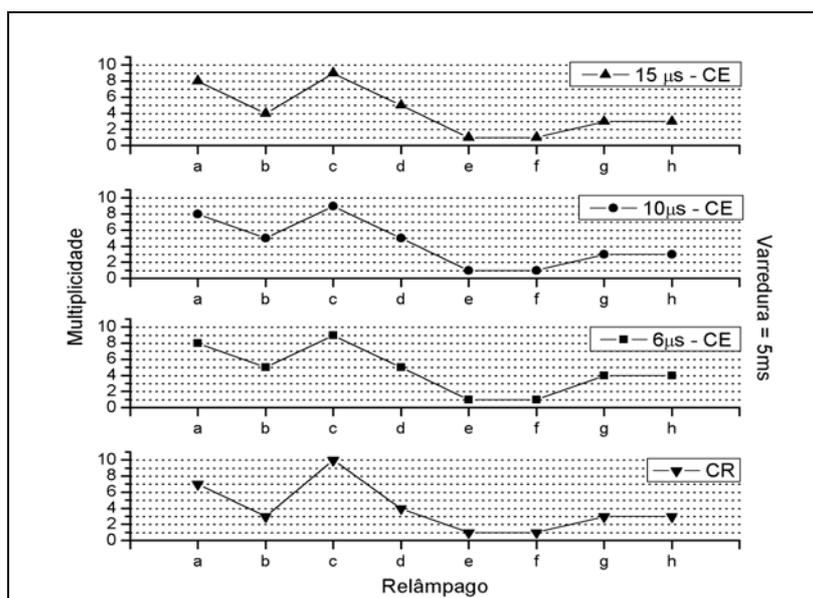


FIGURA 4.6c – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 5 ms.

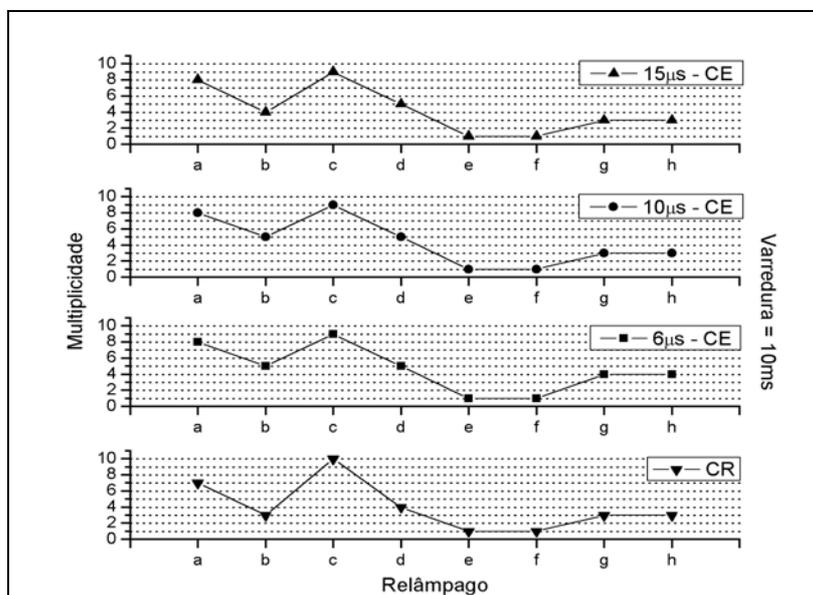


FIGURA 4.6d – Comparação entre a multiplicidade observada pela câmera rápida e a multiplicidade obtida pelo campo elétrico com o uso do algoritmo e seus critérios em teste. Tempo morto = 10 ms.

Para a análise das FIGURAS 4.6a-d, foi utilizado o método dos mínimos quadrados (Jenkins e Watts, 1968), com o intuito de descobrir quais valores de Limiar de Largura de Pulsos e de Tempo morto, minimizam a soma dos quadrados das discrepâncias entre as multiplicidades estimadas pelo algoritmo e as multiplicidades reais. Em outras palavras, pretende-se verificar qual das curvas de multiplicidades estimadas, mais se aproxima da curva de multiplicidade real na FIGURA 4.6(a-d). A TABELA 4.1 mostra a soma dos quadrados das discrepâncias (sqd) para cada par de parâmetros.

TABELA 4.1 – Resultado da análise dos métodos dos mínimos quadrados para os parâmetros Tempo Morto e Limiar de Largura dos pulsos.

Limiar de Largura \ Tempo morto	6 μ s	10 μ s	15 μ s
0.6ms	sqd = 16	sqd = 14	sqd = 12
2ms	sqd = 12	sqd = 10	sqd = 07
5ms	sqd = 12	sqd = 10	sqd = 07
10ms	sqd = 12	sqd = 10	sqd = 07

Uma observação da TABELA 4.1 mostra que, qualquer que seja o valor do Limiar de Largura, o valor de Tempo Morto que contribui para maior credibilidade da multiplicidade deve ser igual a 2 ms, além disso, valores maiores que 2 ms não influenciam na multiplicidade estimada. Apesar do limiar de largura igual a 15 μ s apresentar-se como o melhor, uma análise detalhada mostra que este resultado é influenciado por um só relâmpago (“b”). A desconsideração deste relâmpago na análise, torna o limiar de largura igual a 10 μ s melhor do que o limiar igual a 15 μ s para qualquer valor de tempo morto. Foi observado que a utilização de um limiar de largura igual a 10 μ s ou 15 μ s não resulta em diferenças significativas nos resultados. Assim, resolveu-se adotar o valor igual 10 μ s, dado que está mais próximo dos valores apresentados na literatura.

O algoritmo apresentou bons resultados na primeira etapa (detecção e discriminação dos pulsos), sendo os melhores resultados para um limiar de largura do pulso igual a 10 μ s e um tempo morto igual a 2 ms. Dos 8 casos em que o critério foi avaliado, 4 casos

apresentaram multiplicidades corretas, 3 casos apresentaram multiplicidades com um erro igual a ± 1 unidade e 1 caso apresentou a multiplicidade com um erro igual a 2 unidades, o que pode ser considerado como um bom resultado e o critério aprovado nesta fase.

Resta ainda testar a segunda parte do algoritmo, que trata do agrupamento das descargas discriminadas como DR's, em relâmpagos. Esta parte do algoritmo trata de a partir de todos os pulsos de descargas nuvem-solo encontrados e suas localizações no tempo, agrupar a seqüência de descargas nuvem-solo nas quais a diferença de tempo entre as descargas seja menor ou igual a um valor definido. Este critério é importante, uma vez que há a possibilidade, por mais remota que seja, de encontrar-se os registros de dois relâmpagos diferentes em um mesmo arquivo. Ele faz-se necessário também, quando se processa uma seqüência de arquivo, neste caso, havendo a possibilidade de parte do registro de um relâmpago encontrar-se em um arquivo e parte encontrar-se no arquivo posterior. Felizmente, uma observação dos registros de campo elétrico dos relâmpagos filmados utilizados nos testes anteriores, mostra que é pequena a possibilidade dos arquivos conterem acima de 1 registro de relâmpago, de forma que os resultados foram influenciados pelos parâmetros testados e não pela ausência da aplicação da segunda etapa do algoritmo.

Ao contrário dos critérios de agrupamento das descargas adotado pelo SDR, que consideram a máxima separação temporal entre DR's consecutivas, a máxima separação espacial entre as DR's e a máxima duração do relâmpago, o algoritmo de agrupamento desenvolvido neste trabalho adotará apenas o critério da separação temporal entre DR's consecutivas e um valor de duração máxima para o relâmpago, cujos valores avaliados foram iguais a 500 ms para o intervalo de tempo máximo entre DR's consecutivas do relâmpago e igual a 1 segundo para a máxima duração deste relâmpago. Para um grupo de "n" arquivos contendo registros de campo elétrico, após a identificação e classificação de todos os pulsos de descargas do tipo DR contidos nos "n" arquivos, faz-se o cálculo da diferença de tempo entre descargas consecutivas, e para descargas com separações menores ou iguais a um certo valor, elas são consideradas como pertencentes a um mesmo relâmpago. Ao se encontrar um par de descargas cuja separação seja maior

que o valor definido, a descarga anterior é considerada como pertencente ao grupo formado pelas descargas anteriores, determinando assim um relâmpago e sua multiplicidade. A descarga posterior inicia um novo relâmpago podendo ter uma ou mais DR's. Este procedimento é realizado até a verificação do último intervalo entre DR's. Para exemplificar a avaliação desta parte do algoritmo, consideremos o relâmpago "c". Este relâmpago ocorreu no dia 05/03/2003, às 17:11:46,358 horas (UT). O arquivo que contém este relâmpago é apenas 1 dentro de um total de 90 arquivos com duração de 1s cada. O algoritmo final (2 etapas) manipula os 90 arquivos como se fossem um único arquivo (aglomerado) formado pela aglomeração de todos eles. A detecção dos pulsos e suas classificações em DR's ou IN's são feitas a cada arquivo ou "sub-parte", exatamente como foi explicado anteriormente. Porém, a localização temporal de cada pulso encontrado, é armazenada considerando-se a sua localização tanto no arquivo de 1s quanto no arquivo aglomerado com duração de 90s. A FIGURA 4.7 exemplifica como é feita a localização temporal nos arquivos.

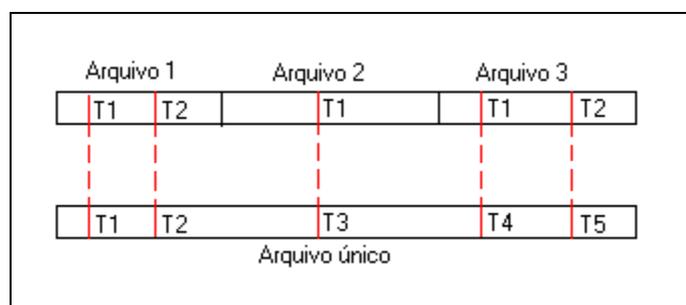


FIGURA 4.7 – Esquema da localização temporal dos pulsos encontrados, dentro de cada arquivo (faixa superior) e dentro do arquivo único (faixa inferior).

Na FIGURA 4.7 os traços verticais em vermelho representam os pulsos localizados nos arquivos e os símbolos "Ti" (i=1,2,3,4 e 5) representam suas localizações temporais. Os traços verticais escuros na faixa superior indicam as separações entre os arquivos "sub-partes".

A TABELA 4.2 mostra os resultados da aplicação do algoritmo incluindo a segunda etapa da avaliação, para o conjunto de 90 arquivos dos quais um deles contém a forma de onda de campo elétrico do relâmpago “c”. Nesta tabela são apresentados 19 relâmpagos, suas multiplicidades (DR’s ou *strokes*) e seus instantes de ocorrência em segundos, tendo como sistema de referência, o início do primeiro arquivo da seqüência. Convertendo-se o instante de ocorrência para horas, minutos e segundos a partir da hora inicial de aquisição apresentada no topo da tabela, tem-se que o relâmpago “11” ocorreu na mesma hora em que o relâmpago “c” e apresenta a mesma multiplicidade apresentada quando foi executada e avaliada apenas a primeira parte do algoritmo, que trata da detecção dos DR’s. Observa-se que o algoritmo baseado nos critérios da largura do pulso e da separação temporal resultou em um bom valor de multiplicidade para o relâmpago “c” e foi capaz de encontrar este relâmpago em meio a tantos outros sem interferir na multiplicidade obtida. Assim o algoritmo foi aprovado nas duas etapas sendo classificado como aceitável.

Finalmente, o Apêndice C apresenta um fluxograma do algoritmo final desenvolvido neste trabalho.

TABELA 4.2 – Resultados da aplicação do algoritmo final sobre o conjunto de arquivos contendo o arquivo do relâmpago C.

INÍCIO DE AQUISIÇÃO= 17:10:52,747	
RELÂMPAGO= 1	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	5,291 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 2	2 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	8,534 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 3	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	11,999 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 4	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	18,642 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 5	5 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	20,322 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 6	16 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	28,595 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 7	3 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	40,680 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 8	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	43,963 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 9	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	47,851 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 10	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	53,042 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 11	9 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	53,611 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 12	2 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	57,391 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 13	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	66,329 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 14	5 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	70,098 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 15	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	73,773 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 16	2 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	77,137 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 17	1 <i>STROKE</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	78,635 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 18	10 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	84,441 SEGUNDOS
RELÂMPAGO= 19	2 <i>STROKES</i>
INSTANTE DE OCORRÊNCIA=	88,936 SEGUNDOS

4.2 Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através do Registro de Campo Elétrico, da Câmera Rápida e do Sistema de Detecção de Relâmpagos

Neste item, é feita uma comparação entre os valores de multiplicidade e tempo entre DR's observados através de registros de campo elétrico e pelo SDR, em comparação com os valores obtidos através das imagens obtidas pela câmera rápida. Os valores observados pelas filmagens são, a princípio, assumidos como reais em virtude da alta resolução temporal da filmadora, comparada à frequência de ocorrência de DR's em um relâmpago, a qual corresponde a cerca de dezenas a centenas de milésimos de segundos entre duas DR's consecutivas. Além disso, o fato de poder visualizar o evento em si traz a certeza de estar considerando na análise apenas o evento em questão. Também é feita uma discussão sobre as discrepâncias entre os resultados e suas possíveis causas.

4.2.1 Valores de Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através da Câmera Rápida e do Registro de Campo Elétrico

A FIGURA 4.8 mostra as multiplicidades para os 8 relâmpagos filmados, obtidas através da câmera rápida e do registro de campo elétrico. Para a obtenção da multiplicidade a partir do registro de campo elétrico, foi utilizado o algoritmo desenvolvido neste trabalho. Na ordenada tem-se a multiplicidade e na abscissa a especificação do relâmpago. Esta figura mostra que para 4 casos, os resultados obtidos através do registro de campo elétrico concordam com os resultados provenientes dos dados da câmera rápida. A multiplicidade média obtida através das observações feitas por câmera rápida foi igual a 4,00. Para observações a partir do registro de campo elétrico a multiplicidade média obtida foi igual a 4,38. Dentro dos 4 casos apresentando erros na multiplicidade, 3 casos apresentam uma diferença de multiplicidade igual a 1, o que pode ser considerado um bom resultado.

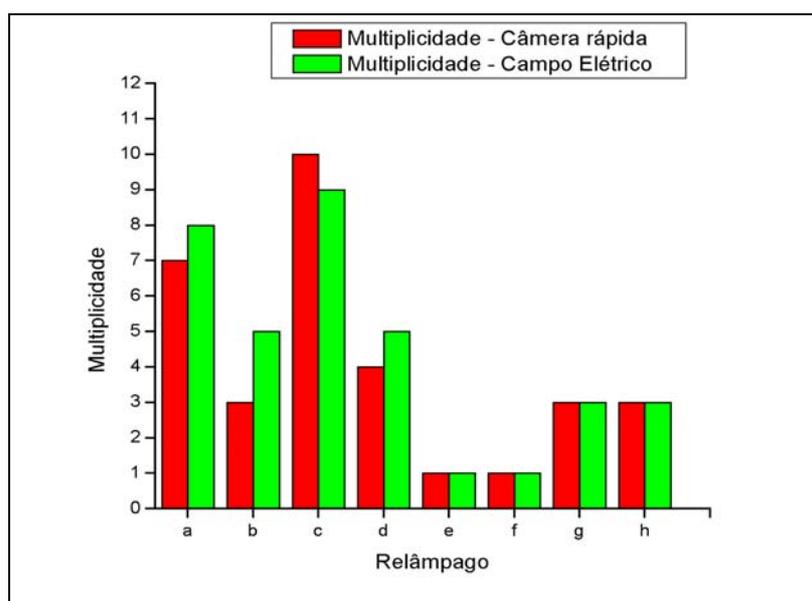


FIGURA 4.8 – Comparação entre as multiplicidades obtidas pelas técnicas: Câmera rápida e Campo elétrico.

Há três hipóteses para a explicação das discrepâncias apresentadas na FIGURA 4.8. A primeira delas é a ocorrência de diferentes relâmpagos simultâneos ou quase simultâneos, associados a diferentes tempestades simultâneas ou mesmo a uma única tempestade severa. A segunda hipótese é a possibilidade de uma DR de um relâmpago filmado ser suficientemente fraca, a ponto de que o seu pico de campo elétrico seja inferior à condição de mínima amplitude e conseqüentemente rejeitado pelo algoritmo como pertencente a uma DR ocorrida dentro de um raio igual a 50 km em relação ao observador. A terceira corresponde à possibilidade de ocorrência de um canal bifurcado, cuja parte bifurcada ocorra fora do campo de visão da câmera. As duas primeiras hipóteses correspondem a uma limitação da técnica de observação por antenas de campo elétrico, enquanto a terceira corresponde a uma limitação da técnica de observação por câmeras. Na FIGURA 4.8 têm-se 3 casos em que as multiplicidades observadas pelo registro de campo elétrico são maiores do que as multiplicidades observadas pelos registros de câmera rápida. Estes casos são mais possíveis de serem explicados pelas hipóteses 1 ou 3. Têm-se 1 caso em que a multiplicidade observada através de registro de câmera rápida é maior do que a multiplicidade observada por registro de campo elétrico. Este caso é melhor explicado pela segunda hipótese. A seguir tem-se a

verificação destas hipóteses para os 4 casos apresentando discrepâncias na FIGURA 4.8.

O relâmpago “b” ocorreu sobre São José dos Campos, no dia 05/03/2003 entre 16:08:36,300 (UT) e 16:08:37,300(UT). A FIGURA 4.9 mostra a cobertura de nuvens sobre o Brasil durante o período desta tempestade.

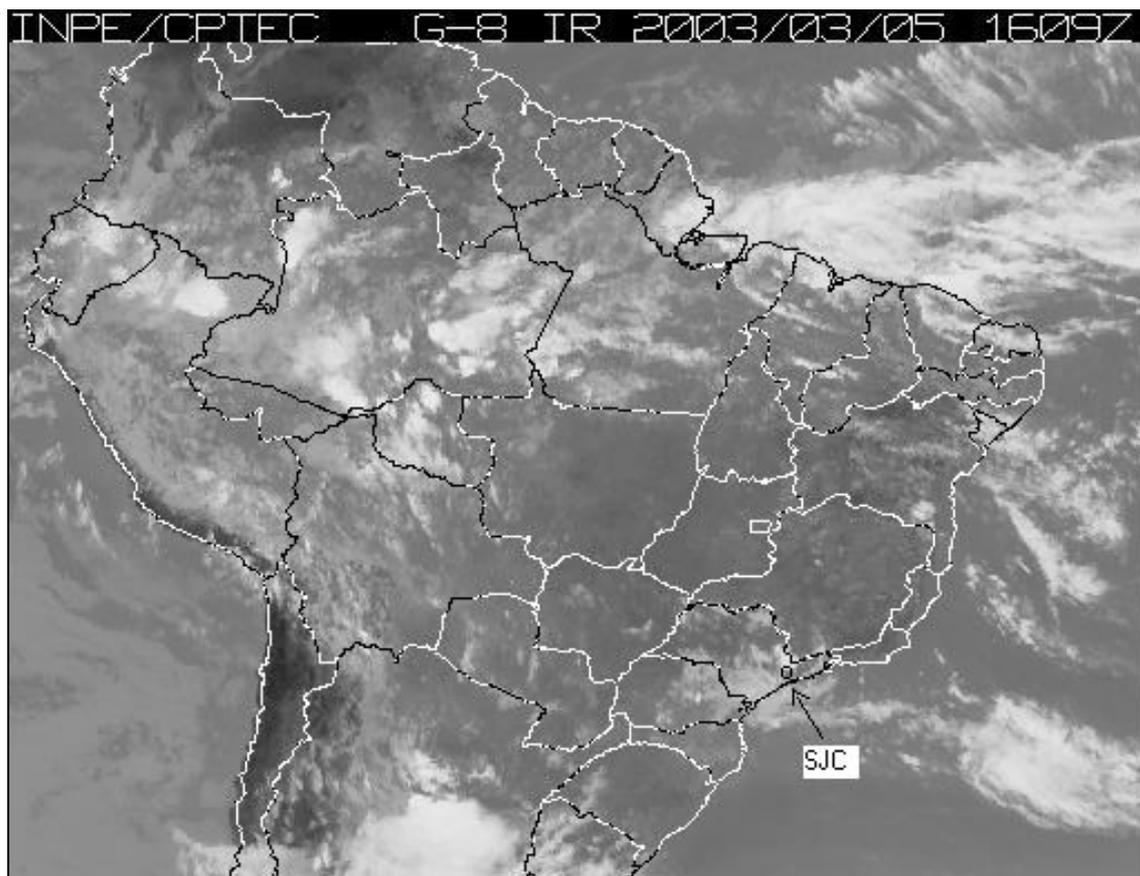


FIGURA 4.9 – Imagem infra-vermelha do satélite GOES apresentando a distribuição de nuvens sobre o Brasil. Canal 8 – 05/03/2003, 16:09 UT.

Esta imagem apresenta 1 minuto de atraso em relação ao período do registro de campo elétrico associado ao relâmpago “b”, o qual não influencia nos resultados da observação, dado que a duração típica de uma tempestade varia entre 30 minutos à 1 hora. Pode-se observar a ocorrência de nuvens (regiões brancas) por boa parte do estado de São Paulo. A fraca e homogênea tonalidade da coloração branca, significa que estas

nuvens não são tão altas, indicando pouca possibilidade de ocorrência de tempestades severas e ou diferentes tempestades simultâneas. Na FIGURA 4.10 tem-se a forma de onda de campo elétrico do relâmpago “b”, na qual os pulsos de descargas de retorno indicados pelas setas vermelhas foram filmados e detectados pelo algoritmo, ao contrário dos indicados pelas setas pretas que foram apenas detectados pelo algoritmo.

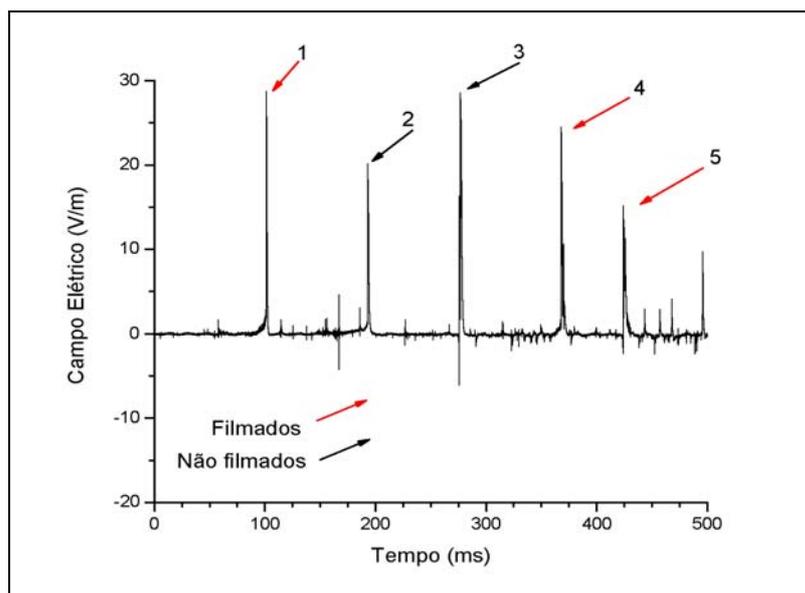


FIGURA 4.10 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “b”, ocorrido às 17:08:37,364 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.

Uma análise mais cautelosa das imagens mostra haver intensificações da luminosidade nos *frames* justamente nos instantes em que ocorrem os pulsos de descargas de retorno não filmadas na FIGURA 4.10, indicando que os pulsos 2 e 3 ocorreram dentro da tempestade observada, porém ocorreram fora do campo visual da câmera. Apenas pulsos 1, 2, 3 e 4 foram detectados pelo SDR. Observe que a distribuição dos pulsos 1 a 5 no registro, satisfaz os critérios da separação temporal entre DR's consecutivas e da máxima duração de um relâmpago adotado pelo SDR. Porém, falta satisfazer o critério das separações espaciais entre as DR's consecutivas e a DR de primeira ordem. Indubitavelmente as imagens de câmera rápida mostram que os pulsos de DR's 1, 4 e 5 pertencem ao mesmo relâmpago, assim, apenas a verificação das separações espaciais

entre as DR's 2 e 3 em relação à DR 1 é suficiente para classificá-las, segundo o SDR, como pertencente ou não ao relâmpago filmado que contém as DR's 1, 4 e 5.

A TABELA 4.3 mostra as distâncias entre estes pulsos, calculadas a partir de suas coordenadas geográficas fornecidas pelo SDR.

TABELA 4.3 – Distância entre as DR's dos pulsos 2, 3 e 4, em relação à primeira DR associada ao pulso 1.

Pulsos	Distância (km)
2 e 1	4,3
3 e 1	4,5
4 e 1	4,7
5 e 1	4,7

Observe que as DR's associadas aos pulsos 2 e 3 estão a menos de 10 km de distância da DR associada ao pulso 1, sendo satisfeito o critério de separação espacial. Assim, conclui-se através dos critérios do SDR que as DR's associadas aos pulsos 2 e 3 pertencem ao relâmpago "b" e nesse caso a terceira hipótese explica a discrepância apresentada na FIGURA 4.8.

Os relâmpagos "a", "c" e "d" apresentam uma diferença entre as multiplicidades igual a uma descarga cada. A FIGURA 4.11 mostra a forma de onda de campo elétrico do relâmpago "a". As setas vermelhas indicam pulsos de DR's filmadas e detectadas pelo algoritmo e as setas pretas indicam pulsos de DR's que não foram filmadas, porém foram detectados pelo algoritmo. O resultado apresentado é considerado bom, embora a multiplicidade obtida pela forma de onda de campo elétrico seja igual a 8, enquanto a multiplicidade suposta real vale 7. O pulso de descarga 4 não foi detectado pelo SDR de forma que não tem-se como saber a sua separação espacial em relação à primeira DR, associada ao pulso 1.

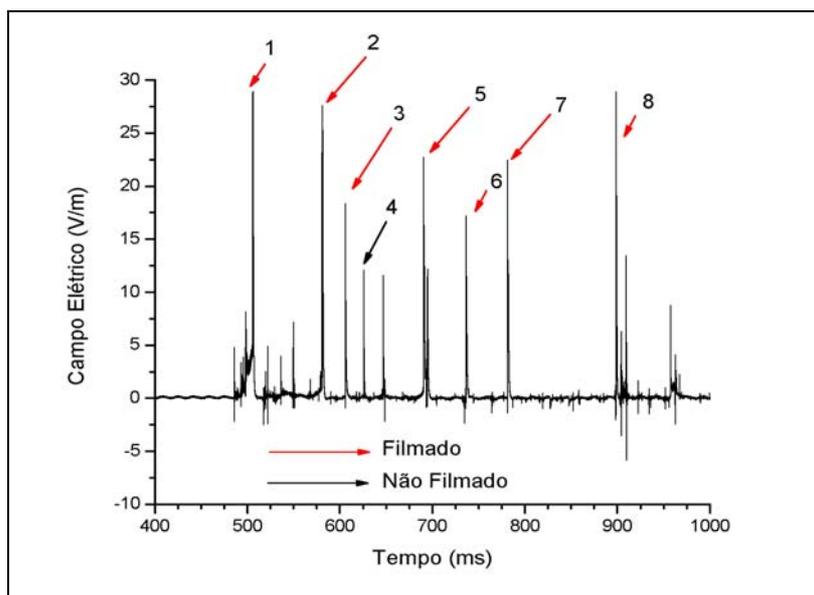


FIGURA 4.11 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “a”, ocorrido às 00:52:30,045 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 21/02/03.

As FIGURAS 4.12 e 4.13, mostram a distribuição de nuvens no Brasil em um período que englobe o instante de ocorrência do relâmpago “a”.

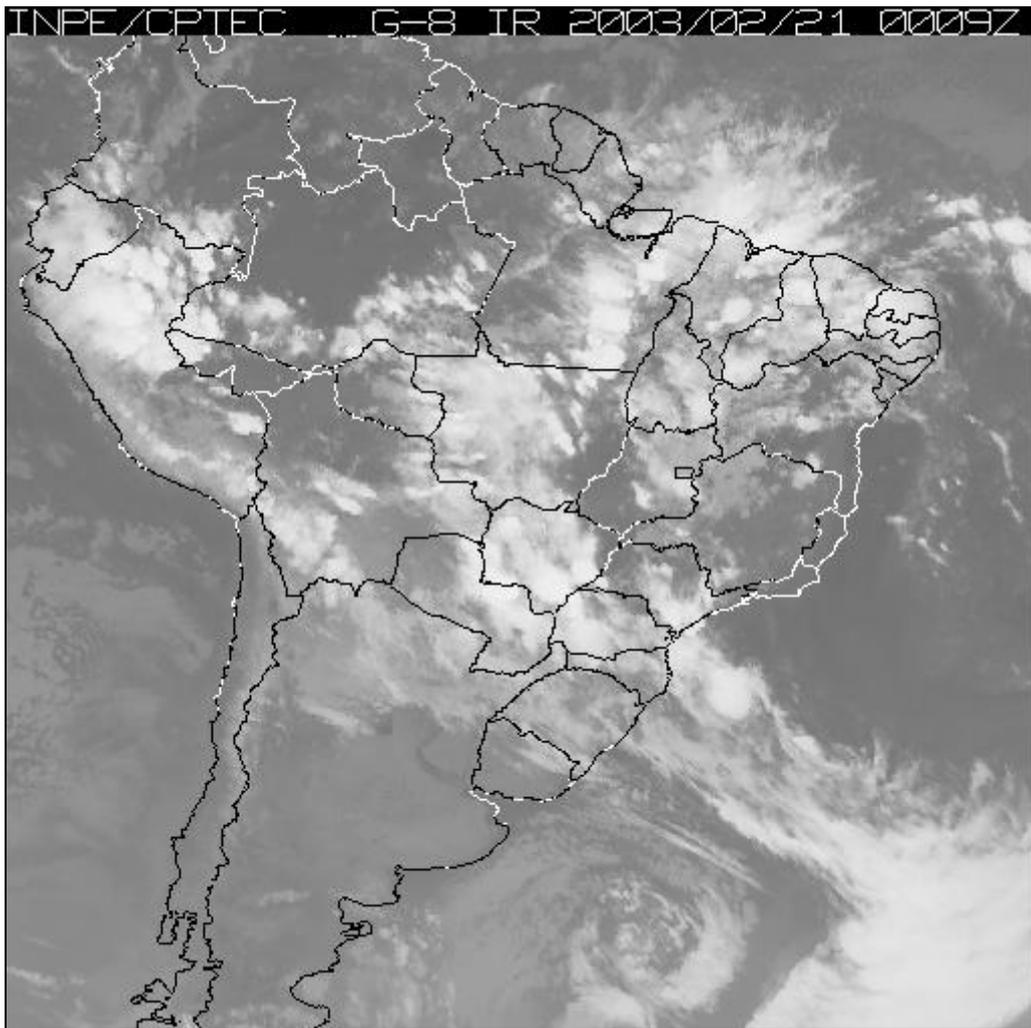


FIGURA 4.12 – Cobertura de nuvens em um período pouco antes do instante de ocorrência do relâmpago “a”.

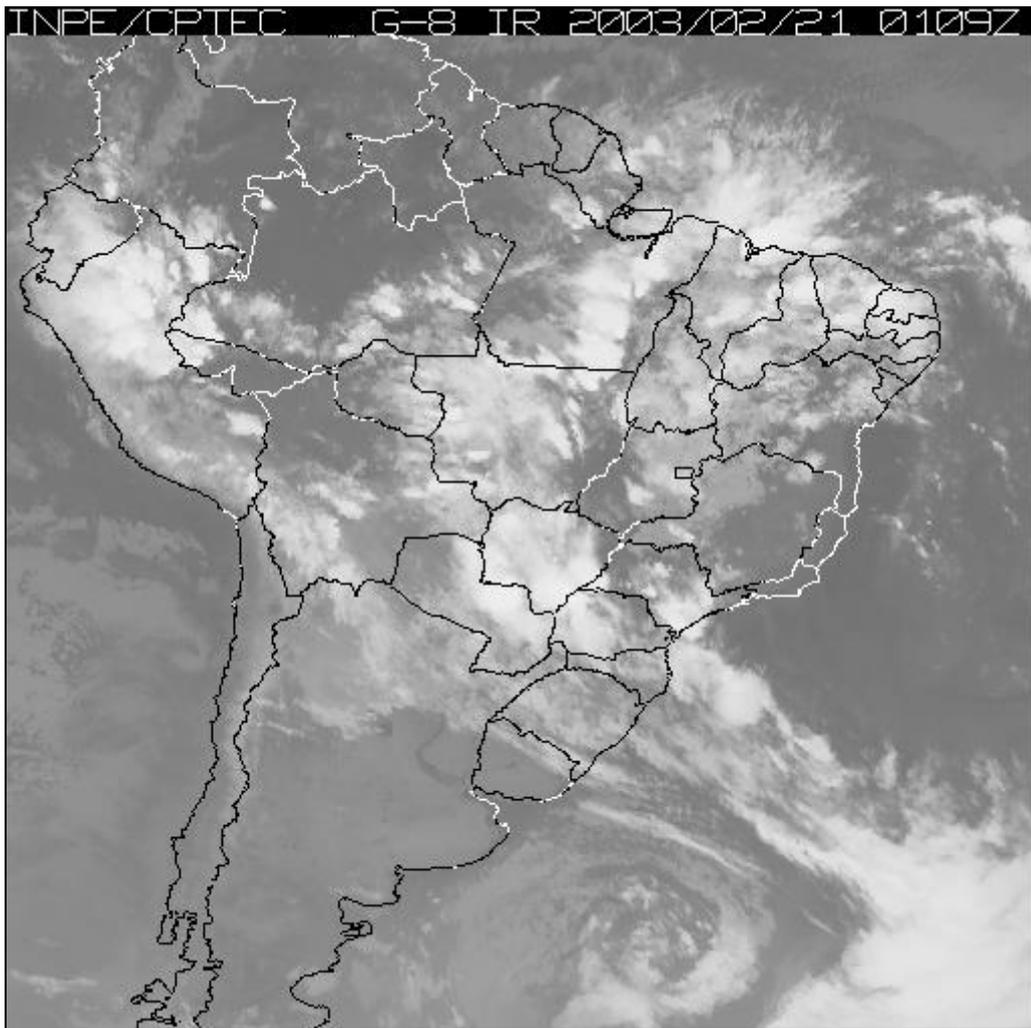


FIGURA 4.13 - Cobertura de nuvens em um período pouco após do instante de ocorrência do relâmpago “a”.

As FIGURAS 4.12 e 4.13 parecem não indicar a possibilidade de ocorrência de tempestades simultâneas, pois nota-se uma única, grande e homogênea distribuição de nuvem sobre parte do estado de São Paulo e não um aglomerado de várias nuvens separadas e menores. Porém, a situação parece ser um pouco mais severa do que a situação apresentada na FIGURA 4.9, o que pode ser visto pela comparação entre as tonalidades das cores das nuvens sobre a região de São Paulo. Além disso, uma minuciosa análise das imagens obtidas por câmera rápida não indica a possibilidade da terceira hipótese explicar a presença do pulso 4 na FIGURA 4.11. Parece que a

explicação mais plausível para a discrepância entre as multiplicidades observadas para o relâmpago “a” é a primeira hipótese.

A FIGURA 4.14 mostra a forma de onda do Relâmpago “c”. As setas vermelhas indicam os pulsos de DR’s filmadas e as pretas indicam as detectadas pelo algoritmo. Veja que o pulso 10 foi filmado, porém não foi detectado pela análise de campo elétrico. Observe que ele possui amplitude menor do que 10 V/m e isto explica a sua exclusão. Assim, a segunda hipótese é a melhor explicação para a discrepância entre os valores de multiplicidade observada neste caso.

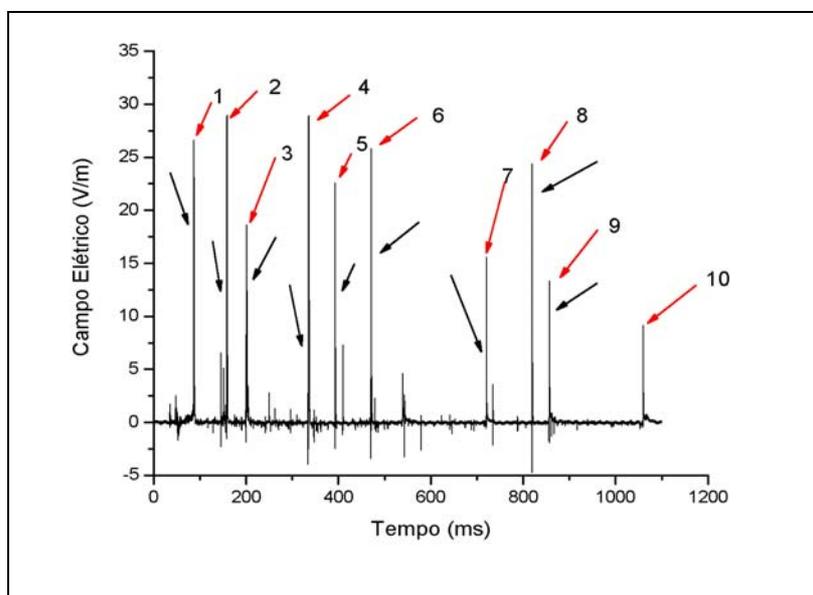


FIGURA 4.14 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “c” ocorrido às 17:11:46,359 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.

A FIGURA 4.15 mostra a forma de onda de campo elétrico do relâmpago “d”.

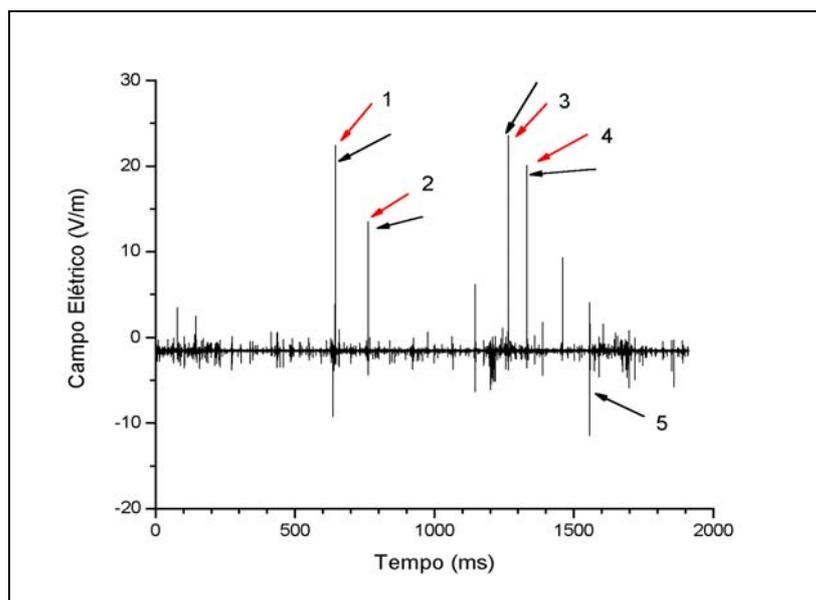


FIGURA 4.15 - Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “d” ocorrido às 17:20:45,801 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.

As setas vermelhas indicam os pulsos de descargas filmadas e as pretas os pulsos detectados através da forma de onda de campo elétrico. Observe que o quinto pulso não foi filmado, mas foi detectado como uma DR do relâmpago através do programa desenvolvido. Este pulso ocorreu às 17:20:46,713 horas (UT) e não foi detectado pelo SDR. Uma análise da imagem de satélite (FIGURA 4.16) correspondente ao período em que ocorreu o relâmpago “d” e de seu registro feito por câmera rápida, similarmente aos casos anteriores, indica que a hipótese que melhor explica a discrepância entre as multiplicidades para esse caso é a hipótese 1.

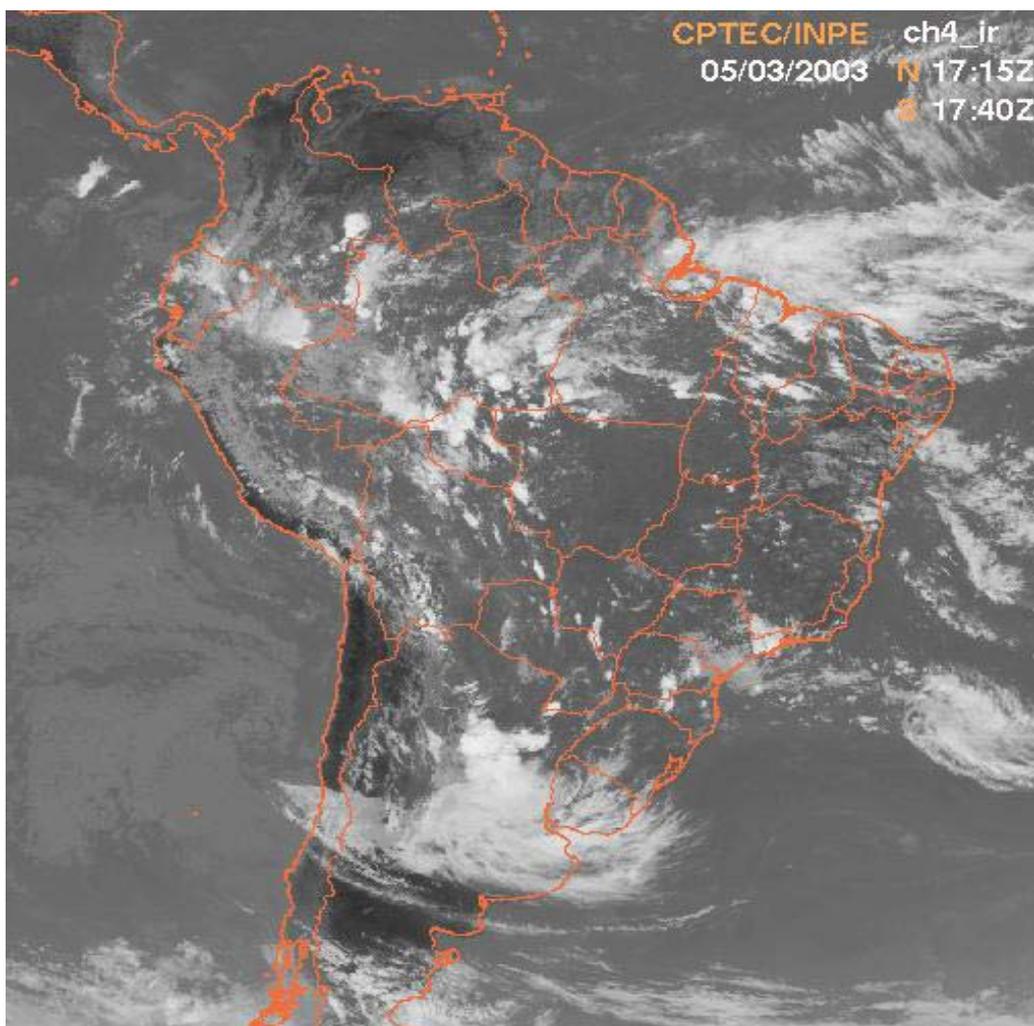


FIGURA 4.16 - Cobertura de nuvens em um período contendo o instante de ocorrência do relâmpago “d”.

A FIGURA 4.17 mostra a distribuição do tempo entre DR's consecutivas, obtidas a partir da análise dos registros de campo elétrico e das filmagens. A TABELA 4.4 mostra alguns resultados estatísticos para o intervalo de tempo entre descargas de retorno. Há uma ligeira discrepância entre as distribuições real e estimada, devido às ligeiras diferenças de multiplicidades e suas causas já discutidas. Entretanto, os resultados obtidos através de ambas as técnicas são similares. Com relação à distribuição dos intervalos de tempo entre DR's, a distribuição estimada através das formas de onda de campo elétrico aproxima-se razoavelmente da distribuição real.

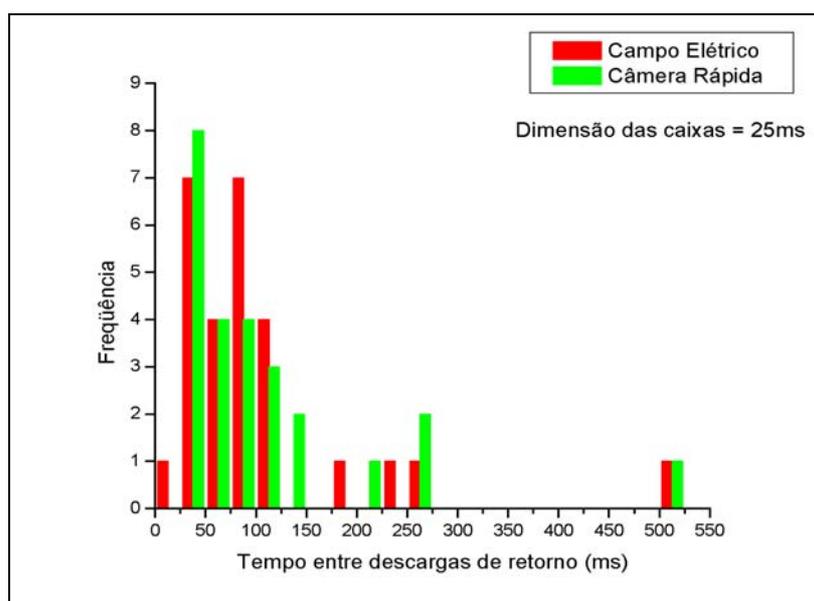


FIGURA 4.17 – Distribuições dos intervalos de tempo entre DR's dos 8 relâmpagos filmados, obtidas a partir dos registros de campo elétrico e de câmera rápida.

TABELA 4.4 – Resultados estatísticos das distribuições estimada e real dos intervalos de tempo entre DR's.

	Média Geométrica (ms)	Média Aritmética (ms)	Desvio Padrão (ms)	Valor Mínimo (ms)	Valor Máximo (ms)
Campo Elétrico	76	101	97	11	503
Câmera Rápida	83	109	104	26	503

Para finalizar esta comparação, tem-se que os resultados obtidos através da análise da forma de onda de campo elétrico dos relâmpagos são bons. Cerca da metade dos resultados coincidem com os valores reais e a outra metade apresenta pequenas discrepâncias. Uma discussão sobre as causas das diferenças entre as multiplicidades real e estimada foi feita para cada caso, e foi observado que para três casos, estas causas foram devidas aos erros inerentes ao algoritmo desenvolvido. No entanto, para um caso foi evidenciada a possibilidade de erro (Relâmpago “b”) na multiplicidade supostamente

real, dado que, DR's de um mesmo relâmpago podem bifurcar-se, ocorrendo fora do campo de visão da câmera. A multiplicidade média estimada a partir das formas de onda de campo elétrico é similar ao valor suposto real e aos valores apresentados na literatura, sendo ainda melhor do que o resultado apresentado por Miranda (2000). Os valores estatísticos estimados aproximam-se mais dos valores assumidos como reais dos que os apresentados por Miranda (2000).

4.2.2 Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através da Câmera Rápida e do Sistema de Detecção de Relâmpagos

Neste item pretende-se fazer uma comparação similar à feita no item anterior, porém, usando resultados provenientes do SDR em comparação com os resultados reais (câmera rápida). A FIGURA 4.18 mostra as distribuições de multiplicidade obtidas pela câmera rápida, pelos cenários E e H e em Tempo Real, para 36 relâmpagos nuvem-solo negativos observados nas proximidades da torre de observação.

Os valores obtidos para a multiplicidade média foram iguais a 3,85; 1,95; 1,75 e 1,90 para a câmera rápida e os cenários E, H e Tempo Real respectivamente. Para a obtenção destes resultados estatísticos foram considerados apenas os eventos que além de filmados, foram detectados pelos cenários E e H e também pelo Tempo real, com o intuito de que nenhum dos cenários fosse favorecido ou desfavorecido por ter uma maior ou menor amostra. Assim, dos 36 relâmpagos filmados e considerados na FIGURA 4.18, 20 relâmpagos detectados por todos os cenários do SDR foram utilizados na estatística.

A FIGURA 4.19 mostra a distribuição dos intervalos de tempo entre DR's observados pela câmera rápida e pelo SDR (cenários E, H e Tempo Real). As médias geométricas para os intervalos de tempo entre DR's obtidos pela câmera rápida e pelos cenários E, H e TR, a partir de 20 relâmpagos múltiplos dentre os 36 relâmpagos filmados, são: 58 ms, 124 ms, 123 ms, 114 ms respectivamente.

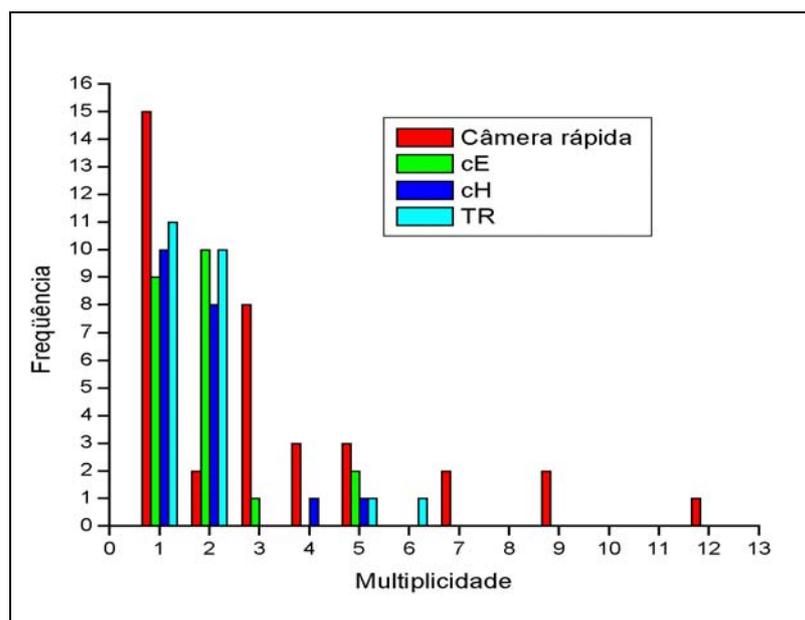


FIGURA 4.18 – Distribuições da multiplicidade dos 36 relâmpagos filmados (vermelho), 22 relâmpagos detectados pelo cenário E (verde-cE), 20 relâmpagos detectados pelo cenário H (azul escuro-cH) e 23 relâmpagos detectados em Tempo Real (azul claro-TR). A diferença entre o número de relâmpagos filmados e o número de relâmpagos detectados por um certo cenário corresponde ao número de relâmpagos filmados que o cenário não detectou.

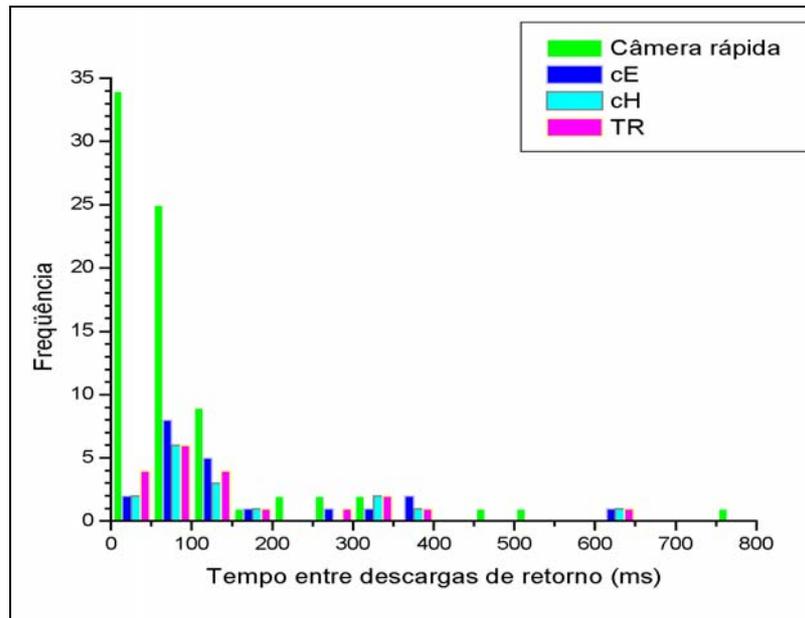


FIGURA 4.19 – Distribuições dos intervalos de tempo entre DR's dos 36 relâmpagos filmados (verde), 22 relâmpagos detectados pelo cenário E (azul escuro-cE), 20 relâmpagos detectados pelo cenário H (azul claro-cH) e 23 relâmpagos detectados em Tempo Real (rosa-TR). As diferenças entre o número total de intervalos de tempo entre DR's observado pela câmera rápida e o número total de intervalos de tempo entre DR's observado pelos cenários do SDR, está associado ao fato do SDR não ter detectado todos os relâmpagos e DR's filmados.

Observe que os valores médios de multiplicidade obtidos pelo SDR (cenários E, H e em Tempo Real) são cerca da metade do valor obtido pela câmera rápida. Estes resultados são similares aos resultados apresentados na literatura (TABELA 2.1). Observe na TABELA 2.1, que os valores médios de multiplicidade obtidos por sistemas do tipo SDR, no Brasil (Pinto et al., 1999) e em outros países (Diendorfer et al., 1998a; Orville e Huffines, 2001), também são cerca da metade dos valores médios de multiplicidade observados por técnicas consideradas mais precisas (Kitagawa et al., 1962; Thomson et al., 1984 e Rakov et al., 1994). O intervalo de tempo médio observado pela câmera rápida está em coerência com os valores obtidos por técnicas consideradas mais precisas e apresentados na literatura (Thomson et. al., 1984; Rakov e Uman, 1990a e Rakov et al., 1990 – TABELA 2.2). Já o intervalo de tempo médio obtido a partir do SDR é cerca de 2 vezes o valor observado pela câmera rápida, o que é coerente com as observações de multiplicidade feitas por ambos os sistemas, dado que, um maior número de DR's (multiplicidade) em um relâmpago com duração fixa, significa menor intervalo de tempo entre as DR's e vice-versa.

4.2.3 Multiplicidade e Tempo entre Descargas de Retorno Observados através do Registro de Campo Elétrico, da Câmera Rápida e do Sistema de Detecção de Relâmpagos

Neste item, os resultados estatísticos da multiplicidade e dos intervalos de tempo entre DR's apresentados nos Itens 4.2.1 e 4.2.2, são comparados com o objetivo de verificar-se, qual destas técnicas de observação, apresentou melhores resultados em relação aos resultados obtidos a partir das imagens da câmera rápida. As TABELAS 4.5 e 4.6 mostram resultados que possibilitem o alcance desse objetivo.

TABELA 4.5 – Médias geométricas para a multiplicidade e o intervalo de tempo entre DR's dos 8 relâmpagos observados simultaneamente pela câmera rápida e pela antena de campo elétrico desenvolvida neste trabalho. Os valores observados pela câmera rápida são adotados como reais.

	Multiplicidade Média	Intervalo de tempo entre DR's (Média Geométrica)
Câmera rápida	4,00	82,00 ms
Campo Elétrico	4,38	76,00 ms
Erro relativo	10%	7%

TABELA 4.6 - Médias geométricas para a multiplicidade e o intervalo de tempo entre DR's observadas pela Câmera Rápida e pelo SDR. Os valores observados pela Câmera Rápida são adotados como reais. Os valores observados pelo SDR, são provenientes do cenário E (cE). Estes são resultados de um banco de dados proveniente dos 36 relâmpagos filmados.

	Multiplicidade (Média Geométrica)	Intervalo de tempo entre DR's (Média Geométrica)
Câmera rápida	3,85	58 ms
SDR - cE	1,95	124 ms
Erro relativo	49%	114%

A primeira característica a se observar, é que, os erros relativos associados às observações feitas pelo SDR são bem maiores do que os erros relativos associados às observações feitas pela antena de campo elétrico. Os erros relativos para a multiplicidade e o tempo entre DR's, associados às observações feitas pelo SDR são cerca de 5 vezes e 16 vezes, respectivamente, maiores do os erros relativos para a multiplicidade e o tempo entre DR's associados às observações feitas pela antena de

campo elétrico. O que se pode dizer a partir desses resultados é que, as observações a partir dos registros de campo elétrico obtiveram resultados melhores do que os obtidos a partir das observações feitas pelo SDR.

4.3 Investigação da Relação entre Picos de Corrente (I_p) e de Campo Elétrico (E_p)

4.3.1 Observação da Relação entre o Pico de Corrente (I_p) e o Pico de Campo Elétrico (E_p) para Eventos Próximos (até 30 km) e Distantes (entre 30 e 350 km)

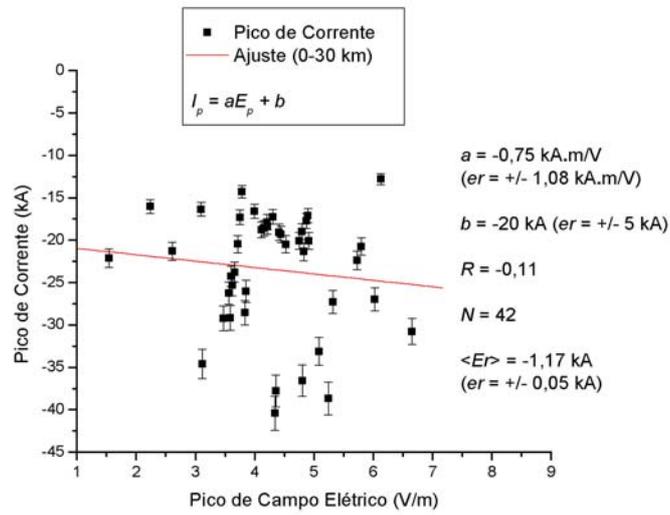
Segundo Uman et al. (1975), para grandes distâncias, geralmente muito maiores do que a altura do canal do relâmpago, predomina o componente de radiação. Neste caso, as formas de onda de campo elétrico e magnético possuem o mesmo formato da forma de onda da corrente que viaja no canal, e a relação entre os campos e a corrente é linear. Porém, para pequenas distâncias o componente eletrostático do campo elétrico gerado pelo relâmpago predomina e é responsável pela presença da rampa apresentada na forma de onda de campo elétrico (FIGURA 4.4). Neste caso, a relação entre as formas de onda da corrente e do campo elétrico deixa de ser linear. Segundo Uman et al. (1975), considerando o modelo TL e como características do relâmpago, uma altura igual a 4 km para o canal vertical reto, a velocidade da DR constante e igual a 8×10^7 m/s e uma condutividade infinita para o solo, a 1 km de distância da DR predomina o campo eletrostático e a 10 km predomina o campo de radiação.

Willett et al. (1989) obtiveram uma expressão linear para a relação entre os picos de corrente e campo elétrico, a partir da regressão do campo elétrico (E) sobre a corrente (I), por um ajuste diferente do não o “método dos mínimos quadrados”. Por isso, Rakov et al. (1992a) argumentaram que a expressão proposta por Willett et al. (1989), não era a melhor expressão para se obter a corrente a partir do campo e a partir dos mesmos dados e por meio da regressão da corrente (I) sobre o campo elétrico (E), através de um ajuste

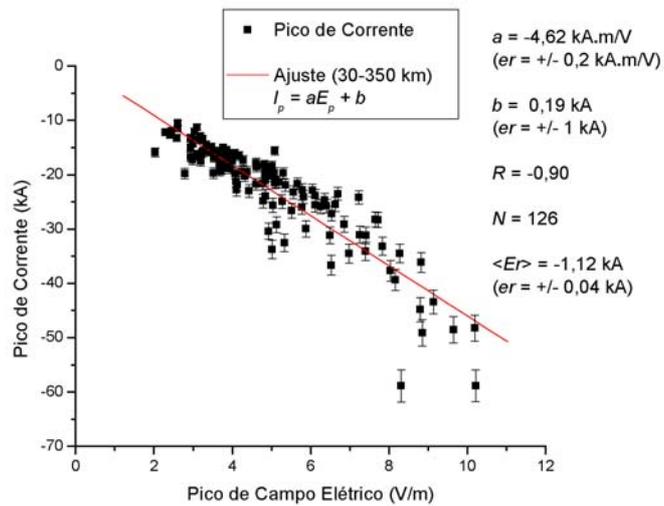
pelo método dos mínimos quadrados, obtiveram uma expressão a qual eles chamaram de “a melhor” para a obtenção da corrente a partir do campo elétrico.

Neste trabalho foram realizadas: uma observação do comportamento da relação $I_p \times E_p$ com a distância; observação da coerência entre os picos de corrente medidos pelo SDR e os picos de campo elétrico medidos pela antena desenvolvida neste trabalho; observação das regiões de domínio dos componentes eletrostático e de radiação; uma investigação da possibilidade de picos de campo elétrico dentro da região dominada pelo componente eletrostático apresentar uma relação linear $I_p \times E_p$ e da possibilidade deste fato estar associado a alguma característica da forma de onda de campo elétrico da DR. Para isto, foram selecionados 2 grupos de pulsos de campo elétrico detectados tanto pela antena de campo elétrico quanto pelo SDR. Um grupo foi composto por pulsos de DR's ocorridas a uma distância entre 0 e 30 km da antena e outro grupo foi composto por pulsos de DR's ocorridas a uma distância entre 30 e 350 km da antena. A FIGURA 4.20 apresenta ajustes pelo método dos mínimos quadrados, destes picos de corrente em relação a estes picos de campo elétrico. As curvas de ajuste na FIGURA 4.20a,b são do tipo $I_p = aE_p + b$, onde “a” e “b” são respectivamente os coeficientes angular e linear da reta. “N” é o número de eventos utilizados nos ajustes, “R” é o coeficiente de correlação, “er” é o erro associado ao valor de grandeza e “<Er>” é o valor médio das barras de erros na FIGURA 4.20. Além de apresentados na FIGURA 4.20, estes parâmetros são apresentados de forma mais clara na TABELA 4.7. Observe que o comportamento da relação entre os picos de corrente e campo elétrico com a distância é coerente com o que é apresentado na literatura. O coeficiente de correlação para o ajuste linear entre os picos de corrente e de campo elétrico de DR's distantes até 30 km, onde a população é em maior parte dominada pelo componente eletrostático é ruim ($R = -0,11$), porém ele assume melhor valor ($R = -0,90$) quando apenas eventos acima de 30 km de distância da antena são considerados.

Estes resultados mostram que, os picos de corrente de DR's estimados pelo SDR a partir da radiação, estão em coerência com os picos de campo elétrico medidos pela antena de campo elétrico.



a)



b)

FIGURA 4.20 – Ajustes de curvas para a relação $I_p \times E_p$. a) Para DR's ocorridas até 30 km de distância da antena; b) Para DR's ocorridas entre 30-350 km de distância da antena.

TABELA 4.7 – Valores dos coeficientes angular (a), linear (b) e de correlação (R) para os ajustes apresentados na FIGURA 4.20. N é o número de eventos utilizados nos ajustes e $\langle Er \rangle$ é o valor médio das barras de erros apresentadas na FIGURA 4.20.

	0-30 km	30-350 km
Coeficiente angular (a)	-0,75±1,08 kA•m/V	-4,62±0,2 kA•m/V
Coeficiente linear (b)	-20±5 kA	-0,19±1 kA
Coeficiente de correlação (R)	-0,11	-0,90
N (amostra)	42	126
Valor médio das Barras de Erros $\langle Er \rangle$	-1,17±0,05 kA	-1,12±0,04 kA

Foram feitas neste trabalho, uma verificação detalhada dos intervalos de distância dominados pelos componentes eletrostático e de radiação, e uma investigação da possibilidade de ocorrência de DR's dentro de uma região dominada pelo componente eletrostático, apresentarem uma relação linear entre os picos de corrente e campo.

Para este estudo, foi observada entre todas as formas de onda de campo elétrico de DR's distantes até 350 km da antena, a ocorrência de formas de onda de descargas de retorno, em que não houvesse considerável contribuição da rampa associada ao campo eletrostático, ao pico inicial de campo elétrico e que também não apresentasse o pico de polaridade invertida (*overshoot*). Foram considerados picos de campo elétrico não “contaminados”, àqueles cuja forma de onda apresentasse pequena rampa associada ao campo eletrostático, ou mesmo que a rampa fosse considerável, o seu início tivesse um valor de campo elétrico próximo do valor associado ao início da DR. Este critério de seleção foi aplicado com o objetivo de eliminar-se os casos em que há a certeza do domínio do componente eletrostático ou de radiação. A FIGURA 4.21 mostra exemplos de formas de onda descartadas e selecionadas para esta análise.

A FIGURA 4.21a, mostra uma forma de onda de uma DR que ocorreu a 18 km de distância do observador. Observe que o valor do campo elétrico no início da rampa é cerca de 50% do valor do pico inicial de campo elétrico, de forma que, foi assumido que o pico de campo elétrico possui considerável contribuição do campo eletrostático. Por isso, esta e outras formas de onda similares foram descartadas da análise. A FIGURA 4.21b, mostra a forma de onda de uma descarga de retorno ocorrida a 291 km de distância do observador. Assim como ela, formas de onda apresentando *overshoot* como indicação do domínio do componente de radiação, foram descartadas. E formas de onda similares à apresentada na FIGURA 4.21c, nas quais o valor do campo elétrico no início da rampa fosse pequeno em relação ao valor do pico inicial de campo elétrico, e que não apresentassem *overshoot*, foram assumidas como possuindo um pico de campo elétrico com pouca contribuição do componente eletrostático, sendo classificadas como não contaminadas e por isso foram selecionadas. A forma de onda apresentada na FIGURA 4.21c, corresponde a uma descarga de retorno ocorrida a 23 km do observador.

A idéia de pico de campo elétrico contaminado pelo componente eletrostático não está necessariamente associado à presença da rampa, mas sim ao fato do valor de campo elétrico após o seu valor de pico, decrescer ou não até o nível de ruído do registro de campo elétrico ou até um valor próximo do valor de campo elétrico de início da DR, o que pode ser visto através do valor assumido pelo campo no início da rampa. Por exemplo, para o caso apresentado na FIGURA 4.21a, o início da rampa está em torno de 50% do valor de pico. Sugere-se então, uma “interferência” mais acentuada do componente eletrostático sobre o pico do sinal de campo elétrico e diz-se que o pico de campo elétrico está contaminado.

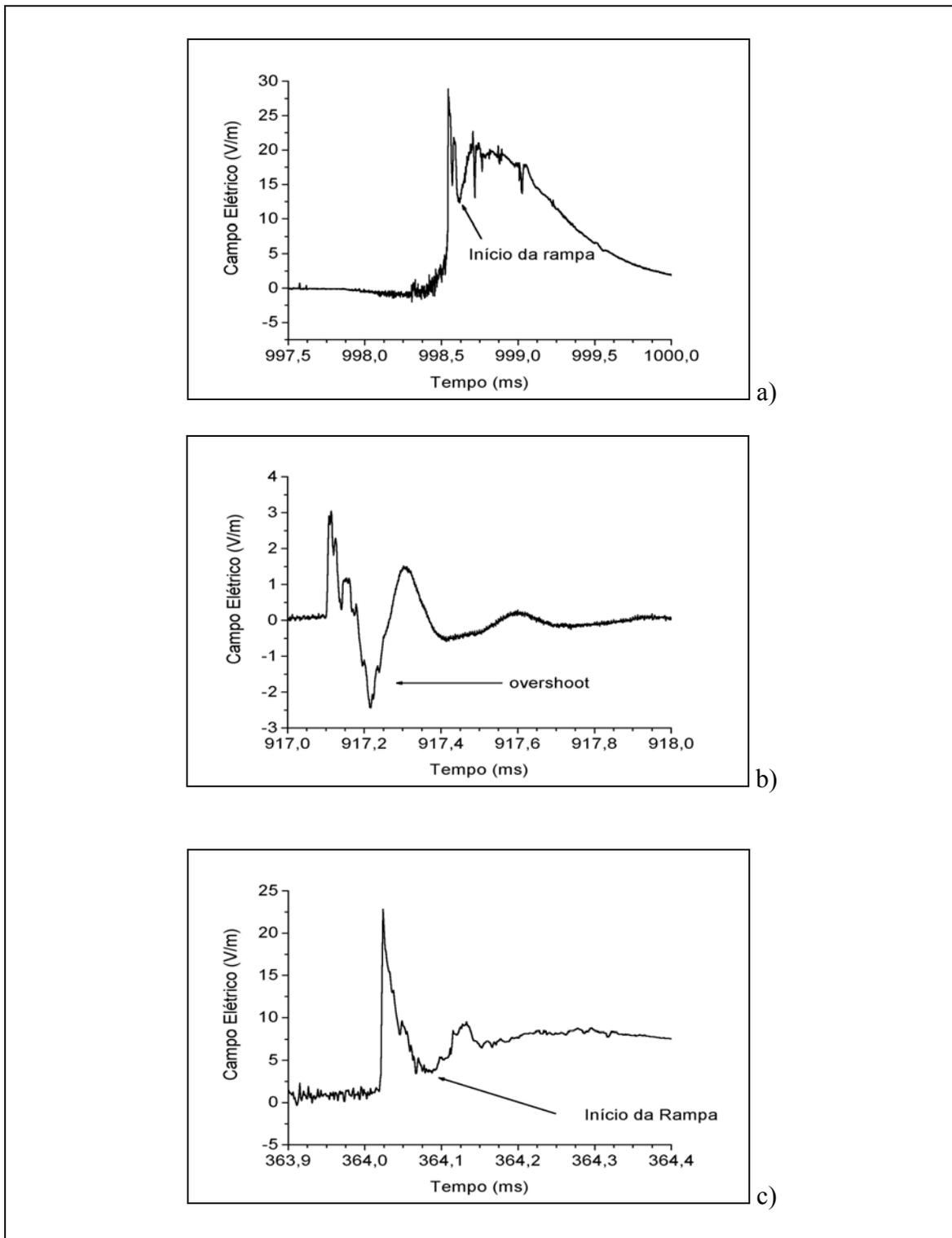


FIGURA 4.21 – Formas de onda de pulsos de DR's selecionadas e descartadas na investigação para o estudo de verificação da influencia do campo eletrostático e da distância na relação $I_p \times E_p$.

Foram observados casos em que o início da rampa apresentasse um valor de campo elétrico, de cerca de 90% do valor de pico. Porém, foram observados casos com consideráveis rampas associadas ao componente eletrostático, similares ao caso apresentado na FIGURA 4.21a, cujo valor do campo no início da rampa, estivesse localizado no nível de ruído do registro de campo elétrico ou apresentasse um valor de campo próximo ao valor de início da DR. Neste caso sugere-se uma menor interferência do componente eletrostático no pico de campo elétrico, o qual foi classificado como não contaminado. Assim, a presença de uma considerável rampa na forma de onda da DR não necessariamente significa contaminação do pico de campo elétrico pelo componente eletrostático. Esta idéia baseia-se na afirmativa de Uman et al. (1975), de que nos instantes iniciais de uma DR (cerca de alguns milionésimos de segundo) independentemente da distância de observação domina o componente de radiação, porém não consideraram a relação entre picos de corrente e campos, mas sim entre as formas de onda de corrente e campos.

Para este estudo foram inicialmente utilizados 168 picos de campo elétrico de DR's ocorridas até 350 km de distância da antena, os quais foram detectados pelo SDR e como resultado desse critério de seleção, das 168 formas de onda de DR's, 34 foram selecionadas. Para estas formas de onda selecionadas, a maior distância encontrada foi igual a 63 km.

Dentro dos 34 casos de formas de onda de DR's com picos não contaminados, 31 casos (91%) ocorreram entre 15 km e 45 km. Cerca de 4 casos (12%) apresentaram rampas intensas, geralmente com valores de máximo bem acima de 50% do valor de pico de campo elétrico, alguns casos chegando até cerca de 90% do valor de pico de campo elétrico, são os casos com "Grandes Rampas". Cerca de 17 casos (50%) apresentaram pequena rampa, geralmente com um valor de máximo bem abaixo de 50% do valor de pico de campo elétrico, são os casos com "Pequena Rampa". Cerca de 13 casos (38%) não apresentaram rampa, apenas decaíram do valor de pico de campo elétrico até ao valor de ruído do registro, são os casos "Sem Rampa". Foram consideradas formas de onda de campo elétrico dominadas pelo componente de radiação, àquelas sem rampa e que apresentassem *overshoot*, fosse ele considerável ou não. A TABELA 4.8, mostra a

relação entre o percentual de uma certa categoria de pulso de DR, em relação ao número total de pulsos de DR's observados e o maior percentual de ocorrência e seu intervalo de ocorrência associado para uma certa categoria de pulsos de DR's.

TABELA 4.8 – Percentual e intervalo de ocorrência de formas de onda de DR's com rampa associada ao componente eletrostático.

	Grande Rampa	Pequena Rampa	Sem Rampa
Número de casos dentro do total de 34 DR's observadas	4 (12% do total)	17 (50% do total)	13 (38% do total)
Número de casos em função da classificação da rampa e da distância	4 casos (100%) entre 15-30 km	10 casos (29%) entre 15-30 km e 7 casos (21%) entre 30-35 km	10 casos (77%) entre 30-45 km e 3 casos (23%) entre 45-65 km

Segundo Uman et al. (1975), o componente eletrostático do campo elétrico decai com $1/D^3$, enquanto o componente de radiação decai com $1/D$, onde D é a distância entre a DR e o observador. Para pequenos valores de D , o componente eletrostático é por si só, bem mais intenso do que o componente de radiação e sua contribuição para o campo elétrico é muito mais eficaz, gerando uma DR com uma Grande Rampa. A medida que se aumenta D o componente eletrostático decai mais rapidamente do que o componente de radiação, ocorrendo o mesmo com a contribuição do componente eletrostático para o campo elétrico. Neste caso a rampa tende a decrescer em direção a uma DR com Pequena Rampa, até chegar uma distância D a qual a partir dela, as contribuições do componente de radiação, mesmo tornando-se cada vez mais fracas com a distância, tornam-se cada vez mais fortes do que as contribuições do componente eletrostático, o que elimina totalmente a rampa, confere à forma de onda de campo elétrico a mesma forma de onda da corrente de DR e resulta em *overshoot*. Neste trabalho, sugere-se como resultado das observações das formas de onda das DR's em função da distância, as hipóteses de que, para os casos com Grandes Rampas há um domínio "total" do componente eletrostático, para os casos com Pequenas Rampas, o domínio do

componente eletrostático não seja mais “total” mas ainda em maior parte, para os casos Sem Rampa, há um equilíbrio entre as contribuições de ambos os componentes e para casos apresentando *overshoot*, a contribuição do componente de radiação supera a do componente eletrostático, havendo o domínio “total” do componente de radiação.

A partir da TABELA 4.8, nota-se entre 15 km e 30 km, a existência de pulsos com Grandes Rampas e pulsos com Pequenas Rampas. Entre 30 km e 35 km há a existência de pulsos com Pequenas Rampas e pulsos Sem Rampas e acima de 35 km têm-se apenas pulsos Sem Rampas. Foi observado que os pulsos Sem Rampas estão associados à maiores distâncias do que os pulsos com Pequenas Rampas, que por sua vez estão associados à maiores distâncias dos que os pulsos com Grandes Rampas. Uma observação de todos os pulsos com *overshoot* ocorridos dentro do alcance da antena de campo elétrico (350 km) mostrou que tais pulsos ocorreram acima de 40 km, sendo que acima de 65 km a ocorrência foi exclusiva de pulsos com *overshoot*. Estes resultados sugerem que há uma região de domínio do componente eletrostático entre 0 e 35 km e outra região de domínio do componente de radiação a partir de 40 km, ambas as regiões separadas por uma estreita região entre 35 e 40 km, onde há um equilíbrio entre os domínios exercidos pelos 2 componentes. Além desta região de equilíbrio entre o domínio dos componentes eletrostático e de radiação, também foi observado que o componente eletrostático não domina apenas para os casos de relâmpagos próximos (algumas unidades de km), mas também para casos de relâmpagos mais distantes (entre 10 e 40 km), em oposição a Uman et al. (1975). O trabalho de Uman et al. (1975) corresponde a um dos primeiros e mais simples modelos teóricos da radiação eletromagnética do relâmpago, no qual aproximações tais como, uma velocidade constante para DR no canal, uma verticalidade e linearidade do canal são feitas. Do ponto de vista prático, a velocidade da DR varia com a altura no canal e os canais possuem tortuosidade e ramificações. Além disso, as faixas de frequência consideradas no presente trabalho e no trabalho de Uman et al. (1975) são diferentes. É possível que, estas diferenças tenham resultado na diferença entre as regiões de domínio dos componentes eletrostático e de radiação apresentadas neste trabalho e no trabalho de Uman et al. (1975).

A FIGURA 4.22 mostra um ajuste de curva linear para a relação entre os picos de corrente e campo elétrico, para os picos não “contaminados”. A amostra é composta por 34 pulsos de DR’s ocorridas até 63 km da antena. A TABELA 4.9 mostra os valores dos parâmetros relativos ao ajuste, os quais também são apresentados na FIGURA 4.22. Embora esta população possua pulsos ocorridos em uma região de domínio do campo de radiação, como concluído agora a pouco, apenas 9 casos ocorreram a uma distância acima de 40 km e mesmo assim, estes 9 casos são pulsos sem rampa. Ou seja, estes pulsos apresentam “equilíbrio” nas contribuições de ambos os componentes para o campo elétrico. A FIGURA 4.22 e a TABELA 4.9 mostram que, para eventos dentro da região de domínio do componente eletrostático, incluindo relâmpagos próximos, pode-se obter uma boa relação linear entre os picos de corrente e de campo elétrico, desde que sejam considerados, a partir da análise da forma de onda de campo elétrico da DR, picos de campo elétrico que não estejam ou estejam pouco “contaminados” pelo componente eletrostático.

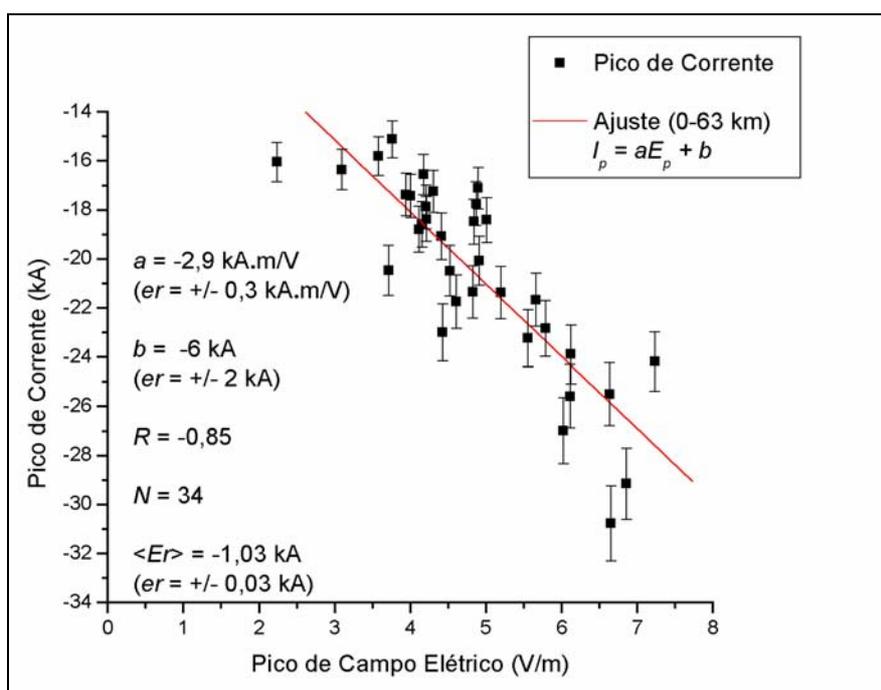


FIGURA 4.22 – Relação $I_p \times E_p$ para picos iniciais de campo elétrico não contaminados ou pouco contaminados pelo campo eletrostático.

TABELA 4.9 – Valores dos coeficientes angular (a), linear (b) e de correlação (R) para o ajuste apresentado na FIGURA 4.22. N é o número de eventos utilizados no ajuste e $\langle Er \rangle$ é o valor médio das barras de erros apresentadas na FIGURA 4.22.

	0-63 km
Coeficiente angular <i>(a)</i>	$-2,9 \pm 0,3 \text{ kA} \cdot \text{m/V}$
Coeficiente linear <i>(b)</i>	$-6 \pm 2 \text{ kA}$
Coeficiente de correlação <i>(R)</i>	$-0,85$
N (amostra)	34
Valor médio das Barras de Erros $\langle Er \rangle$	$-1,03 \pm 0,03 \text{ kA}$

4.4 Observação da Performance do Sistema de Detecção de Relâmpagos

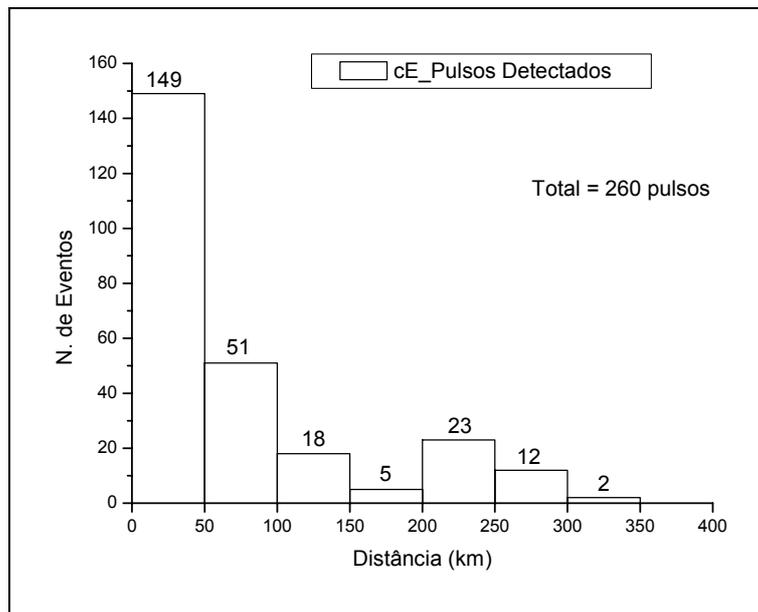
Este item trata da observação da performance do SDR, para os cenários E e H entre si, e da eficiência do SDR em relação à antena de campo elétrico. Além disso, comparações entre características importantes da radiação dos relâmpagos, tais como os tempos de subida e as larguras dos pulsos das DR's, são feitas, a partir de medidas obtidas pelos cenários E e H do SDR e pela antena de campo elétrico.

4.4.1 Eficiência dos Cenários E e H na Detecção de Descargas de Retorno

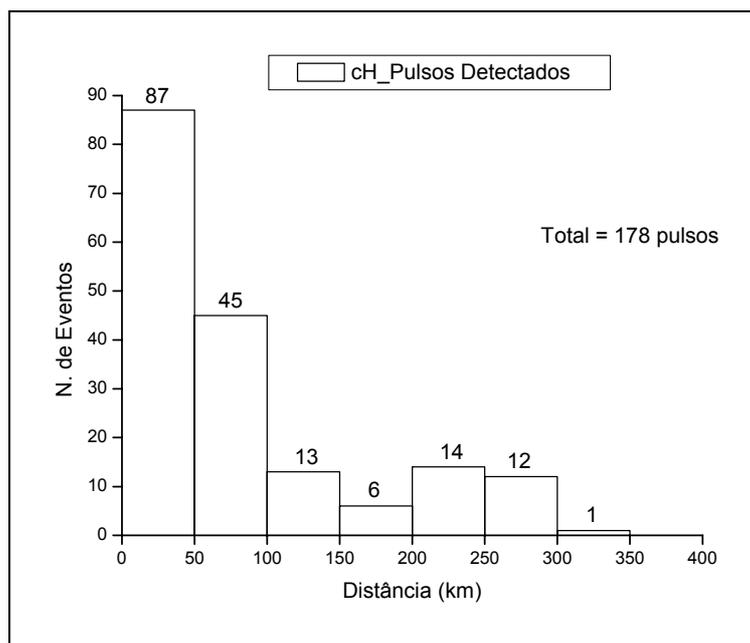
A FIGURA 4.23 apresenta histogramas das distâncias dos pulsos associados à DR's detectadas pelos cenários E e H e também presentes no registro de campo elétrico. Todos os pulsos considerados ocorreram dentro do alcance da antena (350 km). Nesta figura observa-se que, o cenário E detectou 82 pulsos a mais do que o cenário H.

Uma análise de discriminação dos 82 pulsos detectados pelo cenário E através da largura dos pulsos, mostrou que apenas 7 dos 82 pulsos detectados apenas pelo cenário E, foram classificados como sendo do tipo IN. Assim, o cenário E detectou 75 pulsos de DR's as quais não foram detectadas pelo cenário H. As larguras dos pulsos foram medidas uma a uma manualmente, e pulsos com largura abaixo de 10 μ s foram classificados como sendo devidos a descargas IN e pulsos com largura acima de 10 μ s classificados como sendo devidos as DR's. Esta análise foi feita devido a possibilidade de algumas pulsos do tipo IN serem confundidos com DR's.

Com relação à eficiência dos cenários E e H na detecção de DR's, foram usadas como referência, as DR's detectadas pela antena de campo elétrico. Foram consideradas apenas DR's dentro de um raio de 50 km, dado que, a análise das ocorrências de DR's nos registros de campo elétrico foi feita pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho. A TABELA 4.10 mostra os resultados da investigação da eficiência dos cenários na detecção de DR's, em relação à antena de campo elétrico.



a)



b)

FIGURA 4.23 – Histogramas das distâncias dos pulsos detectados pelo SLT através dos cenários E e H.

TABELA 4.10 – Eficiência de detecção de DR’S para os cenários E-H, em relação à antena de campo elétrico.

	Número de DR's detectadas em um raio de 50 km	Eficiência de detecção de DR's
Antena de campo elétrico	184	1,000
Cenário E	149	0,810
Cenário H	87	0,584

Observe que o cenário E apresenta melhor eficiência de detecção de DR's (81,0%) do que o cenário H (58,4%). Estes resultados, assim como os resultados apresentados na FIGURA 4.23 foram influenciados pelo caráter mais restritivo do cenário H em relação ao cenário E e pela configuração do SDR utilizada na aquisição e processamento dos dados. O caráter mais restritivo está associado ao fato de que para a detecção e localização da DR pelo cenário E, deve-se haver pelo menos, 4 medidas de tempo de chegada da radiação a um sensor do SDR (realizadas por antenas IMPACT ou LPATS) e no caso do cenário H deve-se haver 3 medidas de tempo (realizadas por antenas IMPACT ou LPATS) e uma medida de ângulo, o que exige a obrigatoriedade da participação de pelo menos uma antena IMPACT. Além disso, com relação à configuração do SDR, por problemas técnicos as antenas IMPACT's de São José dos Campos e Cachoeira Paulistas não entraram na aquisição e processamento dos dados. Assim, estes 2 fatores juntamente colaboraram para menor eficiência de detecção de DR's por parte do cenário H.

4.4.2 Medidas do Tempo de Subida a Partir da Antena de Campo Elétrico e do Sistema de Detecção de Relâmpagos

Para a análise do Tempo de Subida (*TS*) observado pelo SDR e pela antena de campo elétrico, foram considerados 52 casos de formas de onda de campo elétrico de relâmpagos acima de 50 km. Este critério de seleção objetivou a coerência na comparação entre as observações feitas a partir da antena de campo elétrico e do SDR, uma vez que, o SDR considera como valores de *TS*'s e *LP*'s dos pulsos, àqueles medidos pelo sensor mais próximo, a fim de evitar distorção devido ao efeito de

propagação e ao mesmo tempo, acima de 50 km com o objetivo de eliminação da rampa eletrostática.

As definições para as observações de tempos de subida e larguras dos pulsos, a partir dos registros de campo elétrico obtidos pela antena desenvolvida neste trabalho, são as mesmas que as utilizadas pelos sensores do SDR. Estas definições são apresentadas na FIGURA 4.24 e descritas pelas Equações (4.1) para o TS e (4.2) para a LP .

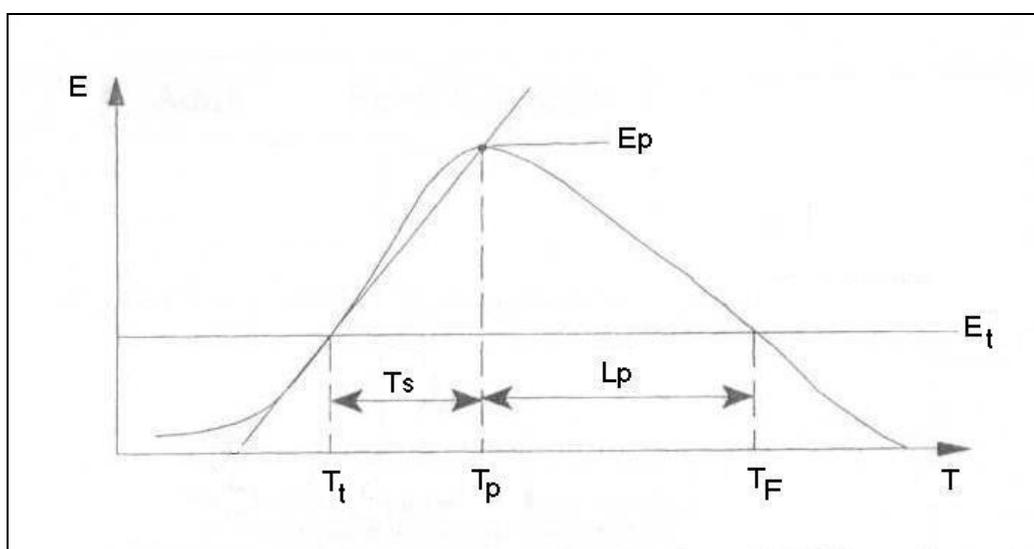


FIGURA 4.24 – Esquema da detecção do tempo de subida e da largura do pulso de campo elétrico feita pelas antenas IMPACT componentes do SDR. E_p = Pico de campo elétrico, E_t = Campo de *trigger* (início da DR), T_t = Tempo de *trigger*, T_p = Tempo do pico, T_F = Tempo em que o pulso cruza o campo de *trigger* durante o decréscimo do sinal, TS = Tempo de subida, LP = Largura do pulso.

FONTE: adaptada de Diendorfer et al. (1998a).

$$TS = T_p - T_t \quad (4.1)$$

$$LP = T_F - T_p \quad (4.2)$$

A FIGURA 4.25 mostra a distribuição dos tempos de subida medidos pela antena de campo elétrico e pelo SDR (cenários E e H). Os valores médios para as distribuições apresentadas na FIGURA 4.25 são iguais a 6,4 μs ; 4,8 μs e 5,0 μs , para a antena de campo elétrico e para os cenários E e H respectivamente. Estes resultados são similares aos resultados apresentados na literatura, que são da ordem de alguns microssegundos. As ligeiras diferenças entre estes resultados e os resultados apresentados na TABELA 2,3 deve-se ao fato de que neste trabalho não foi feita distinção entre TS 's de primeiras DR's e de DR's subsequentes, dado que este tipo de informação não consta no banco de dados do SDR que foi analisado.

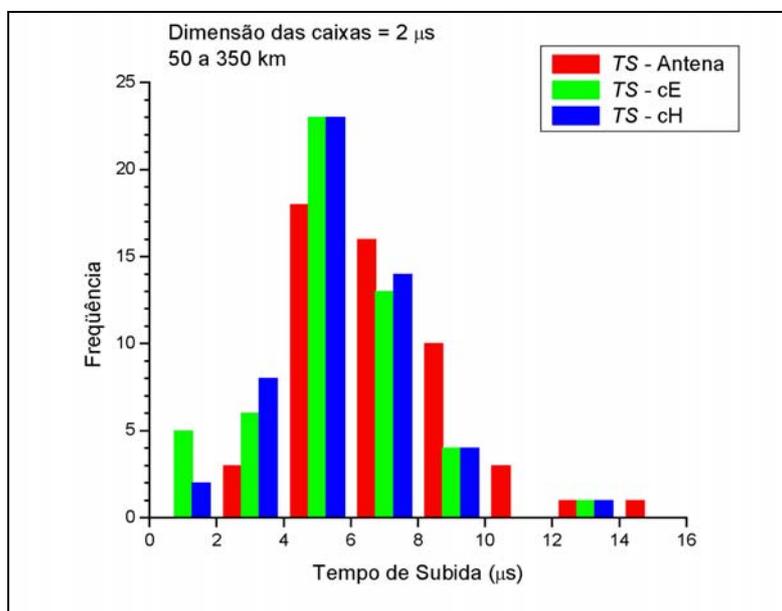


FIGURA 4.25 – Distribuição dos tempos de subida ($0-E_p$) medidos pela antena de campo elétrico e pelo SDR (cenários E (cE) e H (cH)).

Observe na FIGURA 4.25 que, as distribuições dos TS 's para ambos os cenários são similares, indicando que, a qualidade dos tempos de subida medidos por ambos os cenários é a mesma. Além disso, as discrepâncias entre as distribuições obtidas pela antena de campo elétrico e pelo SDR não são significativas, e pode-se concluir que há uma coerência entre as observações feitas pela antena de campo elétrico desenvolvida e pelo SDR. Valores de TS 's registrados pelo SDR como sendo inferiores a 2 μs , foram registrados pela antena de campo elétrico como sendo superiores, devido à resolução

temporal da antena ($1,25 \mu\text{s}$) que resultou para estes poucos casos, uma distorção do sinal, levando a um ligeiro aumentando no valor do TS . Isto não ocorre no caso das observações a partir do SDR, já que a taxa de amostragem dos sensores é da ordem de nanossegundos.

Foi feita uma observação da dependência dos TS 's com a distância de propagação da radiação. A FIGURA 4.26 mostra os ajustes de curvas entre os valores de TS 's das DR's e suas respectivas distâncias, para os casos considerados na análise. Na ordenada tem-se o parâmetro TS e na abscissa a distância. Para os gráficos apresentados na FIGURA 4.26a,b a distância é em relação ao sensor do SDR mais próximo da DR, enquanto que, na abscissa da FIGURA 4.26c, a distância é em relação à antena de campo elétrico. Os parâmetros dos ajustes apresentados na FIGURA 4.26 são similares aos parâmetros apresentados nas FIGURAS 4.20 e 4.22 e nas TABELAS 4.7 e 4.9. A FIGURA 4.26 não mostra uma boa correlação entre os TS 's e a distância, mostrando que o TS não depende da distância, para observações feitas dentro da região considerada neste trabalho. Este resultado é contrário aos resultados obtidos em outros países [Cooray e Lundquist (1983), Uman et al. (1976)].

Segundo Uman et al. (1976), o tempo de subida pode ser acrescido de $1 \mu\text{s}$ em média, caso a radiação se propague por cerca de 200 km acima de um solo finitamente condutor, com uma condutividade entre 0,001 e 0,003 mho/m. Assim, pode-se inferir a partir dos resultados apresentados na FIGURA 4.26, que as diferenças entre a condição de propagação da radiação neste trabalho em relação à condição de propagação considerada no trabalho de Uman et al. (1976), é que são responsáveis pela não dependência dos TS 's com a distância.

O que valida esta conclusão de independência dos TS 's com a distância, é o fato de que 2 sistemas de observação independentes entre si, a antena de campo elétrico e o SDR, chegaram nos mesmos resultados. Este resultado é importante, pois indica não ser necessária, para observações dentro da região considerada neste trabalho, a utilização de modelos para correção dos valores de TS 's alterados pelo efeito de propagação. Além

disso, este resultado aumenta a confiabilidade das observações feitas pela antena de campo elétrico e pelo SDR.

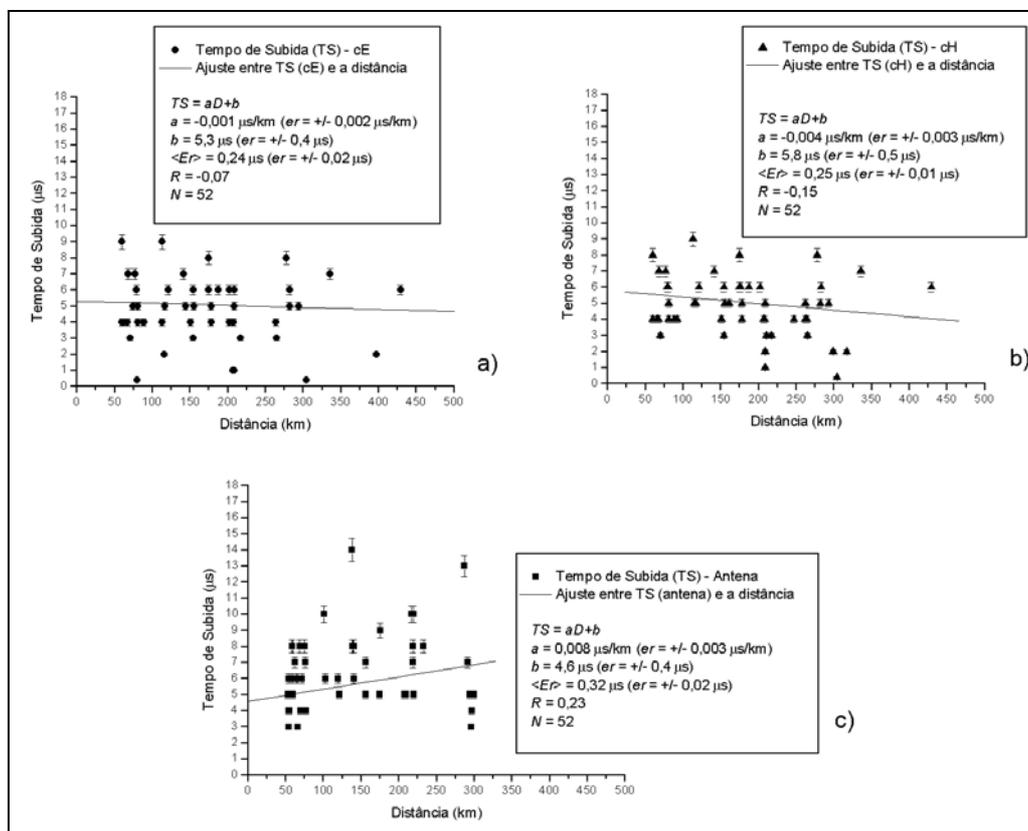


FIGURA 4.26 – Ajuste linear dos tempos de subida das DR's com suas respectivas distância, para os dados provenientes da antena de campo elétrico e do SDR (cenários E e H).

4.4.3 Medidas de Largura de Pulsos de Campo Elétrico a Partir da Antena de Campo Elétrico e do Sistema de Detecção de Relâmpagos

A análise da Largura de Pulso (LP) observada pelo SDR e pela antena de campo elétrico foi feita a partir da mesma amostra pela qual foram analisados os TS 's. A FIGURA 4.27 mostra a distribuição das LP 's para a antena de campo elétrico e para o SDR [cenários E (cE) e H (cH)].

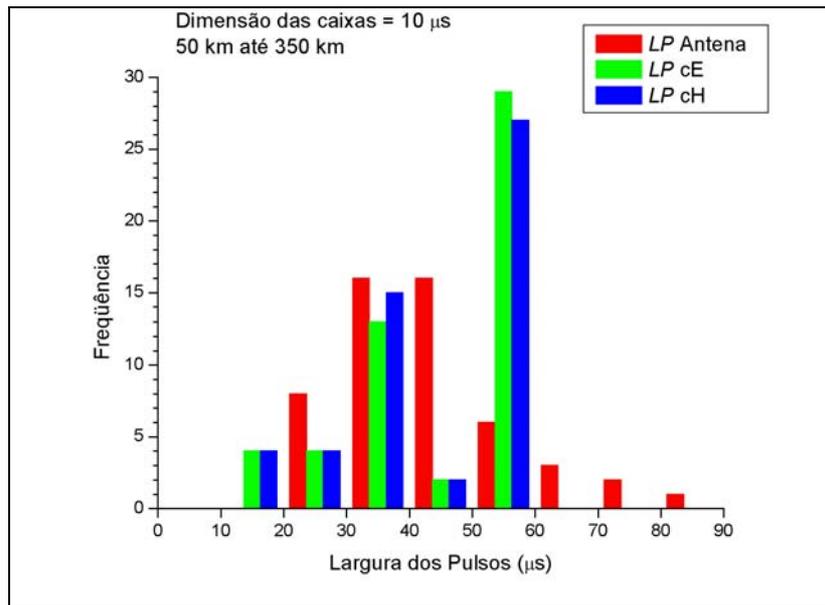


FIGURA 4.27 – Distribuição das Larguras dos Pulsos (*LP*).

Observe na FIGURA 4.27 a similaridade entre as distribuições para ambos os cenários do SDR. Isto indica que a qualidade das observações de *LP*'s por ambos os cenários é a mesma. Porém, o mesmo não pode ser dito com relação à qualidade das observações feitas pela antena de campo elétrico. Os picos nas distribuições do SDR entre 50 µs e 60 µs para os cenários E e H na FIGURA 4.27, estão associados ao fato de que, o SDR para ambos os cenários, registra os valores de *LP*'s para pulsos com larguras acima de 50 µs, como sendo iguais a 50 µs, e assim, não necessariamente poderiam apresentar-se como picos, caso o SDR registrasse os valores realmente medidos para as *LP*'s acima de 50 µs. Porém, é certo que os valores das *LP*'s associados aos picos realmente sejam maiores ou iguais a 50 µs.

Uma análise da FIGURA 4.27 mostra que cerca de 56% dos casos do cenário E e 52% dos casos do cenário H foram registrados pelo SDR com pulsos acima de 50 µs, enquanto cerca de 77% dos casos registrados pela antena de campo elétrico apresentavam *LP*'s menores ou iguais a 50 µs. Isto significa que o SDR está registrando valores de *LP*'s superiores aos valores registrados pela antena de campo elétrico, uma vez que a amostra é a mesma, para a antena e para ambos os cenários.

As possíveis causas para as discrepâncias entre as distribuições de LP 's observadas pela antena de campo elétrico e pelo SDR, apresentadas na FIGURA 4.27 são: o efeito de propagação da radiação em um meio cuja condutividade seja finita, tal como a atmosfera e o solo, que pode resultar em aumento nas LP 's e ou diferentes níveis de ruído da antena de campo elétrico e dos sensores do SDR.

A FIGURA 4.28 mostra os ajustes das distribuições das LP 's em função da distância de observação, para os cenários E e H e para a antena de campo elétrico. Nas FIGURAS 4.28a,b a abscissa corresponde à distância entre a DR e o sensor do SDR mais próximo da DR, e na FIGURA 4.28c, a abscissa corresponde à distância entre a DR e a antena de campo elétrico. Os parâmetros dos ajustes apresentados na FIGURA 4.28, também são similares aos parâmetros apresentados nas FIGURAS 4.20 e 4.22 e nas TABELAS 4.7 e 4.9. A FIGURA 4.28 não mostra uma boa correlação das LP 's com a distância, mostrando que as LP 's não dependem da distância e não sofreram efeito de propagação. Assim, a causa das discrepâncias entre as distribuições das LP 's observadas pela antena de campo elétrico e pelo SDR, não é o efeito de propagação e sim, possivelmente a diferença entre os níveis de ruído da antena de campo elétrico e do SDR.

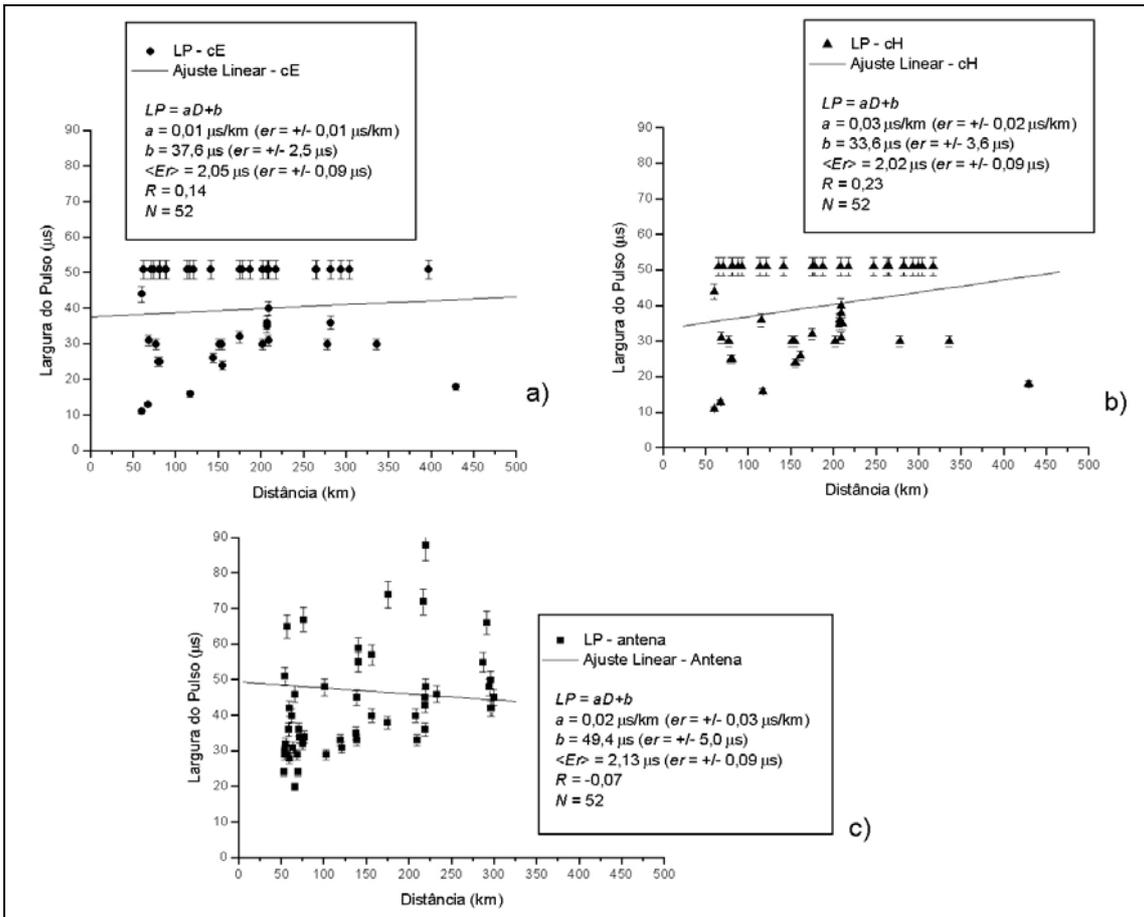


FIGURA 4.28 – Ajuste linear das larguras dos pulsos em relação às suas respectivas distâncias, para os dados provenientes da antena de campo elétrico e do SDR (cenários E e H).

Tanto a antena de campo elétrico quanto os sensores do SDR, apresentam níveis de ruídos deslocados do nível de tensão nulo. Este ruído é o valor registrado pelos equipamentos quando nenhum sinal associado a um evento acontece, e é da ordem de alguns milésimos de volts para o SDR e cerca de 0,25 volts para a antena de campo elétrico. Na ocorrência de um evento, seu sinal é registrado superposto a este ruído. Assim, quanto maior o nível de ruído, um menor valor de LP será medido.

Os valores médios das LP 's são iguais a $43 \mu\text{s}$ para a distribuição obtida a partir da antena de campo elétrico, $41 \mu\text{s}$ para a distribuição obtida a partir do cenário E e $40 \mu\text{s}$ para a distribuição obtida a partir do cenário H. Estes valores médios obtidos a partir do

SDR são provavelmente inferiores aos valores que seriam obtidos, caso o SDR registrasse os valores realmente medidos das *LP*'s acima de 50 μ s. Entretanto, a antena de campo elétrico e o SDR obtiveram resultados similares aos resultados apresentados na literatura (TABELA 2.4). A pequena discrepância dos valores médios para as *LP*'s observadas a partir da antena de campo elétrico, em relação aos resultados apresentados na literatura, deve ser atribuída ao fato de não ter sido feita a distinção entre *LP*'s de primeiras DR's e de DR's subseqüentes. A razão pela qual esta distinção não foi feita é a mesma apresentada no Item 4.4.2. Uma observação importante é o fato de não ser necessário uso de modelos de correção para as *LP*'s alteradas por efeito de propagação, para casos de observações na região de estudo, dado que foi observado que a *LP* não depende da distância e também não sofreu efeito de propagação detectável.

4.5 Erro na Multiplicidade de um Relâmpago Associado a Observações feitas através de Uma Câmera Rápida e Ocorrência de Picos de Campo Elétrico de Descargas de Retorno Subseqüentes Maiores do que os Picos de Campo Elétrico de suas Descargas de Retorno de Primeira Ordem

Neste trabalho o número de bifurcações de um relâmpago, é definido como a contagem dos diferentes pontos no solo atingidos pelas DR's subseqüentes do relâmpago. Uma verificação da possibilidade de uma câmera não detectar uma DR de um relâmpago, devido à bifurcação da DR para fora do campo visual de uma câmera, foi feita através da análise da estrutura fina da forma de onda de campo elétrico, em comparação com as imagens feitas pela câmera rápida. Dado que a resolução para as filmagens utilizadas neste trabalho está entre as melhores, senão a melhor, o interesse neste trabalho está na observação da influência da limitação do campo visual da câmera na detecção das descargas de retorno.

Segundo Willett et al. (1995), as primeiras DR's a viajarem em um canal (primárias), sejam elas de primeira ordem ou a primeira DR subseqüente a viajar em um canal bifurcado, apresentam estruturas finas das derivadas das formas de onda de campo elétrico similares entre si, porém diferente das estruturas finas das derivadas das formas

de onda de campo elétrico de DR's subseqüentes, as quais não são as primeiras a viajarem pelo canal. Segundo Willett et al. (1995), a derivada da forma de onda de campo elétrico de uma DR primária apresenta-se ruidosa após o pico inicial de campo elétrico, enquanto a derivada da forma de onda de campo elétrico de uma DR subseqüente a qual não é primária, apresenta-se suave ou bem menos ruidosa após o pico inicial de campo elétrico. Eles chegaram a estes resultados a partir de uma comparação entre imagens provenientes de uma câmera comum e registros de campo elétrico de relâmpagos com uma resolução igual a 10 ns.

Valine e Krider (2002) apresentam resultados estatísticos sobre a ocorrência de bifurcações dos canais dos relâmpagos, porém sendo limitados devido à baixa resolução temporal da câmera de vídeo usada. Os resultados apresentados a seguir correspondem à primeira associação entre dados provenientes de uma câmera rápida com resolução igual a 1 ms com registros de campo elétrico com uma resolução igual 1,25 μ s. As características das formas de onda das DR's observadas neste trabalho não foram prejudicadas, pelo fato de que a resolução temporal no registros das formas de onda de campo elétrico utilizada nesse trabalho seja inferior à resolução utilizada por Willett et al. (1995), porém, este trabalho traz consigo a vantagem de estar-se observando filmagens com uma resolução temporal bem melhor do que a utilizada por Willett et al. (1995).

Neste trabalho, pretende-se através da análise da estrutura fina da forma de onda de campo elétrico e das imagens feitas pela câmera rápida, verificar se as DR's presentes no registro de campo elétrico, mas ausentes na filmagem, podem ter se bifurcado para fora do campo visual da câmera, resultando em subestimação da multiplicidade pela câmera rápida. A seleção dos dados foi feita através da associação entre os registros de campo elétrico e as filmagens, e considerou apenas os casos em que, houvesse a certeza de que as DR's filmadas pertencessem ao relâmpago considerado e que pelo menos uma das DR's filmadas fosse bem visível. Esta seleção também foi influenciada pelas possibilidades observadas a partir dos registros de câmera rápida, as quais foram: a ocorrência de DR's bifurcadas bem visíveis e suas formas de onda de campo elétrico; a ocorrência de formas de onda de campo elétrico de DR's associadas a apenas um

razoável aumento na intensidade luminosa no *frame* correspondente ou nenhuma evidência no *frame* correspondente e a ocorrência de DR's com imagens saturadas ou de má visibilidade. Assim, dentro de um total de 8 relâmpagos filmados, foram selecionados 4 casos de DR's filmadas e contendo suas formas de onda de campo elétrico. Dos 4 relâmpagos selecionados para análise, 1 apresentou 10 DR's e um único canal bem visível, terminando em um único ponto no solo, enquanto 3 apresentaram canais terminando em diferentes pontos no solo.

Para os casos onde não há a ocorrência do canal no *frame* correspondente a um pulso de uma DR no registro de campo elétrico, há uma grande possibilidade de que esta DR tenha se bifurcado para fora do campo visual da câmera, uma vez que, Valine e Krider (2002), mostram resultados estatísticos que indicam ser pequena a possibilidade de ocorrência em uma tempestade, de 2 relâmpagos separados entre si por um intervalo de tempo menor ou igual a 1 segundo, ocorrendo assim, superposição de registros de DR's de diferentes relâmpagos no mesmo registro de campo elétrico.

A FIGURA 4.29 mostra os *frames* de 3 DR's filmadas de um mesmo relâmpago correspondente à forma de onda de campo elétrico apresentada na FIGURA 4.30.

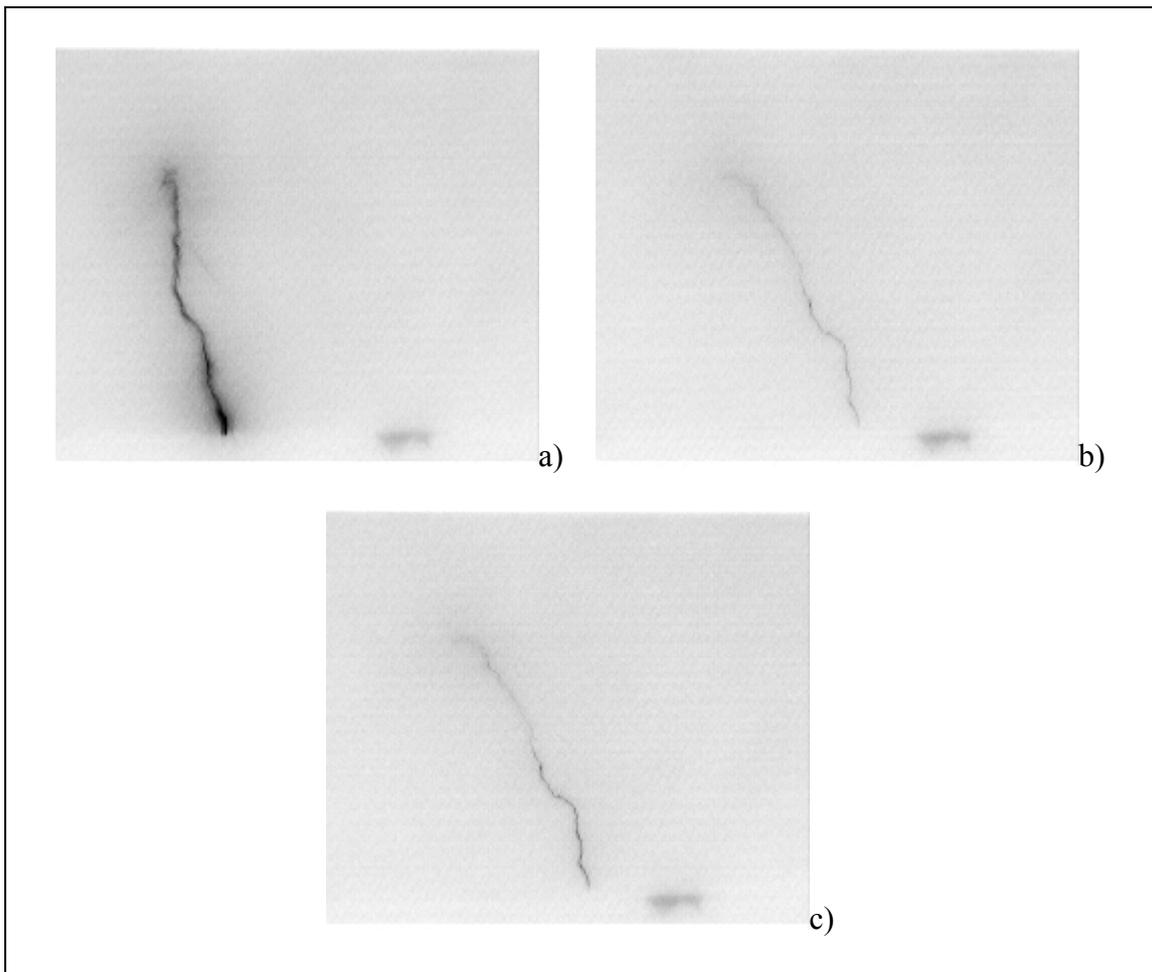


FIGURA 4.29 – Filmagem das DR's de um relâmpago ocorrido no dia 05/03/2003 às 00:52:30,045 Horas (UT), a cerca de 15 km da torre de observação.

As DR's apresentadas na FIGURA 4.29, correspondem aos pulsos de campo elétrico de números 1, 4 e 5, presentes no registro de campo elétrico em escala de milissegundos apresentado na FIGURA 4.30.

A FIGURA 4.31 mostra as formas de onda de campo elétrico e suas derivadas em escala de microssegundos, dos pulsos de campo elétrico (1 a 5) do relâmpago apresentado na FIGURA 4.30.

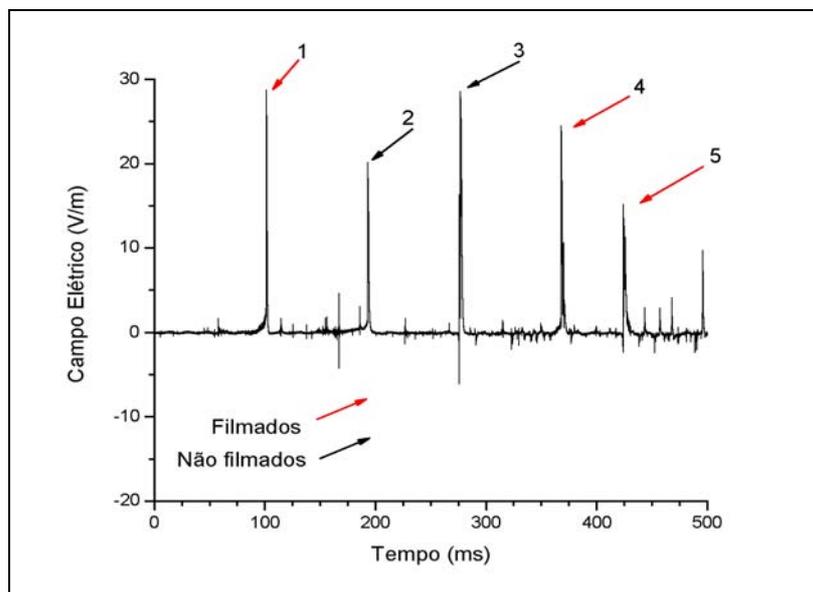


FIGURA 4.30 – Forma de onda de campo elétrico do relâmpago “b”, ocorrido às 17:08:37,364 horas (UT), hora da primeira DR, no dia 05/03/03.

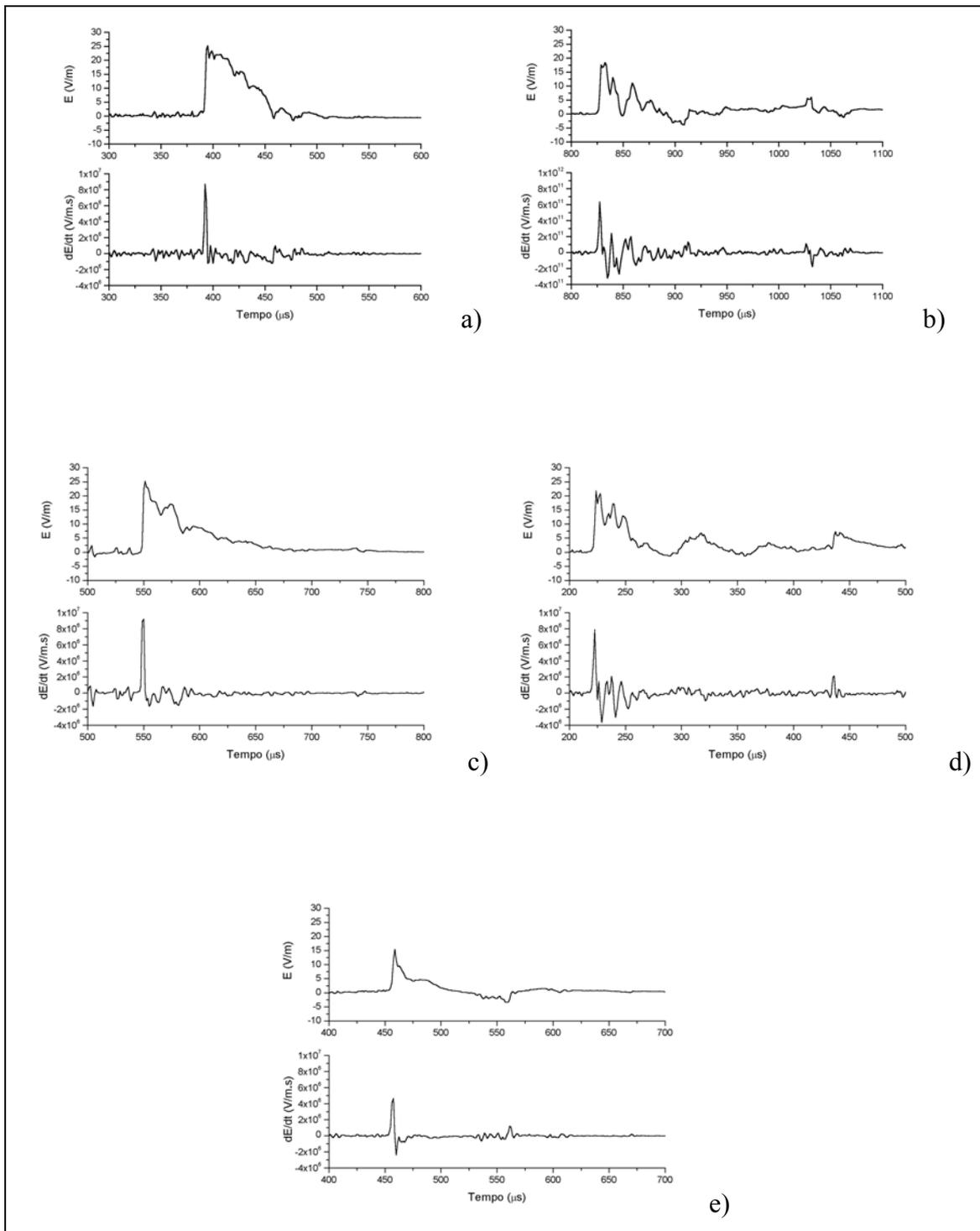


FIGURA 4.31 – Formas de onda de campo elétrico e suas derivadas para os pulsos de DR's do relâmpago apresentado na FIGURA 4.30. Os pulsos 1,4 e 5 foram filmados e são apresentados na FIGURA 4.29.

As FIGURAS 4.29(a, b e c) correspondem às FIGURAS 4.31(a, d e e) e aos pulsos 1, 4 e 5 na FIGURA 4.30. Os pulsos 2 e 3 na FIGURA 4.30 e expandidos nas FIGURAS 4.31(b,c) não foram observados nas filmagens. Na FIGURA 4.29(b, c) o canal corresponde a uma bifurcação do canal prévio apresentado na FIGURA 4.29a. A FIGURA 4.31d correspondente à segunda DR filmada a qual foi bifurcada, e apresenta um nível de ruído considerável após o pico de campo, tanto no campo elétrico como em sua derivada. Já a FIGURA 4.31e correspondente à terceira DR filmada, a qual embora bifurcada em relação à primeira DR, é a segunda DR a viajar pelo canal bifurcado, apresenta uma forma de onda relativamente suave após o pico de campo tanto para o campo elétrico quanto para a sua derivada, em acordo com Willett et al. (1995). Este mesmo comportamento observado entre os pulsos de DR's apresentados nas FIGURAS 4.31b,c indica que é muito provável que suas DR's tenham se bifurcado assim como as DR's relativas à seqüência de pulsos apresentadas nas FIGURAS 4.31(d,e). Infelizmente, através das filmagens não é possível detectar a direção da bifurcação de tais pulsos. É possível que para estas DR's, o canal tenha se bifurcado para fora do campo de visão da câmera rápida. De qualquer forma, embora este resultado não seja estatisticamente suficiente para concluir-se a respeito da técnica de observação de multiplicidade de um relâmpago por filmagens, como sendo a melhor ou não, ele chama a atenção para a limitação desta técnica, no que se refere à influência da limitação do campo visual nos resultados para relâmpagos próximos.

Relembrando a classificação adotada por Valine e Krider (2002), um relâmpago múltiplo bifurcado, ou seja, cujas DR's atingem o solo em 2 ou mais pontos diferentes, é classificado como RMC. Dentro da classe dos RMC's, há ainda os RNC's e os RCA's. Os RNC's apresentam 2 ou mais canais completamente separados abaixo da base da nuvem, enquanto que, os RCA's apresentam canais que tocam o solo em 2 ou mais pontos diferentes, porém há um canal comum acima de uma certa altitude abaixo da base da nuvem. Neste trabalho, foi adotada a mesma classificação utilizada por Valine e Krider (2002), com as seguintes adições: para os casos de relâmpagos do tipo RMC, nos quais os canais separados possuam um ponto de convergência a uma certa altura, mas não apresentam canal a uma altura superior ao ponto de convergência, este

ponto foi assumido como estando na base da nuvem e estes relâmpagos foram considerados como RNC's. Em alguns casos, devido à dificuldade de observar-se a base da nuvem, a existência de um canal comum acima do ponto de convergência entre 2 ou mais DR's, foi suficiente para assumir o relâmpago como RCA. Além disso, relâmpagos apresentando um único canal foram classificados como Relâmpagos de Canal Simples (RCS). A TABELA 4.11 mostra as características dos 4 relâmpagos observados quanto à geometria do canal.

TABELA 4.11 – Classificação dos relâmpagos observados quanto à geometria do canal.

Data do Evento	Hora (UT)	Número de DR's Filmadas	Número de pontos em que o canal toca o solo visivelmente	Tipo de canal observado
05/03/2003	17:08:37,364	3	2	RNC
05/03/2003	17:11:46,359	10	1	RCS
05/03/2003	17:20:45,801	4	2	RNC
19/03/2003	19:29:43,071	3	3	RNC

Observe na TABELA 4.11 que nenhum relâmpago RCA foi observado, apenas RCS e RNC's. O primeiro relâmpago de classificação RNC é apresentado na FIGURA 4.29. Note que as 3 DR's iniciam-se no mesmo ponto e que não se pode ver canal acima deste ponto. A FIGURA 4.29 sugere a elevada possibilidade de que as 3 DR's possam ter iniciado em um mesmo ponto na base da nuvem e se propagado em diferentes canais entre o solo e a base da nuvem. A FIGURA 4.32 mostra o segundo relâmpago RNC indicado na TABELA 4.11.

Observe na FIGURA 4.32 que a primeira e a segunda DR's são as primeiras a se propagarem por um canal e espera-se que as derivadas de suas formas de onda de campo elétrico sejam ruidosas após o pico inicial de campo elétrico. Já a terceira e a quarta DR's subsequentes passam pelo canal bifurcado o qual já foi percorrido pela primeira vez pela segunda DR e espera-se que as derivadas das formas de onda de seus campos elétricos após o pico inicial sejam mais suaves.

A FIGURA 4.33 mostra DR's do terceiro relâmpago classificado como RNC. Uma análise detalhada, quadro a quadro do relâmpago apresentado na FIGURA 4.33 leva a concluir que as 3 DR's iniciam-se no mesmo ponto. Veja que todas as DR's se bifurcaram e tocaram diferentes pontos no solo.

Em resumo, foram selecionados 4 relâmpagos múltiplos para os quais suas DR's filmadas apresentassem canais legivelmente visíveis. Destes relâmpagos, apenas um apresentou um único canal (RCS). Dentre os relâmpagos do tipo RMC, não houve um sequer que não estivesse em acordo com a afirmativa de Willett et al. (1995), fossem bifurcados ou não. A partir desta afirmativa de Willett et al. (1995) foi possível constatar uma limitação na estimativa da multiplicidade dos relâmpagos através de uma câmera para relâmpagos próximos, devido à limitação na extensão do campo visual da câmera. As FIGURAS 4.29 e 4.31, juntamente a uma análise da estrutura fina das formas de onda de campo elétrico e suas derivadas, mostram como efeito dessa limitação, a subestimação da multiplicidade do relâmpago apresentado nestas FIGURAS. A FIGURA 4.33b também fortalece esta evidência ao mostrar uma DR que fora bifurcada para a esquerda. Felizmente ela fora parcialmente vista, o que permitiu considerá-la e assim evitar a subestimação da multiplicidade deste relâmpago.

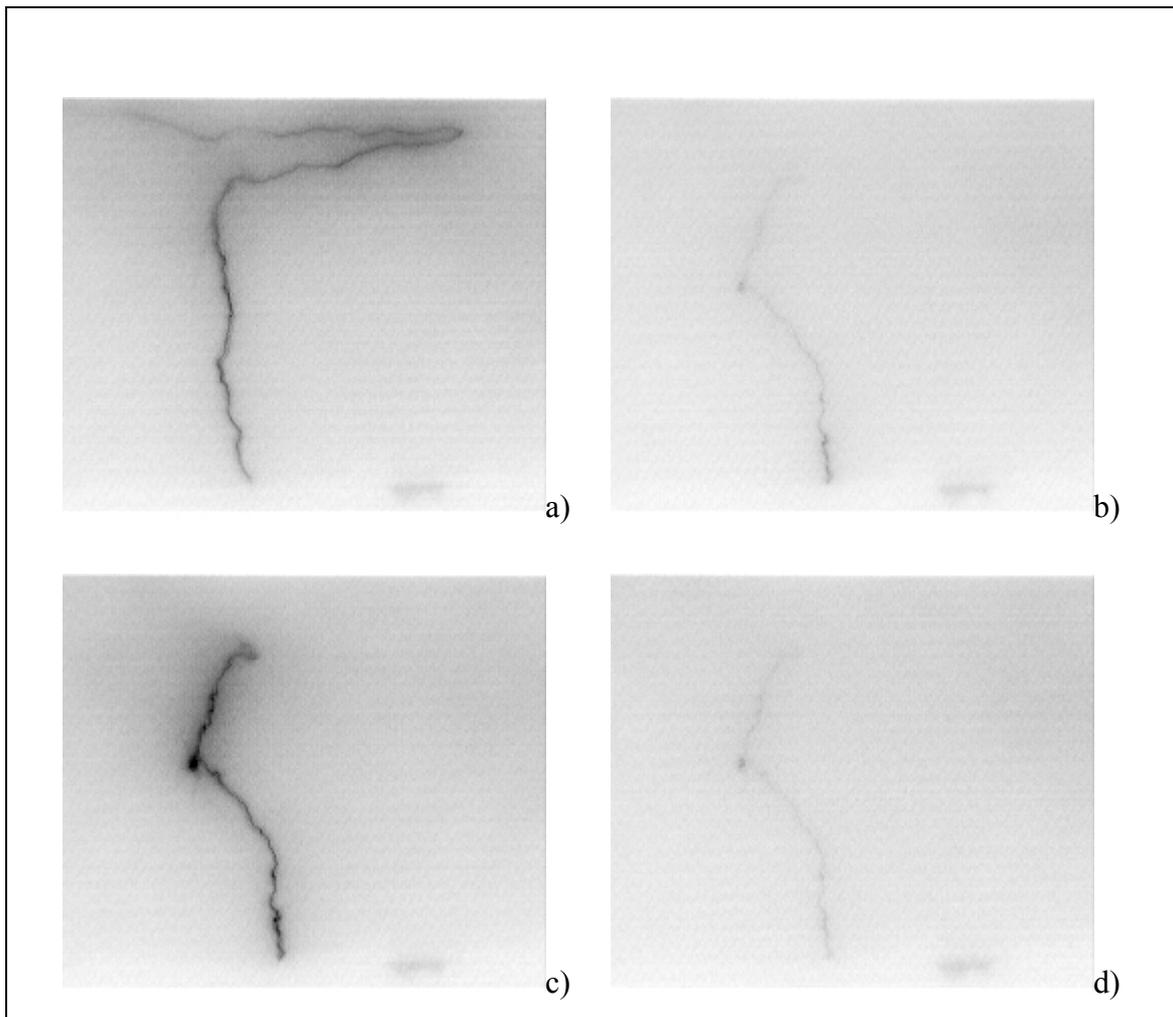


FIGURA 4.32 – Descargas de retorno de um relâmpago RNC, ocorrido no dia 05/03/2003 às 17:20:45,801 horas (UT), a cerca de 10 km da torre de observação.

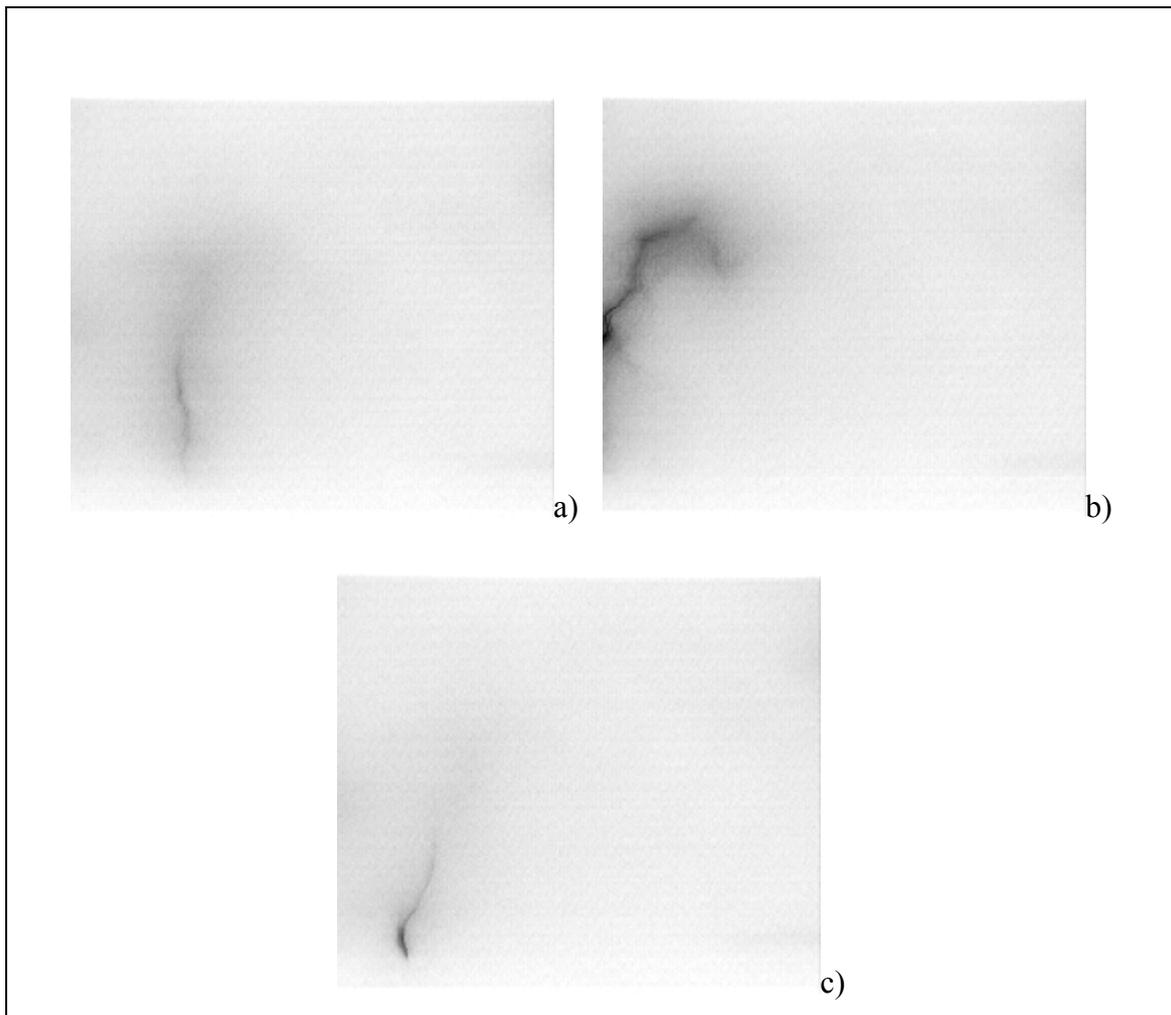


FIGURA 4.33 - Descargas de retorno de um relâmpago RNC, ocorrido no dia 19/03/2003 às 19:29:43,071 horas (UT), a cerca de 25 km da torre de observação.

Para a observação da ocorrência de DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que às amplitudes de suas DR's de primeira ordem, foram analisados os registros de campo elétrico de relâmpagos que ocorreram dentro de um raio de 50 km e de registros correlatos de câmera rápida e campo elétrico, objetivando a associação entre a ocorrência de tais DR's com a bifurcação ou não dos seus canais.

Para análise a partir do banco de dados composto apenas pelos registros de campo elétrico, foi utilizado o algoritmo desenvolvido neste trabalho. Através dos registros de campo elétrico foi detectado um total de 107 DR's subseqüentes em um raio de 50 km

de observação. Destas 107 DR's subseqüentes, 39 DR's (36,4%) apresentaram DR's subseqüentes com amplitudes superiores às amplitudes de suas respectivas primeiras DR's, um resultado similar ao encontrado por Thottappillil et al. (1992). A partir desse mesmo banco de dados, composto por 40 relâmpagos negativos múltiplos contendo 147 DR's, um valor médio igual a 3,68 foi obtido para a multiplicidade dos relâmpagos. Este valor é bem próximo ao valor obtido através das imagens de câmera rápida apresentado no Item 4.2.2. A média geométrica para o intervalo de tempo entre DR's obtida, é igual a 75 ms, um valor similar aos valores apresentados na literatura.

Foram observadas também, ocorrências de DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que as amplitudes de suas primeiras DR's, nos relâmpagos filmados. O objetivo desta observação foi fazer uma associação entre a ocorrência desses eventos e a geometria do canal (bifurcação ou não). Primeiramente uma comparação entre amplitudes das DR's foi feita a partir do registro de campo elétrico. Para aquelas DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que as amplitudes de suas primeiras DR's, a observação de bifurcação ou não do canal foi feita a partir das imagens de câmera rápida. Nesta análise foram utilizados apenas os 4 relâmpagos múltiplos e filmados já comentados, e a razão para tal escolha foi a mesma apresentada no estudo da possibilidade de subestimação da multiplicidade por uma câmera, associada à limitação do campo visual. A TABELA 4.12 mostra os resultados desta observação.

TABELA 4.12 – Relação entre a ocorrência de $DR_{sub} > DR_p$ e a geometria do canal. O termo $DR_{sub} > DR_p$ significa DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que as amplitudes de suas primeiras DR's.

Relâmpago	N. de dr's subseqüentes	N. de $DR_{sub} > DR_p$	Ordem da $DR_{sub} > DR_p$	Tipo de canal
A 05/03/2003	4	1	3 ^a	RNC
B 05/03/2003	9	2	4 ^a e 8 ^a	RCS
C 05/03/2003	3	1	3 ^a	RNC
D 19/03/2003	2	1	2 ^a	RNC
Total	18	5 (28%)	--	--

Dentre os 4 relâmpagos observados, todos apresentaram DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que a amplitude de sua DR de primeira, sendo que, 3 apresentaram uma única DR subseqüente com amplitude maior do que a amplitude de sua DR de primeira ordem e um relâmpago apresentou 2 DR's subseqüentes com amplitudes maiores do que a amplitude de sua DR de primeira ordem. Dos 4 relâmpagos cuja amplitude de campo elétrico de alguma DR excedeu a amplitude de sua DR de primeira ordem, 3 foram bifurcados, sendo do tipo RNC segundo a classificação adotada neste trabalho. A TABELA 4.12 parece sugerir que a ocorrência de DR's subseqüentes, com amplitudes maiores do que as amplitudes de suas primeiras DR's, está associada ao fato do relâmpago ser bifurcado, embora este tipo de relação entre amplitudes de DR's pode ocorrer em relâmpagos não bifurcados. Para uma análise mais conclusiva, sugere-se como trabalho futuro, novas observações a partir de um banco de dados maior.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Pela primeira vez, registros de formas de onda de campo elétrico da radiação gerada por relâmpagos, com uma resolução igual a $1,25 \mu\text{s}$ e sincronizados à hora GPS, foram feitos no Brasil. Para isto, foi projetado um aparato composto por uma antena capacitiva para medida de campo elétrico, acoplada a um sistema de digitalização com a resolução mencionada e a uma antena de GPS. Além disso, pela primeira vez no Brasil foram feitas associações e comparações de informações provenientes desses registros com as informações provenientes da câmera rápida e do SDR. Este equipamento desenvolvido teve uma contribuição importante no alcance dos objetivos de caráter científico e técnico, sem a qual não seria possível alcançá-los. A seguir são apresentadas as principais conclusões a partir dos resultados associados aos objetivos científico e técnico.

Caráter Científico

A multiplicidade média de relâmpagos negativos foi observada neste trabalho. Para observações de 8 casos de relâmpagos com registros simultâneos de campo elétrico e de câmera rápida, as multiplicidades médias obtidas foram iguais a 4,00 para observações a partir da câmera rápida e 4,38 para observações a partir da antena de campo elétrico. Para bancos de dados não correlatos, os valores médios para a multiplicidade foram iguais a 3,85 para 20 relâmpagos filmados e 3,68 para 40 relâmpagos registrados pela antena de campo elétrico. Uma importante conclusão é o fato de que, os resultados obtidos pela câmera rápida e pela antena de campo elétrico são similares entre si. Eles também são similares à maioria dos resultados obtidos por técnicas similares em outros locais (TABELA 2.1). Além disso, são melhores do que os resultados apresentados por Miranda (2000) e Ferraz (2001), devido ao uso de técnicas mais precisas tais como: câmera rápida, registros de campo elétrico com alta resolução e critérios para o processamento dos dados mais precisos, validados através de uma análise comparativa entre registros de câmera rápida e campo elétrico.

Observações dos intervalos de tempo entre DR's foram feitas a partir da câmera rápida e da antena de campo elétrico. As médias geométricas para os intervalos de tempo entre DR's foram iguais a 83 ms para a câmera rápida e 76 ms para a antena de campo elétrico, para os 8 relâmpagos filmados e contendo registros de campo elétrico. A média geométrica para o intervalo de tempo entre DR's para 20 relâmpagos filmados foi igual a 58 ms e o valor obtido a partir dos registros de campo elétrico de 40 relâmpagos foi igual a 75 ms. Os valores de média geométrica para o intervalo de tempo entre descargas de retorno, obtidos pela câmera rápida e pela antena de campo elétrico, também são similares entre si. Além disso, eles são similares à maioria dos resultados obtidos por técnicas similares em outros locais (TABELA 2.2), e são melhores do que os resultados apresentados por Miranda (2000), também devido ao uso de técnicas mais precisas.

A relação entre os picos de corrente e de campo elétrico foi estudada. Uma boa correlação ($R = -0,90$) para a relação entre os picos de corrente estimados pelo SDR e os picos de campo elétrico medidos pela antena capacitiva, para distâncias entre 30 km e 350 km foi obtida. Este resultado está em acordo com a literatura que apresenta uma relação linear entre picos de campo elétrico e de corrente para DR's ocorridas distantes do observador, onde predomina o componente de radiação. Neste trabalho, foi verificada a região de domínio dos componentes eletrostático e de radiação sobre a forma de onda de campo elétrico, e foi observado que, para distâncias de observação entre o observador e o relâmpago iguais a até 35 km, a forma de onda de campo elétrico é dominada pelo componente eletrostático, e, para distâncias de observação acima de 40 km, a forma de onda é dominada pelo componente de radiação. Para distâncias de observação entre 35 km e 40 km, foi observado um equilíbrio no domínio de ambos os componentes sobre a forma de onda de campo elétrico. Foi observado que, mesmo para formas de onda de campo elétrico de DR's ocorridas dentro da região de domínio do componente eletrostático, pode-se obter uma boa relação linear entre os picos de corrente e de campo elétrico, desde que os picos de campo elétrico não estejam "contaminados" por contribuição do componente eletrostático. Os picos de campo elétrico são considerados "não contaminados" quando, a partir deles o registro de

campo elétrico decai até um valor próximo do valor de início da DR, antes do início da rampa associada ao componente eletrostático, seja esta rampa considerável ou não. Este resultado é importante, pois mostra a possibilidade de poder-se utilizar uma relação linear mais simples tal como a Equação (2.1). Sugere-se então, a determinação de uma relação similar à apresentada na FIGURA 4.22, a partir de um maior número de picos de campo elétrico “não contaminados”, porém dentro de regiões dominadas pelo componente eletrostático, a fim de que esta relação possa ser utilizada em trabalhos futuros na estimativa do pico de corrente a partir do pico de campo elétrico, nos casos de picos de campo elétrico “não contaminados”.

Valores de tempos de subida de formas de onda de campo elétrico de DR's de relâmpagos negativos foram observados pela antena de campo elétrico e pelo SDR (cenários E e H). Os valores médios obtidos para os tempos de subida foram iguais a 6,4 μ s; 4,8 μ s e 5,0 μ s para observações a partir da antena de campo elétrico e dos cenários E e H respectivamente. É provável que as ligeiras diferenças entre estes resultados e os apresentados na literatura (TABELA 2.3), sejam devidas a 2 fatores: o primeiro é o fato de que, neste trabalho não foi feita uma distinção entre descargas de retorno de primeira ordem e subseqüentes, dado que, o banco de dados proveniente do SDR e utilizado neste trabalho, também não fez tal distinção. O segundo fator, associado ao fato do resultado obtido pela antena de campo elétrico ser um pouco superior aos resultados obtidos pela mesma técnica e definição de tempo de subida em outros lugares, pode ser devido à menor resolução dos registros de campo elétrico utilizada neste trabalho, em relação às resoluções utilizadas nos outros trabalhos. Contudo, os resultados são similares aos apresentados na literatura e encontram-se dentro da variabilidade nela apresentada. Uma observação da dependência dos tempos de subida com a distância de propagação da radiação foi feita. Verificou-se que o tempo de subida não depende da distância para observações feitas dentro da região considerada neste trabalho (FIGURA 4.26), um resultado contrário aos obtidos em outros países [Cooray e Lundquist (1983), Uman et al. (1976)]. É possível que as condições de propagação da radiação na região considerada neste estudo, seja diferente das condições em outros países, a ponto de não interferir nos valores de tempos de subida da radiação. Este resultado é importante, uma

vez que é confirmado por 2 sistemas de observação independentes entre si (antena de campo elétrico e o SDR) e indicam não ser necessário a utilização de modelos para correção dos valores dos tempos de subida alterados pelo efeito de propagação, conferindo maior credibilidade às observações feitas pela antenna de campo elétrico e pelo SDR.

Observações das larguras de pulsos das formas de onda de campo elétrico, de DR's de relâmpagos negativos, foram feitas pela antenna de campo elétrico e pelo SDR (cenários E e H). Os valores médios obtidos para as larguras de pulsos foram iguais a 43 μs ; 41 μs e 40 μs , para observações a partir da antenna de campo elétrico e dos cenários E e H respectivamente. Em relação aos resultados apresentados na literatura (TABELA 2.4), os valores médios obtidos neste trabalho aproximam-se mais dos valores médios obtidos através de registro de campo elétrico. Além disso, eles aproximam-se mais ainda dos resultados obtidos para descargas de retorno subseqüentes, devido ao fato de não ter sido feita, neste trabalho, a distinção entre descargas de retorno de primeira ordem e subseqüentes, sendo a maior parte do banco de dados, composta por descargas subseqüentes. Contudo, os valores médios das larguras de pulsos obtidos pela antenna de campo elétrico são similares aos apresentados na literatura, encontrando-se dentro da variabilidade nela apresentada. Verificou-se que a largura de pulso não depende da distância para observações feitas dentro da região considerada neste trabalho (FIGURA 4.28). É possível que as condições de propagação da radiação na região considerada neste estudo, seja diferente das condições em outros países, a ponto de não interferir nos valores das larguras de pulsos da radiação. Assim como para as observações dos tempos de subida, este resultado também é importante uma vez que é confirmado por 2 sistemas de observação independentes entre si (antenna de campo elétrico e o SDR) e indicam não ser necessário a utilização de modelos para correção dos valores de larguras de pulsos alterados pelo efeito de propagação, tornando mais confiáveis as observações feitas pela antenna de campo elétrico e pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos.

Caráter Técnico

Foram avaliados critérios para a detecção de DR's e o agrupamento delas em relâmpagos, a partir do registro obtido por uma antena de campo elétrico. Como critérios para a detecção e a discriminação dos pulsos de campo elétrico, como sendo devidos a descargas do tipo DR ou IN, foram considerados os critérios das amplitudes e o critério das larguras dos pulsos. Em 50% dos registros de campo elétrico de relâmpagos filmados e examinados pelo critério das amplitudes, nenhum pulso sequer, foi detectado e classificado como sendo devido à uma descarga de retorno. Além disso, para os 50% em que houve detecção de pulsos como sendo devidos a descargas de retorno, dentre esses pulsos, alguns foram verificados a partir da análise das imagens de câmera rápida, como sendo devidos a descargas dentro da nuvem. O critério da largura do pulso apresentou bons resultados na detecção e discriminação dos pulsos. A partir da distribuição dos picos de campo elétrico com a distância, foi estabelecida no algoritmo uma amplitude mínima igual a 10 V/m, para a aceitação de um pulso detectado pelo algoritmo a partir do registro de campo elétrico, como tendo ocorrido dentro da região de interesse, que corresponde a um raio de 50 km do observador. Foi observado que, 3% dos pulsos com amplitudes maiores ou iguais a 10 V/m, ocorreram acima de 50 km do observador, e que 7% dos pulsos com amplitudes menores a 10 V/m, ocorreram até no máximo 50 km do observador, sendo estes percentuais as incertezas ao admitir, pulsos com amplitudes maiores ou iguais a 10 V/m como sendo localizados até 50 km do observador e pulsos com amplitudes abaixo de 10 V/m como sendo localizados acima de 50 km do observador. O melhor valor para o parâmetro tempo morto utilizado na detecção de pulsos nos registros de campo elétrico foi igual a 2 ms. Já o melhor valor para o limiar de Largura de Pulso, para a discriminação dos pulsos detectados como sendo associados à descargas de retorno ou descargas dentro da nuvem, foi igual a 10 μ s. Para o agrupamento dos pulsos classificados como devidos a descargas de retorno, foram considerados os critérios da máxima separação temporal entre as descargas de retorno de um relâmpago e a máxima duração dos relâmpago, sendo os melhores valores iguais a 500 ms e 1 s respectivamente. Estes resultados contribuem com uma melhoria da técnica de observação de relâmpagos através de registros da radiação.

Valores de multiplicidade e intervalos de tempo entre descargas de retorno foram obtidos a partir dos registros de campo elétrico dos relâmpagos filmados e analisados segundo os critérios validados neste trabalho, e a partir de imagens de câmera rápida. Os resultados obtidos através da antena de campo elétrico e através da câmera rápida foram próximos. Em 50% dos casos analisados a multiplicidade obtida a partir da antena de campo elétrico foi igual à multiplicidade obtida a partir das imagens da câmera rápida. Para os outros 50%, ligeiras discrepâncias foram observadas. Os intervalos de tempo observados pela câmera rápida e pelo registro de campo elétrico apresentam distribuições similares. A pequena discrepância entre ambas as distribuições, está relacionada à pequena discrepância entre as multiplicidades. Foi observado que, as discrepâncias entre as multiplicidades observadas a partir da antena de campo elétrico e das imagens da câmera rápida, que por sua vez influenciaram nas distribuições dos intervalos de tempo entre as descargas de retorno, também observados a partir de ambas as técnicas, foram devidas, ora às limitações da técnica de observação a partir da antena de campo elétrico, ora às limitações da técnica de observação a partir da câmera rápida. Estes valores mostram que, as observações a partir dos registros de campo elétrico, processados segundo os critérios encontrados neste trabalho, apresentam resultados muito próximos dos resultados obtidos através de observações feitas pela câmera rápida, assumidos como reais.

Os valores médios para as multiplicidades observadas pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos (1,95 para o cenário E; 1,75 para o cenário H e 1,90 para o Tempo Real) equivalem aproximadamente à metade do valor observado pela câmera rápida (3,85). Os valores de média geométrica dos intervalos de tempo entre descargas de retorno observados pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos (124 ms para o cenário E, 123 ms para o cenário H e 114 ms para o tempo Real) são cerca de 2 vezes o valor observado pela câmera rápida (58 ms), um resultado provavelmente influenciado pelos mesmos fatores que influenciaram nas discrepâncias de multiplicidade. Estes resultados mostram que, a técnica de observação de multiplicidade e tempo entre descargas de retorno a partir do registro de campo elétrico, foi melhor do que as observações feitas pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos.

Uma observação da performance dos cenários E e H do SDR foi feita. Durante todo o período de observação, o cenário E detectou 75 descargas de retorno a mais do que o cenário H, o que mostra que o cenário E, apresentou melhor performance na detecção das descargas de retorno. A eficiência dos cenários E e H em relação à antena de campo elétrico que detectou um total de 184 pulsos de descargas de retorno em um raio de 50 km, foi observada. O cenário E apresentou uma eficiência na detecção de DR's igual a 81% em relação à antena de campo elétrico, enquanto o cenário H apresentou uma eficiência igual a 58,4% (TABELA 4.10). Os piores resultados apresentados pelo cenário H, são devidos ao seu caráter mais exigente, associado ao fato de que, por problemas técnicos, as antenas IMPACT de Cachoeira Paulista e São José dos Campos, não terem participado da aquisição e processamento dos dados. Acredita-se que, caso a antena IMPACT de Cachoeira Paulista e ou a de São José dos Campos tivessem participado na aquisição e no processamento dos dados, o cenário H pudesse apresentar resultados comparáveis aos resultados apresentados pelo cenário E.

As distribuições dos tempos de subida observados pelo SDR (cenários E e H) e pela antena de campo elétrico são similares, indicando que a qualidade dos tempos de subida observados pelo SDR e pela antena de campo elétrico é a mesma. As distribuições das larguras de pulsos observadas pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos (cenários E e H) são similares entre si, porém, diferentes da distribuição das larguras de pulsos observadas pela antena de campo elétrico. Estas diferenças são atribuídas ao maior nível de ruídos da antena de campo elétrico, que faz com que a antena de campo elétrico meça valores menores para as larguras de pulsos. Além disso, o SDR registra os valores das larguras de pulsos acima de 50 μ s, como sendo iguais a 50 μ s, o que provavelmente resulta em um valor médio para as larguras de pulsos inferior ao valor que seria obtido, caso o Sistema de Detecção de Relâmpagos registrasse os valores realmente medidos.

Observações de multiplicidade a partir da associação entre registros de campo elétrico e de vídeo são consideradas as mais precisas. Isto por que, os fracos pulsos de campo elétrico desconsiderados, podem ser considerados, caso sejam observados nos registros de vídeo, como pertencente ao relâmpago. A utilização de câmera rápida torna os resultados mais precisos devido à sua alta resolução temporal, talvez até o ponto de

poder obter-se bons resultados com o uso apenas dela. Porém, uma associação entre os registros de campo elétrico e de câmera rápida feita neste trabalho, mostrou uma limitação da técnica na detecção da multiplicidade, relacionada à limitação do campo visual da câmera. Esta limitação pode subestimar a multiplicidade de um relâmpago múltiplo próximo, caso o seu canal bifurque-se para fora do campo visual da câmera. Um exame da estrutura fina da forma de onda de campo elétrico de pulsos de DR's ausentes nos registros da câmera rápida possibilitou verificar que estas DR's realmente pertenciam ao relâmpago considerado, porém bifurcaram-se para fora do campo visual da câmera resultando na subestimação da multiplicidade em uma observação a partir dos registros da câmera rápida. Assim, com base na possibilidade da ocorrência de erros associados à limitação do campo visual da câmera, sugere-se além da associação entre os registros de campo elétrico e da câmera rápida, uma análise da estrutura fina da forma de onda de campo elétrico.

Os Sistemas de Detecção de Relâmpagos apresentam uma vantagem na observação a longas distâncias, devido ao seu maior alcance. Além disso, podem encontrar a localização das descargas, o que não pode ser conseguido com uma única antena de campo elétrico. Por outro lado, tem sido observada uma deficiência na detecção de descargas de retorno, que por sua vez reflete nos resultados de multiplicidade e tempo entre descargas de retorno. Os resultados observados pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos e apresentados neste trabalho sofreram influência da ausência das antenas IMPACT de São José dos Campos e Cachoeira Paulista na detecção das descargas de retorno e no processamento de suas informações. Logicamente, a participação destas antenas melhoraria os resultados, porém, ainda assim ficariam um pouco distante dos resultados reais, como pode ser observado na literatura, a qual apresenta valores de multiplicidade menores do que os valores obtidos a partir de técnicas consideradas mais precisas para tal (campo elétrico e câmera). Algumas das causas da deficiência dos Sistemas de Detecção de Relâmpagos são a sua complexidade e o nível de exigência dos algoritmos de processamento das informações.

A utilização de uma única antena de campo elétrico é restrita a observações localizadas. Isto é devido ao seu menor alcance, o que associado à sua menor complexidade e ao seu

menor nível de exigências (mais fáceis de serem satisfeitas) cooperou na obtenção de bons resultados de multiplicidade e tempo entre descargas de retorno, dentro de um raio de 50 km de observação.

Observações feitas por uma câmera rápida, são precisas nas detecções de descargas de retorno e do tempo entre elas. Porém, sofrem influência da limitação do campo visual da câmera, o que as tornam também restritas a uma região localizada.

Assim, as três técnicas utilizadas neste trabalho apresentam vantagens e desvantagens, de forma a se completarem uma a outra através de uma utilização em conjunto, o que é sugerido para os trabalhos futuros.

Sugere-se ainda para trabalhos futuros, a utilização destas técnicas em observações de um maior número de tempestades, para diferentes localizações da antena de campo e da câmera rápida dentro da região coberta pelo Sistema de Detecção de Relâmpagos, observando assim, a eficiência do Sistema de Detecção de Relâmpagos na detecção de descargas de retorno e relâmpagos em função da localização geográfica das tempestades. Sugere-se também para trabalhos futuros, a utilização destas técnicas nas observações das eficiências do Sistema de Detecção de Relâmpagos para diferentes arranjos da rede de sensores do Sistema de Detecção de Relâmpagos, no que se trata da consideração ou desconsideração de um determinado sensor nesta rede, para os dados reprocessados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beasley, W.; Uman, M. A.; Rustan, Jr, P. L. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. C7, p. 4883-4902, June 1982.

Berger, K. Novel observations on lightning discharges: results of research on Mount San Salvatore. **Journal of the Franklin Institute**, v. 283, n. 6, p. 478-525, June, 1967.

Brantley, R. D.; Tiller, J. A.; Uman, M. A. Lightning properties in Florida thunderstorms from video tape records. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 24, p. 3402-3406, Aug., 1975.

Clifton, K. S.; Hill, C. K. Low-light-level television measurement of lightning. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 61, n. 9, p. 987-992, Sept., 1980.

Cooray, V.; Lundquist, S. Effects of propagation on the rise times and the initial peaks of radiation fields from return strokes. **Radio Science**, v. 18, n. 3, p. 409-415, May-June, 1983.

Cooray, V.; Lundquist, S. Characteristics of the radiation fields from lightning in Sri Lanka in the tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. D4, p. 6099-6109, June, 1985.

Cooray, V. Effects of propagation on the return stroke radiation fields. **Radio Science**, v. 22, n. 5, p. 757-768, Sept.-Oct., 1987.

Cummins, K. L.; Murphy, M. J.; Bardo, E. A.; Hiscox, W. L.; Pyke, R. B.; Pifer, A. E. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 103 n. D8, p. 9035-9044, Apr., 1998.

Diendorfer, G.; Schulz, W.; Rakov, V. A. Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Locating System. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p.452-464, Nov., 1998a.

Diendorfer, G.; Schulz, W.; Mair, M. Effects of field propagation on the peak current estimates. In: International Lightning Detection Conference (ILDC 1998), 15., 1998b, Tucson. **Proceedings...**[S.l.]: [s.n.], [1998?].

Ferraz, E. C. **Desenvolvimento e aplicação de instrumentação para o estudo de relâmpagos**. 2001. 92p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Faria, H. H. **Estudo comparativo da atividade e características dos relâmpagos nas regiões de Rondônia e sudeste, no período de outubro de 1999 a março de 2000**. 2002. 224p. (INPE-9779-TDI/861). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.

Fisher, R. J.; Uman, M. A. Measured electric fields risetimes for first and subsequent lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 77, n. 3, p. 399-406, Jan., 1972.

Guedes, D. G. **Modelagem matemática de correntes na torre da estação morro do cachimbo (Brasil)**. 2003. 262p. (INPE-10549-TDI/938). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.

Guo, C.; Krider, E. P. The optical and radiation field signatures produced by lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. C11, p. 8913-8922, Oct., 1982.

Hojo, J.; Ishii, M.; Kawamura, T.; Suzuki, F.; Funayama, R. The fine structure in the field change produced by positive ground strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. D4, p. 6139-6143, June, 1985.

Idone, V. P.; Orville, R. E. Lightning return stroke velocities in the Thunderstorm Research International Program (TRIP). **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. C7, p. 4903-4915, June, 1982.

Idone, V. P.; Saljoughy, A. B.; Henderson, R. W.; Moore, P. K.; Pyle, R. B. A reexamination of the peak current calibration of the National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D10, p. 18,323-18,332, Oct., 1993.

Idone, V. P.; Davis, D. A.; Moore, P. K.; Wang, Y.; Henderson, R. W.; Ries, M.; Jamason, P. F. Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York – 2. Location accuracy. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 9057-9069, Apr., 1998a.

Idone, V. P.; Davis, D. A.; Moore, P. K.; Wang, Y.; Henderson, R. W.; Ries, M.; Jamason, P. F. Performance evaluation of the U.S. National Lightning Detection Network in eastern New York – 1. Detection efficiency. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 9045-9055, Apr., 1998b.

Iribarne, J. V.; Cho, H. R. **Atmospheric physics**. Dorecht: Reidel, 1980. 212p.

Ishii, M.; Hojo, J.I. Statistics on fine structure of cloud-to-ground lightning field waveforms. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13,267-13,274, Sept., 1989.

Jenkins, G. M.; Watts, D. G. **Spectral analysis and its applications**. San Francisco: Holden-Day, 1968. 525p.

Kitagawa, N., Kobayashi, M. Distribution of negative charge in the cloud taking part in a flash to ground, **Pap. Meteorol. Geophys. Tokyo**, 9, 99-105, 1958.

Kitagawa, N.; Brook, M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 4, p. 1189-1201, Apr., 1960.

Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 2, p. 637-647, Feb., 1962.

Krider, E. P.; Leteinturier, C.; Willett, J. C. Submicrosecond fields radiated during the onset of first return strokes in cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D1, p. 1589-1597, Jan., 1996.

Krider, E. P.; Noggle, R. C.; Pifer, A. E.; Vance, D. L. Lightning direction finding systems for forest fire detection. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, n. 9, p. 980-986, Sept., 1980.

Lacerda, M. **Análise e modelagem de curvas de corrente de relâmpagos negativos descendentes entre 1985 e 1994, na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo – MG**. 1998. 214p. (INPE-7238-TDI/691). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.

Lanzerotti, L. J.; Thomson, D. J.; MacLennan, C. G.; Rinnert, K.; Krider, E. P.; Uman, M. A. Power spectra at radio frequency of lightning return stroke waveforms. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13,221-13,227, Sept., 1989.

Lin, Y. T.; Uman, M. A. Electric radiation fields of lightning return strokes in three isolated Florida thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 33, p. 7911-7915, Nov., 1973.

Lin, Y. T.; Uman, M. A.; Tiller, J. A.; Brantley, R. D.; Beasley, H. W.; Krider, E. P.; Weidman, C. D. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. C10; p. 6307-6314, Oct., 1979.

Mach, D.M.; Rust, W.D. Photoelectric return-stroke velocity and peak current estimates in natural and triggered lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13,237-13,247, Sept., 1989.

Mach, D. M.; Rust, W. D. Two dimensional velocity, optical risetime, and peak current estimates for natural positive lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D2, p. 2635-2638, Feb., 1993.

Master, M. J.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Darveniza, M. Lightning induced voltages on power lines: Experiment. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-103, n. 9, p. 2519-2529, Sept., 1984.

Miranda, F. J. de. **Estudo da Forma de Onda de Campo Elétrico de Relâmpagos**. 2000. 119p. (INPE-8173-TDI/757). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.

Miranda, F. J. de; Pinto Jr., O; Saba, M. M. F A study of the time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning flashes in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 65, issue 3, p. 293-297, Feb., 2003.

Murphy, M. J.; Krider, E. P.; Maier, M. W. Lightning charge analyses in small convection and precipitation electrification (CaPE) experiment storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D23, p. 29,615-29,626, Dec., 1996.

Naccarato, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades**. 2001. 165p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

Naccarato, K. P. **Tópicos em eletricidade atmosférica**. 2002. 155p. (INPE-9387-PUD/118). Exame de Qualificação (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Nucci, C. A.; Diendorfer, G.; Uman, M. A.; Rachidi, F.; Ianoz, M.; Mazzetti, C. Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D12, p. 20,395-20,408, Nov., 1990.

Ogawa, T. Lightning currents. In: Volland, H. (ed.) **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Bonn: Radioastronomical Institute, University of Bonn, CRC Press, 1995, v. 1, cap. 4, p. 93-136.

Orville, R. E.; Huffines, G. R. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-98. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, 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**. 1987. 129p. (INPE-4487-TDL/325). Tese (Doutorado em Ciência Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1988.

Pinto Jr., O.; Cardoso, I. Decifrando os raios, a fonte provável da energia que elaborou a vida. **Scientific American Brasil**, v. 02, n. 20, p. 30-35, Janeiro, 2004.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 1996. 112p.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000. 196p.

Pinto Jr., O.; Pinto, I. R. C. A.; Gomes, M. A. S. S.; Padilha, A. L.; Vitorello, I.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; C. Filho, A. Cloud-to-ground lightning in the southeastern Brazil in 1993, 1, Geographical distribution. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. D24, p. 31,369-31,380, Dec., 1999.

Pinto, I. R. C. A.; Pinto Jr., O.; Rocha, R. M. L.; Diniz, J. H.; Carvalho, A. M.; C. Filho, A. Cloud-to-ground lightning flashes in the southeastern Brazil in 1993, 2, Time variations and flash characteristics. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. D24, p. 31,381-31,388, Dec., 1999.

Popov, M.; He, S.; Thottappillil, R. Reconstruction of lightning currents and return stroke model parameters using remote electromagnetic fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D19, p. 24,469-24,481, Oct., 2000.

Rakov, V. A, Uman, M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D5, p. 5447-5453, Apr., 1990a.

Rakov, V. A, Uman, M. A. Waveforms of first and subsequent leaders in negative lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D10, p. 16,561-16,577, Sept., 1990b.

Rakov, V. A, Uman, M. A. Origin of lightning electric field signatures showing two return-stroke Waveforms separated in time by a millisecond or less. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D4, p. 8157-8165, Apr., 1994.

Rakov, V. A , Uman, M. A; Jordan, D. M.; Priore III, C. A. Ratio of leader to return stroke electric field change for first and subsequent lightning strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. 10, p. 16,579-16,587, Sept., 1990.

Rakov, V. A.; Thottappillil, R., Uman, M. A. On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return-stroke peak current and peak electric field. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D11, p. 11,527-11,533, July, 1992a.

Rakov, V. A., Uman, M. A., Thottappillil, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D5, p. 10,745-10,750, May, 1994.

Rakov, V.A. Lightning electric and magnetic fields. In: International Zurich Symposium on electromagnetic compatibility, 13., 1999, Zurich. **Proceedings...** [S.l.]: [s.n.], [1999?].

Rakov, V. A.; Huffines, G. R. Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, p. 1455-1462, Oct., 2003.

Rakov, V. A.; Uman, M. A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 403-426, Nov., 1998.

Saba, M.M.F.; Pinto Jr., O; Ballarotti, M.G.; Cabral, G.F. Monitoring the performance of the lightning detection network by means of a high-speed camera. In: International Lightning Detection Conference (ILDC 2004), 18., 2004, Helsinki. **Proceedings**...Helsinki: Vaisala, 2004. 1 CD-ROM.

Schonland, B. F. J. The lightning discharge. In: Flügge, S. (ed.) **Handbuch der Physik**. Berlin: Springer-Verlag, 1956. v. 22. p. 576-628.

Shao, X. M.; Krehbiel, P. R.; Thomas, R. J.; Rison, W. Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. D2, p. 2749-2783, Feb., 1995.

Solorzano, N. N. **Primeiras medidas de relâmpagos induzidos no Brasil**. 2003. 212p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Taylor, W. L. Radiation field characteristics of lightning discharges in the band 1 kc/s to 10 kc/s. **Journal of Research of the National Bureau of Standards – D. Radio Propagation**. v. 67D, n. 5, p. 539-550, Sept.-Oct., 1963.

Thomson, E. M. Characteristics of Port Moresby ground flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. C2, p. 1027-1036, Feb., 1980.

Thomson, E. M.; Galib, M. A.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Master, M. J. Some features of stroke occurrence in Florida lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. D3, p. 4910-4916, June, 1984.

Thottappillil, R.; Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Master, M. J.; Shelukin, D. V. Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D7, p. 7503-7509, May, 1992.

Thottappillil, R.; Uman, M. A. Comparison of lightning return stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D12, p. 22,903-22,914, Dec., 1993.

Thottappillil, R.; Rakov, V. A.; Uman, M. A. Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D6, p. 6987-7006, Mar., 1997.

Tiller, J. A.; Uman, M. A.; Lin, Y. T.; Brantley, R. D.; Krider, E. P. Electric field statistics for close lightning return strokes near Gainesville, Florida. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. 24, p. 4430-4434, Aug., 1976.

Torres, H.; Rondón, D.; Briceño, W.; Barreto, L. Lightning peak current estimation analysis from field measurements in tropical zones. In: International Conference on Lightning Protection (ICLP 1996), 23., 1996, Firenze. **Proceedings...** [S.l.]: [s.n.], [1996?].

Uman, M. A.; Mclain, D. K.; Krider, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna, **American Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 33-38, Jan., 1975.

Uman, M. A.; Swanberg, C. E.; Tiller, J. A.; Lin, Y. T.; Krider, E. P. Effects of 200 km propagation on Florida lightning return stroke electric fields. **Radio Science**, v. 11, n. 12, p. 985-990, Dec., 1976.

Uman, M. A. **The lightning discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. 377p.

Uman, M. A.; Krider, E. P. A review of natural lightning: experimental data and modeling. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. EMC-24, n. 2, p. 79-112, May, 1982.

Valine, W. C.; Krider, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, AAC8 (p.1-11), Oct., 2002.

Vincenty, T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. **Survey Review**, v. XXIII, n. 176, p. 88-93, Apr., 1975.

Weidman, C. D.; Krider, E. P. The fine structure of lightning return stroke waveforms. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. C12, p. 6239-6247, Dec., 1978.

Willett, J. C.; Bailey, J. C.; Idone, V. P.; Eybert-Berard, A; Barret, L. Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission line model. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13,275-13,286, Sept., 1989.

Willett, J. C.; Le Vine, D. M.; Idone, V. P. Lightning-channel morphology revealed by return-stroke radiation field waveforms. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. D2, p. 2727-2738, Feb., 1995.

Willett, J. C.; Krider, E. P.; Leteinturier, C. Submicrosecond field variations during the onset of first return strokes in cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 9027-9034, Apr., 1998.

Winn W. P.; Aldridge, T. V.; Moore, C. B. Video-tape recordings of lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 21, p. 4515-4519, July, 1973.

APÊNDICE A

PICOS DE CAMPO ELÉTRICO DE DESCARGAS DE RETORNO REGISTRADOS PELA ANTENA DE CAMPO ELÉTRICO E SUAS DISTÂNCIAS DE PROPAGAÇÃO

A seguir são apresentados valores de picos de campo elétrico de descargas de retorno (DR) detectadas pela antena de campo elétrico e analisadas neste trabalho. Os valores estão organizados em grupos, de acordo com a data de aquisição e a ordem da aquisição feita nesta. Na primeira coluna tem-se a especificação dos grupos classificados de acordo com a data em mês, dia e ano (mm/dd/aa) e a ordem da aquisição (A_i , onde $i = 1,2,3$) nesta data. Em cada grupo tem-se ainda na coluna da esquerda, uma seqüência de pulsos de campo elétrico associados a uma DR, simbolizados por “ P_iR_j ”, onde i pode assumir qualquer valor maior ou igual a 1 e j pode assumir qualquer valor de 1 a 90. O número “ j ” refere-se ao arquivo de registro de campo elétrico no qual o pulso foi encontrado, dado que cada aquisição durou 90 segundos e gerou 90 arquivos de 1 segundo cada. O símbolo “ R ” refere-se a registro, o símbolo “ P ” refere-se a pulsos e o número “ i ” indica a ordem de ocorrência do pulso dentro da seqüência de pulsos contida no registro R_j . A exemplo, o símbolo $P2R65$ quer dizer “Pulso 2 do registro 65” para um certo grupo. Na coluna central tem-se os valores de picos de campo elétrico associados aos pulsos e na coluna à direita a distância entre a antena e a DR associada ao pulso.

Relâmpago	Campo Elétrico (V/m)	Distância (km)
20/02/03 – A1		
P1R17	23,2	17,6
P2R17	26,2	16,7
P1R18	12,8	175,4
P2R65	24,2	12,0
P3R65	24,2	13,8
P1R66	28,0	10,8
P1R79	4,4	219,6
P2R79	2,2	216,7
P3R79	2,2	219,3
P4R79	5,6	232,9
P5R79	4,1	218,7
P6R79	4,5	219,1
P7R79	1,1	218,7

Relâmpago	Campo Elétrico (V/m)	Distância (km)
05/03/03 – A1		
P1R9	25,2	12,6
P2R9	25,2	17,2
P1R10	9,2	46,2
P2R10	7,2	44,8
P1R17	12,5	38,0
P2R17	5,1	74,7
P1R18	2,9	156,6
P1R20	18,0	34,6
P2R20	12,1	33,5
P1R21	8,8	43,5
P1R26	4,2	55,1
P1R27	7,0	100,5
P1R30	10,1	44,9
P2R30	11,0	47,5
P1R38	21,2	18,9
P1R45	6,5	53,5
P1R47	7,2	49,5
P1R55	8,8	55,2
P2R55	2,6	140,5
P3R55	2,5	138,1
P1R56	2,1	294,1
P3R56	1,4	295,8
P4R56	2,0	295,9
P5R56	2,9	299,5
P6R56	2,7	156,5
P1R57	15,8	31,1
P1R64	19,9	20,8
P1R65	24,8	27,4
P3R65	7,3	46,1
P1R69	12,2	46,1
P2R69	12,2	50,8
P1R70	17,9	16,1
P1R79	17,0	31,6
P1R82	24,1	12,5
P2R82	2,5	119,8
P1R83	8,7	43,1
P1R84	8,6	54,0
P1R89	13,4	54,3
P2R89	4,5	77,0
05/03/03 – A2		
P1R6	12,2	33,1
P1R9	18,4	35,4

Relâmpago	Campo Elétrico (V/m)	Distância (km)
P2R9	13,3	35,6
P3R9	24,7	18,2
P1R13	3,7	77,9
P2R13	2,3	140,4
P3R13	2,7	138,5
P1R21	22,6	21,8
P2R21	21,8	21,5
P3R21	19,7	23,7
P1R29	24,6	9,0
P1R44	11,5	33,9
P3R48	11,8	30,2
P1R53	2,5	208,0
P1R54	9,0	41,9
P2R54	24,2	13,6
P3R54	23,7	15,1
P4R54	24,3	15,1
P5R54	24,7	13,9
P1R55	25,4	15,3
P1R68	1,3	294,5
P2R68	1,1	297,2
P3R68	1,0	297,3
P4R68	1,6	295,9
P1R69	8,3	75,8
P1R71	18,5	22,2
P2R71	17,8	22,6
P3R71	18,4	27,5
P1R78	9,0	43,6
P2R78	9,6	44,0
P1R79	11,1	31,9
P1R85	5,4	57,0
P2R85	6,4	49,1
P3R85	23,8	15,0
P4R85	21,6	72,8
P1R86	3,2	295,8
P1R90	4,7	75,2
05/03/03 – A3		
P1R1	7,1	56,8
P2R2	5,6	56,6
P1R10	15,6	47,5
P2R10	16,5	42,9
P1R16	4,8	65,7
P1R18	15,7	30,6
P1R19	13,1	41,5

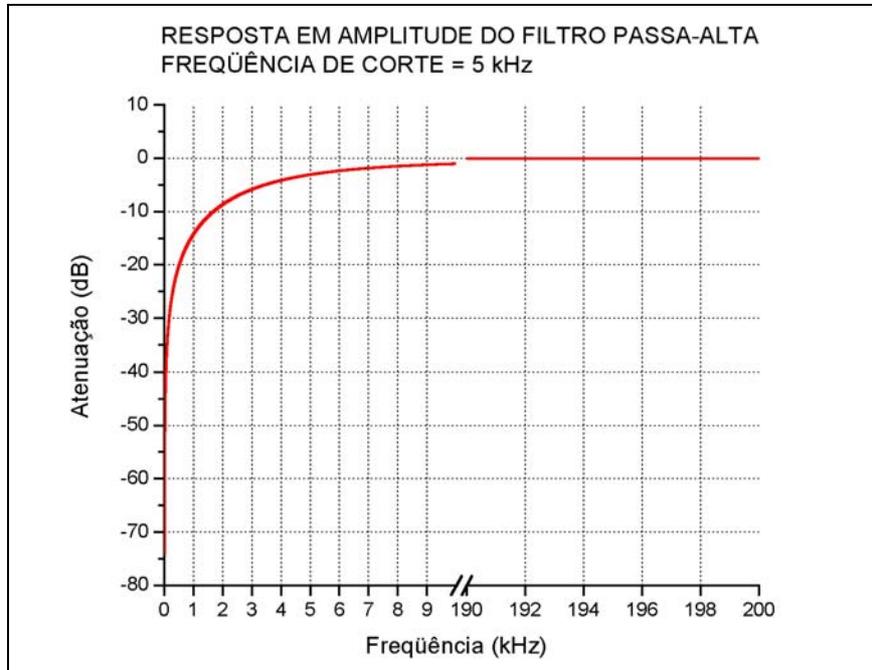
Relâmpago	Campo Elétrico (V/m)	Distância (km)
P1R20	22,5	25,2
P3R26	21,4	21,3
P1R27	20,4	19,5
P2R27	3,2	287,0
P4R27	6,3	139,0
P1R29	22,2	31,5
P2R29	22,2	31,0
P1R33	7,1	68,4
P2R33	6,6	70,5
P1R35	14,4	41,6
P1R40	17,3	111,0
P1R40	17,3	45,3
P1R45	14,4	47,3
P1R46	5,2	121,0
P1R47	12,2	41,6
P1R51	18,3	44,9
P1R58	21,9	21,7
P2R61	20,6	24,2
P3R61	17,6	22,9
P1R62	12,8	43,1
P1R64	17,7	41,3
P2R64	14,3	41,1
P1R65	4,6	102,7
P1R66	13,1	39,6
P2R67	23,9	13,3
P1R68	25,1	16,0
P1R77	9,3	71,8
P2R77	5,1	69,6
P1R81	18,6	32,1
P2R81	18,3	58,8
P3R81	19,3	30,5
P1R84	19,5	20,8
P2R84	17,7	21,6
P1R85	2,9	291,1
07/03/03 – A1		
P1R13	1,3	204,1
P1R16	8,0	27,4
P1R27	9,7	54,2
P2R27	1,7	209,5
P3R27	9,2	54,0
P1R40	6,3	59,1
P2R40	6,2	59,2
P3R40	6,1	59,4

Relâmpago	Campo Elétrico (V/m)	Distância (km)
P1R41	0,7	269,2
P1R47	5,8	66,3
P1R51	17,1	26,1
P1R56	6,8	62,1
P1R73	5,7	58,5
P1R79	2,0	175,0
P1R87	6,6	63,5
P2R87	9,0	63,0
07/03/03 – A2		
P1R6	15,7	49,7
P2R6	8,6	48,6
P3R6	6,7	47,9
P1R28	5,1	99,2
P2R28	3,2	97,7
P3R28	2,6	98,9
P1R34	3,5	185,2
P1R35	1,2	194,6
P1R44	3,0	84,6
P1R54	-32,4	23,2
P1R87	1,8	204,1
P2R87	1,4	204,6
P3R87	1,5	204,0
P4R87	2,5	203,0
07/03/03 – A3		
P1R8	8,0	95,8
P2R8	3,0	96,0
P3R8	5,3	95,3
P1R14	8,2	102,8
P2R14	5,3	100,9
P1R20	6,9	91,7
P1R23	-23,2	28,3
P1R59	7,4	95,9
P2R59	3,5	104,2
P5R59	6,0	94,7
P1R60	5,5	90,4
P2R60	6,5	94,9
P1R74	6,4	59,7
P2R74	0,6	331,8
P3R74	4,1	92,3

Relâmpago	Campo Elétrico (V/m)	Distância (km)
19/03/03 – A1		
P1R70	23,6	13,3
19/03/03 – A2		
P1R88	21,7	14,6
P2R88	19,0	16,5

APÊNDICE B

CURVAS DE RESPOSTA EM AMPLITUDE E FASE DO FILTRO PASSA-ALTA ALTA DE BUTTERWORTH COM FREQUÊNCIA DE CORTE IGUAL A 5 kHz



APÊNDICE C

ALGORITMO PARA DETECÇÃO DE RELÂMPAGOS E SUAS MULTIPLICIDADES

A seguir tem-se um fluxograma do algoritmo to para a detecção, discriminação e agrupamento das DR's em relâmpagos, a partir dos pulsos presentes no registro de campo elétrico. As duas primeiras páginas de fluxograma correspondem à detecção dos pulsos e à discriminação destes pulsos como sendo devidos a descargas do tipo DR ou IN. A última página de fluxograma contém seqüências de comandos que tratam do agrupamento das DR's detectadas em relâmpagos. Nesta fase são registrados o número de relâmpagos detectados, o seu instante de ocorrência e sua multiplicidade.

Este algoritmo foi preparado para processar k ($k=1$ a 90) registros de campo elétrico por vez. Nas tomadas de decisões presentes nesse fluxograma, se a condição for satisfeita, ou seja, for Verdadeira (V), o sentido a ser seguido é para a esquerda, caso contrário, se a condição não for satisfeita, ou seja, for Falsa (F), o sentido a ser seguido é para a direita.

