



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8758-TDI/799

ANÁLISE DE CURVAS DE CORRENTE DE RELÂMPAGOS EM TORRES

Dailton Gilberto Guedes

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Osmar Pinto Júnior ,
aprovada em 02 de fevereiro de 2001.

INPE
São José dos Campos
2002

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8758-TDI/799

**ANÁLISE DE CURVAS DE CORRENTE DE RELÂMPAGOS
EM TORRES**

Dailton Gilberto Guedes

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Osmar Pinto Júnior ,
aprovada em 02 de fevereiro de 2001.

INPE
São José dos Campos
2002

551.594.22 (815.1) (234.3) (494.5)

GUEDES, D. G.

Análise de curvas de corrente de relâmpagos em torres/

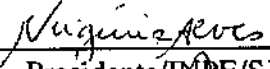
D. G. Guedes. – São José dos Campos: INPE, 2001.

123p. – (INPE-8758-TDI/799).

1.Relâmpagos. 2.Torres. 3.Corrente elétrica. 4.Formas de ondas. 5.Análises. I.Título.

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

Drª Maria Virgínia Alves



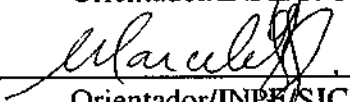
Presidente/INPE/SJCampos-SP

Dr. Osmar Pinto Jr.



Orientador/INPE/SJCampos-SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



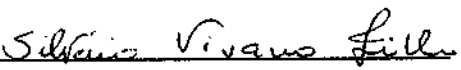
Orientador/INPE/SJCampos-SP

Dr. Nelson Veissid



Membro da Banca/INPE/SJCampos-SP

Dr. Silvério Visacro Filho



Membro da Banca
Convidado UFMG/Belo Horizonte-MG

Candidato: Dailton Gilberto Guedes

São José dos Campos, 02 de fevereiro de 2001.

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores Osmar e Marcelo Saba, principalmente ao Osmar e Iara que com sua dedicação à pesquisa ajudaram na busca de dados que viabilizaram este estudo e buscaram informações quase que diretamente na fonte; à Lúcia de Almeida Terra Limiro do DAE/CEA que desenvolveu o software Sistema Digidado que permitiu a digitalização dos dados e, portanto a sua interpretação computacional; ao CNPq pelo apoio à pesquisa; aos amigos e colegas da Elat que participaram com discussões temáticas; à Elaine pelo suporte e paciência; a minhas filhas, Gabrielle e Emanuelle, que me motivaram.

RESUMO

Esta dissertação faz uma análise morfológica e estatística das curvas de corrente de descarga de retorno de todos os tipos de relâmpagos, positivos ou negativos envolvendo as torres instaladas na Suíça, África do Sul, Japão e Brasil. Em parte os dados utilizados neste relatório foram obtidos através de compilação na literatura especializada e em seguida digitalizados, porém os dados mais importantes são originais da estação do Cachimbo da CEMIG em Minas Gerais. Nossos resultados nos levaram a identificar e nomear um novo tipo de relâmpago positivo muito discutido por ser portador das mais altas correntes de descarga. Também nossos resultados confirmaram algumas tendências quanto ao comportamento dos relâmpagos em baixas latitudes, como amplitude máxima das descargas de retorno e subseqüentes, multiplicidade e tempos característicos.

ANALYSIS OF CURRENTS WAVEFORMS OF LIGHTNING IN TOWERS

ABSTRACT

This dissertation makes a morphological and statistical analyses of return stroke current waveforms of positive and negative, downward and upward lightning from some of most important towers located in the Switzerland, Japan, South Africa and Brazil. In part, the data utilized in this report were compiled from relevant literature. On the other hand, the most important data are originally acquired from the "Morro do Cachimbo Station" located in Minas Gerais – Brazil a lightning research station built for CEMIG at 1985. Our results indicate a new type of positive lightning with different properties, including its normally higher intensity. Our results also allowed confirming some tendencies with respect to the behavior of lightning in low latitudes, as larger amplitude of the return strokes, larger multiplicity and characteristic times.

SUMÁRIO	Pág.
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
Lista de Siglas e/ou Abreviaturas	
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	19
1.1 – Apresentação	19
1.2 - Breve histórico sobre pesquisa de relâmpagos em torres	19
1.3 – Dados analisados	20
1.4 - A estação de pesquisa do Morro do Cachimbo.	21
1.5 – A estação de pesquisa do Monte San Salvatore	22
1.6 - A estação de pesquisa da África do Sul	25
1.7 - A estação de pesquisas do Japão	25
CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS EM TORRES	27
2.1 - Relâmpagos pesquisados na Suíça e classificação proposta por Berger	30
2.2 - Classificação atual dos relâmpagos	30
2.3 – Descrição dos tipos de relâmpagos	31
2.4 - Mecanismos de Descargas	37
2.5 - Etapas dos Relâmpagos	40
2.6 – Física dos relâmpagos positivos e negativos	45
2.7 - Justificativas para o estudo dos relâmpagos positivos.	48
2.8 - Características dos relâmpagos em torres	52
2.9 - Formas de ondas de correntes em torres	55
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS	71
3.1 - Curvas médias de relâmpagos da estação de San Salvatore	71
3.2 - Curvas médias das Torres T1 e T2 da estação de San Salvatore obtidas em nossa análise	75
3.3 - Curvas médias da estação do Cachimbo obtidas em nossa análise	92
3.4 - Curvas médias da Estação da África do Sul (AFS)	100

3.5 – Curvas de relâmpagos positivos	102
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	107
4.1 - Características dos relâmpagos em torres.	107
4.2 - Relâmpagos negativos ascendentes (RNA)	108
4.3 - Relâmpagos negativos descendentes (RND)	109
4.4 - Descargas subseqüentes	113
4.5 - Formas de ondas mais características	116
4.6 - Relâmpagos positivos	118
4.7 – Sugestões para próximas pesquisas	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE FIGURAS

	Pág
1.1 Disposição física esquemática da Estação do Cachimbo.	21
1.2 Base do mastro da torre suportada por isoladores de pedestal	23
1.3 Vista aérea do pico do Monte San Salvatore com a Torre 1 e o laboratório fotográfico	24
2.1 Os oito tipos de relâmpagos baseados na direção e carga do líder, propostos por Berger	30
2.2 Tipos de relâmpagos baseados nas direções dos líderes e na carga neutralizada ou destruída na nuvem	31
2.3 Estrutura da nuvem de tempestade	32
2.4 Fotografia de um relâmpago negativo descendente com três descargas de retorno.	33
2.5 Fotografia de um relâmpago negativo ascendente na estação San Salvatore	34
2.6 Fotografia em filme estacionário do relâmpago da Figura 2.5 na ESS.	34
2.7 Fotografia de um relâmpago positivo descendente	35
2.8. Relâmpago positivo ascendente	36
2.9 Mecanismo de descarga. Os instantes de tempo t são em milésimos de segundos.	38
2.10 Forma de onda com impulso $1,2 \times 50 \mu s$ conhecido como onda plena	39
2.11 Esquema fora de escala, mostrando uma descarga nuvem solo	41
2.12 Evolução temporal esquemática de um relâmpago ascendente	44
2.13 Relâmpago negativo ascendente	44
2.14 Curva de relâmpago negativo descendente com as características assinaladas.	56
2.15 Relâmpago negativo descendente com uma descarga de retorno	57
2.16 Relâmpago negativo descendente com uma descarga de retorno	57

	Pág
2.17 Relâmpago negativo descendente na ESS – Descarga de retorno	58
2.18 Relâmpago negativo descendente na ESS - 1ª descarga subsequente	58
2.19 Relâmpago negativo descendente na ESS - 2ª descarga subsequente	59
2.20 Relâmpago negativo descendente na ESS - 3ª descarga subsequente	59
2.21 Relâmpago negativo descendente na ESS - 4ª descarga subsequente	59
2.22 Forma de onda de um relâmpago positivo ascendente com corrente de longa duração e pulsos	60
2.23 Relâmpago negativo ascendente CLD e pulsos de até 10kA	61
2.24 Critério para determinar um relâmpago negativo ascendente com descarga.	62
2.25 Relâmpago negativo ascendente CLD e descarga acima de 10kA	62
2.26 Relâmpago negativo ascendente CLD e descarga acima de 10kA	63
2.27 Relâmpago positivo descendente	64
2.28 Relâmpago positivo ascendente com corrente de longa duração sem pulso.	65
2.29 Relâmpago positivo ascendente com corrente de longa duração e pulso	65
2.30 Relâmpago positivo de junção	66
2.31 Relâmpago positivo de junção	67
2.32 Relâmpago positivo de junção	67
2.33 Relâmpago positivo de junção	68
3.1 Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente da primeira descarga de retorno – Curva média (escala de 0 a 560µs)	72
3.2 Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente da primeira descarga de retorno – Curva média (escala de 0 a 96µs)	73

	Pág
3.3 Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente das descargas subseqüentes – Curva média (escala de 0 a 120 μ s)	73
3.4 Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente das descargas de retorno subseqüentes	74
3.5 Relâmpagos positivos de junção com correntes impulsivas	74
3.6 Relâmpagos negativos descendentes da Torre T1 – Curva média das correntes das descargas de retorno	82
3.7 Curva média das descargas de retorno da Torre T1	83
3.8 Relâmpagos negativos descendentes da Torre T2 – Curva média das correntes das descargas de retorno	83
3.9 Curva média das descargas de retorno da Torre T2.	84
3.10 Relâmpagos negativos descendentes da Torre T1 – Curva média das correntes das primeiras descargas subseqüentes	84
3.11 Curva média das primeiras descargas subseqüentes Torre T1	85
3.12 Relâmpagos negativos descendentes da Torre T2 – Curva média das correntes das primeiras descargas subseqüentes	85
3.13 Curva média das primeiras descargas subseqüentes Torre T2	86
3.14 Relâmpagos negativos descendentes da Torre T1 – Curva média das correntes das segundas descargas subseqüentes	86
3.15 Curva média das segundas descargas subseqüentes Torre T1	87
3.16 Relâmpagos negativos descendentes da Torre T2 – Curva média das correntes das segundas descargas subseqüentes	87
3.17 Curva média das segundas descargas subseqüentes Torre T2	88
3.18 Superposição das curvas médias das DR's das Torres T1 e T2	88
3.19 Superposição da média das DR's das Torres T1 e T2 com a média de Berger	89
3.20 Superposição das curvas médias da primeira descarga subseqüente das Torres T1 e T2	90
3.21 Superposição das curvas médias da segunda descarga subseqüente das Torres T1 e T2	90

	Pág
3.22 Curva média das descargas subsequêntes das torres T1 e T2	91
3.23 Superposição da média das descargas subsequêntes das Torres T1 e T2 com a média obtida por Berger	91
3.24 Curva média da corrente (Forma de onda) da primeira descarga de retorno (curva grossa no meio) para as 22 primeiras descargas.	93
3. 25 Relâmpagos negativos descendentes da estação EC – Curva média de onda de corrente da descarga de retorno	97
3. 26 EC Curva média das correntes das descargas de retorno	97
3.27 Superposição da média das DR's da EC com a média obtida por Berger na escala de 500 milionésimos de segundo	98
3.28 Superposição da média das DR's da EC com as curvas médias obtidas para as torresT1 e T2	98
3. 29 Curva média de corrente das primeiras descargas subsequêntes	99
3.30 Curva média de corrente das segundas descargas subsequêntes	99
3.31 Curva média das médias das primeiras e das segundas descargas subsequêntes	100
3.32 Superposição das curvas médias das descargas subsequêntes da EC com o erro padrão e a curva média obtida por Berger.	100
3.33 Superposição da média das DR's da EC e da África do Sul com a média obtida por Berger	102
3.34 Relâmpagos positivos especiais de junção registrados no Japão	104
3.35 Relâmpagos positivos especiais de junção registrados no Japão	105
4.1 Comparação entre as formas de onda das primeiras descargas de retorno da estação de San Salvatore (ESS, T1 e T2) e da estação Cachimbo	109
4.2 Gráfico das distribuições de valores extremos de corrente das curvas de T1, T2 e EC em função dos percentuais	112
4.3 Comparação entre as curvas médias das descargas subsequêntes da EC	115

LISTA DE TABELAS

		Pág
2.1	FASES DE PESQUISA NA ESTAÇÃO SAN SALVATORE	27
3.1	RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ESTAÇÃO DE SAN SALVATORE DE 1963 A 1974	72
3.2	REGISTRO DE RELÂMPAGOS NAS TORRES DA ESTAÇÃO DE SAN SALVATORE ENTRE OS ANOS DE 1963 E 1971	75
3.3	RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ESTAÇÃO DE SAN SALVATORE DE 1963 A 1971	81
3.4	LISTA DE RELÂMPAGOS REGISTRADOS NA ESTAÇÃO DO CACHIMBO ENTRE 1985 E 1998	94
3.5	RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ESTAÇÃO DO CACHIMBO DE 1985 A 1998 (ACUMULADO)	96
3.6	RELÂMPAGOS CLASSIFICADOS NA ESTAÇÃO DO CACHIMBO DE 1985 A 1998.	96
3.7	RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ÁFRICA DO SUL DE 1972 A 1977	101
3.8	REGISTRO DE RELÂMPAGOS NA TORRE DA ESTAÇÃO DA ÁFRICA DO SUL	101
3.9	RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NO JAPÃO DE 1976 A 1992	103
3.10	REGISTRO DE RELÂMPAGOS NA TORRE DA ESTAÇÃO DO JAPÃO	104
4.1	CLASSIFICAÇÃO DE RELÂMPAGOS NAS ESTAÇÕES	107
4.2	ESTIMATIVA DOS PERCENTUAIS DAS DESCARGAS DE RETORNO	114
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE TEMPOS CARACTERÍSTICOS	117

LISTA DE SIGLAS E/OU ABREVIATURAS

AFS	Estação de pesquisas da África do Sul
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CLD	Corrente de longa duração
CCD	Corrente de curta duração
CND	Estação de pesquisas do Canadá
DR	Descarga de retorno
EC	Estação de pesquisas do Cachimbo
JAP	Estação de pesquisas do Japão
ESS	Estação de pesquisas do Monte San Salvatore
EN	Relâmpago entre nuvens
LC	Líder contínuo
LE	Líder escalonado
IN	Relâmpago dentro da nuvem
NA	Relâmpago entre a nuvem e o ar
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEERI	National Electric Engineering Research
MCSs	Sistemas Convectivos de meso escala
RNA	Relâmpago negativo ascendente
RND	Relâmpago negativo descendente
RPA	Relâmpago positivo ascendente
RPD	Relâmpago positivo descendente
REJ	Relâmpago positivo especial de junção
SLR	Sistema de localização de Relâmpagos

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

Esta dissertação apresenta um estudo do comportamento de relâmpagos em torres instrumentadas construídas com a finalidade de registrar as formas de ondas das correntes das descargas atmosféricas que as tocam. O objetivo será investigar aspectos morfológicos das formas de onda das correntes das descargas de retorno e das descargas subseqüentes dos relâmpagos, determinando suas curvas médias, valores de pico máximo e considerar variações probabilísticas das médias com a finalidade de comparar as curvas de relâmpagos obtidas em diferentes torres.

Apresentamos assim, neste Capítulo as considerações iniciais sobre a dissertação, abordando o histórico de pesquisas de relâmpagos fazendo em seguida uma breve apresentação das estações de pesquisa que analisamos. No Capítulo 2 são apresentadas as características principais dos relâmpagos em torres, e suas classificações mostrando inclusive como a classificação de relâmpagos evoluiu nestes últimos anos. No Capítulo 3 fazemos uma apresentação dos resultados que obtivemos e justificamos os critérios que adotamos para obter as curvas médias nos diversos casos que analisamos. Finalmente no Capítulo 4 nós apresentamos as nossas conclusões e fazemos alguns comentários sobre os nossos resultados.

1.2 - Breve Histórico sobre Pesquisas de Relâmpagos em Torres.

Os primeiros trabalhos sobre correntes de relâmpagos em torres surgiram nas décadas de 60 e de 70 a partir de trabalhos publicados sobre observações feitas na Suíça desde 1943 (Berger, 1967). Até então, as pesquisas de relâmpagos se restringiam a observações através de medições por instrumentos colocados próximos de locais tais como torres de igrejas, mastros, linhas de transmissão e no topo de edifícios. Os relatórios originados na Suíça constituem, fonte relevante de dados pelo seu caráter quantitativo. Foram aproximadamente 1598 registros

em 28 anos de pesquisa. Na Itália a partir da década de 60 e início da década de 70 observações efetuadas geraram relatórios e a partir de 1972 (Garbagnati e Lo Piparo, 1970) o mesmo aconteceu na África do Sul (Ericksson, 1979). Na década de 80, do Japão vieram estudos sobre eventos de relâmpagos em torres em tempestade de inverno (Goto Y e Narita, 1994). Quando em novembro de 1985 a estação de pesquisa de relâmpagos da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) na Serra do Cachimbo foi comissionada, o Brasil passou a fazer parte do grupo de países que pesquisam relâmpagos em torres (Diniz et al, 1995). Em 1985, Chang e Inan (1985) divulgaram resultados de pesquisas em torres no Canadá.

As pesquisas em torres tiveram impulso a partir de 1939/40, quando estudo feito em relâmpagos a partir de dados obtidos no topo do edifício Empire State Building na cidade de Nova York (E.U.A), mostrou alguns aspectos referentes a relâmpagos em estruturas elevadas (McEachron, 1940). No seu artigo McEachron (1940) publicou o resultado da análise dos oscilogramas de correntes e fotografias de relâmpagos obtidos durante o verão de 1937.

1.3 – Dados Analisados

Utilizamos neste estudo dados da estação de pesquisa do Morro do Cachimbo da CEMIG localizada em Minas Gerais, referente aos seus primeiros treze anos de operação, sendo os últimos quatro anos dados originais. Estes dados foram agrupados e digitalizados para unificar suas escalas de tempo de aquisição, os quais foram originalmente adquiridos em intervalos de tempo 5 nano segundo. Estes dados registram um total de 79 relâmpagos, com uma média de 6 relâmpagos por ano (Mello, D. et al, 2000).

Também analisamos e digitalizamos as curvas de 118 relâmpagos registrados na estação de San Salvatore localizada na Suíça com duas torres instrumentadas que chamamos de Torre T1 e T2, classificando as curvas por torre e por tipo de relâmpago, um trabalho nunca antes feito. Estabelecemos uma comparação destas curvas entre si, por se tratar de aquisição a partir de duas torres posicionadas na mesma estação.

Digitalizamos também as curvas de 8 relâmpagos negativos descendentes registrados na África do Sul por Eriksson (1979) e algumas curvas de relâmpagos registrados no Japão (Goto e Narita, 1994). Estes dados considerados em nossa análise, geraram também estatísticas que utilizamos para estabelecer uma comparação entre os índices de ocorrência de relâmpagos registrados nas torres do Cachimbo (EC), de San Salvatore (ESS), Torres T1 e T2, da África do Sul (AFS) e da torre do Japão (JAP).

Consideramos este estudo de grande importância tanto pelo seu caráter original, ao incluir novas curvas de corrente obtidas na EC nos últimos quatro anos, como também do ponto de vista de reavaliação das curvas de corrente obtidas no passado, a partir de novos resultados obtidos por Rakov (1998), quanto à identificação das descargas.

1.4 - A Estação de Pesquisa do Morro do Cachimbo.

1.4.1 - Localização e Descrição Geral

A estação de pesquisa de relâmpagos do Morro do Cachimbo da CEMIG, (Companhia Energética de Minas Gerais) se localiza no Morro do Cachimbo (43° 58' 26" O, 20° 00' 39" S) a 15 km de Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais. Devido a sua localização ela é também chamada de "estação do Cachimbo", "Cachimbo" ou simplesmente EC (Lacerda, 1998).

1.4.2 - Equipamentos Disponíveis para Medições

A estação, cujo esquema geral é visto na Figura 1.1, foi adquirida pela CEMIG do National Electric Engineering Research Institute (NEERI), Pretória, África do Sul e foi instalada sob orientação de A. J. Eriksson, em 1985. Ela iniciou sua operação em novembro de 1985 e tem como mastro captor uma torre metálica de 60 m, em forma de um prisma triangular (Fig. 1.2) instalada no topo de um morro de 1400 m de altitude, sendo 200 m mais elevado que qualquer outro ponto da região circunvizinha.

No mesmo local, a cerca de 10 m do mastro, está instalada a casa de instrumentos, com sala de equipamentos para os registros gráficos e de imagens dos relâmpagos.

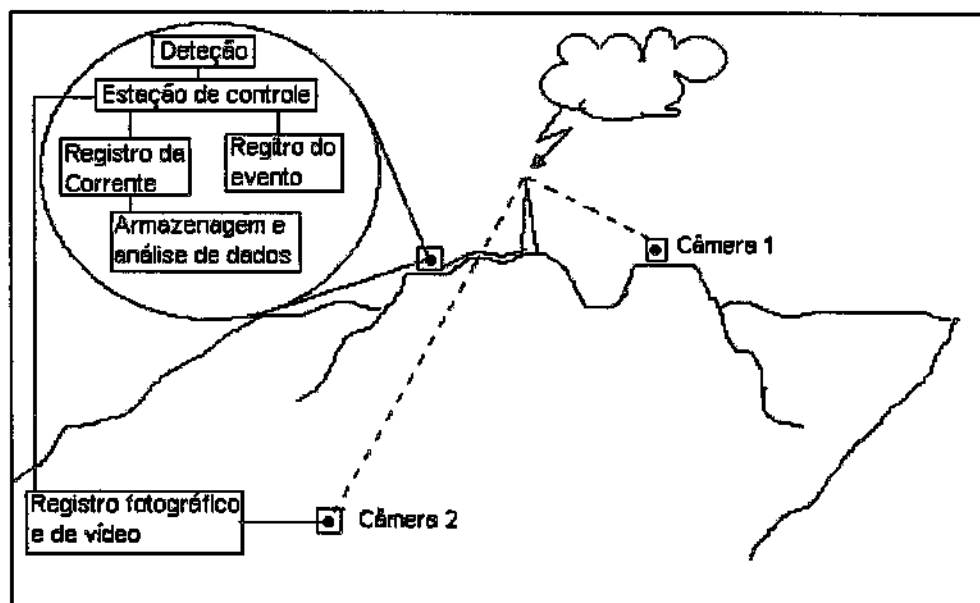


Fig. 1.1 - Disposição física esquemática da Estação do Cachimbo. A distância da torre para a câmera um é de aproximadamente 1km e para a câmera dois de cerca de 3 km.
FONTE: adaptada de Lacerda (1998, p.71).

Ela está equipada para adquirir informações sobre:

- a) Atividade de relâmpagos nuvem solo;
- b) Campo elétrico atmosférico;
- c) Registros fotográficos com máquinas fotográficas comuns, e filmagens com câmera de vídeo.
- d) Forma de onda e frente de onda da corrente de relâmpagos que tocam a torre (NEERI, 1985).

1.5 - A Estação de Pesquisa do Monte San Salvatore

1.5.1 – Localização e Descrição Geral.

A estação do Monte San Salvatore foi construída em 1943 a 45°59' latitude norte e 8°57' longitude leste, próximo do lago Lugano nos Alpes Suíços, junto á fronteira com a Itália, pelo Comitê Suíço de Pesquisas de Alta Tensão (Fig. 1.3). O principal

objetivo das pesquisas foi o registro das formas de onda de corrente de relâmpagos em torres.

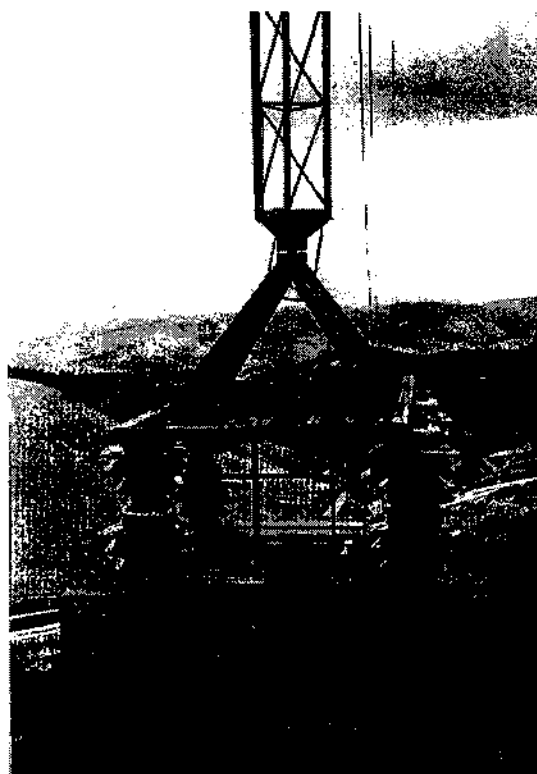


Fig. 1.2 – Base do mastro da torre suportada por isoladores de pedestal.
Fonte: Estação de Pesquisa de Descargas Atmosféricas – CEMIG
(1985)

A estação de pesquisa de relâmpagos no Monte San Salvatore, teve a sua primeira torre erguida em 1943, construída em madeira com quatro bases isoladoras. Sua altura era 60 m com uma haste metálica adicional nos seu topo com 10 m de altura. O shunt de corrente foi instalado próximo da sala de instrumentos na base da torre. Em 1958, esta torre foi substituída por uma torre totalmente metálica de transmissão de TV de 60 m na qual foi adicionada uma plataforma para instalação do shunt e haste metálica de 10 m, totalizando 70 m de altura, que nós chamamos de Torre T1. O segundo shunt foi instalado com um

tempo de resposta de 16 nano segundo e apresentou uma notável vantagem sobre o primeiro, em termos de limite de frequência (Berger, 1975).



Fig. 1.3 – Vista aérea do pico do Monte San Salvatore com a Torre 1 e o laboratório fotográfico. O shunt é montado sobre a antena de TV, 10m abaixo da haste. (Berger, 1967)

Em 1950, uma segunda torre metálica chamada de Torre T2, foi instalada para obter fotografias e novas opções de medições. Em relação à Torre T1, ela foi montada a 365 m de distância com um desnível de 47 m, porém com a mesma altura útil, 70m. (Berger, 1967).

O gatilho de disparo para registro das formas de onda podia ser ajustado para correntes de 20A.

A pesquisa de relâmpagos na Estação de San Salvatore envolveu:

- a) o estudo da forma de onda da corrente;
- b) a imagem do relâmpago registrada em filmes normal e de alta velocidade.

1.6 - A Estação de Pesquisa da África do Sul

1.6.1 - Localização e Descrição Geral

A estação da África do Sul constituída por uma torre de 60 metros, foi instalada a cerca de 10km a leste de Pretória, África do Sul (29 00 S, 24 00 E). A estação está localizada a uma altitude de 1400m, com seu topo sobressaindo 80m acima de toda a vizinhança (Eriksson, 1979).

As pesquisas da África do Sul tiveram como objetivo o conhecimento da amplitude do pico da corrente de descarga dos relâmpagos, para uso da engenharia no dimensionamento de sistemas de proteção de linhas de transmissão de energia elétrica e de aterramento de sistemas de potência.

1.7 - A Estação de Pesquisas do Japão

1.7.1 – Localização e Descrição Geral

A estação do Japão foi instalada a aproximadamente 30 km a sudeste da cidade de Niigata, localizada a aproximadamente 240 km de Hokuriku, próximo do porto no mar do Japão. A torre com aproximadamente 150m de altura, foi construída em uma elevação 125 m acima do nível do mar e a 400m afastada do litoral. Ela é estaiada por quatro fios de aço em três direções. Duas hastes de aço foram instaladas no topo da torre sendo as duas conectadas na estrutura da torre através de shunts resistivos de corrente. As correntes dos relâmpagos eram a partir daí registradas pelos instrumentos (Goto e Narita, 1994).

As pesquisas tiveram como objetivo a avaliação das descargas elétricas causadas por tempestades de inverno, para definir características dos relâmpagos quanto à polaridade e origem.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS EM TORRES

2.1 - Relâmpagos Pesquisados na Suíça e Classificação Proposta por Berger.

Berger publicou dados de aproximadamente 1598 relâmpagos registrados em torres, todos ocorridos na Suíça, na estação San Salvatore, durante o período que se iniciou em 1943 e se estendeu até 1971 (Berger, 1975).

Os mais de 28 anos de registros de dados segundo Berger, podem ser divididos em três fases, não considerando os três primeiros anos de pesquisa, mostradas na Tabela 2.1 a seguir.

TABELA 2.1 - FASES DE PESQUISAS NA ESTAÇÃO SAN SALVATORE

Relâmpago	FASE I (1946/1954)	FASE II (1955/1963)	FASE III (1964/1974)	TOTAL
Positivos	57	46	-	103
Negativos	204	324	-	528
Negativos sem DR	-	-	732	732
Positivos sem DR	-	-	102	102
Negativos com DR	-	-	106	106
Positivos com DR	-	-	27	27
Total	261	370	967	1598

Berger (1975) procurou classificar os relâmpagos em quatro diferentes tipos, esquematizando-os com base na polaridade da carga da nuvem que diretamente participa no relâmpago. Em assim sendo, o líder pode ser seguido ou não por uma descarga de retorno - Líder escalonado (LE) ou simplesmente líder, é uma

descarga que inicia dentro da nuvem e segue um caminho tortuoso e em etapas desde a nuvem até o solo; descarga de retorno (DR ou r) é uma intensa corrente que flui pelo canal no momento que o líder encontra o solo - Pinto (1996) . Na Figura 2.1 são ilustrados os oito tipos de relâmpagos propostos por Berger (1975), onde o sufixo (a) indica que o relâmpago não tem descarga de retorno e o sufixo (b) indica que o relâmpago tem pelo menos uma descarga de retorno.

Os oito possíveis tipos de relâmpagos previstos por Berger, foram esquematizados na Figura 2.1 a seguir, sendo:

Tipo 1a – O relâmpago começa com um líder descendente negativo a partir do centro de carga negativa da nuvem sendo o mais freqüente em campo aberto. No caso do líder não encontrar o solo, não há descarga de retorno e este constitui um relâmpago no céu.

Tipo 1b – Quando o líder negativo encontra o solo, uma descarga de retorno ascendente se desenvolve neutralizando cargas negativas da nuvem. Na seqüência pode ocorrer uma descarga ou várias descargas de retorno. Neste caso é o relâmpago negativo descendente (Identificado por Schonland).

Tipo 2a – A descarga é iniciada por um líder ascendente em direção ao centro de cargas negativas da nuvem a partir de estruturas aterradas (torre ou topo de uma montanha). Este líder é carregado positivamente (a estrutura é um anodo) e a carga flui para a terra produzindo uma corrente negativa na torre. Berger descreve este relâmpago como “líder positivo ascendente/relâmpago negativo com corrente contínua”.

Tipo 2b – Estágio inicial como no tipo 2a, seguido por descargas subseqüentes, tendo cada uma um líder descendente e uma descarga de retorno como no tipo 1b.

Designado como “líder positivo ascendente/relâmpago negativo com pulsos múltiplos” (pesquisado por McEachron no Empire State Building e por Berger).

Tipo 3a – Este corresponde a um relâmpago tipo 1a mas sob o centro de cargas positivo da nuvem. A carga e a corrente do líder são positivas e desde que o líder não toque o solo, este é um relâmpago intranuvem e como consequência apenas uma corrente de deslocamento flui no solo.

Tipo 3b – Quando o líder descendente positivo encontra o solo, este produz uma descarga de retorno ascendente através da qual tanto o líder quanto parte da nuvem são descarregados. Este relâmpago é muito raro em regiões montanhosas. Berger fotografou apenas um seguramente positivo nas margens do lago Lugano e um único caso na torre de San Salvatore, em 15 anos de pesquisa. Este relâmpago é designado como relâmpago positivo descendente.

Tipo 4a – Um líder ascendente negativo é iniciado sob o centro de carga positiva da nuvem a partir de estruturas aterradas (a estrutura constitui o catodo) e a carga que flui para a terra é positiva. A corrente sendo de longa duração é a corrente contínua.

Este tipo de relâmpago é designado por “líder negativo ascendente/relâmpago positivo com corrente contínua”. (Típico de montanhas)

Tipo 4b – Este relâmpago é iniciado como os tipos 4a mas o líder ascendente é seguido, após 4 a 25ms por uma descarga positiva descendente muito intensa que pode ser relacionada a uma descarga de retorno. Este tipo foi primeiramente observado em San Salvatore e Berger e Anderson (1975) discutiram este relâmpago com muito detalhe. O líder negativo ascendente progride na forma de um “líder conectante” muito grande para uma descarga intranuvem que causa primeiro um forte campo transiente do qual o líder ascendente foi iniciado e depois é descarregado para a terra através do “líder conectante”.

Designado por “líder negativo ascendente/relâmpago positivo com corrente impulsiva”. (Típico de montanhas)

Em regiões montanhosas ou áreas próximas de estruturas elevadas, por causa da alta intensidade do campo elétrico no solo, o relâmpago tipo 4b parece excluir o tipo 3b pelo qual um longo líder ascendente conectante é iniciado pela aproximação de um líder descendente.

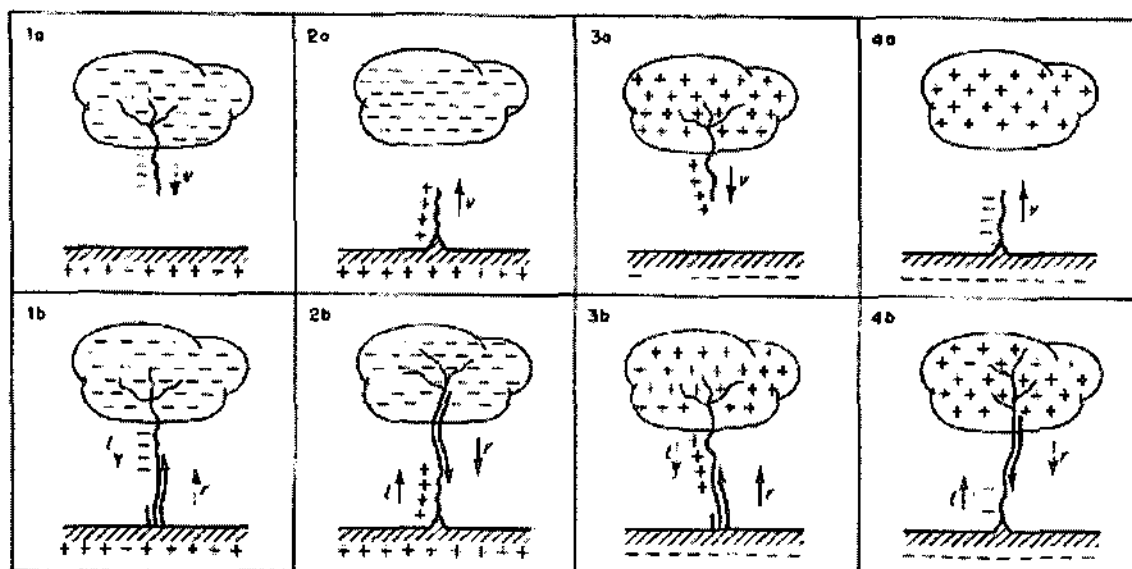


Fig. 2.1 – Os oito tipos de relâmpagos baseados na direção e carga do líder, propostos por Berger (l é o líder, r a corrente de retorno)
Fonte Berger(1975, p.136).

2.2 - Classificação Atual dos Relâmpagos

Na classificação proposta por Berger reproduzida na Figura 2.1 acima, as direções dos líderes produzem descargas de retornos diferentes do que é hoje aceito, como descrito em seguida.

Inicialmente os relâmpagos podem ser classificados em dois grupos :

- Relâmpagos que ocorrem no céu (Miranda, 2000) que correspondem aos relâmpagos entre a nuvem e outra nuvem (EN entre – nuvens); dentro da nuvem (IN - intranuvem) e da nuvem para o ar (NA – nuvem ar).
- Relâmpagos que ocorrem entre o solo e a nuvem ou entre a nuvem e o solo.

Os relâmpagos nuvem – solo (NS e SN), se agrupados a partir das cargas efetivamente destruídas ou neutralizadas na nuvem podem ser denominados como relâmpagos nuvens – solo, aqui simplesmente NS, que poderão ser ascendentes ou descendentes, dependendo da direção de propagação do líder. (Mazur e Ruhnke, 1993; Rakov, 1998).

Assim, diferentemente da classificação de Berger, podemos caracterizar quatro tipos de relâmpagos NS, considerando que a descarga de retorno é um pulso de

corrente que percorre o canal do relâmpago do solo para a nuvem, fazendo o potencial do canal se igualar ao potencial do solo, conforme a Figura 2.2 a seguir. (Mazur e Ruhnke, 1993; Rakov, 1998):

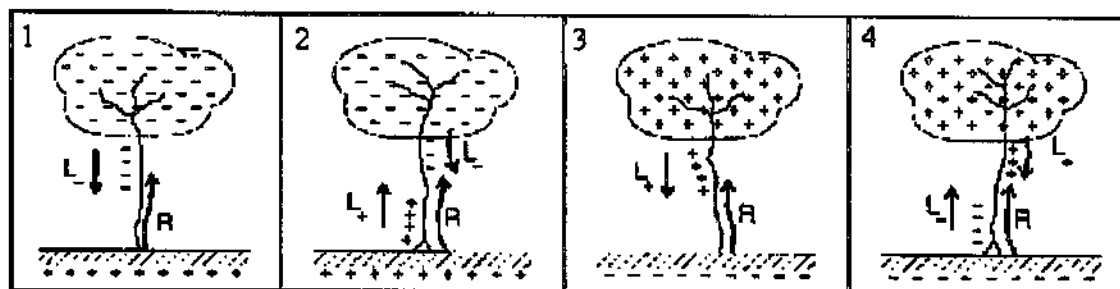


Fig. 2.2 – Tipos de relâmpagos baseados nas direções dos líderes e na carga neutralizada ou destruída na nuvem. (L é o líder, R a corrente de retorno) (Fonte: Mazur e Ruhnke – 1993).

2.3 – Descrição dos Tipos de Relâmpagos.

Nas descrições dos tipos de relâmpagos, a polaridade dos relâmpagos corresponde à da carga neutralizada na nuvem e o sentido ascendente ou descendente depende do sentido do líder escalonado como esquematizado na Figura 2.3.

2.3.1. - Relâmpagos Negativos Descendentes

Relâmpagos que se iniciam na região de **cargas negativas da nuvem**, com o **líder se propagando para o solo** com transferência de elétrons para o solo (downward negative lightning), são chamados de relâmpagos negativos descendentes (Figura 2.4).

No relâmpago da Figura 2.4, notamos em (a) o canal principal e a descarga de retorno. O canal principal, mais brilhante (b), foi formado após o líder escalonado encontrar o líder ascendente que surgiu no topo da torre. Este relâmpago apresentou ainda mais duas descargas após a descarga de retorno, chamadas de descargas subseqüentes (c) e (d), que acontecem após o líder contínuo (condutor que antecede a descarga que tem maior velocidade de propagação do que o líder

escalonado) encontrar a torre. O detalhamento destes processos será apresentado no item 2.5.1.

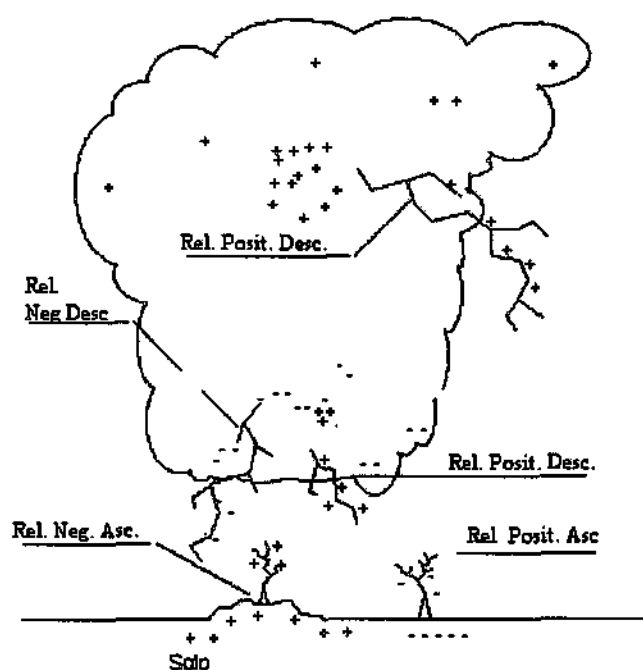


Fig. 2.3 - Estrutura da nuvem de tempestade mostrando as regiões onde se iniciam os diversos tipos de relâmpagos.

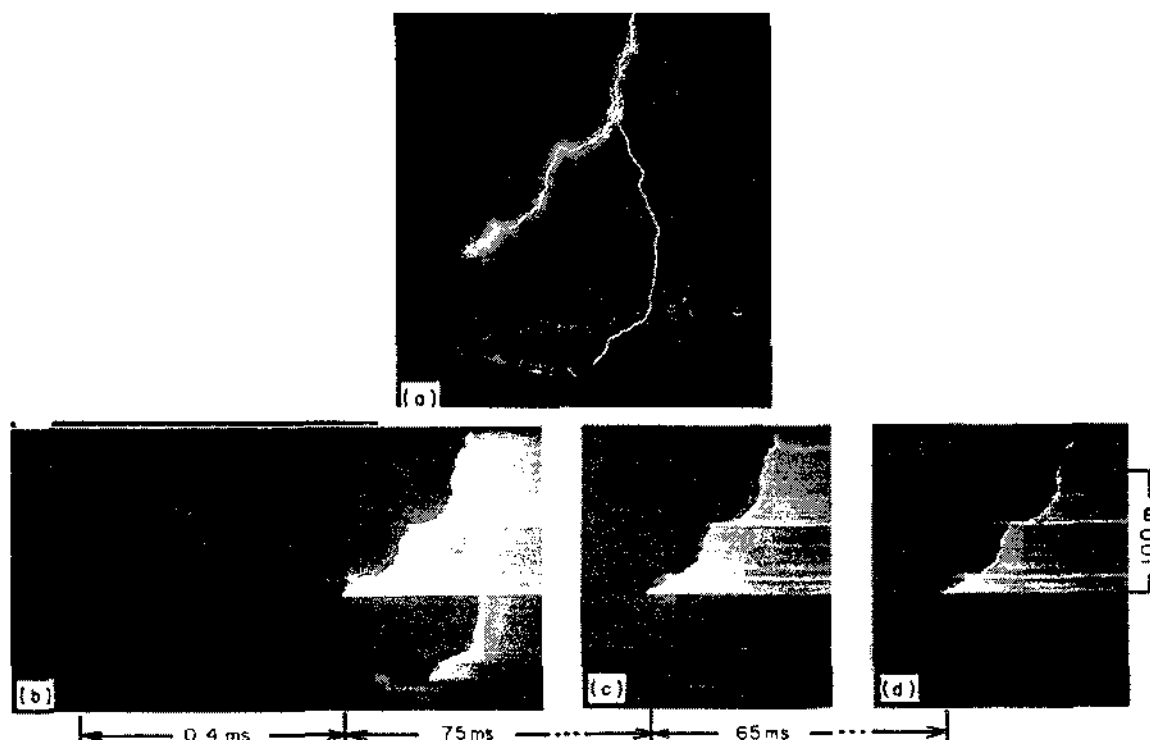


Fig. 2.4 – Fotografia de um relâmpago negativo descendente com três descargas de retorno.

FONTE: Berger (1975, p127)

2.3.2 - Relâmpagos Negativos Ascendentes

Relâmpagos que se iniciam no solo com o líder se propagando para a região de cargas negativas da nuvem com transferência de elétrons para o solo (upward negative lightning), chamados de relâmpagos negativos ascendentes ilustrados nas Figuras 2.5 e 2.6.

A Figura 2.5 (a) mostra uma fotografia tirada com filme em alta velocidade de um relâmpago negativo ascendente onde é possível notar o início do relâmpago ascendente à esquerda. No relâmpago ascendente o líder inicia seu desenvolvimento a partir da torre em direção à nuvem. Em (b) a fotografia mostra dois líderes nas duas torres da estação San Salvatore. É um registro de dois relâmpagos que aconteceram simultaneamente nas duas torres. Na Figura 2.6 é possível, agora com fotografias tiradas com filme estacionário, visualizar à

esquerda o relâmpago da Figura 2.5 (a) e à direita os relâmpagos nas duas torres da Figura 2.5 (b).

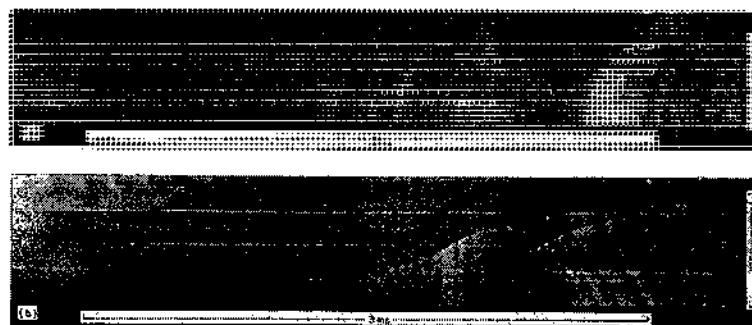


Fig. 2.5 – Fotografia de um relâmpago negativo ascendente na estação San Salvatore (a) Líder na torre 2; (b) Líderes nas torres 1 e 2 .
FONTE: Berger (1975 p.160).

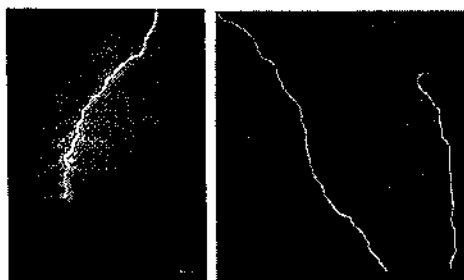


Fig. 2.6 – Fotografia em filme estacionário do relâmpago da Fig. 2.5 na estação San Salvatore. A esquerda o relâmpago (a) da Fig. anterior e a direita (b)
FONTE: Berger (1975, p.160).

2.3.3 - Relâmpagos Positivos Descendentes

Relâmpagos que se iniciam na região de **cargas positivas da nuvem** com o **líder se propagando para o solo** com transferência de elétrons do solo para a nuvem (downward positive lightning), chamados de relâmpagos positivos descendentes, ilustrado na Figura 2.7.

Uma maneira de distinguir os relâmpagos positivos dos negativos em fotografia, é comparar a luminosidade dos líderes. Os relâmpagos positivos apresentam uma fraca luminosidade. A Figura 2.7 (a) mostra o líder escalonado de um relâmpago

descendente positivo que iniciou seu trajeto da nuvem para o solo à esquerda da fotografia tocando a torre à direita. Esta foto foi tirada a uma distância de 3,3km da torre. Em (b) e (c) com filme estacionário, foram tiradas duas fotos do mesmo relâmpago a partir de posições diferentes. A fotografia da esquerda (b) foi tirada a mesma distância da foto tirada em (a) e a fotografia em (c) foi tirada a uma distância de 400m.

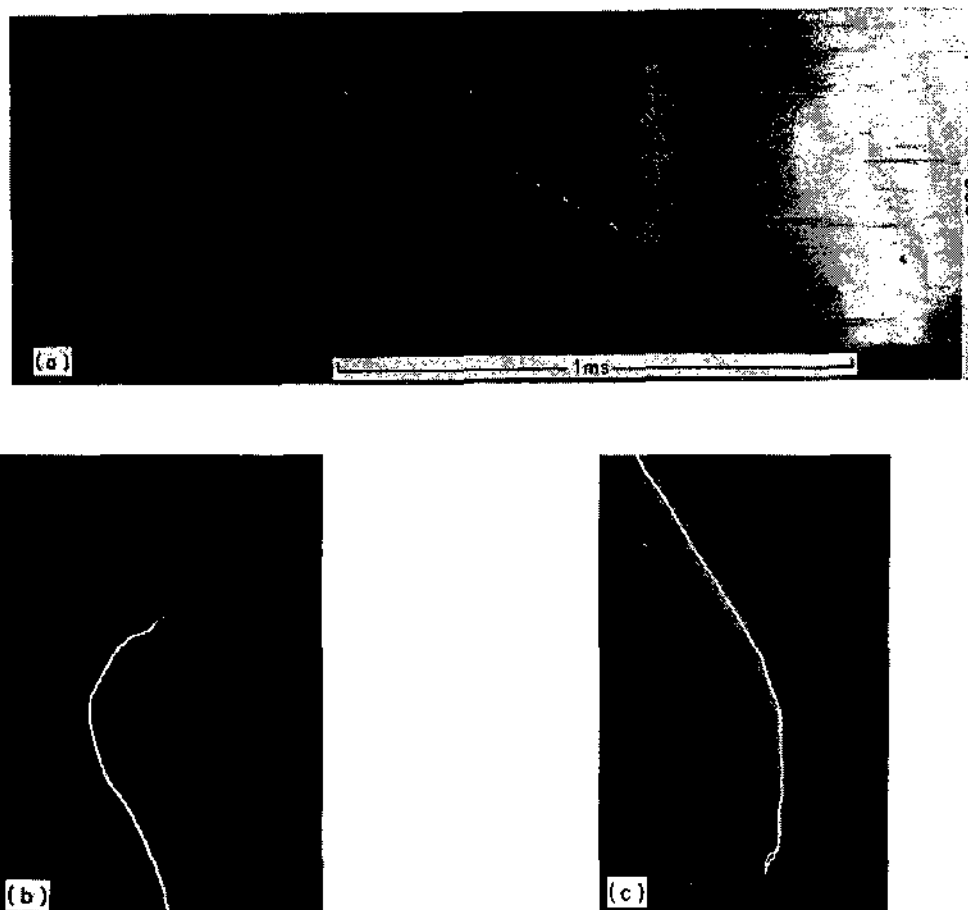


Fig. 2.7 – Fotografia de um relâmpago positivo descendente (a) Líder fotografado a 3,3km de distância; (b) Em filme estacionário à mesma distância; (c) Mesmo relâmpago a aproximadamente 400m.
FONTE: Berger (1975, p. 154 e 155)

2.3.4 - Relâmpagos Positivos Ascendentes

Relâmpagos que se iniciam no solo com o líder se propagando para a região de cargas positivas da nuvem com transferência de elétrons para a nuvem (upward positive lightning), chamado de relâmpagos positivos ascendentes ilustrado na Figura 2.8.

Uma maneira de distinguir os relâmpagos ascendentes dos descendentes é examinar as ramificações destes relâmpagos. Enquanto os descendentes têm suas ramificações voltadas para baixo, os ascendentes as têm para cima. Na Figura 2.8 (a) e (c), notamos o desenvolvimento do líder desde a torre à esquerda com destino a nuvem e em (b) O mesmo relâmpago registrado em filme estacionário onde se pode perceber a ramificação voltada para cima.

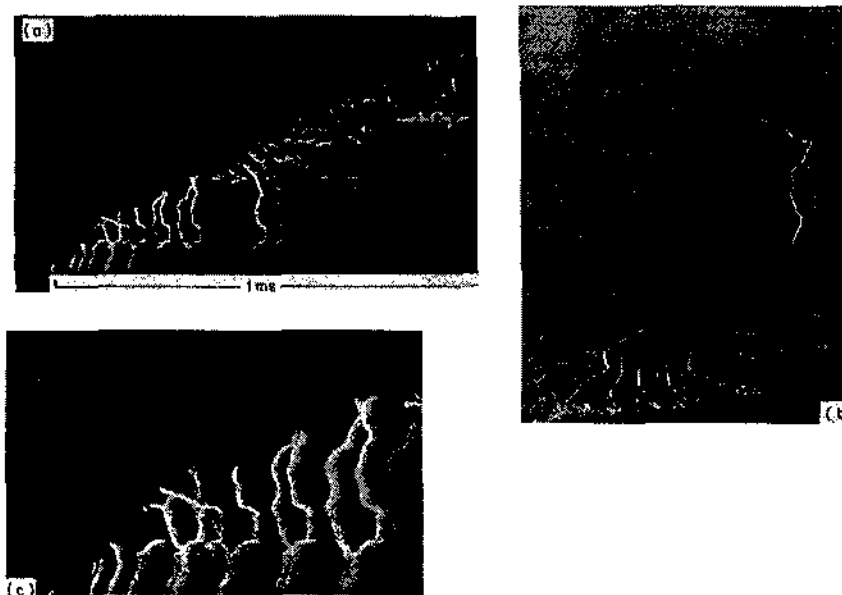


Fig. 2.8 - Relâmpago positivo ascendente (a) e (c) Líder no topo da torre; (b) – Fotografia com filme estacionário.
FONTE: Berger (1975, p.162)

Acredita-se que os relâmpagos negativos descendentes totalizam aproximadamente 90% ou mais dos relâmpagos NS e que 10% ou menos das descargas, são relâmpagos positivos descendentes. Relâmpagos ascendentes

positivos e negativos ocorrem somente em torres, a partir de estruturas elevadas quando próximo do nível do mar (alturas superiores a 100 m) ou então, de objetos que sobressaem moderadamente em topos de montanhas elevadas. (Rakov, 1998).

2.4 - Mecanismos de Descargas

Quando o campo elétrico no interior da nuvem de tempestade atinge valores da ordem de 10^5 V/m, ele provoca a ruptura da rigidez dielétrica do ar em algum ponto dentro da nuvem, que dará origem a um mecanismo de descarga que impulsionará cargas para baixo formando o *envelope corona* onde um condutor chamado *líder escalonado* percorrerá o caminho entre a nuvem e o solo. Dependendo da região de cargas estas poderão ser positivas ou negativas, produzindo um *relâmpago negativo* ou *positivo descendente*. Ocorre em seguida a formação de um *canal principal* que é uma região no interior do *envelope corona* com uma largura da ordem de 1 a 5 cm, fortemente ionizada, submetida a uma corrente elétrica muito intensa.

Um relâmpago pode ter uma descarga de retorno (DR), ou então múltiplas descargas. Neste caso após a primeira descarga de retorno, ocorrem os processos K e J de descargas internas à nuvem disponibilizando cargas para uma nova descarga chamada *líder contínuo* (LC) que percorre o canal principal com uma velocidade de 10^6 m/s. O *líder contínuo* (LC) vai depositando de 1 a 10 C de cargas negativas ao longo do canal e quando o se aproxima do solo, é iniciada uma nova descarga de retorno que neste caso chama-se descarga subsequente (DS) em geral sem ramificações. Se este processo continua com outras descargas, o relâmpago é considerado relâmpago múltiplo. A Fig. 2.9 ilustra o mecanismo de descarga.

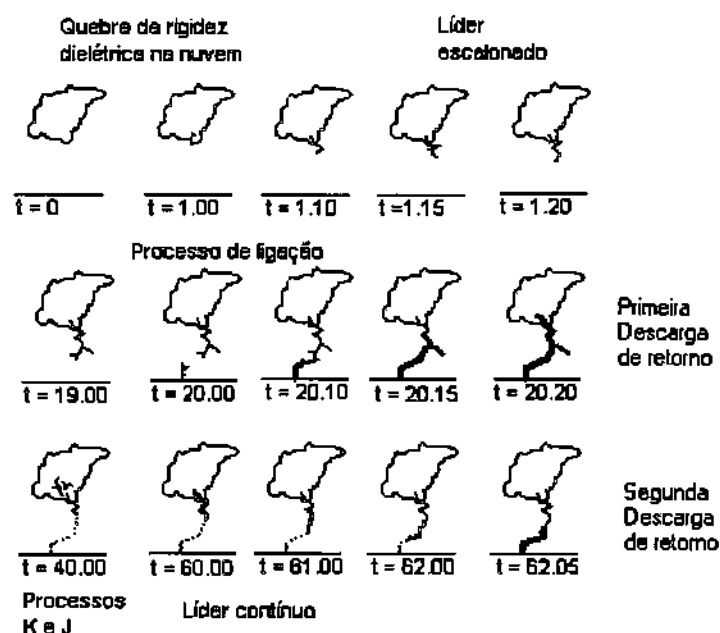


Fig. 2.9 - Mecanismo de descarga. Os instantes de tempo t são em milésimos de segundos.

FONTE: adaptada de Uman (1987 p. 12).

2.4.1 - Correntes que Fluem pelo Canal Principal

- Correntes de curta duração (CCD): Estas correntes possuem elevada magnitude e ocorrem em tempos reduzidos, considerados pequenos na ordem de dezenas de milionésimos de segundos. São correntes assimétricas, cuja frente de onda tem um valor de crista muito elevado e com forte amortecimento. A Figura 2.10 mostra o modelo de uma onda de impulso $1,2 \times 50\mu\text{s}$ padronizado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (NBR 6936, NBR 6937 e NBR 6938) conhecida como onda plena. Na Figura 2.10 temos um tempo de aproximadamente $50\mu\text{s}$ para a onda atingir na cauda 50% de seu valor de crista (t_2) e o tempo $t_1 = 1,2\mu\text{s}$ que é dado pela diferença entre o tempo em que a corrente atinge o seu valor máximo (t_{pico}) e o tempo chamado de zero virtual que é definido pela intersecção da reta que se superpõe ao trecho entre 30% e 90% da frente de onda com o eixo dos tempos. Exemplos de corrente de curta duração são as descargas de retorno, descargas subsequentes

e correntes corona que apresentam forte amortecimento após picos de amplitude elevada, com tempo de duração de milionésimos de segundo.

- Correntes de longa duração (CLD) : Essas correntes possuem pico moderado e sua forma de onda apresenta fraco amortecimento sendo caracterizadas por um maior tempo de permanência no canal e pela polaridade unidirecional. Estas correntes ocorrem em intervalos de tempos que variam entre centenas de milionésimos de segundos a algumas dezenas de milésimos de segundos. Um exemplo destas, são as correntes que aparecem no canal do relâmpago antes, durante e após a DR, com baixas amplitudes as quais provocam uma diminuição do campo elétrico. Estas correntes são também chamadas de correntes contínuas.

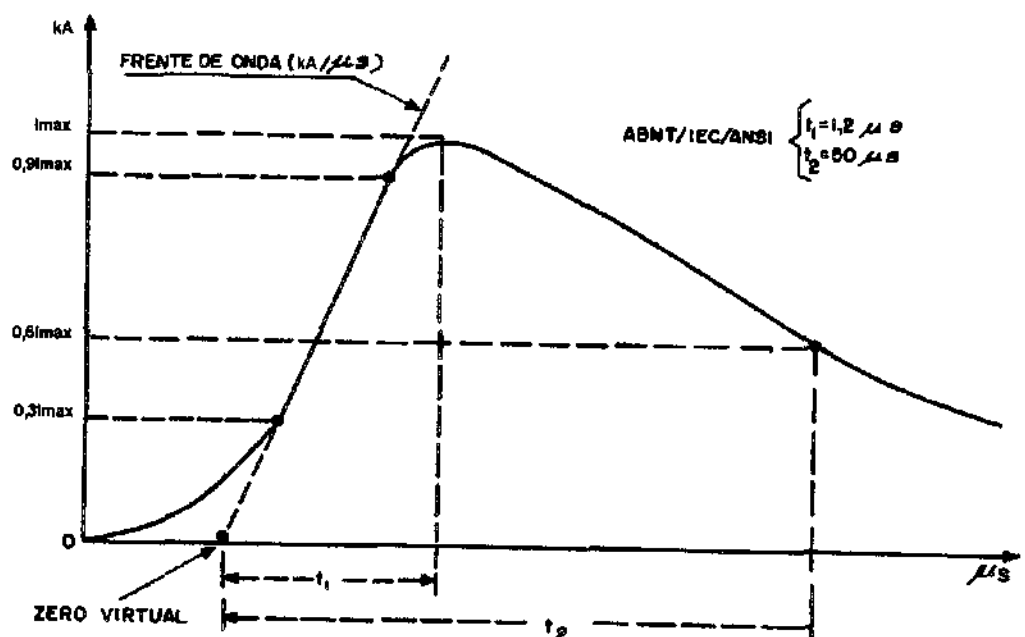


Fig. 2.10 – Forma de onda com impulso 1,2x50μs conhecido como onda plena
 $t_1=1,2\mu s$, $t_2=50\mu s$.
 FONTE: ABNT - NBR 6936

2.5 - Etapas dos Relâmpagos

2.5.1 - Relâmpago negativo descendente

Devido ao campo elétrico de alta intensidade, as cargas elétricas negativas de uma nuvem de tempestade são impulsionadas para baixo em pequenos passos da ordem de 50 m, percorridos em média em $1\mu\text{s}$, com uma pausa de $50\mu\text{s}$ entre cada passo e com uma velocidade média ao longo da distância entre a nuvem e o solo da ordem de 10^5 m/s , gerando uma corrente elétrica de 100 A a 1000 A. Essa fase é chamada de *líder escalonado* (LE). Ela demarca uma região do espaço chamada de *envelope corona* no qual cargas elétricas ficam retidas. O envelope formará o *canal principal* entre a nuvem e o solo. O desenvolvimento dessa fase pôde ser identificado em medidas de campo elétrico confrontadas com fotografias feitas com o filme girando em alta velocidade (Schonland et al. 1938a; 1938b). Um esquema desta fase pode ser visto na FIGURA 2.11 a seguir.

À medida que a ponta do *líder escalonado* se aproxima do solo, aumenta a intensidade do campo elétrico na ponta do líder, fazendo com que surjam a partir do solo, um novo *líder positivo ascendente*. A cerca de 100 m do solo, quando a ponta do *líder escalonado* toca uma dessas descargas ascendentes ocorre o *processo de ligação*, ocasionando a primeira *descarga de retorno* (DR). O que caracteriza a fase da *descarga de retorno* é o aumento da corrente no solo, de um valor de 100 A a 1000 A, para valores da ordem de dezenas de kA em média, direcionada para a nuvem. Isso ocorre num intervalo de tempo de 1 a $20\mu\text{s}$, com um decaimento aos valores iniciais num intervalo de tempo de cerca de 200 a $500\mu\text{s}$, gerando um pulso que percorre a distância entre a Terra e a nuvem com uma velocidade da ordem de 10^8 m/s .

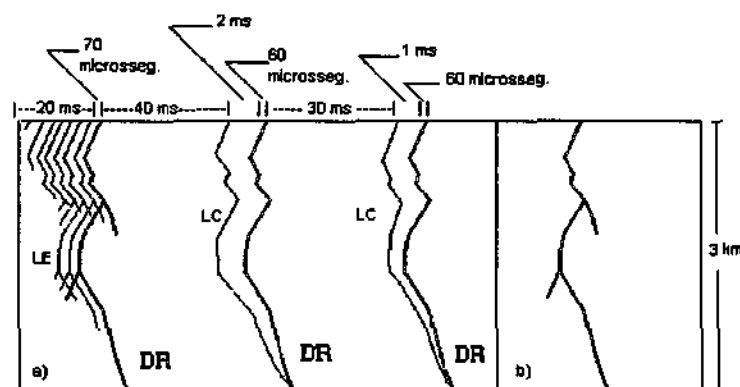


Fig. 2.11- Esquema fora de escala, mostrando uma descarga nuvem solo: a) tempos característicos das diversas fases (DR: Descarga de retorno; LC: líder contínuo; LE: líder escalonado) registrada por câmera com o filme girando em alta velocidade; b) a mesma descarga registrada em filme estático.

FONTE: Uman (1987. p 14).

Inicialmente, as cargas que fluem para o solo são aquelas que estão distribuídas na ponta do líder escalonado, gerando um pulso que se propaga desde o solo até a nuvem, sendo o responsável pelo primeiro pico da corrente da descarga de retorno. As cargas que estão depositadas ao longo do canal formando o envelope corona, colapsam em direção ao canal e daí para o solo, estabelecendo uma corrente chamada de corrente corona a qual faz surgir um segundo pico na corrente elétrica registrada no solo. O canal principal e suas ramificações ficam luminosos, o meio se aquece e se dilata produzindo o trovão.

2.5.2 - Relâmpago Positivo Descendente

A partir de registros de medida de campo elétrico, observa-se que relâmpagos positivos geralmente são precedidos por significativas descargas intranuvens (IN), que em média duram de 100 ms a 200 ms. Estas observações sugerem que os relâmpagos positivos descendentes podem ser iniciados por uma ramificação destas descargas dentro da nuvem e alguns relatórios registram que às vezes estes relâmpagos envolvem um grande canal horizontal, com algumas dezenas de quilômetros de extensão (Rakov,1998). Evidências indicam que os líderes são iniciados na região de cargas positivas que ocorrem mais freqüentemente no estágio dissipativo das nuvens de tempestades. Neste momento a região de

cargas positivas poderia ser menos protegida pela blindagem das cargas negativas da nuvem, como resultado de um deslocamento do principal centro de cargas no interior da nuvem (Uman, 1987). A análise do líder destes relâmpagos mostra uma fraca luminosidade, menos visível e que não possui pausas bem definidas, impossibilitando às vezes, sua observação mesmo em filmes de alta velocidade (Berger, 1967). Em observações de relâmpagos em geral, é evidenciado que os relâmpagos positivos ocorrem em menor estatística do que os negativos e também que a maioria dos relâmpagos positivos possui uma única descarga de retorno e que a metade destes relâmpagos possui uma corrente de longa duração que percorre o canal logo após a descarga de retorno, produzindo uma variação do campo elétrico no canal.

2.5.3 - Relâmpagos Ascendentes Positivos e Negativos

A descoberta de relâmpagos ascendentes é geralmente atribuída a McEachron (Uman, 1987). A maioria dos relâmpagos observados no Empire State Building na cidade de Nova York (EUA) era iniciada por um líder ascendente, cuja origem era a ponta da haste no topo do edifício, mas sem ocorrência de descarga de retorno. Hagenguth e Anderson (1952) registraram que a média máxima de corrente de longa duração em relâmpagos ascendentes é aproximadamente 250A para um máximo de 1440A com um tempo de permanência destas correntes de longa duração chegando a décimos de segundos. O maior tempo observado para este tipo de relâmpago foi 1,5s a metade destes com tempo de ocorrência de 0,27s. Em aproximadamente metade das descargas subseqüentes, a corrente é iniciada por líderes contínuos descendentes acompanhados por uma descarga no seu estágio inicial. McEachron (Uman, 1987) observou que o líder negativo escalonado ascendente tinha um comprimento médio de 8,2 m com uma variação de 6,2 m a 23 m. O intervalo de tempo entre os passos foi de 30 μ s com uma variação entre 20 μ s e 100 μ s.

Após o líder ascendente atingir a nuvem, uma corrente de longa duração circula pelo canal com uma descarga inicial que pode ser precedida por uma combinação de um líder contínuo descendente sem pulsos.

Os relâmpagos negativos ascendentes podem ser agrupados segundo as características da descarga inicial que percorre o canal:

- Forma de onda de corrente de longa duração com valor médio de até 600A, não ultrapassando 2000 A
- Forma de onda de corrente de longa duração e superposição de pulsos próximos de 10kA.
- Forma de onda com descarga inicial e a corrente de longa duração com uma descarga de retorno subsequente ascendente. Entretanto, estes relâmpagos não possuem a primeira descarga de retorno, com a forma de onda se assemelhando com as descargas subsequentes dos relâmpagos descendentes.

O líder ascendente pode iniciar uma descarga de retorno descendente aparentemente observada apenas para o caso de líderes carregados com cargas positivas, nos relâmpagos negativos.

Os relâmpagos ascendentes mais freqüentemente são produzidos por líderes que iniciam a partir do topo de estruturas elevadas, tais como no Empire State Building, NY (McEachron, 1940; Hagenguth e Anderson, 1952), as Torres no Monte de San Salvatore na Suíça (Berger, 1967, 1975) na Torre de Toronto no Canadá (Chang, e Inan 1985) e na torre do Morro do Cachimbo. Segundo Berger (1977), os líderes ascendentes às vezes são imediatamente precedidos por descargas intranuvem que em frações de segundo fazem o campo elétrico no topo da estrutura dar início a um líder.

Em pesquisas que abrangem grande quantidade de dados com estatísticas de ocorrência de relâmpagos naturais, os ascendentes são considerados raros.

A partir de observações das formas de correntes de relâmpagos em torres registradas em osciloscópios, Berger (1967) concluiu que relâmpagos cujas curvas de correntes se iniciam com uma corrente de longa duração e com frente de onda íngreme e com forte amortecimento eram causadas por relâmpagos ascendentes.

Na Figura 2.12 apresentamos o esquema de evolução temporal do relâmpago negativo descendente.

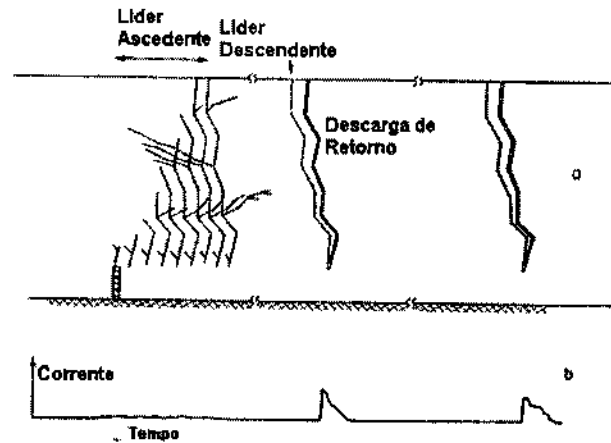


Fig. 2.12 – Evolução temporal esquemática de um relâmpago ascendente (a) corrente de descarga de retorno; (b) forma da corrente sem escala.

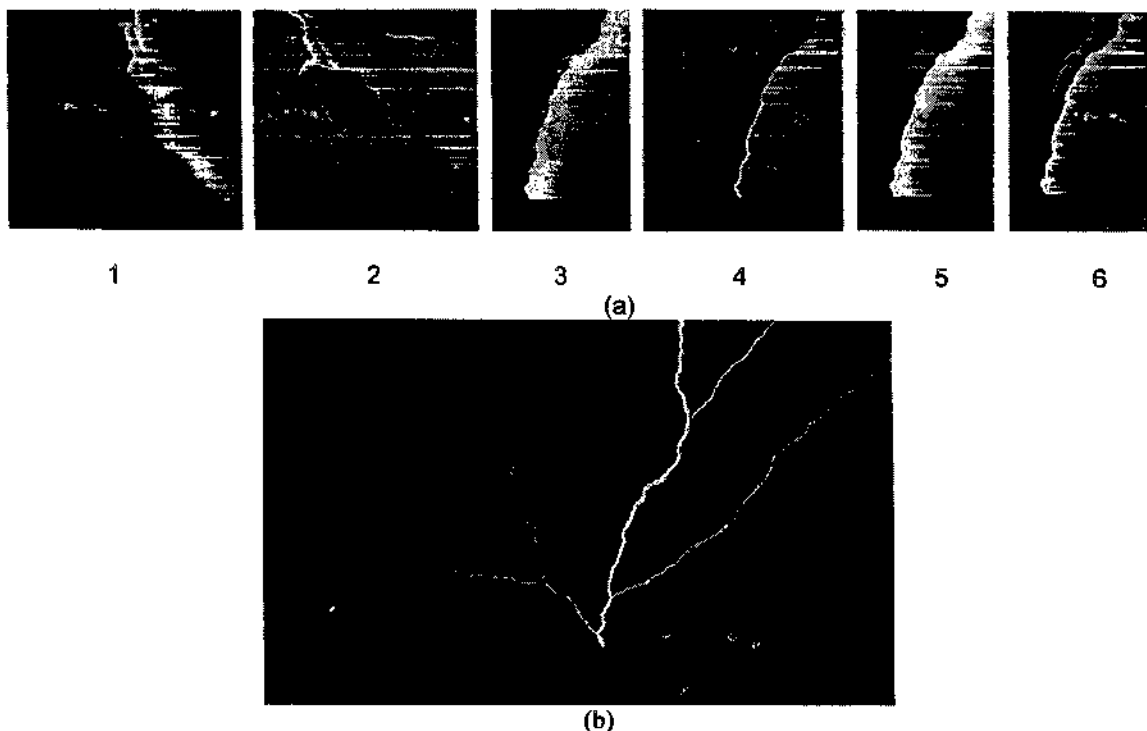


Fig. 2.13 – Relâmpago negativo ascendente; (a) As fotos de 3 a 6 correspondem à descargas de retorno e às descargas subsequentes; (b) Fotografia em filme estacionário.

FONTE: Berger (1967)

Como já comentado anteriormente, as ramificações dos relâmpagos ascendentes são voltadas para cima, o que notamos na Figura 2.13 (b).

Já, os relâmpagos positivos ascendentes podem ser agrupados segundo as características da descarga inicial que percorre o canal:

- Forma de onda de corrente de longa duração com valor médio de até 600A, não ultrapassando 2000 A
- Forma de onda de corrente de longa duração e superposição de pulsos próximos de 10kA.

Independentemente onde ocorram, em topo de montanhas, torres, edificações ou outras estruturas aterradas, os relâmpagos positivos são considerados raros.

2.6 – Física dos Relâmpagos Positivos e Negativos

A interação entre líderes descendentes, como o líder escalonado (LE) e o líder ascendente que se inicia na estrutura no solo, produz resultados que dependem fortemente da descontinuidade do meio condutor canal–torre e torre–solo, para citar apenas um exemplo de relâmpagos em torres, que é o nosso caso. Como consequência deste meio eletricamente descontínuo, a corrente da descarga de retorno (DR) pode receber a influência da modificação da condutividade do meio embora saibamos que para determinar esta influência em sua totalidade, precisamos fazer mais medições no canal o que torna esta tarefa muito difícil. Como consequência da alta frequência da corrente da descarga de retorno a resistência do solo neste caso é uma impedância de aterramento apresentando portanto variações. Este acontecimento indica que os resultados devem ser cuidadosamente analisados para serem entendidos no que se refere à propagação dos líderes descendentes e a indução dos líderes ascendentes (Mazur e Ruhnke, 1998).

A distribuição de carga no canal bem como a avalanche eletrônica que causa o efeito corona no envelope e produz uma elevação do campo elétrico na ponta do

líder faz com que a diferença de potencial entre o líder e o solo aumente à medida que se aproxima do solo. Recorrendo a estudos feitos em modelagem da corrente da descarga de retorno para analisar a influência dos parâmetros escolhidos Mazur e Ruhnke (1993) argumentam que o modelo de uma descarga com um líder unidirecional uniformemente carregado originado no centro de cargas localizado na nuvem (modelo de centro de carga) é bem detalhado desde a introdução deste conceito por Schonland (1938). No estudo da corrente da descarga de retorno dentro dos parâmetros propostos pelo modelo do líder unidirecional, “a carga negativa é previamente removida da nuvem e é distribuída ao longo de todo o canal através do líder” (Malan, 1963). Isto implica na existência de um processo físico pelo qual cargas da nuvem possam ser empurradas ou forçadas para dentro do canal do líder.

Mazur e Ruhnke (1998) argumentam que o líder bidirecional, cujo conceito pressupõe um líder com carga total nula desenvolvido por Kasemir (1950,1960,1983), foi ignorado pela maioria dos pesquisadores envolvidos no campo de observação de relâmpagos. A primeira confirmação de que este conceito é válido, veio de observações de radares feitas pela NASA em aviões instrumentados voando através de nuvens de tempestade (Mazur e Ruhnke, 1993). Tais observações mostraram que a maioria dos relâmpagos que iniciaram no avião se desenvolveram de forma bidirecional (Mazur e Ruhnke, 1993). Análises posteriores das medidas da variação de campo elétrico feitas em aviões, suas taxas de variação temporais e correntes, tanto quanto as observações ópticas e por vídeo durante os experimentos, mostraram que o único conceito consistente com o resultado destas medidas é a idéia de Kasemir de um líder bidirecional, com líder de carga total nula iniciado na fuselagem do avião. Tal como em relâmpagos naturais, a fonte de energia para o avião induzir o relâmpago, é o campo elétrico ambiente. Entretanto instrumentos de medições transportados em aviões, também permitiram a primeira oportunidade de estudar o processo de iniciação do relâmpago, com instrumentos instalados dentro do canal do relâmpago (Mazur e Ruhnke, 1993).

O conceito do líder bidirecional portanto, se opõe ao modelo do centro de cargas sob base física e reveste a questão fundamental de como o líder coleta a carga da nuvem para produzir correntes ou campos mensuráveis. “Não existe nenhuma lei física que faça as cargas negativas ou positivas da nuvem moverem-se uniformemente para se concentrarem no canal do relâmpago” (Kasemir,1983). Usando este conceito de líder bidirecional o qual é influenciado pelas cargas induzidas pelo campo elétrico ambiente, Kasemir (1983) resolveu o problema de transferência de carga mostrando como o relâmpago consome a energia armazenada na nuvem de tempestade.

Yoshihashi e Kawasaki (1999) realizaram testes interferométricos de UHF em canais de relâmpagos em termos de fonte de radiação. Mediram a corrente de descarga de retorno de relâmpagos induzidos no topo de torres, para confirmar a polaridade de líderes ascendentes e obtiveram as características da radiação em UHF em função da polaridade. Os resultados que eles apresentaram correspondem aos que outros pesquisadores encontraram tanto para líderes unidirecionais quanto para líderes bidirecionais. Suas pesquisas foram baseadas em campanhas realizadas no Japão em tempestades de inverno e na Austrália em tempestades de verão. As correntes dos relâmpagos foram obtidas em medições realizadas no topo de torres para confirmar a polaridade de líderes ascendentes e a característica da radiação em UHF. Concluíram que o conceito de líder bidirecional está correta para as observações interferométricas.

Assim, além do sistema de interferometria verificar a posição e origem do líder, a pesquisa indicou que o modelo do líder bidirecional apresenta uma vantagem crítica sobre o modelo unidirecional, ao seguir um conceito físico coerente.

Em uma modelagem da corrente da descarga de retorno, os processos físicos comuns em várias formas de onda de relâmpagos de qualquer tipo, natural ou artificial, devem ser descritos usando o modelo eletrostático do líder unidirecional transportando carga positiva ou negativa, ou líder bidirecional com carga total nula. Segundo Mazur e Ruhnke (1993) pode-se definir os principais princípios físicos que governam os processos dos relâmpagos como a seguir.

- a) Líder bidirecional – ocorre quando a descarga elétrica na atmosfera é consequência de relâmpagos IN e NS com descarga sem meio físico condutor diretamente aterrado, podendo ser iniciado ou por avião ou por foguetes; Líder unidirecional – ocorre quando a descarga toca o solo ou em relâmpagos NS com descarga com fio condutor, iniciado ou por foguetes diretamente aterrados e em estruturas elevadas.
- b) O processo de ruptura da rigidez dielétrica do ar pela ponta do líder depende apenas do gradiente de potencial no local, que iguala a diferença de potencial entre o potencial do líder e da nuvem. Este processo comanda o desenvolvimento do líder após seu início.
- c) O canal do líder desaparece quando a diferença de potencial entre o potencial do líder e o potencial da nuvem na extremidade do líder está abaixo do limite do nível necessário para a ruptura da rigidez dielétrica do ar. Quando isto acontece em todas as ramificações do canal, o processo do relâmpago como um todo caminha para o final.

Podemos aproveitar as descrições destes processos para a interpretar curvas de onda de corrente de descarga de retorno nos relâmpagos naturais e artificiais e com base em outras considerações, determinar a natureza do relâmpago que produziu a onda de corrente.

2.7 - Justificativas para o Estudo dos Relâmpagos Positivos

2.7.1 – Importância dos Relâmpagos Positivos

Os relâmpagos positivos foram considerados relativamente raros por pesquisadores e portando um evento sem maior importância. Mais recentemente estes relâmpagos atraíram considerável atenção pelas seguintes razões (Rakov, 1998).

- 1) As mais altas correntes registradas (acima de 300kA) e as maiores cargas efetivamente transferidas para o solo (acima de centenas de

coulombs) estão associadas aos relâmpagos positivos (Goto e Narita, 1992). Como resultado, relâmpagos positivos causam os mais severos estragos em vários objetos e sistemas se comparados com os relâmpagos negativos.

- 2) Relâmpagos positivos podem ser o tipo dominante de relâmpagos NS durante as estações frias, durante estágio dissipativo de alguma nuvem de tempestade em outras situações discutidas a seguir.
- 3) Relâmpagos positivos foram identificados como a maior fonte de vários efeitos na média e alta atmosfera, tais como os sprites.
- 4) A identificação de relâmpagos positivos por sistema de localização por sensoriamento eletromagnético (SLR – Sistema de localização de relâmpagos) tem importantes aplicações para vários estudos meteorológicos e outros que dependem do sistema de localização de relâmpagos.

2.7.2 - Situações mais Favoráveis para Ocorrer Relâmpagos Positivos

Apesar da percentagem de relâmpagos positivos ser um pouco baixa, há cinco situações que se acredita sejam propícias para favorecer a ocorrência destes.

- 1) Estágio dissipativo de nuvem de tempestade.
- 2) Tempestades de inverno
- 3) Nuvens baixas tais como as regiões estratiformes arrastadas pelos sistemas convectivos de meso escala (MCSs).
- 4) Tempestades severas.
- 5) Tempestades formadas a partir de incêndios em florestas.

As situações “1” e “2” foram identificadas usando a combinação de observações óticas e de campo elétrico e adicionalmente, usando o sistema de

localização de relâmpagos SLRs, enquanto as situações “3” , “4” e “5” foram estimadas apenas pelos registros de dados de estações pertencentes ao sistema de localização de relâmpagos – SLRs (Rakov,1998).

2.7.3 – Características dos Relâmpagos Positivos.

A diferença entre a corrente de pico média para relâmpagos positivos e negativos na primeira descarga de retorno, é um pouco baixa (35kA contra 30kA) em dados divulgados por Berger (1975). Entretanto, 5% da corrente de pico de relâmpagos positivos chega a 250kA, três vezes maior do que os 80kA obtidos nos 5% dos relâmpagos negativos observados por Berger (Berger, 1975).

As formas de onda observadas por Berger (1975) para relâmpagos positivos podem ser classificadas em quatro categorias:

- a) Forma de onda similar aos relâmpagos negativos descendentes em se tratando de escala de tempo, apenas considerando a inversão de polaridade (tempo de duração da ordem de milionésimos de segundo) (Rakov, 1998).
- b) Forma de onda de corrente de longa duração sem pulsos com valor médio de até 600A, não ultrapassando 2000A.
- c) Forma de onda com corrente de longa duração e superposição de pulsos próximos de 10kA.
- d) Forma de onda com um tempo de permanência da ordem de milésimos de segundo e corrente impulsiva com amplitude na ordem de dezenas e kA. (Rakov,1998).

Não seria possível classificar estes relâmpagos como ascendentes, apesar do longo tempo de permanência no canal, porque estes possuem uma corrente cuja forma de onda não se comporta como as formas de ondas analisadas nos relâmpagos ascendentes. Outro fator importante na análise é que ainda não

foram registrados relâmpagos ascendentes positivos com correntes de longa duração e superposição de descargas antes ou depois.

O tempo de permanência de corrente fluindo no canal pode em nossa avaliação, ser consequência de uma intersecção do líder positivo descendente que sai da nuvem ao líder ascendente que transporta cargas negativas desde a torre. Neste mecanismo que sugerimos, o líder positivo descendente sai de uma região mais alta da nuvem na fase de maior atividade da tempestade. Este líder descendente que pode ser consequência de :

- uma ramificação de uma descarga intranuvem (Berger, 1975)
- um outro relâmpago que por razões não inerentes ao surgimento do líder ascendente, desenvolve-se até que encontra o líder ascendente formando um único relâmpago.

A este tipo de relâmpago, chamamos preliminarmente de relâmpago positivo especial de junção (REJ) porque sua existência pode depender de mais de um relâmpago.

Os relâmpagos positivos com corrente de amplitude elevada (acima de 10kA) que apresentam uma escala de tempo que seja da ordem de dezenas de milésimos de segundo podem ser classificados como positivos de junção.

2.7.4 - Critérios que Identificam os Relâmpagos Positivos e Negativos

Relacionamos a seguir uma série de propriedades e características de relâmpagos positivos em relação aos relâmpagos negativos (Rakov, 1998).

- 1) Multiplicidade de descargas de retorno: os relâmpagos positivos possuem usualmente uma descarga de retorno, enquanto que 80% dos relâmpagos negativos possuem duas ou mais descargas de retorno.

- 2) Corrente de longa duração: a descarga de retorno do relâmpago positivo tende a ser seguida por corrente de longa duração que permanece no canal até centenas de milésimos de segundos.
- 3) Descarga intranuvem: medidas de campo elétrico registram que relâmpagos positivos são às vezes precedidos por descargas dentro da nuvem, que na média duram mais de 100 milésimos de segundo.
- 4) Canal horizontal: alguns pesquisadores notaram que relâmpagos positivos às vezes envolvem um longo canal horizontal com até dezenas de quilômetros de extensão.
- 5) Velocidade de propagação do líder: enquanto os líderes negativos descendentes ou ascendentes são escalonados, os líderes descendentes positivos não apresentam pausas definidas.
- 6) Luminosidade do canal: Os relâmpagos positivos apresentam uma luminosidade mais fraca do que os relâmpagos negativos.

2.8 - Características dos Relâmpagos em Torres.

Uma das formas de se determinar as características dos relâmpagos é examinar o comportamento do campo elétrico. Em uma descarga para o solo, ao analisarmos a forma de onda do campo elétrico em uma escala de milionésimo de segundo, observamos a estrutura do primeiro pulso e em seguida uma seqüência de 3 a 5 pulsos separados e espaçados por dezenas de milésimos de segundos. O pulso inicial é chamado de pulso preliminar e é o que provoca a ruptura da rigidez dielétrica do ar e os pulsos seguintes, são chamados de descarga de retorno. O tempo em que ocorre a seqüência inicial dos pulsos é da ordem de um milésimo de segundo. Analisando portando o comportamento do campo elétrico, é possível determinar a magnitude do pulso inicial e dos pulsos subseqüentes, bem como a polaridade do relâmpago, a forma de onda e as faixas de tempo que cada etapa se manifesta. Como uma descarga é sempre imprevisível, mesmo durante uma tempestade, este procedimento nem sempre está diretamente assegurado, tendo

em vista que a instrumentação tem que estar sempre a postos para efetuar os registros da variação do campo elétrico. Já em torres instrumentadas, a estratégia é a medição direta da corrente de descarga de retorno, quando esta é tocada por uma descarga e é analisando a forma de onda destas correntes que podemos compreender as características dos relâmpagos em estruturas elevadas.

2.8.1 - Interação entre Líderes Descendentes e Descarga Conectante.

Quando o líder se movimenta da nuvem com destino ao solo, o percurso entre a nuvem e o solo é feito em etapas ou pausas. Em geral a velocidade com que o líder escalonado se movimenta, é da ordem de 10^5 m/s quando negativo e de 10^6 m/s quando positivo. Quando o líder se aproxima do solo, em relâmpagos naturais, vários líderes ascendentes despontam do solo ou de pontos salientes, como resultado da elevação campo elétrico na ponta do líder. No caso de torres, estrutura da torre emite um líder ascendente em decorrência do aumento campo elétrico na ponta do líder descendente.

A parte crítica desta interação acontece no final do canal e próximo ao topo da torre, onde se dá a junção entre os líderes. O fator dominante na interação do líder com a torre é o potencial do líder em relação ao do solo, que define o comprimento do passo do líder. Este comportamento é confirmado quando se produz líder escalonado em testes de laboratório (Mazur e Ruhnke, 1999).

2.8.2 - Escala de Tempo como Definição do Tipo de Relâmpagos

2.8.2.1 – Relâmpagos Ascendentes

Nos relâmpagos ascendentes, após o líder com cargas positivas percorrer a distância entre o solo e a nuvem, uma corrente de longa duração circula pelo canal e nestes casos, não há registro de uma primeira descarga de retorno.

Relâmpagos ascendentes, podem portanto ser identificados a partir da escala de tempo que os medidores registram as correntes. É possível que o maior tempo de permanência no canal e conseqüentemente do maior tempo de duração deste

relâmpago, se deve à sua característica de estar sempre seguido por uma corrente de longa duração.

A descarga conectante (DC) neste tipo de relâmpago, é produzida pelo líder descendente que neste caso emerge de um centro de cargas da nuvem.

Podemos aceitar portanto que os relâmpagos que apresentam uma forma de onda cuja escala de tempo seja da ordem de dezenas de milésimos de segundo correspondem a relâmpagos ascendentes.

2.8.2.2 – Relâmpagos Descendentes

Apenas como contraponto, independentemente de estruturas aterradas, torres ou edificações, os relâmpagos positivos mesmo que raros, são frequentemente iniciados por um líder positivo descendente (LE) que pode ser uma ramificação de descargas intranuvem. Estes líderes também podem surgir na região de cargas positivas localizadas abaixo do local onde antes havia o centro de cargas negativas, fato este que pode se justificar na argumentação de que estes relâmpagos acontecem durante o estágio dissipativo da nuvem.

Portanto, se a forma de onda tiver uma escala de tempo da ordem de dezenas milionésimos de segundo, o evento corresponde a um relâmpago descendente.

2.8.3 - Outras Características que Diferem os Relâmpagos Negativos e Positivos, Descendentes e Ascendentes:

- Frente de onda da descarga de retorno: as descargas de retorno de relâmpagos negativos são identificadas por corrente cuja frente de onda é mais íngreme do que dos relâmpagos positivos.
- Multiplicidade de descargas de retorno: Em termos estatísticos, os relâmpagos negativos possuem múltiplas descargas de retorno, enquanto que os relâmpagos positivos possuem apenas uma descarga de retorno.

- Amplitude da corrente de pico : A média das correntes de pico dos relâmpagos positivos é maior do que a dos negativos. Orville e Huffines (1995) avaliando resultados obtidos no sistema da rede de identificação de relâmpagos nos Estados Unidos verificaram que a variação da corrente de pico média apresentou diferenças nos relâmpagos positivos e negativos, sendo 24kA para os positivos e 20 kA para os negativos. Berger e Anderson (1975), encontraram que nas torres de San Salvatore, a média era de 35kA para os positivos e 30 kA para os negativos.
- Frente de onda da descarga de retorno : mesmo raras em relâmpagos positivos, as descargas subseqüentes possuem uma frente de onda mais íngreme do que a descarga de retorno.

2.9 - Formas de Ondas de Correntes em Torres

Pelo que foi exposto previamente, podemos então classificar os relâmpagos a partir de suas formas de ondas, observando as suas características:

- a) Descarga conectante com a junção dos líderes ascendente e descendente : é o momento inicial da curva de corrente da descarga de retorno que se dá nos primeiros momentos do registro da forma de onda, a corrente está na faixa de 1kA.
- b) Formação do canal principal : a união dos líderes forma o canal principal com a intensificação da corrente de descarga de retorno, que neste momento encontra um meio condutor para fluir.
- c) Pico de corrente de descarga de retorno : É possível que haja um segundo pico de corrente, chamado de pico secundário, que poder ser o resultado da precipitação das cargas existentes nas ramificações para dentro do canal principal.
- d) Início da cauda: Após a corrente chegar ao pico máximo, ela inicia o decaimento dando origem a uma cauda, que dependerá das características

próprias da descarga para ser lento rápido. Este fato pode ser traduzido pela constante de tempo da onda, o que no entanto não é uma tarefa simples, pelas próprias características do canal e suas variáveis.

- e) Corrente corona: Já em seu decaimento, a corrente pode ser ligeiramente intensificada pela precipitação das cargas existentes nas paredes do envelope corona produzindo uma ligeira recuperação na amplitude da corrente.
- d) Fase final: O processo do relâmpago como um todo caminha para o final com a corrente da descarga de retorno chegando a zero. Para os relâmpagos descendentes este fato se dá a algumas dezenas de milionésimos de segundo do início, estimada em média em $500\mu\text{s}$ e para os relâmpagos ascendentes na faixa de dezenas de milésimos de segundo, em torno de $1,25\text{ms}$.

Os aspectos que ressaltamos acima podem ser identificados na Fig. 2.14 a seguir, onde a título de exemplo nós identificamos as diversas características que podem ser observadas nas curvas das correntes de descarga de retorno dos relâmpagos. Aproveitamos para isto uma curva de um relâmpago negativo descendente.

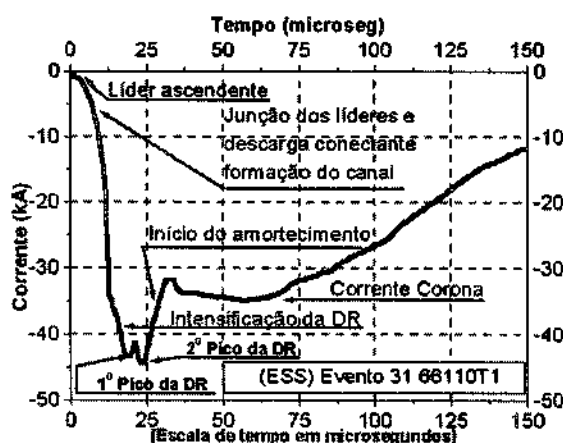


Fig. 2.14 – Curva de relâmpago negativo descendente com as características assinaladas.

2.9.1 – Relâmpagos Negativos Descendentes

2.9.1.1 – Descargas de Retorno.

As Figuras 2.15 e 2.16 mostram os trechos mais característicos da onda de corrente da descarga de retorno (DR) dos relâmpagos negativos descendentes. Os principais pontos são assinalados e mostram o início da descarga conectante (A), o ponto em que há a intensificação da corrente com a precipitação das cargas alojadas nas ramificações para o canal (B) e o pico máximo (C).

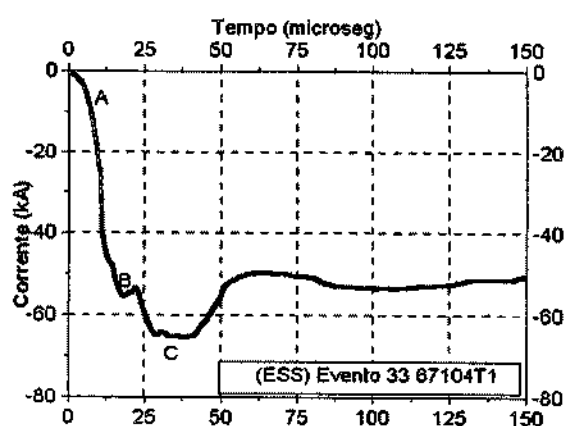


Fig. 2.15 – Relâmpago negativo descendente com uma descarga de retorno na ESS.

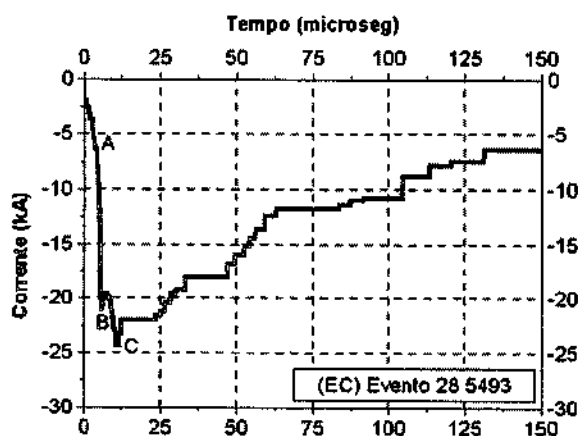


Fig. 2.16 – Relâmpago negativo descendente com uma descarga de retorno na EC

2.9.1. 2 - Descargas Subseqüentes.

Havendo disponibilidade de cargas na nuvem, os processos internos J e K produzem um novo líder, chamado de líder contínuo que percorre o canal até o solo para em seguida um pulso de corrente chamado de descarga subseqüente fluir pelo canal que ainda está ionizado e condutor. Como consequência deste fato a frente de onda deste tipo de descarga não se comporta como a DR. Sua rampa de subida é mais íngreme em uma escala de tempo de milionésimos de segundo e apresenta valores de pico inferiores à primeira descarga, estatisticamente falando. Na Figura 2.17 voltamos a mostrar a descarga de retorno (DR) característica de um relâmpago negativo descendente que possui descargas subseqüentes (DS) e nas Figuras 2.18 a 2.21 as suas descargas subseqüentes em um total de quatro.

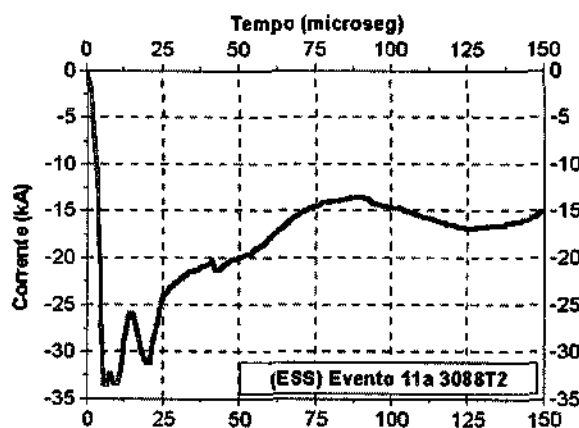


Fig. 2.17 – Relâmpago negativo descendente na ESS – Descarga de retorno

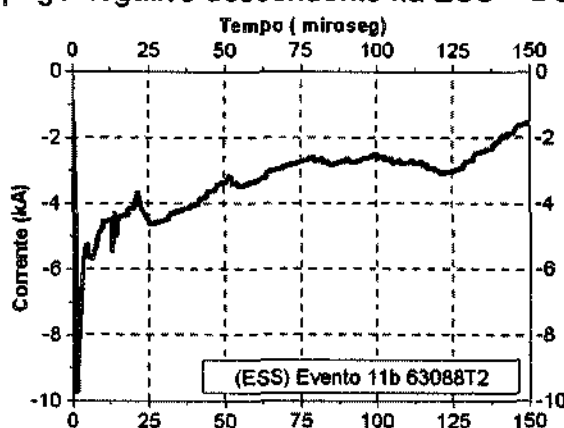


Fig. 2.18 – Relâmpago negativo descendente na ESS - 1ª descarga subseqüente

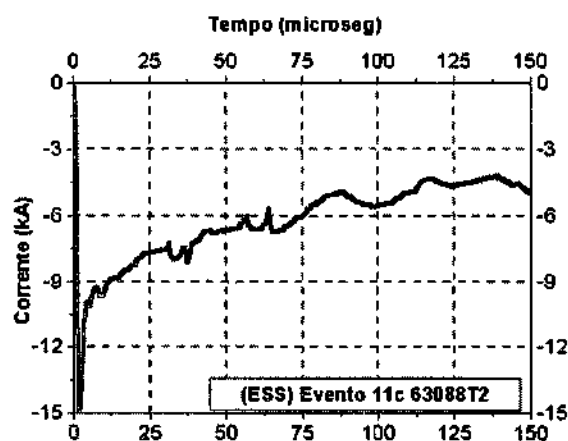


Fig. 2.19 – Relâmpago negativo descendente na ESS - 2ª descarga subsequente

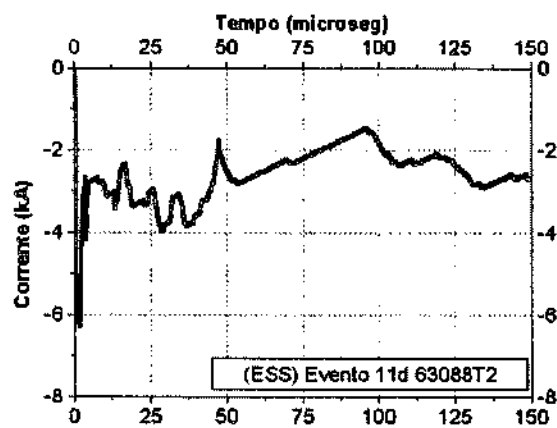


Fig. 2.20 – Relâmpago negativo descendente na ESS - 3ª descarga subsequente

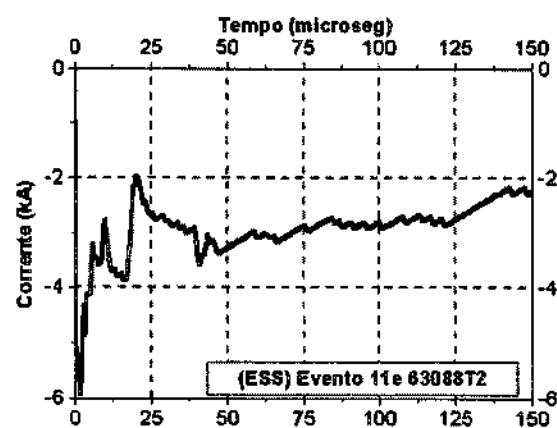


Fig. 2.21 – Relâmpago negativo descendente - 4ª descarga subsequente

2.9.2 - Relâmpago Negativo Ascendente.

2.9.2.1 – Relâmpago Negativo Ascendente com Corrente de Longa Duração (CLD) com e sem Pulsos.

A descarga inicial deste relâmpago pode ser:

- com corrente de longa duração sem pulsos e neste caso a amplitude não ultrapassa 2kA como na Figura 2.22
 - com corrente de longa duração com pulsos que podem variar de 2 a 10 kA.
- Figura 2.23

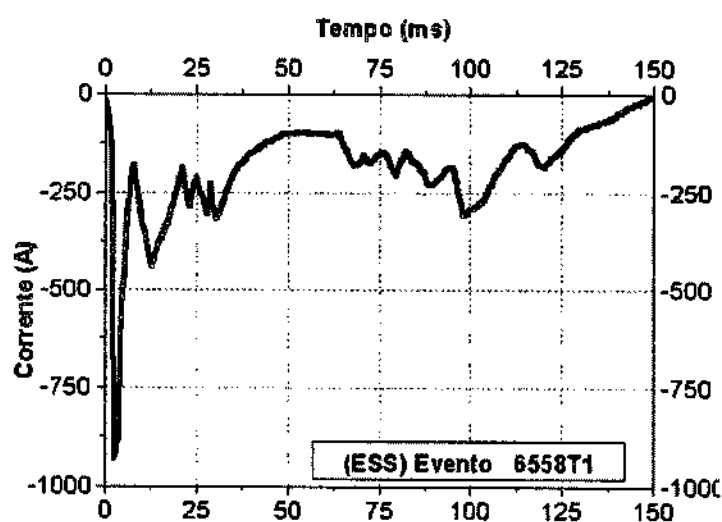


Fig. 2.22 – Relâmpago negativo ascendente CLD sem pulsos

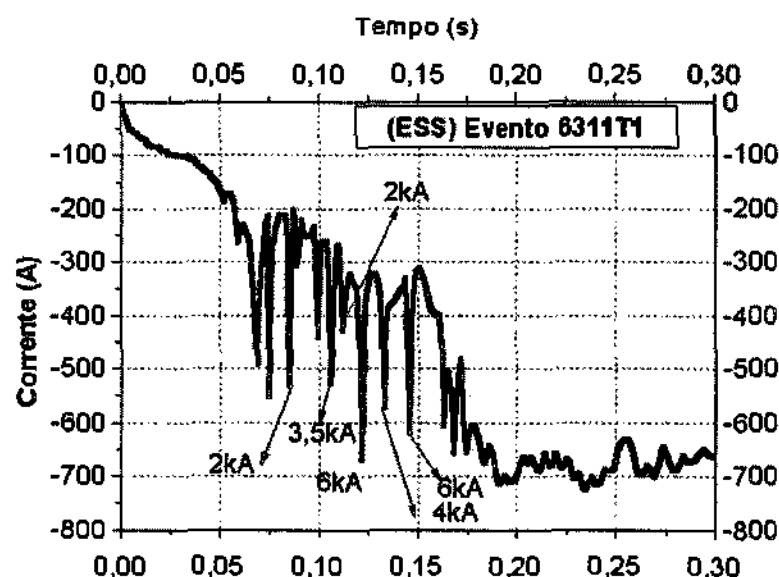


Fig. 2.23 – Relâmpago negativo ascendente CLD e pulsos de até 10kA

2.9.2.2 - Relâmpago Negativo Ascendente com Descarga Acima de 10kA.

A característica destes relâmpagos é de não possuir a primeira descarga de retorno, se assemelhando portanto, com a forma de onda das descargas subseqüentes dos relâmpagos descendentes os quais apresentam em sua descarga subseqüente, uma onda de frente íngreme, como nas Figuras 2.25 e 2.26 a seguir. A corrente de longa duração está presente neste evento, antes durante ou depois a descarga.

Nós adotamos o seguinte critério para identificar um relâmpago com descarga de retorno ascendente (Figura 2.24);

- Consideramos o tempo de subida da frente de onda da descarga o qual deve ser menor que 10 milionésimos de segundo, com valor médio em torno de 5 a 7,5 μ s. Este intervalo representa a diferença entre os tempos t_2 e t_1 na Figura 2.24 a seguir.
- O ponto que a reta que superpõe o trecho de subida da onda entre 30% e 90% do valor de pico da corrente, corta o eixo horizontal do tempo, é

chamado de t_1 . O tempo que a onda leva para atingir o valor de pico t_2 corresponde ao tempo de pico da corrente. Descontado do tempo de pico (t_2) o tempo correspondente ao zero virtual (t_1) temos então o tempo de subida ($t_2 - t_1$).

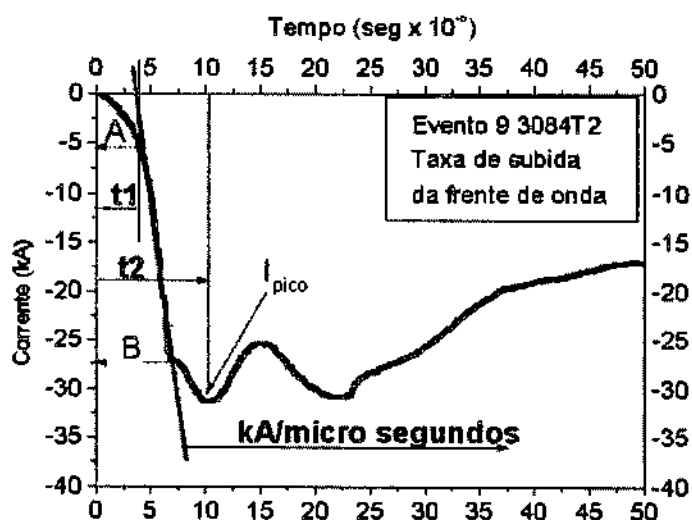


Fig. 2.24 – Critério para determinar um relâmpago negativo ascendente com descarga.

Na Figura 2.24, 30% do valor de pico da corrente corresponde à inflexão da curva de subida, ou ao início da descarga conectante e o ponto 90% do valor da corrente de pico corresponde ao ponto em que a corrente caminha para seu valor máximo produzindo uma inflexão.

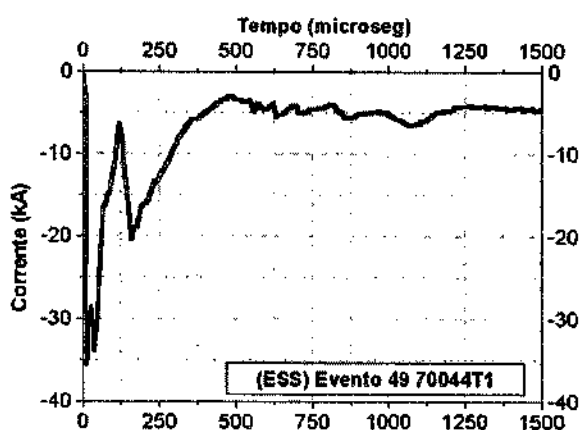


Fig. 2.25 – Relâmpago negativo ascendente CLD e descarga acima de 10kA

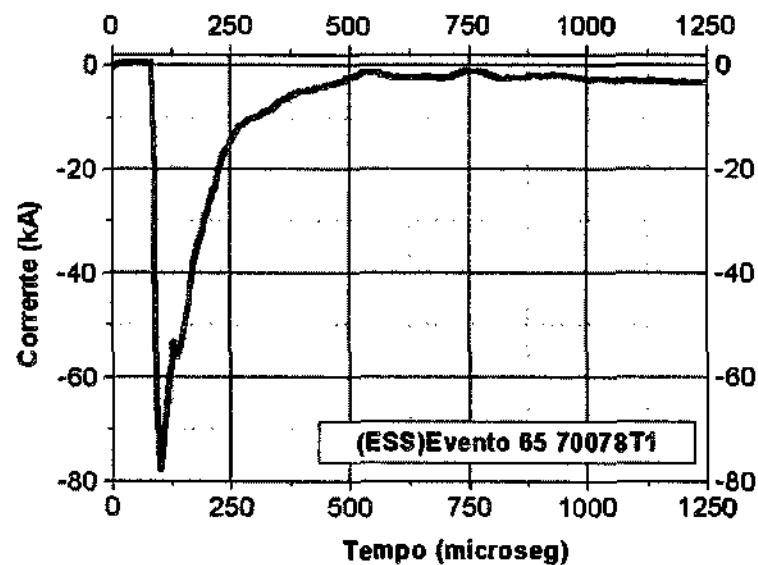


Fig. 2.26 – Relâmpago negativo ascendente CLD e descarga acima de 10kA.

2.9.3 - Relâmpagos Positivos

2.9.3.1 – Relâmpagos Positivos Descendentes

Os relâmpagos positivos descendentes, a não ser pela polaridade da carga que é neutralizada na nuvem e conseqüentemente a polaridade de sua corrente, se assemelham em muito aos negativos descendentes. Pelo seu caráter raro, este tipo de relâmpago deixa uma lacuna considerável na amostragem para seu estudo, notadamente considerando os dados reunidos nesta dissertação. Berger (1977) em quinze anos de pesquisa só registrou um evento comprovadamente positivo descendente.

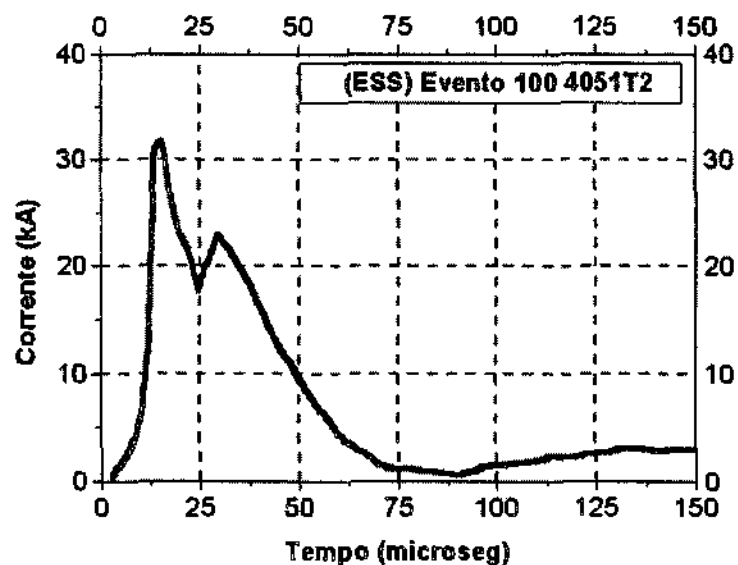


Fig. 2.27 – Relâmpago positivo descendente.

2.9.3.2 – Relâmpagos Positivos Ascendentes

Neste caso, não são conhecidos registros de relâmpagos positivos ascendentes com descarga de retorno. Os registros mostram a ocorrência de relâmpagos positivos ascendentes com corrente de longa duração sem pulsos com valor médio de 600A como na Fig. 2.29 ou com a superposição de pulsos de 2kA até 10kA aproximadamente, como é o caso do exemplo na Fig. 2.30 a seguir.

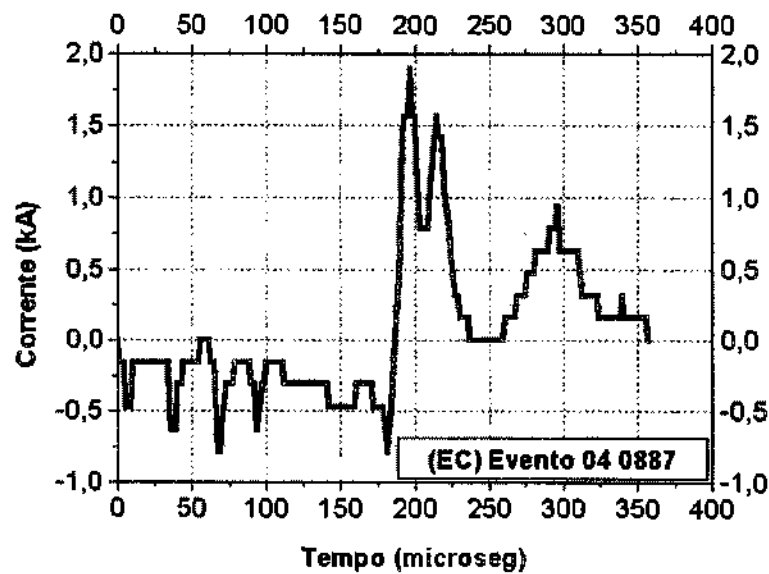


Fig. 2.28 – Relâmpago positivo ascendente com corrente de longa duração sem pulso.

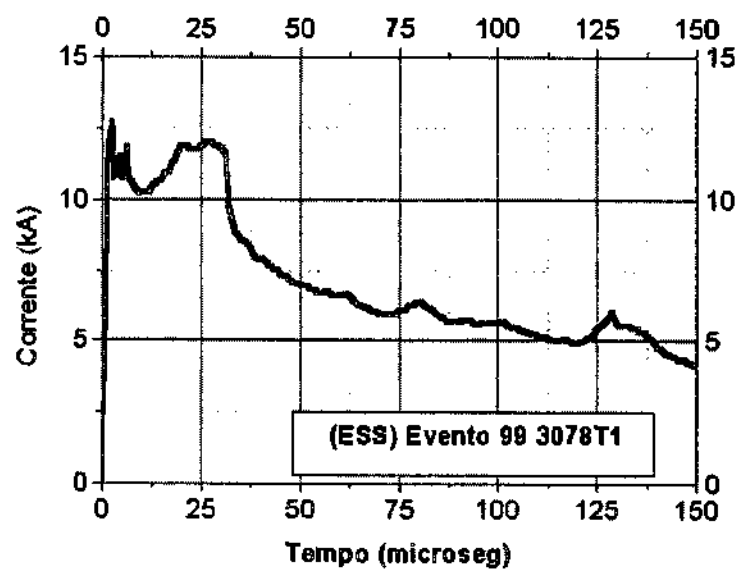


Fig. 2.29 – Relâmpago positivo ascendente com corrente de longa duração e pulso.

2.9.4 - Relâmpagos Positivos Especiais de Junção

Berger (1975), identificou documentando com fotos e com oscilogramas, um tipo de relâmpago positivo cujo líder ascendente é seguido após 4 a 25 ms por uma corrente impulsiva de uma descarga descendente, classificando o evento como relâmpago ascendente com corrente impulsiva - tipo 4b (item 2.1). Esta corrente impulsiva que Berger achou parecer uma descarga de retorno, foi um registro freqüente entre 1959 e 1973 (Fase III das pesquisas) com algo em torno de 48 relâmpagos, isto é, 3,2 relâmpagos por ano (Fig.s 2.30 e 2.31). Na estação do Cachimbo, pelo menos um caso semelhante foi registrado entre 1985 e 1994 (Figura 2.32). No Japão foram obtidos registros de corrente com amplitude da ordem de 300kA em relâmpagos positivos com tempo de duração da ordem de 1ms (Figura 2.33).

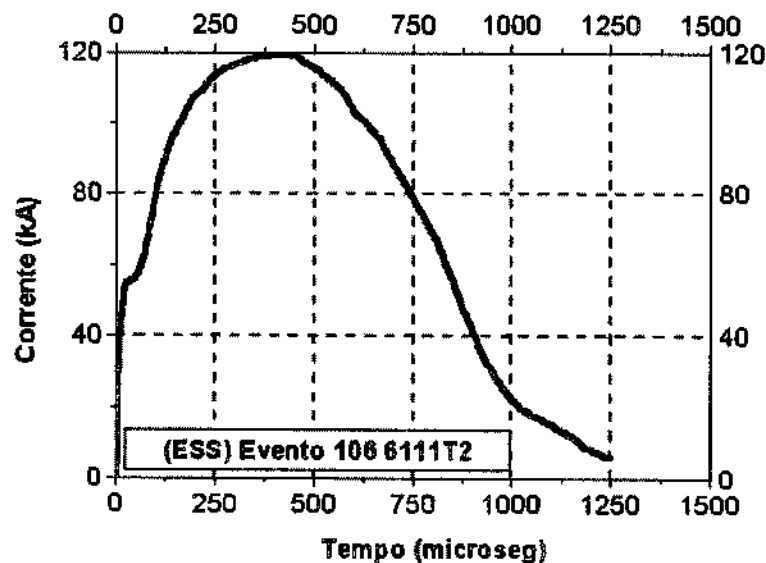


Fig. 2.30 – Relâmpago positivo de junção.

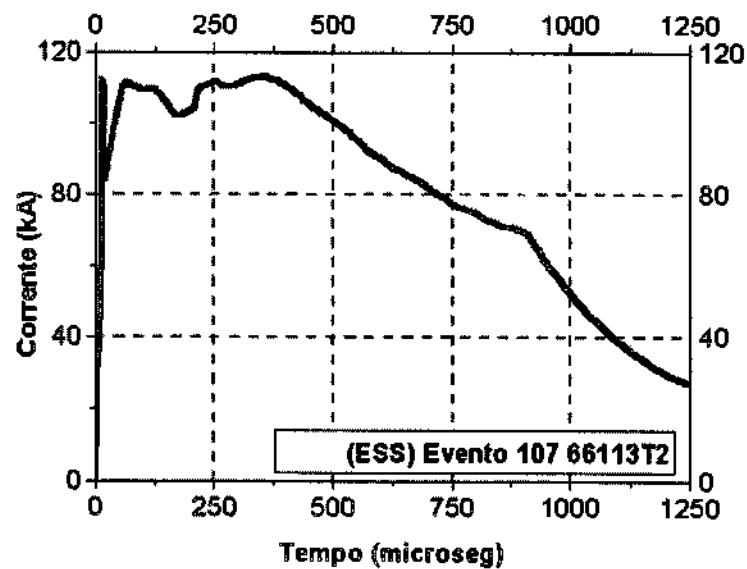


Fig. 2.31 – Relâmpago positivo de junção.

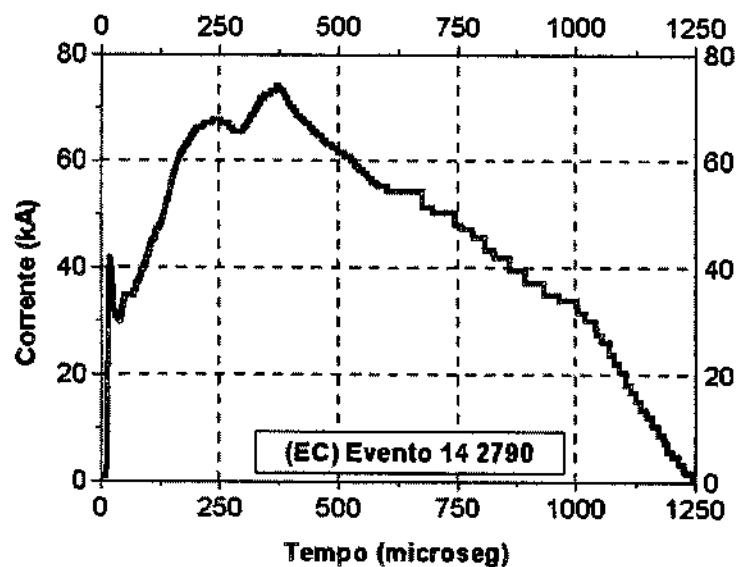


Fig. 2.32 – Relâmpago positivo de junção.

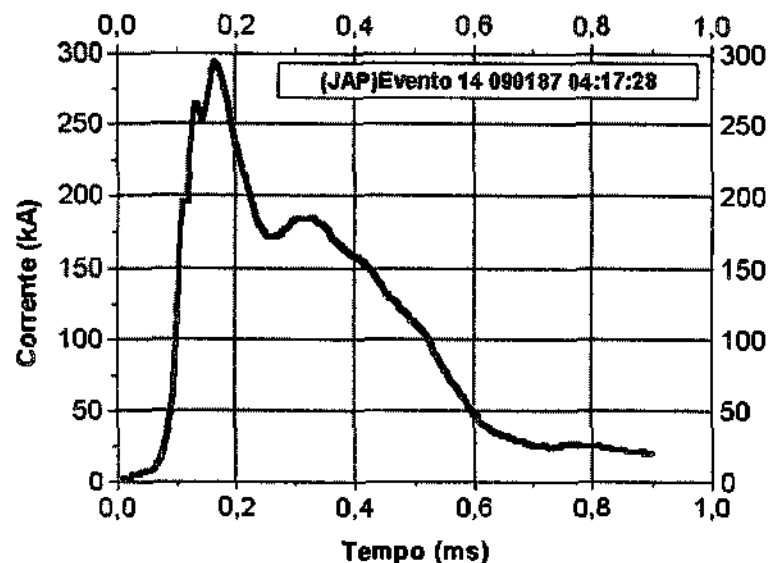


Fig. 2.33 – Relâmpago positivo de junção.

Sugerimos um mecanismo para este relâmpago chamando-o de RELÂMPAGO DE JUNÇÃO descrevendo três acontecimentos concorrentes, ou seja:

1 – Fase inicial é identificada pelo surgimento de um líder ascendente negativo que da torre parte com destino ao centro de cargas positivas da nuvem. Este líder tem uma trajetória com destino certo, mas de certa forma irregular, pois em algum ponto de sua subida, ele é interceptado por um líder positivo escalonado descendente que pode ter surgido não pelo acentuado campo elétrico que produziu o líder ascendente, mas por condições da variação e intensificação do campo elétrico próximo a algum centro de carga na nuvem.

2 – Fase de junção que compreende o encontro dos dois líderes que virá a formar a descarga, provocando o registro nos medidores de uma corrente com amplitude elevada. Explicar como este encontro se dá e comprovar a ação desta junção, passa pela avaliação da velocidade destes líderes e do potencial em cada um, e da corrente de descarga, que é o resultado desta junção. O que pode trazer mais detalhes que mostrem a junção são as condições anteriores à descarga. O líder descendente é portador de cargas positivas e surgiu do centro de cargas positivas da nuvem e produziria um relâmpago positivo descendente se não fosse

interceptado pelo líder negativo ascendente. Portanto como um líder positivo escalonado e sua velocidade média é 10^6 m/s enquanto a velocidade média do líder escalonado ascendente é da ordem de $2,5 \times 10^5$ m/s, identificado por McEachron (Berger, 1975).

3 – Fase final compreende a corrente impulsiva que percorre o canal formado pela junção dos líderes. Utilizando 26 relâmpagos positivos que foram registrados na terceira fase de sua pesquisa, Berger (1975) analisou o tempo de duração do líder em função da amplitude da corrente de impulso subsequente, sendo considerada a altura da nuvem de onde se deu a descarga para concluir que estes relâmpagos se concentram a uma altura de 2 a 3 km.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 - Curvas Médias de Relâmpagos da Estação de San Salvatore

Como um dos resultados de suas pesquisas, Berger e Anderson (1975) apresentaram as curvas médias de relâmpagos negativos descendentes tanto para as descargas de retorno quanto para as descargas subseqüentes. Apresentou também curvas típicas para os relâmpagos positivos que neste trabalho consideramos como relâmpagos especiais de junção (item 2.7.4).

Realizamos um levantamento dos relâmpagos registrados por Berger (1975) no período que vai de 1963 a 1974, terceira fase das suas pesquisas, e elaboramos a Tabela 3.1 a seguir. Nos interessou este período, já que os relâmpagos que possuímos registrados em forma de curvas, correspondem a esta fase de pesquisa.

As Figuras 3.1 a 3.4 mostram estas curvas médias obtidas por Berger e Anderson (1975), que acreditamos sejam referentes aos eventos que compõem a Tabela 3.1 embora não exista confirmação da origem das curvas que geraram as curvas médias, apenas as quantidades de curvas escolhidas. Este resultado torna por isto mesmo, no nosso entendimento, os resultados mais gerais e portanto bastante adequados para nossas comparações.

Para construir o gráfico da Figura 3.1, Berger e Anderson (1975) consideraram as curvas, sem fazer distinção de torres. Na faixa de tempo até 160 μ s, 88 curvas contribuíram para a média e após 160 μ s foram utilizadas apenas 10 de longa duração, o que explica a ondulação nesta parte da curva. Outra ondulação ocorreu

**TABELA 3.1- RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
NA ESTAÇÃO DE SAN SALVATORE DE 1963 A 1974.**

DESCRIÇÃO	ESS	Percentual
Quantidade Total de relâmpagos	967	100%
Relâmpagos negativos Ascendentes (RNA)	732	75,7%
Relâmpagos Negativos Descendentes (RND)	106	11%
Relâmpagos Positivos Descendentes (RPD)	1	≤0,1%
Relâmpagos Positivos Ascendentes (RPA)	102	10,5%
Relâmpagos Positivos Especiais de Junção (REJ)	26	2,7%

Fonte: Berger (1975).

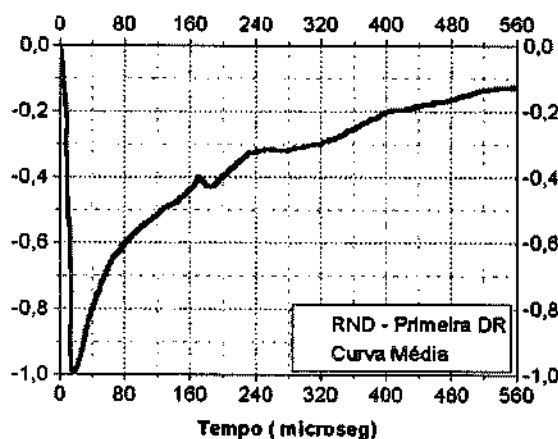


Fig. 3.1 – Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente da primeira descarga de retomo – Curva média (escala de 0 a 560 μ s).

na região em torno de 200 μ s, devido à imprecisão inerente às medições originais, o que contribuiu para os erros residuais nesta parte da curva.

Esta ondulação não aparece na curva da Figura 3.2, pois nesta escala de tempo a quantidade de curvas analisadas foi restrita a apenas 88 curvas.

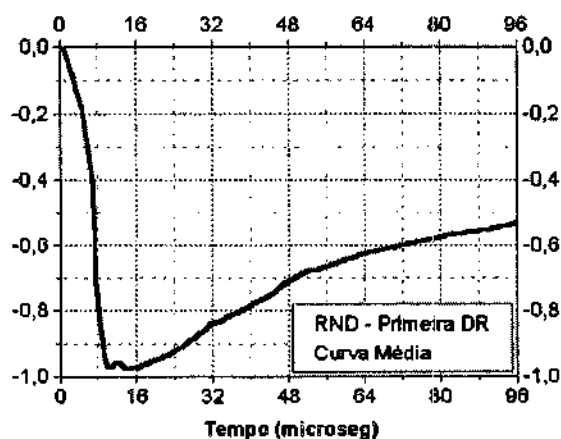


Fig. 3.2 - Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente da primeira descarga de retorno – Curva média (escala de 0 a 96 μ s).

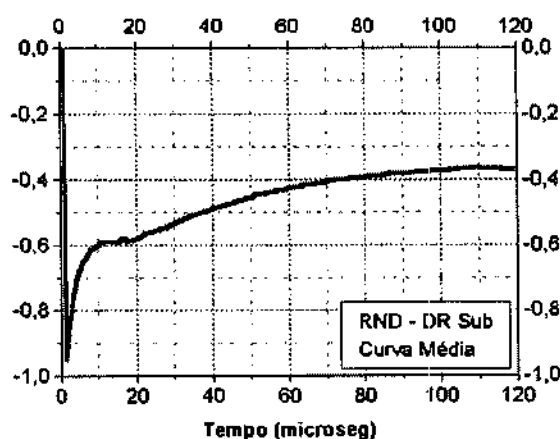


Fig. 3.3 - Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente das descargas subsequentes – Curva média (escala de 0 a 120 μ s).

Berger e Anderson (1975) também construíram uma média para 76 descargas subsequentes em duas escalas de tempo. Também neste caso não há informação quanto a ordem das descargas subsequentes escolhidas. Estas curvas têm uma característica diferente se comparadas com aquelas da primeira descarga de retorno, por possuírem uma frente de onda mais íngreme. Após 5 milionésimos de segundos, a onda já em processo de queda inicia decaimento mais lento dando origem a uma cauda. (Figuras 3.3 e 3.4)

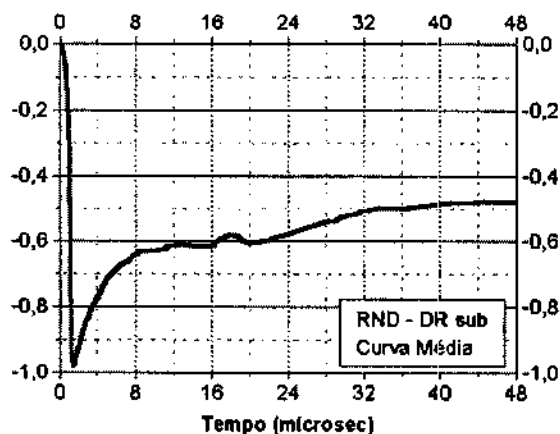


Fig. 3.4 - Relâmpago negativo descendente – Onda de corrente das descargas de retorno subseqüentes – Curva média (escala de 0 a 48 μ s).

Na faixa de aproximadamente 20 milionésimos de segundos as curvas das descargas subseqüentes registradas com escala de tempo de 0 a 120 μ s (Figura 3.3) apresentam uma ligeira ondulação, pelos mesmos motivos descritos anteriormente, ou seja, problema de precisão nos registros. Já na curva com escala de tempo de 0 a 48 μ s (Figura 3.4), a precisão se deteriora na maioria dos registros originais após 16 milionésimos de segundos do início da curva, em função da baixa amplitude da corrente.

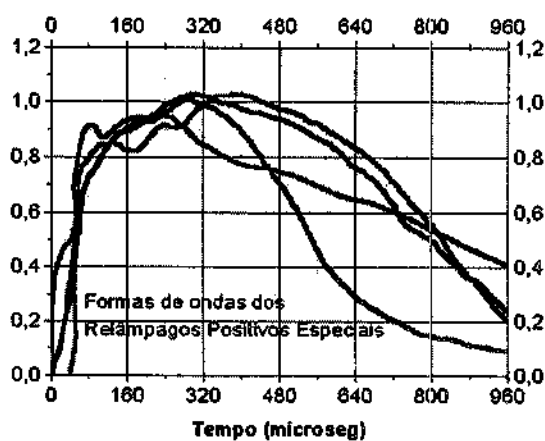


Fig. 3.5 – Relâmpagos positivos de junção com correntes impulsivas.

Embora os relâmpagos positivos sejam caracterizados pela grande quantidade de carga transferida e pela frente de onda ter uma taxa de crescimento mais lenta se comparados com os relâmpagos negativos, eles não têm nenhuma característica comum, tais como frente de onda e forma da cauda de onda, que possa produzir uma forma de onda média que seja aceitável. Berger selecionou quatro das mais típicas curvas, dentre aproximadamente 48 registros, para mostrar na Figura 3.5 acima.

3.2 - Curvas Médias das Torres T1 e T2 da Estação de San Salvatore Obtidas em Nossa Análise

Digitalizamos curvas de 118 relâmpagos registrados nas torres T1 e T2 da estação de San Salvatore, e as classificamos por tipo de relâmpagos e por torre. Na TABELA 3.2 apresentamos nossa classificação. Legenda da Tabela:

RNA Relâmpago negativo ascendente RPA Relâmpago positivo ascendente

RND Relâmpago neg. descendente RPD Relâmpago pos. descendente

REJ Relâmpago positivo especial de junção

TABELA 3.2 - RELÂMPAGOS NA ESTAÇÃO DE SAN SALVATORE 1963 E 1971.

TORRE T1 - TABELA 3.2 – I (CLASSE RNA)					
Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
1	21 64011T1	21	3	1964	2051310564011T1
2	37 67109T1	37	2	1967	2218260767109T1
3	40 67117T2	40	1	1967	0004050867117T2
4	49 70044T1	49	1	1970	0000000070044T1
5	61 770073T2	61	1	1970	0214130770073T2B
6	65 770078T1	65	1	1970	0222130770078T1
7	78 70102T1	78	3	1970	0746150870102T1
8	96 71166T1	96	1	1971	0247250871166T1
	TOTAL	8	13		
	T1	6	11		
	T2	2	2		

TORRE T1 - TABELA 3.2 – II (CLASSE RND) (Continuação)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
1	1 63046T1	1	1	1963	0745040663046T1
2	2 63071T1	2	1	1963	2031240663071T1
3	4 63073T1	4	4	1963	2037240663073T1
4	6 63077T1	6	1	1963	1722030563077T1
5	8 63082T1	8	6	1963	0531050763082T1
6	12 63089T1	12	1	1963	1735070863089T1
7	13 63090T1	13	3	1963	1735070863090T1
8	14 63091T1	14	4	1963	1735070863091T1
9	18 63097T1	18	1	1963	17477070863097T1
10	20 644011T1	20	1	1964	20513105644011T1
11	22 64044T1	22	1	1964	0000000064044T1
12	26 65048T1	26	1	1965	1718010765048T1
13	27 65067T1	27	1	1965	2055050965067T1
14	28 66044T1	28	1	1966	1657230566044T1
15	30 66069T1	30	1	1966	2321050766069T1
16	31 66110T1	31	1	1966	18122300866110T1
17	33 67104T1	33	1	1967	0652220767104T1
18	34 67105T1	34	7	1967	1524250767105T1
19	35 67106T1	35	1	1967	1515250767106T1
20	42 67164T1	42	3	1967	1916091067164T1
21	44 68049T1	44	1	1968	10031407
22	47 69027T1	47	3	1969	140310669027T1
23	48 70044T1	48	1	1970	000000070044T1
24	50 670045T1	50	1	1970	0646170670045T1

(Continua)

TORRE T1 - TABELA 3.2 – II (CLASSE RND) (Continuação)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
25	52 670052T1	52	1	1970	1932190670052T1
26	54 670055T1	54	5	1970	0759070670055T1
27	62 70074T1	62	1	1970	0215130770074T1
28	63 70075T1	63	8	1970	0220130770075T1
29	64 70077T1	64	1	1970	0221130770077T1
30	71 70085T1	71	1	1970	1809010870085T1
31	74 70095T1	74	3	1970	0458150870095T1
32	81 71002T1	81	1	1971	0024110571002T1
33	82 71002T1	82	1	1971	0024110571002T1
34	84 71055T1	84	7	1971	1436050671055T1
35	86 71116T1	86	1	1971	0023180771116T1
36	87 71118T1	87	2	1971	0024180771118T1
37	90 71141T1	90	1	1971	2125280771141T1
38	91 71141T1	91	1	1971	2125280071141T1
39	93 71148T1	93	12	1971	1441050871148T1
40	94 71161T1	94	1	1971	0556210871161T1
41	95 71165T1	95	1	1971	0246250871165T1
42	97 71171T1	97	1	1971	2044300871171T1
	TOTAL	42	94		

TORRE T2 - TABELA 3.2 – III (CLASSE RND)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
1	3 63072T2	3	1	1983	2034240663072T2
2	5 63076T2	5	1	1963	1524280663076T2
3	7 63081T2	7	3	1963	0436050763081T2
4	9 63084T2	9	1	1963	0317080763084T2
5	10 63087T2	10	7	1963	1624250763087T2
6	11 63088T2	11	5	1963	1631250763088T2
7	15 663092T2	15	1	1963	1738070863092T2
8	16 63094T2	16	2	1963	1738070863094T2
9	17 63094T2	17	1	1963	1738070863094T2
10	19 63108T2	19	1	1963	1307240963108T2
11	23 64045T2	23	1	1964	0000000064045T2
12	24 64046T2A	24	1	1964	0000140964046T2A
13	25 64046T2	25	1	1964	0000140964046T2
14	29 66045T2	29	5	1966	1902230566045T2
15	32 667092T2	32	1	1967	1423190667092T2
16	36 67107T2	36	1	1967	1525250767107T2
17	38 67110T2	38	1	1967	2219260767110T2
18	39 67115T2	39	1	1967	2237040867115T2
19	41 67125T2	41	1	1967	0333040967125T2
20	43 768048T2	43	2	1968	1002140768048T2
21	45 669025T2	45	1	1969	1355010669025T2
22	46 669026T2	46	1	1969	1401010669026T2
23	51 670050T2	51	1	1970	1442180670050T2
24	53 70054T2	53	1	1970	1958190670054T2

TORRE T2 - TABELA 3.2 – III (CLASSE RND) (Continuação)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
25	55 70062T2	55	1	1970	085470670062T2
26	56 70070T2	56	1	1970	0212130770070T2
27	57 70071T2A	57	4	1970	0000000070071T2A
28	58 70071T2B	58	3	1970	0212130770071T2B
29	59 70072T2	59	1	1970	0213130770072T2
30	60 70073T2A	60	1	1970	0214130770073T2A
31	61 70073T2B	61	2	1970	0124130770073T2B
32	66 70073T2	66	2	1970	2126240770073T2
33	67 70080T2	67	1	1970	2127240770080T2
34	68 70081T2	68	3	1970	1801010870081T2
35	69 70083T2	69	1	1970	1803110870083T2
36	70 70084T2	70	1	1970	1803010870084T2
37	72 70092T2	72	1	1970	0542030870092T2
38	73 70092T2	73	1	1970	0542030870092T2
39	75 70097T2	75	7	1970	0540150870097T2
40	76 70098T2	76	9	1970	0540150870098T2
41	77 70101T2	77	2	1970	0729150870101T2
42	79 70131T2	79	11	1970	1523110970131T2
43	80 70132T2	80	1	1970	1630110970132T2
44	83 71033T2	83	2	1971	1501280571033T2
45	85 71115T2	85	1	1971	1839170771115T2
46	88 71140T2	88	1	1971	2123280770040T2
47	89 71140T2B	89	1	1971	2123280771140T2
48	92 71142T2	92	3	1971	2128280771142T2
49	98 71176T2	98	1	1971	2036270971176T2
	TOTAL	49	100		

TORRES T1 E T2 - TABELA 3.2 – IV (CLASSE RPD)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
1	100 64051T2	100	1	1964	2251031064051T2

TORRES T1 E T2 - TABELA 3.2 – V (CLASSE RPA)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
1	99 63078T1	99	1	1963	0334050763078T1
2	108 67024T1	108	1	1967	1923010567024T1
3	109 67026T1	109	2	1967	1935010567026T1
4	110 67144T2	110	1	1967	0103021067144T2
5	111 68014T1	111	1	1968	2042270568014T1
6	114 69030T1	114	1	1969	1955150669030T1
7	116 71107T1	116	1	1971	0154130771107T1
8	123 6520T2	SR	1	1965	6520T2
	TOTAL	8	9		
	T1	6	7		
	T2	2	2		

TORRES T1 E T2 - TABELA 3.2 – VI (CLASSE REJ)

Item	EVENTO	Relâmpago	DR	Ano	Número/Referência
1	101 65072T2	101	1	1965	0210120965072T2
2	102 66074T1	102	1	1966	0853170766074T1
3	103 66075T1	103	1	1966	0904170766075T1
4	104 66077T1	104	1	1966	0908170766077T1
5	105 66100T1	105	1	1966	0714220866100T1
6	106 66111T2	106	1	1966	184500866111T2
7	107 66113T2	107	1	1966	1854300866113T2
8	112 68043T1	112	1	1968	0049210668043T1
9	113 68063T2	113	1	1968	1915080868063T2
10	115 69032T2	115	1	1969	05047190669032T2

TORRES T1 E T2 - TABELA 3.2 – VI (CLASSE REJ) (Continuação)

	TOTAL	10	10
	T1	5	5
	T2	5	5

A Tabela 3.3 a seguir é um resumo dos dados que compõem a Tabela 2. Separamos as informações por tipo de relâmpago considerando a nomenclatura atualmente aceita e incluímos o relâmpago positivo de junção que corresponde a uma nomenclatura proposta por nós.

TABELA 3.3 - RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ESTAÇÃO DE SAN SALVATORE DE 1963 A 1971.

DESCRIÇÃO	TORRE T1	TORRE T2	TOTAL (T1+T2)
Quantidade Total de relâmpagos	59 (50%)	59 (50%)	118 (100%)
Relâmpagos negativos Ascendentes (RNA)	6 (10,15%)	2 (3,45%)	8 (6,8%)
Relâmpagos Negativos Descendentes (RND)	42 (71,2%)	49 (83%)	91 (77%)
RND com uma DR	29 (69%)	32 (65%)	61 (67%)
RND com mais de uma DR	13 (31%)	17 (35%)	30 (33%)
Relâmpagos Positivos Descendentes (RPD)	- (≤0,1)	1 (1,6%)	1 (≤1%)
Relâmpagos Positivos Ascendentes (RPA)	6 (10,15%)	2 (3,45%)	8 (6,8%)
RPA com CLD com pulso ≤ 10kA	6	2	8
Relâmpagos Positivos Especiais de Junção (REJ)	5 (8,5%)	5 (8,5%)	10 (8,5%)
Descargas de retorno RNA	12	3	15
Descargas de retorno RND	94	100	194
Descarga de retorno RPD	0	1	1
Descarga de retorno RPA	7	2	9
Descarga de retorno REJ	5	5	10
Total de descargas de retorno	118	111	229
Média das DR's por RND	2,23	2,04	2,13

3.2.1 - Relâmpagos Negativos Descendentes

A partir da análise de 91 curvas de relâmpagos negativos descendentes da estação San Salvatore disponíveis para o nosso estudo (Tabela 3.2), elaboramos as curvas médias para a descarga de retorno e o mesmo para as descargas subseqüentes, mas considerando as primeiras descargas subseqüentes e as segundas separadamente por evento e por torre. As Figuras de 3.6 a 3.17 a seguir mostram estas curvas médias. As Figuras 3.18 a 3.23 mostram as curvas médias das torres T1 e T2 para efeito de comparação com as curvas médias obtidas por Berger e Anderson (1975) apresentadas nas Figuras 3.1 a 3.4.

3.2.1.1 - Formas de Onda de Corrente de Descarga de Retorno de Relâmpagos Negativos Descendentes – Curvas Médias.

a) Torre T1

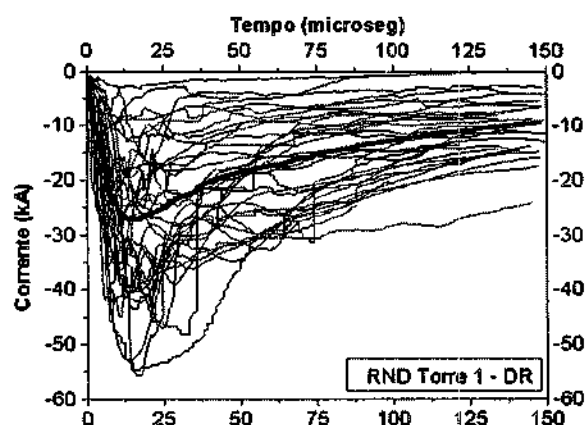


Fig. 3.6 – Relâmpagos negativos descendentes da Torre 1 – Curva Média das correntes de descarga de retorno.

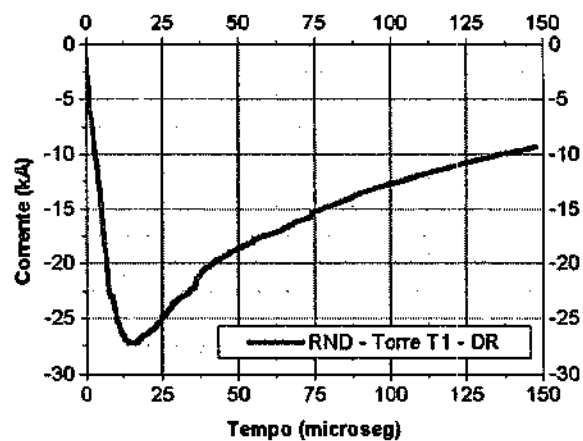


Fig. 3.7 –Curva média das descargas de retorno da Torre T1.

b) Torre T2

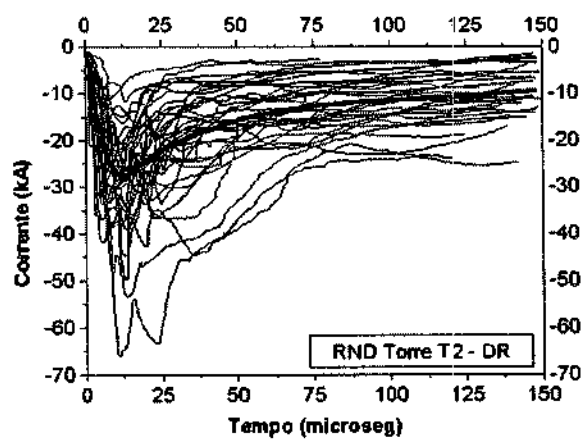


Fig. 3.8 –Relâmpagos negativos descendentes da Torre 2 – Curva Média das correntes de descarga de retorno.

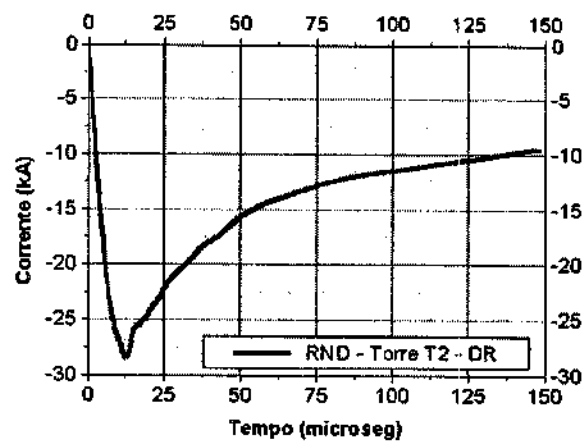


Fig. 3.9 – Curva média das descargas de retorno da Torre T2.

3.2.1.2 - Formas de Onda de Corrente da Primeira Descarga Subseqüente de Relâmpagos Negativos Descendentes - Curvas Médias

a) Torre T1

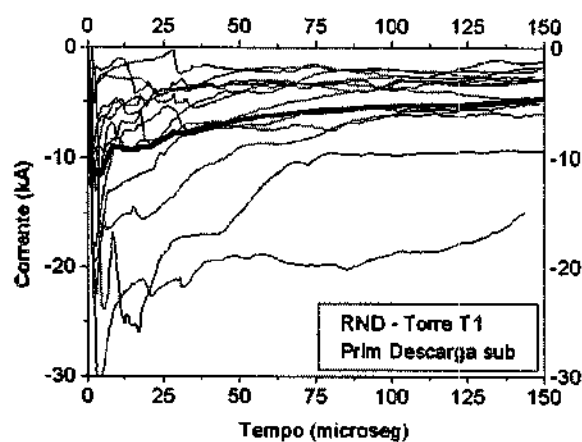


Fig. 3.10 – Relâmpagos negativos descendentes da Torre T1 – Curva Média de corrente das primeiras descargas subseqüentes.

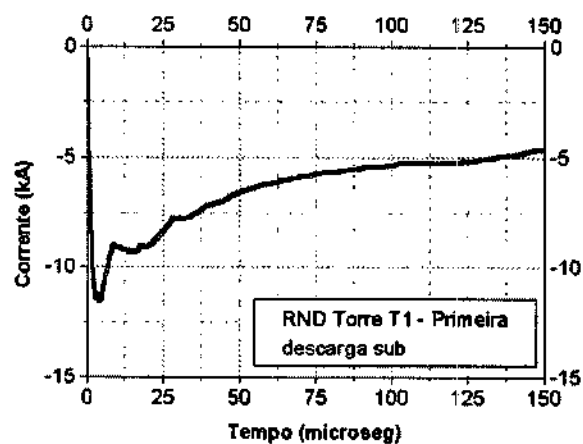


Fig. 3.11 – Curva média das correntes das primeiras descargas subseqüentes Torre T1.

b) Torre T2.

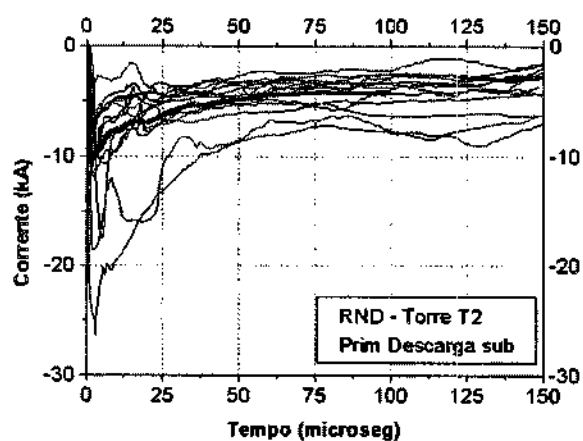


Fig. 3.12 – Relâmpagos negativos descendentes da Torre T2 – Curva Média da corrente das primeiras descargas subseqüentes.

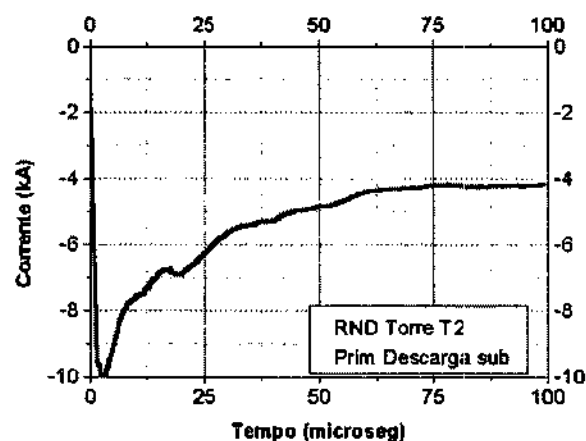


Fig. 3.13 – Curva média das correntes das primeiras descargas subseqüentes Torre T2

3.2.1.3 - Formas de Onda de Corrente da Segunda Descarga Subseqüente de Relâmpagos Negativos Descendentes - Curvas Médias

a) Torre T1

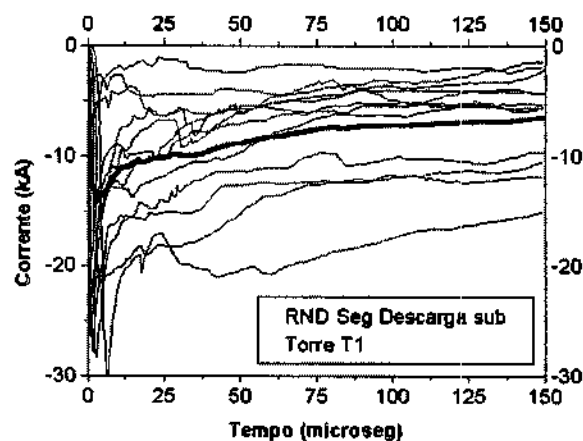


Fig. 3.14 – Relâmpagos negativos descendentes da Torre T1 – Curva Média da corrente das segundas descargas subseqüentes.

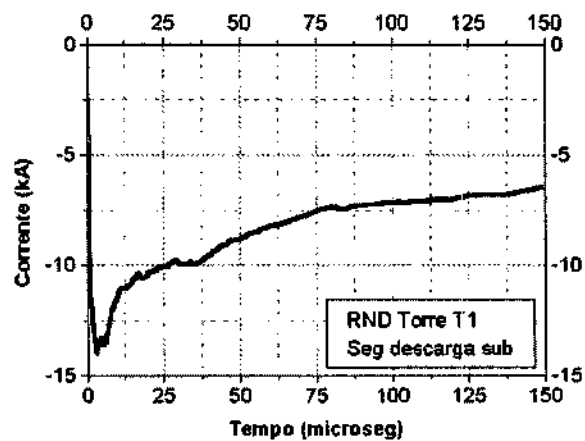


Fig. 3.15 – Curva média das correntes das segundas descargas subseqüentes Torre T1.

b) Torre T2

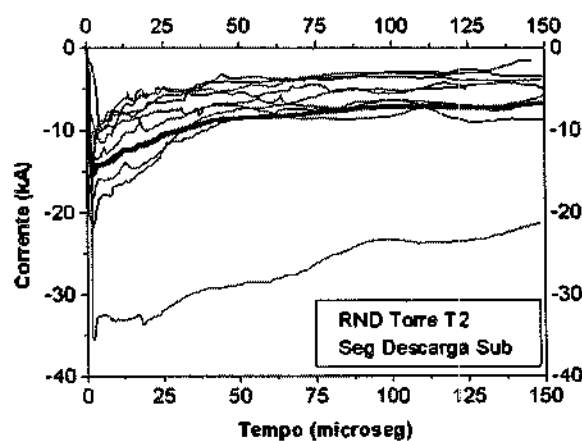


Fig. 3.16 – Relâmpagos negativos descendentes da Torre T2 – Curva Média de corrente das segundas descargas subseqüentes

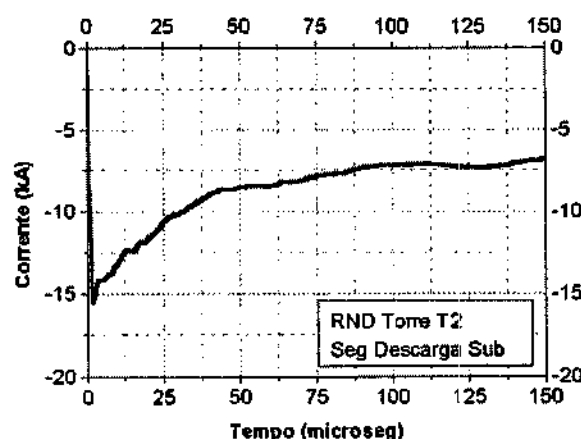


Fig. 3.17 – Curva média das correntes das segundas descargas subseqüentes Torre T2

3.2.1.4 – Análise das Características das Curvas

Utilizamos um total de 42 registros de relâmpagos na torre T1 com 94 descargas de retorno e 49 registros de relâmpagos na torre T2 com um total de 100 descargas de retorno. Berger utilizou em suas médias, 98 registros de relâmpagos, sendo 88 com duplo registro de escala de tempo reduzida e estendida e 10 registros apenas com escala de tempo estendida. Para as descargas de retorno subseqüentes, 76 registros foram utilizados.

A média de amplitude máxima para as duas torres é próxima (Torre T1 27,5kA e Torre T2 28kA).

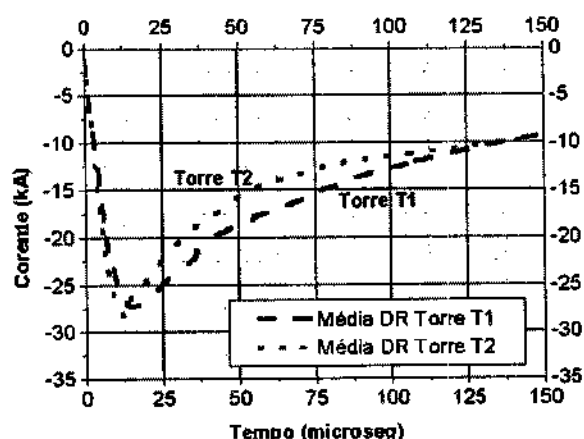


Fig. 3.18 – Superposição das curvas médias das primeiras DR's das Torres T1 e T2.

Com as curvas médias das torres T1 e T2 obtidas da média de todas as curvas apresentadas na Fig. 3.18, que correspondem às descargas de retorno das torres em separado, podemos enfim, comparar com a curva média obtida por Berger (Figura 3.2), visto na Figura 3.19 a seguir.

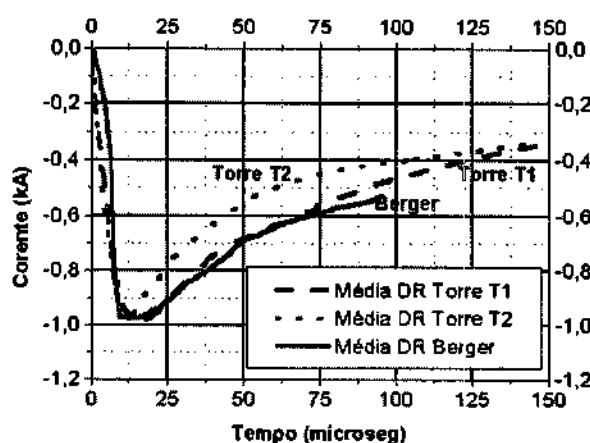


Fig. 3.19 – Superposição da média das primeiras DR's das Torres T1 e T2 com a média de Berger.

As curvas médias das duas torres T1 e T2 da estação de San Salvatore guardam semelhanças com a curva média obtida por Berger e Anderson (1975).

3.2.1.5 - Forma de Onda das Descargas de Retorno

As curvas médias obtidas por Berger mostram o pico de corrente da descarga de retorno ocorrendo em $16\mu s$ nas duas escalas de tempo em que as curvas foram obtidas (Figuras 3.1 e 3.2). A Figura 3.18 mostra que na torre T1 o tempo de pico máximo é o $16\mu s$ e na torre T2 o pico de corrente ocorre em média em $12,5$ milionésimos de segundo do seu início.

3.2.1.6 - Forma de Onda das Descargas Subseqüentes

A curva média das descargas subseqüentes obtidas por Berger e Anderson (1975) em escalas de tempo de 0 a $56\mu s$ e 0 a $120\mu s$ apresentam o valor de pico em aproximadamente 4 milionésimos de segundo a partir de seu início. Nas curvas

obtidas separadamente por descarga subsequente – primeira (Figura 3.20) e segunda (Figura 3.21) – e por torre, estes tempos se repetem para as duas torres.

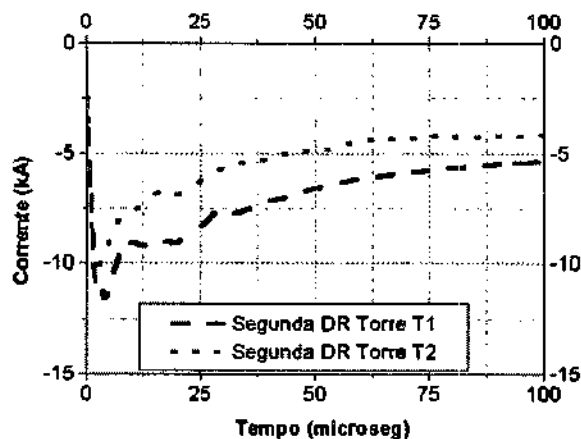


Fig. 3.20 – Superposição das curvas médias das primeiras descargas subsequentes das Torres T1 e T2.

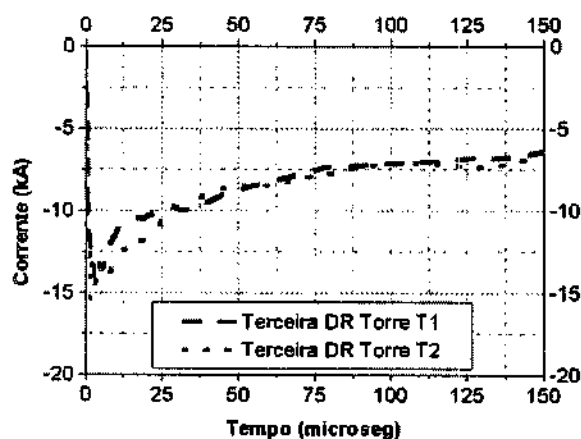


Fig. 3.21 – Superposição das curvas médias das segundas descargas subsequentes das Torres T1 e T2.

Enquanto o início da formação da cauda da primeira descarga subsequente na Torre T2 é mais definido (Figura 3.20), na segunda descarga subsequente é a Torre T1 que apresenta um maior amortecimento (Figura 3.21).

Uma curva média das descargas subsequentes pode ser obtida a partir das Figuras 3.20 e 3.21, para então comparar com a curva média obtida por Berger (Figura 3.3). A Figura 3.22 mostra as curvas médias das descargas subsequentes

das torres T1 e T2, primeira e segunda, e a média aritmética entre as quatro curvas.

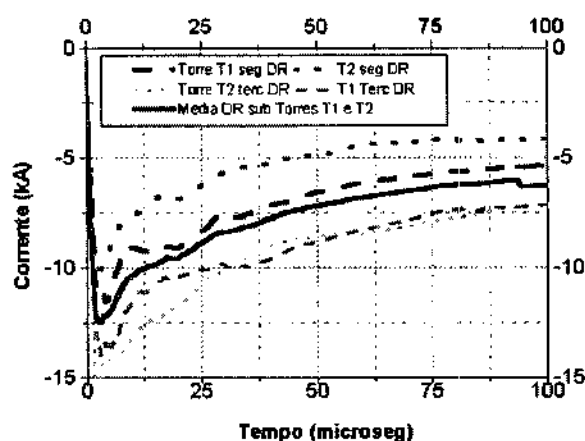


Fig. 3.22 – Curva média das descargas subseqüentes das torres T1 e T2.

Finalmente, para o caso da estação de San Salvatore, temos a comparação entre a curva média obtida por Berger e Anderson (1975) (Figura 3.3) e a média aritmética das curvas médias das descargas subseqüentes das torres T1 e T2, apresentadas na Figura 3.23.

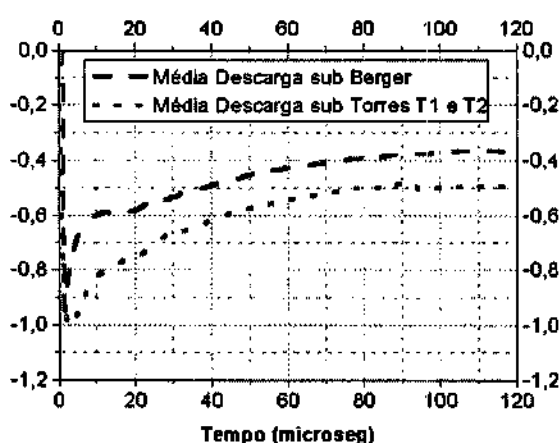


Fig. 3.23 – Superposição da média das descargas subseqüentes das Torres T1 e T2 com a média obtida por Berger.

A curva média das descargas subseqüentes das torres T1 e T2 apresenta um amortecimento menor que a curva média obtida por Berger e Anderson (1975). Os tempos de subida das frentes das duas ondas se superpõem de forma que praticamente são os mesmos, apesar do valor máximo ser maior para a média conjunta das torres T1 e T2, por motivos já comentados anteriormente.

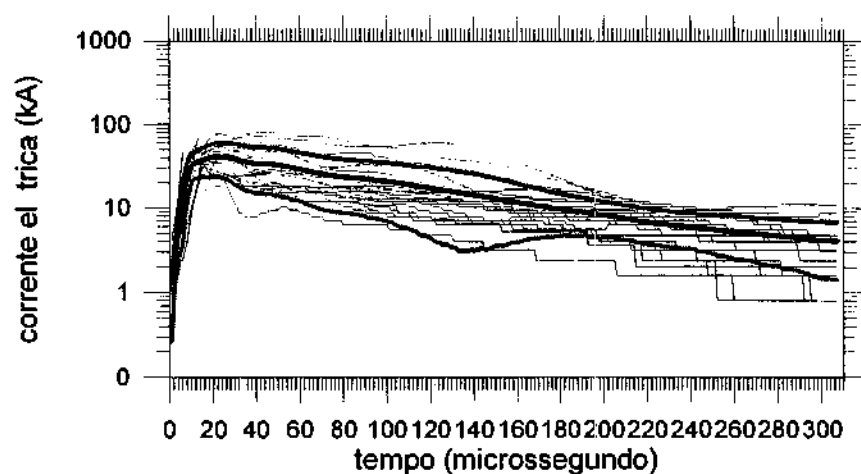
3.3 - Curvas Médias da Estação do Cachimbo Obtidas em Nossa Análise.

A partir do estudo de 79 registros de relâmpagos feitos na estação do Cachimbo, 29 curvas de relâmpagos negativos descendentes foram selecionadas para o nosso estudo (Tabela 3.4).

Fizemos a análise dos relâmpagos, classificamos todos os eventos, separamos as descargas de retorno das descargas subseqüentes e dentre estas as primeiras das segundas. Obtivemos, em caráter original, as curvas médias das correntes de relâmpagos negativos descendentes na Estação do Cachimbo mostradas a seguir a partir da Figura 3.25.

3.3.1 – Critério Adotado para a Obtenção das Curvas.

Lacerda (1998) obteve uma média aritmética das 22 curvas de correntes registradas até o ano de 1994, escolhidas para a análise ponto a ponto, para a primeira descarga de retorno, conforme mostrado na Figura 3.24 a seguir.



**Fig. 3.24 - Curva média da corrente (Forma de onda) da primeira descarga de retorno (curva grossa no meio) para as 22 primeiras descargas. Curva média somada ao desvio padrão (curva grossa abaixo). Curva média subtraída do desvio padrão (curva grossa acima).
 FONTE: Lacerda, (1998 p. 74).**

TABELA 3.4 - LISTA DE RELÂMPAGOS REGISTRADOS NA ESTAÇÃO DO CACHIMBO ENTRE 1985 E 1998.

Evento	REL	ANO	DR	TIPO CEMIG	Classe	Evento	REL	ANO	DR	TIPO CEMIG	Classe
01	03	86	1	DOWN	Rnd	27	51	93	1	UP	Rpa
02	05	87	1	UP	Rna	28	54	93	1	DOWN	Rnd
03	06	87	1	DOWN	Rnd	29	55	93	1	UP	Rpa
04	08	87	1	UP	Rpa	30	56	93	1	DOWN	Rnd
05	09	87	1	DOWN	Rnd	31	57	93	9	DOWN	Rnd
06	10	87	2	UP	SC	32	58	94	9	DOWN	Rnd
07	12	88	1	DOWN	Rnd	33	59	94	1	DOWN	Rnd
08	13	88	1	DOWN	Rnd	34	60	94	1	UP	Rna
09	14	88	1	UP	Rna	35	61	94	7	DOWN	Rnd
10	19	89	3	DOWN	Rnd	36	62	94	5	DOWN	Rnd
11	20	89	1	UP	Rpa	37	63	94	3	UP	Rna
12	21	89	1	DOWN	Rnd	38	64	95	1	-	SC
13	26	90	3	DOWN	Rnd	39	65	95	5	-	Rpa
14	27	90	1	SC	Rej	40	66	95	1	-	Rpa
15	28	90	3	UP	Rna	41	67	95	2	-	Rnd
16	31	91	1	UP	Rna	42	68	95	1	-	Rpa
17	34	91	4	UP	Rna	43	69	95	4	-	Rnd
18	35	91	1	UP	Rna	44	70	95	2	-	Rpa
19	37	91	1	DOWN	Rnd	45	71	96	1	-	Rpa
20	38	92	1	DOWN	Rnd	46	72	96	2	-	Rnd
21	40	92	14	DOWN	Rnd	47	73	96	1	-	Rnd
22	41	92	3	DOWN	Rnd	48	74	96	1	-	Rnd
23	42	92	1	DOWN	Rnd	49	76	96	2	-	Rnd
24	43	92	1	UP	Rpa	50	77	96	1	-	Rna
25	49	93	3	DOWN	Rnd	51	78	97	8	-	Rna
26	50	93	5	DOWN	Rnd	52	79	98	4	-	Rnd
						53	39	92	1	UP	Rpa
						Total	53		134		

Legenda da Tabela:

RNA	Relâmpago negativo ascendente	RPA	Relâmpago positivo ascendente
RND	Relâmpago neg. descendente	RPD	Relâmpago pos. descendente
REJ	Relâmpago positivo especial de junção	SC	Relâmpago sem classificação

Para o traçado das curvas médias, todas as curvas foram reduzidas à escala de $1\mu\text{s}$, pois as curvas de correntes tinham sido obtidas em três escalas de tempo gerando três grupos de dados cada grupo com um intervalo, sendo $1\mu\text{s}$, $0,5\mu\text{s}$ e $0,2\mu\text{s}$. O valor inicial para cada curva foi tomado a partir do momento em que ela começava a crescer, desprezando-se os valores anteriores em que a corrente se mantinha constante. (Lacerda, 1998).

Na nossa abordagem, optamos por digitalizar as curvas de forma que tivéssemos o número de pares de digitalização compatível com o tempo de registro do relâmpago, a exemplo do que fez Lacerda (1998). Eventos registrados em um tempo de 0 a $500\mu\text{s}$ que constituem a maioria dos registros, foram digitalizados com 500 pares em arquivo do tipo DAT. Os eventos com tempos de registro de $350\mu\text{s}$ por sua vez, foram digitalizados com 350 pares e assim por diante. As curvas foram obtidas a partir destes registros e ajustadas para o tempo inicial ($t = 0$) a partir de 1kA na subida da frente de onda. O objetivo deste ajuste foi eliminar as correntes de longa duração que muitas vezes acontecem antes da formação da frente de onda que caracteriza as descargas de retorno dos relâmpagos negativos descendentes

Os dados da Tabela 3.4 correspondem aos registros feitos na estação do Cachimbo incluindo aqueles não considerados como representativos de uma onda de corrente associada a uma descarga atmosférica, uma vez que os valores de pico são muito reduzidos. A Tabela 3.5 apenas classifica os relâmpagos considerados representativos de um relâmpago mesmo que este registro não possua uma curva de corrente e por fim, a Tabela 3.6 que registra somente os eventos que geraram uma curva de corrente.

**TABELA 3.5 - RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
NA ESTAÇÃO DO CACHIMBO DE 1985 A 1998 (ACUMULADO)**

Quantidade total de relâmpagos	79 (100%)
Quantidade de relâmpagos por ano	6
Relâmpagos negativos descendentes ou ascendentes	64 (81%)
Relâmpagos positivos descendentes ou ascendentes	13 (16,5%)
Relâmpagos de polaridade desconhecida	2 (2,5%)
Relâmpagos descendentes observados (confirmados)	33 (41,8%)
Relâmpagos negativos descendentes	31 (39,2%)
Relâmpagos positivos descendentes	2 (2,5%)

**TABELA 3.6 - RELÂMPAGOS CLASSIFICADOS NA ESTAÇÃO DO CACHIMBO
DE 1985 A 1998**

Quantidade de relâmpagos (dados registrados originam a curva)	53 (100%)
Relâmpagos positivos especiais de junção	1 (1,8%)
Relâmpagos de polaridade desconhecida	2 (3,9%)
Relâmpagos positivos descendentes	0 (0%)
Relâmpagos negativos descendentes	29 (54,7%)
Relâmpagos negativos ascendentes	10 (18,9%)
Relâmpagos positivos ascendentes	11 (20,7%)

3.3.2 - Formas de Onda de Correntes de Descarga de Retorno de Relâmpagos Negativos Descendentes.

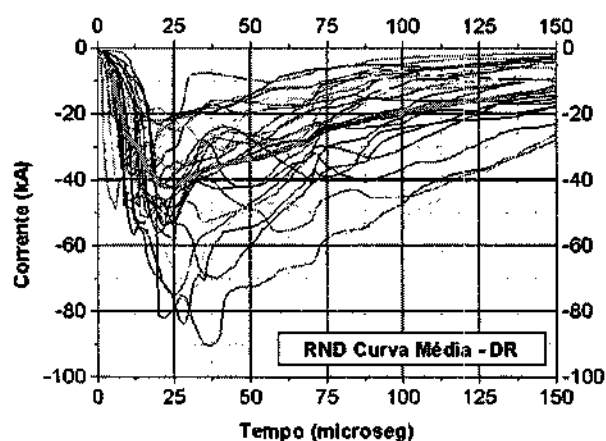


Fig. 3. 25 – Relâmpagos negativos descendentes da estação EC – Curva média das correntes das descargas de retorno.

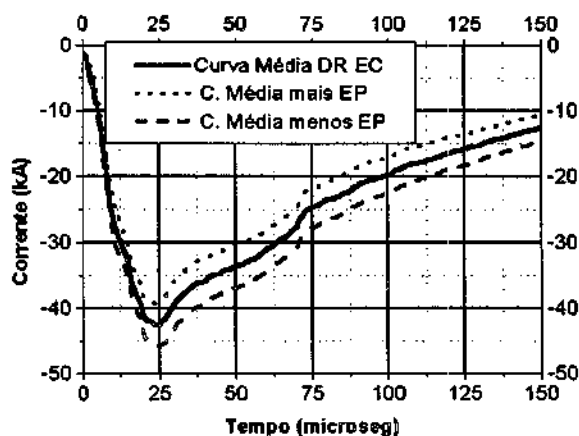


Fig. 3. 26 – EC Curva média das correntes das descargas de retorno.(Legenda: EP – erro padrão)

3.3.3 – Comparação entre as Formas de Onda de Correntes de Descarga de Retorno de Relâmpagos Negativos Descendentes da EC com Berger e com as Curvas Médias das Torres T1 e T2.

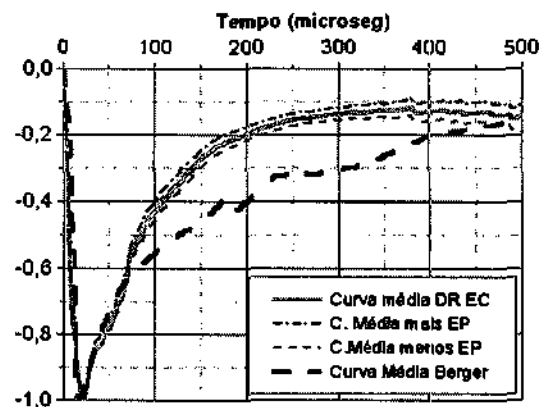


Fig. 3.27 – Superposição da média das DR's da EC com a média obtida por Berger na escala de 500 milionésimos de segundo. (Legenda: EP – erro padrão).

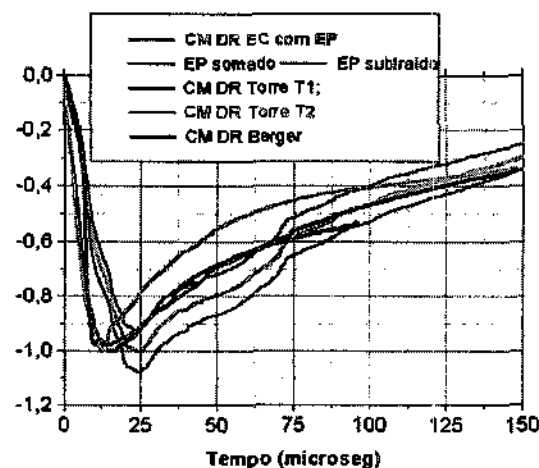


Fig. 3.28 – Superposição da média das DR's da EC com as curvas médias obtidas para as Torres T1 e T2. (Legenda: EP – erro padrão).

Confrontamos a média que obtivemos para a estação do Cachimbo com as curvas médias obtidas por Berger e Anderson (1975) (Figura 3.27) e por nós para cada

torres separadamente (Figura 3.28). Nos dois casos calculamos também o erro padrão acima e abaixo, sendo abaixo (cor violeta, mais nítida na Figura 3.27) representando a curva média somada ao erro padrão e a cima (cor rosa escuro) representando a curva média subtraída do erro padrão.

3.3.4 - Forma de Onda das Correntes de Descargas Subseqüentes de Relâmpagos Negativos Descendentes da EC.

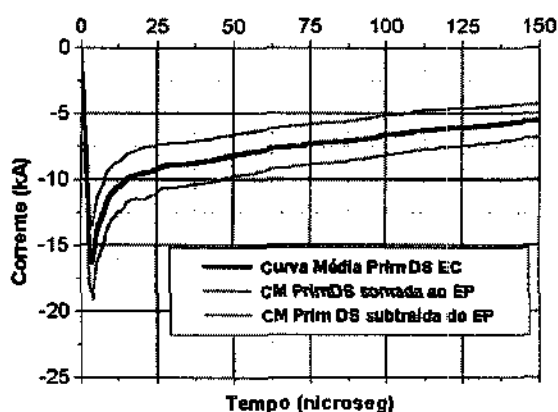


Fig. 3. 29 – Curva média de correntes das primeiras descargas subseqüentes.
(Legenda: EP – erro padrão).

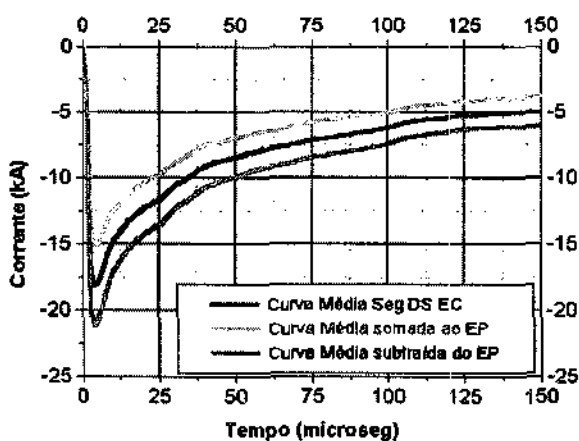


Fig. 3.30 – Curva média de corrente das segundas descargas subseqüentes.
(Legenda: EP – erro padrão)

3.3.5 - Comparação entre as Formas de Onda de Correntes das Descargas Subseqüentes de Relâmpagos Negativos Descendentes da EC e Berger.

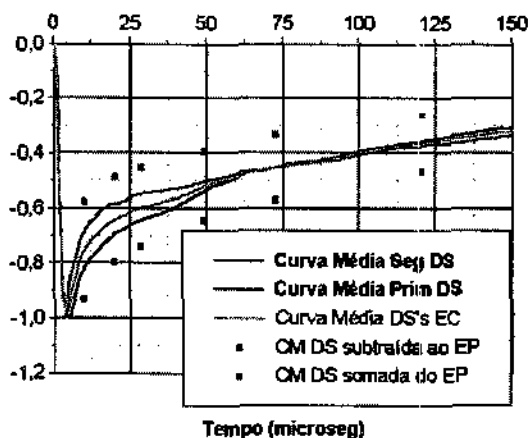


Fig. 3.31 – Curva média das médias da primeira e da segunda descarga subsequente. (Legenda: EP – erro padrão).

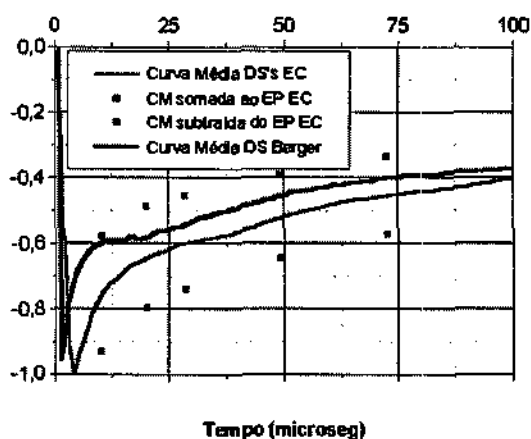


Fig. 3.32 – Superposição das curvas médias das descargas subsequentes da EC com o erro padrão (EP) com a curva média obtida por Berger.

3.4 – Curvas Médias da Estação da África do Sul (AFS)

Analizamos as curvas de relâmpagos descendentes negativos que Eriksson (1979) publicou a partir de registros que ele fez na estação da África do Sul conforme a Tabela 3.7.

**TABELA 3.7 - RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
NA ÁFRICA DO SUL DE 1972 A 1977**

Quantidade total de relâmpagos	25 (100%)
Média de relâmpagos por ano	5
Relâmpagos registrados	15 (60%)
Quantidade de descargas de retorno	22
Média de DR por relâmpago	1,47
Relâmpagos positivos ascendentes ou descendentes	0
Relâmpagos negativos descendentes	13 (52%)
Relâmpagos negativos ascendentes	2 (8%)

Fonte: A. J. Eriksson (1978)

**TABELA 3.8 - REGISTRO DE RELÂMPAGOS NA TORRE DA ESTAÇÃO DA
ÁFRICA DO SUL**

Evento	Número do relâmpago	Descargas De Retorno	Classe	Data/hora
1	740118/12	2	RND	18/01/74-15h15
2	741224/16	1	RND	24/12/74
3	740118/11	1	RND	18/01/74-15h50
4	740104/10	1	RND	04/01/74
5	751114/22	1	RND	14/11/75
6	770222/25	3	RND	22/02/77
7	771009/27	1	RND	09/12/77
8	740118/12	1	RND	18/01/74-15h15
TOTAL	8	11		

Eriksson publicou uma série de 15 curvas de corrente de relâmpagos negativos das quais analisamos 8 relâmpagos, conforme a TABELA 3.8 e considerando a estatística destes eventos obtivemos a curva média para as correntes das descargas de retorno. Existe uma semelhança estrutural entre as torres da estação da África do Sul e da estação do Cachimbo que Eriksson mesmo montou para a CEMIG, além do fato comum de que ambas as estações estão localizadas no hemisfério sul, portanto em baixas latitudes.

A Figura 3.33 a seguir, mostra a comparação entre as curvas médias de corrente de descarga de retorno das estações em questão com a média de Berger e Anderson (1975).

Como os tempos de permanência dos dados em registro são diferentes (Figura 3.33), não podemos fazer uma comparação do comportamento das curvas em sua totalidade.

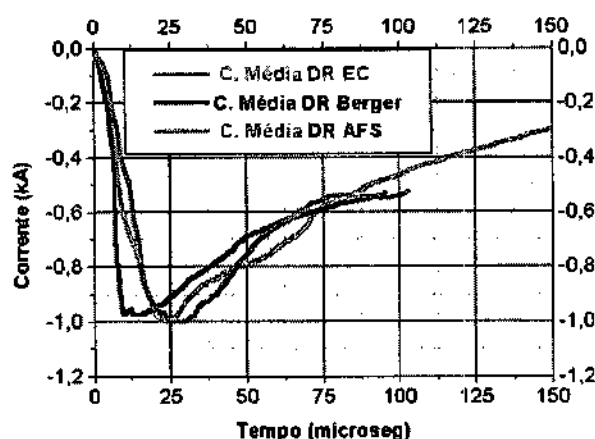


Fig. 3.33 – Superposição das médias das DR's da EC e da África do Sul com a média obtida por Berger.

3.5 – Curvas de Relâmpagos Positivos

Na amostragem de curvas que representa a incidência de relâmpagos positivos, Berger não encontrou elementos comuns que justifiquem o levantamento de uma curva média (Figura 3.5). Isto pode sugerir, que estes relâmpagos possam ser classificados em um grupo especial, como comentado no item 2.7.4 Outras estações de pesquisa, como a estação do Japão e a estação do Cachimbo, encontraram registros de relâmpagos positivos com estas características. No Japão este tipo de relâmpago representa estatística maior no inverno do que no verão, embora nestas estações os negativos descendentes sejam os mais freqüentes.

As pesquisas tiveram como objetivo a avaliação dos relâmpagos causados por tempestades de inverno, para definir características dos relâmpagos quanto à polaridade e origem.

**TABELA 3.9 - RESUMO DOS REGISTROS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
NO JAPÃO DE 1976 A 1992**

Quantidade total de relâmpagos	145 (100%)
Relâmpagos positivos ascendentes ou descendentes	25 (17,2%)
Relâmpagos negativos ascendentes ou descendentes	91 (62,8%)
Relâmpagos com dupla polaridade (positivo/negativo)	29 (20%)
Relâmpago negativo com uma DR	52 (36%)
Relâmpago positivo com uma DR	14 (10%)
Relâmpago negativo com múltiplas DR's	39 (27%)
Relâmpago positivo com múltiplas DR's	11 (7%)
Relâmpago com dupla polaridade com múltiplas DR's	29 (20%)

Fonte: Y. Goto et al, 1994

No Japão, apenas 145 registros apresentaram forma de onda característica de corrente com amplitude máxima acima de 1 kA, avaliadas estatisticamente (Tabela 3.9). Importante notar no caso do Japão, que aproximadamente 63% dos relâmpagos negativos no inverno representam uma percentagem muito menor que os aproximadamente 90% destes relâmpagos que ocorrem no verão.

Apresentamos na Tabela 3.10, uma amostragem desta medição, com 6 relâmpagos negativos e 10 positivos, totalizando 16 relâmpagos.

TABELA 3.10 - REGISTRO DE RELÂMPAGOS NA TORRE DA ESTAÇÃO DO JAPÃO

Evento	Número do relâmpago	Classe	Data/hora
1	121183	RNA c/pulso	12/11/83 21:31:08
2	181183	RNA c/ DR's múltiplas	18/11/83 10:13:00
3	251283	RPA c/ pulso	25/12/83 06:36:36
4	201284	RPA c/ pulso	20/12/84 23:07:03
5	201284	RNA c/ DR's múltiplas	20/12/84 23:07:02
6	151086	RND	06:34:18
7	301086	REJ (positivo especial)	30/10/86 19:34:20
8	301086	REJ (positivo especial)	30/10/86 19:38:05
9	080187	RPA c/ pulso	080187 06:31:05
10	041286	REJ (positivo especial)	04/12/86 16:40:35
11	031287	RNA c/ DR	03/12/87 15:44:12
12	170187	RPA c/ pulso	17/01/87 11:42:23
13	170187	RPA c/ pulso	17/01/87 11:42:24
14	090187	REJ (positivo especial)	09/01/87 04:17:28
15	260387	RPA c/ pulso	26/03/87 21:54:51
16	090293	RND	09/02/93 22:40:58

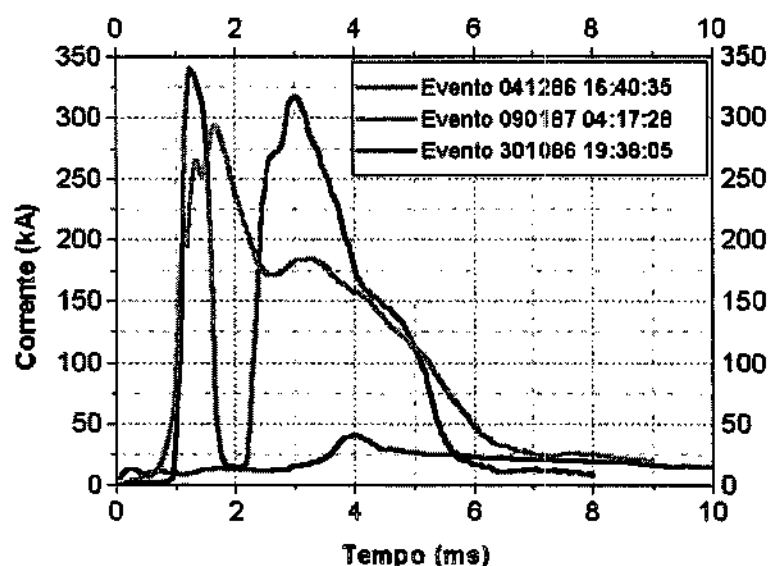


Fig. 3.34 – Relâmpagos positivos especiais de junção registrados no Japão.

Podemos concluir que no Japão na estação de inverno os relâmpagos positivos que ocorrem em maior incidência do que no verão, sejam na verdade relâmpagos

especiais de junção ou então relâmpagos positivos ascendentes com corrente de longa duração seguida por pulsos.

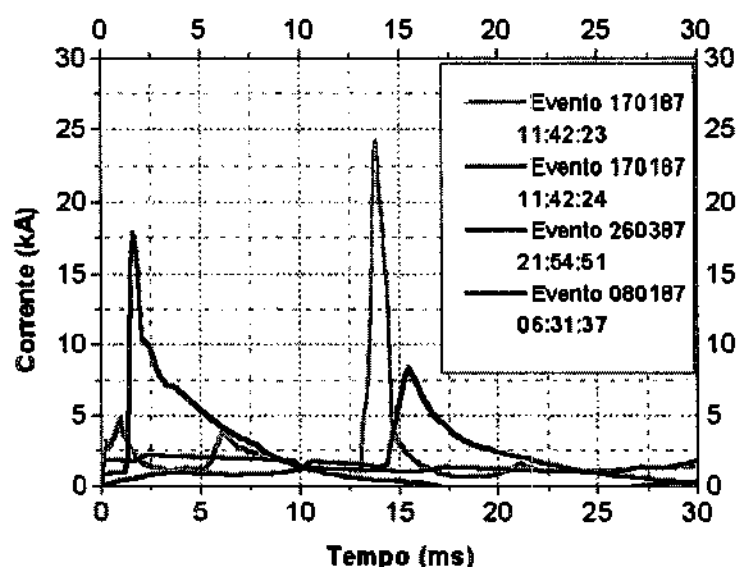


Fig. 3.35 – Relâmpagos positivos especiais de junção registrados no Japão.

Quanto aos relâmpagos positivos descendentes, estes por seu caráter raro não são demonstrados neste trabalho, pois apenas um ou dois registros foram feitos por Berger em quase 15 anos de pesquisas. Na estação do Cachimbo, apenas dois registros constam como relâmpago positivo, sendo que um deles já foi apresentado neste trabalho na Figura 2.32, classificado como relâmpago positivo especial de junção. Na estação da África do Sul, no período de observações abrangido neste trabalho, nenhum relâmpago positivo foi observado.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - Características dos Relâmpagos em Torres.

Elaboramos a Tabela 4.1 a seguir para estabelecer uma comparação entre os dados registrados nas estações do Cachimbo (EC), África do Sul (AFS) e do Japão (JAP) com os dados obtidos na estação de San Salvatore, agora referida como ESS e das suas duas torres separadamente (T1 e T2). Os dados das estações EC, AFS e JAP correspondem aos dados das Tabelas 3.6, 3.8 e 3.9 respectivamente enquanto que os das torres T1 e T2 correspondem aos dados da Tabela 3.3. Os dados referentes a ESS correspondem a informações que levantamos em literaturas já citadas (Tabela 3.1).

TABELA 4.1- CLASSIFICAÇÃO DE RELÂMPAGOS NAS ESTAÇÕES

DESCRIÇÃO	TORRE T1	TORRE T2	EC	JAP	AFS	ESS
Quantidade total de relâmpagos	60 (100%)	58 (100%)	53 (100%)	145 (100%)	15 (100%)	967 (100%)
(RNA) Negativos Ascendentes	6 (10%)	2 (3,45%)	10 (18,9%)	22 (15%)	2 (13%)	732 (75,7%)
(RND) Negativos descendentes	42 (70%)	49 (84,6%)	29 (54,7%)	91 (63%)	13 (87%)	106 (11%)
RND com uma DR	29 (69%)	32 (65%)	14 (48,3%)	-	8 (62%)	-
RND com mais de uma DR	13 (31%)	17 (35%)	15 (51,7%)	-	5 (38%)	-
(RPD) Positivos Descendentes	1 (1,7%)	-	-	-	-	1 (≤0,1%)
(RPA) Positivos Ascendentes	6 (10%)	2 (3,45%)	11 (20,7%)	18 (12%)	-	102 (10,5%)
Rel.SC	-	-	2(3,9%)			
(REJ) Positivos de Junção	5 (8,15%)	5 (8,6%)	1 (1,8%)	14 (10%)	-	26 (2,7%)

Acerca da Tabela 4.1 : Como há algumas divergências no modo de classificar os relâmpagos, algumas considerações devem ser feitas. Os dados do Japão originalmente foram classificados como relâmpagos positivos e negativos com descargas de retorno simples ou múltiplas e dupla polaridade com múltiplas

descargas, perfazendo 5 tipos de relâmpagos, onde 63% são relâmpagos negativos, 17% positivos e 20% com dupla polaridade. O percentual referente ao tipo de dupla polaridade foi distribuído entre os tipos positivo ascendente (5%) e negativo ascendente (15%), segundo o critério de sua de sua polaridade inicial, respectivamente 7 relâmpagos positivos e 22 negativos, para uma melhor comparação com a classificação utilizada nesta dissertação.

4.2 - Relâmpagos Negativos Ascendentes (RNA)

São os relâmpagos que tipicamente ocorrem em torres, ou a partir de estruturas elevadas. Os dados da ESS representam um percentual elevado (75,7%), se comparados aos dados referentes ao período que estamos analisando para as torres T1 e T2 (10% e 3,45% respectivamente) da mesma estação de San Salvatore. A explicação é que no universo de registros que possuímos, os relâmpagos ascendentes positivos e os negativos formados por corrente de longa duração sem pulso (amplitude $\leq 2\text{kA}$) ou com pulso (amplitude $\leq 10\text{kA}$) foram excluídos deste estudo, uma vez que o propósito inicial de utilização destes registros era a análise apenas dos relâmpagos positivos e negativos com descarga de retorno acima de 10kA. Assim os percentuais nas demais estações, 22,8% na EC, 15% no Japão e 13% na AFS são mais representativos se analisados sob este aspecto.

Muitos destes relâmpagos ocorrem com corrente de longa duração com amplitude em torno de 100 a 200A com um tempo de duração que vai a centenas de milésimos de segundo. Estes dados podem ser ignorados pelos instrumentos de medidas dependendo da calibração da escala adotada. Berger optou por determinar uma sensibilidade de 20A. Nas estações EC e AFS os instrumentos foram calibrados para uma sensibilidade de 790A e na estação do Japão, os dados só geraram registro de descarga para amplitude superior a 1kA. Por esta razão, concluímos que os percentuais encontrados nestas estações estão coerentes entre si embora diferentes do percentual da ESS. Podemos neste caso

considerar os percentuais das torres T1 e T2 representativos da estação de San Salvatore.

4.3 - Relâmpagos Negativos Descendentes (RND)

4.3.1 - Descarga de Retorno (DR)

A Figura 4.1 a seguir mostra uma média da forma de onda de corrente da descarga de retorno para os relâmpagos registrados nas estações ESS, Torres T1 e T2 e EC. Na Figura 3.33 já mostramos a mesma comparação entre as descargas de retorno da África do Sul, EC e a curva obtida por Berger.

Para construirmos o gráfico da Figura 4.1, utilizamos os registros correspondentes às curvas médias das descargas de retorno dos relâmpagos negativos descendentes que representam os percentuais de 70% para a Torre T1, 84,5% para a T2 e 54,7% para a EC e os 11% que representam a ESS. É um percentual menor, cujas razões para justifica-lo foram consideradas quando analisamos os relâmpagos negativos ascendentes acima. A AFS possui um número reduzido de curvas na nossa análise, motivo pelo qual sua curva média não foi considerada na Figura 4.1.

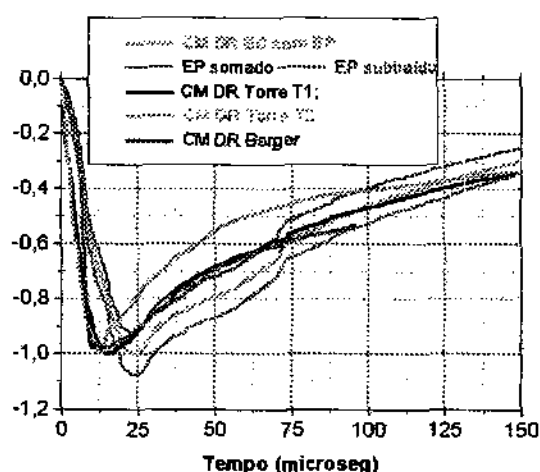


Fig. 4.1 – Comparação entre as formas de onda das primeiras descargas de retorno da estação de San Salvatore (ESS, T1 e T2) e da Estação Cachimbo.

4.3.2 – Amplitude da Descarga de Retorno

4.3.2.1 – Amplitude das Correntes

Quanto à amplitude máxima das correntes da primeira descarga de retorno podemos verificar a tendência de que em latitudes mais baixas, o caso de EC e AFS, a amplitude máxima em média, é maior do que em latitudes altas, caso de ESS e JAP. :

- Para as torres T1 e T2 este valor se situa próximo de 30kA coincidindo com a média de 30kA obtida por Berger e Anderson (1975).
- Para a EC obtivemos o valor médio de amplitude de pico 42,5kA coerente com o valor de 40,2kA determinado nas publicações da CEMIG-UFMG (Melo et al, 2000), e os 42kA obtidos por Lacerda (1998) se consideramos o fato de que analisamos um total de 29 curvas enquanto Lacerda apenas 22.
- A média de amplitude de pico na AFS é 41kA obtida por Eriksson (1978)
- A média no Japão diz respeito a todos os relâmpagos negativos (17kA), abaixo dos valores considerados aqui para os RND, porque no Japão, foram computadas as amplitudes dos relâmpagos ascendentes.

A média de pico obtida por Eriksson (1978) foi 41kA (o numero de curvas analisadas por nós não nos permite obter uma média confiável). No entanto, se amplitudes máximas encontradas para a EC e AFS forem comparadas com aquelas encontradas na ESS e torres T1 e T2 podemos confirmar a tendência de que a descarga de retorno dos relâmpagos negativos descendentes em latitudes mais baixas tem amplitude maior em média do que em latitudes mais altas.

4.3.2.2 – Justificativas

Nestas condições, em baixas latitudes, as cargas contidas dentro das nuvens estão em regiões mais altas segundo Pinto (1996). Orville e Huffines (1999)

afirmam que quando o centro de cargas está em região mais baixa, como a carga é armazenada pelo líder uniformemente ao longo do canal, então a descarga para o solo produz uma corrente com um pico máximo de corrente menor do que nos casos em que o centro de carga está em regiões mais altas.

4.3.2.3 – Cálculos Probabilísticos

- Erro padrão: Calculamos o erro padrão para a curva média da EC e a comparamos com as demais curvas da estação San Salvatore inclusive torres T1 e T2 (Figura 4.1).
- Teste de variância : Complementando os cálculos estatísticos aplicamos o teste F que verifica o índice de variância entre grupos e o índice de variância entre os dados de um grupo, nos valores referentes às amplitudes máximas obtidas diretamente nas curvas que geraram as médias das Torres T1, T2 e EC. O resultado mostrou que enquanto as curvas médias de T1 e T2 não são significativamente diferentes entre si, as curvas médias de T1 e EC e de T2 e EC quando verificadas neste aspecto, são significativamente diferentes entre si.
- Probabilidade dos extremos : Este resultado nos levou então a fazer uma verificação que envolve a probabilidade de distribuição dos extremos, a fim de determinar o valor máximo de corrente que 5% dos relâmpagos negativos descendentes excedem, isto para T1 , T2 e EC uma vez que para a ESS este cálculo foi feito por Berger e Anderson (1975), quando encontraram que 5% dos relâmpagos em ESS excedem 80kA. O resultado pode ser visto na Figura 4.2 de onde extraímos os seguintes valores:
 - 5% excedem 60 kA nas torres T1 e T2 respectivamente – conforme gráfico da Figura 4.2.
 - EC 5% excedem 80 kA – conforme gráfico da Figura 4.2

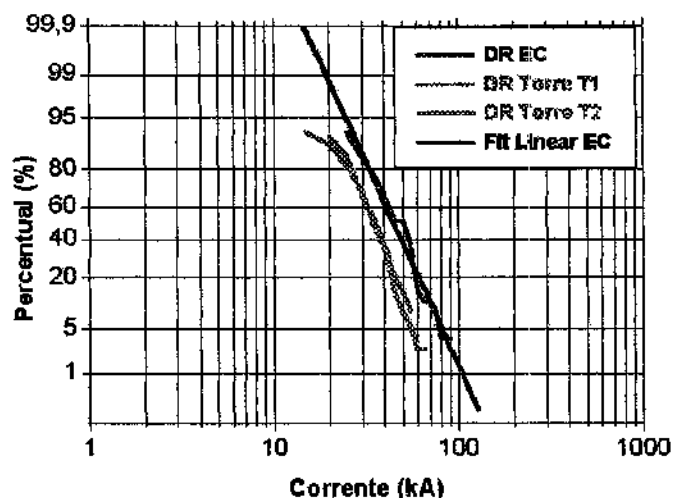


Fig. 4.2 – Gráfico das distribuições de valores extremos de corrente das curvas de T1, T2 e EC em função dos percentuais.

Concluimos que a média da amplitude máxima das correntes das descargas de retorno em baixas latitudes é maior do que em altas latitudes.

4.3.3 – Percentuais de Relâmpagos Negativos Descendentes.

Eriksson (1978) considerou que o percentual de relâmpagos descendentes negativos na AFS (52%) contrastava com o percentual da ESS (11%) onde a maior incidência era de relâmpagos ascendentes, citando o percentual de 84%, aqui corrigido para 75,7% de acordo com o nosso levantamento em Berger (1975). Os resultados da Tabela 4.1 no entanto justificam esta diferença entre os percentuais de Eriksson e de Berger e confirmam os percentuais obtidos tanto na AFS quanto nas demais estações incluindo EC, Torre T1, Torre T2 e Japão, para os quais os percentuais de relâmpagos negativos descendentes são : AFS 87%, EC 54,7%, T1 70%, T2 84,5% e JAP 63% todos eles convergindo para um valor médio de 67%.

4.3.4 - Percentuais de Descargas de Retorno.

Elaboramos a Tabela 4.2 apresentada a seguir, para compararmos os percentuais das descargas de retorno das estações San Salvatore e Cachimbo. Encontramos

médias entre as estações indicando que no aspecto da multiplicidade, em latitudes mais baixas os relâmpagos têm uma maior multiplicidade do que em latitudes mais altas:

- Os relâmpagos negativos descendentes apresentam uma média de descargas por relâmpago de 2,29 para a Torre T1, 2,14 Torre T2 e 3,1 para a EC.
- A média geral, aquela que considera todos os relâmpagos apresenta uma média de descargas de retorno por relâmpago de 2,02 para a Torre T1, 1,97 para a T2 e 2,52 para a EC.
- Berger (1975) analisando 1026 relâmpagos encontrou uma média de 1,9 descargas por relâmpago. A média de Berger aumenta significativamente para 4,8 se são considerados apenas os relâmpagos múltiplos.
- Segundo Mello et al (2000), a média da estação do Cachimbo é de 5,8 descargas por relâmpago negativo descendente.
- A comparação entre as médias acima confirma que a multiplicidade dos relâmpagos em baixas latitudes é maior.

4.4 - Descargas Subseqüentes.

4.4.1 - Quantidade de Descargas Subseqüentes

Na estação San Salvatore por medições diretas Berger (1975), registrou um relâmpago com 17 descargas de retorno subseqüentes, com duração total de 1,8 segundo. Já na EC, o relâmpago com maior número de descargas subseqüentes registrado, tem 14 descargas e um tempo de 927,3 milésimos de segundo aproximadamente. Como ilustração, o maior número de descargas subseqüentes registradas em um único relâmpago é de 54 descargas que foi fotografado no Novo México (EUA) por Workman (Berger, 1975).

Tabela 4.2 - ESTIMATIVA DOS PERCENTUAIS DAS DESCARGAS DE RETORNO

DESCRIÇÃO	TORRE T1	TORRE T2	EC
RNA com uma DR	3	2	7
RNA com mais de uma DR	3	-	3
Total de DR's RNA ($\geq 10\text{kA}$)	11 (9,2%)	2 (1,8%)	23 (17,8%)
RND com uma DR	29	32	14
RND com mais de uma DR	13	17	15
Total de DR's RND	96 (80,7%)	105 (92%)	89 (69%)
RPA com uma DR	5	2	8
RPA com mais de uma DR	1	-	2
Total de DR RPA	7 (5,9%)	2 (1,8%)	16 (12,4%)
REJ com uma DR	5 (4,2%)	5 (4,4%)	1 (0,8%)
Total de Descargas de Retorno	119 (100%)	114 (100%)	129 (100%)
Média de DR's por RND	2,29	2,14	3,1
Média geral de DR por Relâmpago	2,02	1,97	2,43

4.4.2 – Amplitude Máxima das Descargas Subseqüentes.

Observamos que as segundas descargas subseqüentes apresentam uma amplitude de pico maior que as primeiras descargas subseqüentes, identificado nas curvas médias que elaboramos para cada descarga subseqüente. Esta tendência pode ser notada na Figura 3.22 no que se refere às Torres T1 e T2. Na Figura 4.3 comparamos as curvas médias da primeira descarga subseqüente com a segunda na EC. Na AFS a falta de dados nos impediu de avaliar. Com base nos fatos podemos afirmar que já é mais que uma tendência partindo até para uma regularidade.

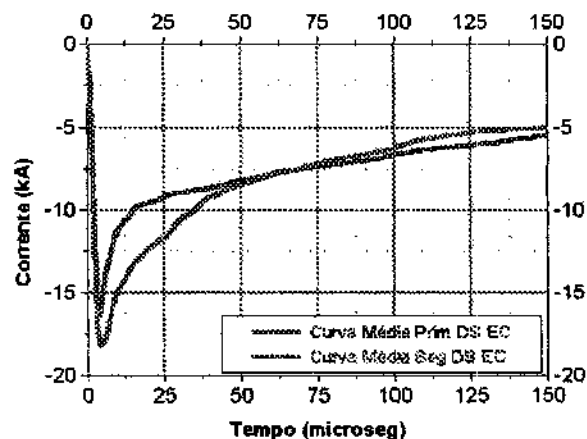


Fig. 4.3 – Comparação entre as curvas médias das descargas subsequentes da EC

Poderemos analisar o intervalo de tempo entre as descargas subsequentes para concluir que o tempo médio que separa a segunda descarga subsequente da primeira subsequente é maior que o tempo médio que separa a primeira descarga subsequente da descarga de retorno e então voltar a este assunto para uma conclusão.

4.4.3 - Média de Tempo entre Descargas Subsequentes

Kitagawa e Kobayashi (1958) registraram no Novo México (EUA) intervalos entre as descargas subsequentes. Para eles, o tempo médio de duração dos relâmpagos analisados é de 899 milésimos de segundo, sendo uma média de 32,6 milésimos de segundo para o tempo médio entre a descarga de retorno e a primeira descarga subsequente, 39,1ms e 50,1ms entre a primeira e a segunda descarga subsequente. O tempo médio entre descargas levantado no Novo México (EUA) entre sete relâmpagos múltiplos com 10 descargas subsequentes, é de 90,3ms. Malan (1956) investigou na África do Sul o intervalo de tempo médio entre descargas múltiplas. Este variou entre 30 e 50 ms. Na Estação do Cachimbo o tempo médio entre descargas subsequentes de 64ms (Mello et al, 2000) .

Podemos sugerir o seguinte mecanismo para explicar a intensidade das segundas descargas subsequentes:

- a desionização do canal pode ser mais acentuada entre a primeira e segunda descarga subsequente, comparado com o mesmo fenômeno entre a descarga de retorno e a primeira subsequente, uma vez que a primeira subsequente pode aproveitar o canal ionizado pela descarga de retorno.
- Na fase das descargas subsequentes, então a segunda descarga subsequente flui por um canal menos ionizado do que a primeira subsequente encontrou ao permear o canal.
- Como consequência deste fato a amplitude da corrente da segunda descarga subsequente é maior do que a amplitude da primeira subsequente, pois mais cargas podem ser estocadas uniformemente ao longo do canal na descida do líder contínuo que a antecede.

4.5 - Formas de Ondas mais Características

O que caracteriza mais fielmente uma onda de corrente de descarga de retorno, é a sua forma assimétrica que corresponde a uma rampa frontal íngreme que tem alta taxa de subida em seu início e uma cauda com forte amortecimento. Podemos descrever uma típica forma de onda ressaltando:

- O início dos registros de corrente freqüentemente começa com uma corrente de longa duração que percorre o canal. Dependendo da sensibilidade dos medidores, estes registram esta corrente de longa duração ou não. Nesta dissertação estes trechos das curvas foram suprimidos de forma a eliminar os ruídos característicos do início de tempo de subida, estabelecendo como tempo inicial, o momento em que a corrente atinge um valor de 1kA.
- O tempo máximo de pico .corresponde ao valor máximo da corrente
- O tempo de início da cauda corresponde ao tempo que a onda assume a tendência de queda.

- O tempo que a corrente atinge 50% do valor de pico na cauda corresponde ao tempo de decaimento 50%.
- O tempo de inflexão corresponde ao momento que a frente de onda apresenta uma ligeira inflexão na subida.
- Estas fases ficam mais bem caracterizadas na TABELA 4.3 a seguir.

TABELA 4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPOS CARACTERÍSTICOS

Descrição	Tempo $t_{\max}$ (μs)	Tempo Início da cauda (μs)	Tempo Inflexão (μs)	Tempo de decaimento 50% (μs)
Berger	13	16	-	112
Torre T1	18	> 50	12,5	125
Torre T2	12,5	> 50	10	100
EC	25	75	18,5	74
EC(Lacerda)	22	75	10	88

Os tempos que caracterizam a forma da onda de todas as torres são diferentes, Apesar disto, os tempos da EC estão próximos dos tempos dos demais. Isto mostra que ainda que a EC esteja localizada em uma região geograficamente diferente e considerando que os outros fatores tais como condições meteorológicas e climáticas sejam diferentes, as formas de onda obtidas nos registros guardam semelhanças entre si.

As curvas de corrente das descargas subsequentes apresentam uma forma de onda semelhante à descarga de retorno, porem possuem uma subida mais abrupta e mais íngreme, ou seja, atingem o pico em um intervalo de tempo muito menor do que as descargas de retorno. Este tempo está na ordem de 1 a 5 milionésimos de segundos contra um tempo aproximadamente de 12 a 25 milionésimos de segundo para a descarga de retorno.

4.6 - Relâmpagos Positivos

O relâmpago positivo especial de junção, é caracterizado por seu longo tempo de duração e elevada amplitude de corrente de descarga, chegando a centenas de milésimos de segundo e a 300kA de amplitude respectivamente. Por não apresentarem as mesmas regularidades das curvas por nós analisadas, tais como: aspecto da frente de onda e da forma de onda, tempo de crista, tempo de decaimento, estes relâmpagos não se enquadram nas características dos relâmpagos descendentes e ascendentes. Ao propor o seu mecanismo de formação como relâmpago positivo especial de junção (REJ), nós consideramos como uma hipótese, já que seu comportamento lembra a formação de pelo menos dois relâmpagos que ocorrem independentemente um do outro durante seus estágios iniciais. Um ascendente positivo cujo líder é carregado com cargas negativas que parte da torre com destino a um centro de cargas positivas da nuvem e um outro líder descendente positivo, carregado com cargas positivas que parte da nuvem com destino a um ponto no solo. Estes líderes se encontram em algum ponto entre o solo e a nuvem, produzindo uma descarga de alta intensidade com corrente fluindo para o solo, caracterizada por uma amplitude elevada gerando o evento que sugerimos seja considerado como relâmpago positivo especial de junção (REJ). Esta classe de relâmpago, cuja nomenclatura é proposta por nós, deve ser avaliada com mais dados e medições em futuras pesquisas, uma vez que ocorre com frequência em torres, tendo sido identificado por Berger e registrados também nas estações de pesquisa do Cachimbo e do Japão.

Assim, os relâmpagos positivos que ocorrem no inverno com tanta frequência no Japão, são na verdade em sua grande maioria, relâmpagos positivos especiais de junção e não relâmpagos positivos descendentes.

4.7 – Sugestões para Próximas Pesquisas

1 – Complementar estes estudos com mais dados obtidos junto as estações de pesquisas do Morro do Cachimbo e do Monte de San Salvatore: na EC considerar

os dados referentes aos anos recentes após 1998; na ESS recuperar o máximo possível dos dados registrados nos 28 anos de pesquisa.

2 – Analisar os dados da ESS considerando as três fases de obtenção de dados para comparar os resultados de relâmpagos registrados na torre T1 inicialmente de madeira e depois em estrutura metálica e em seguida comparar as diferentes torres entre si ou seja: torre de madeira com a segunda torre metálica e torre metálica substituindo a de madeira; depois torres metálicas em suas diversas fases.

3 - Elaborar curvas médias com tempo inicial correspondendo a 90% do valor de pico das curvas individuais para comparar com as obtidas nesta dissertação que foram traçadas no tempo inicial em aproximadamente 1kA.

4 – Com base em uma maior quantidade de dados, pesquisar parâmetros que possam explicar o mecanismo dos relâmpagos positivos de junção. Nos dados referentes a ESS constam um total de aproximadamente 48 relâmpagos deste tipo que podem ter sido registrados com fotografias e curvas.

5 – Envolver nestes estudos aspectos referentes a radiação nas diversas bandas de frequência dos relâmpagos em torres para analisar o comportamento dos relâmpagos positivos para comparar com os negativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – (Associação Brasileira de Normas Técnicas) - **NBR 6936 – Técnicas e ensaios de alta tensão** – Rio de Janeiro - Nov. 1981.
- ABNT – (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 6937 – Procedimentos, Dispositivos de medição** – Rio de Janeiro - Nov. 1981.
- ABNT – (Associação Brasileira de Normas Técnicas) **NBR 6938 - Guia de aplicação para dispositivos de medição** – Nov. 1981
- Berger, K. Novel observations on lightning discharges: results of research on Mount San Salvatore. **Journal of the Franklin Institute**, v. 283, p. 480-525, Junho 1967.
- Berger, K.; Anderson, R. B.; Kroninger, H. Parameters of lightning flashes. **Electra**, v. 41, p. 23-37, 1975.
- Berger, K –. The Earth Flash – LIGHTNING – In: Golde, R.H. ed. **Physics of lightning** – Edited by R. H. Golde – Academic Press - London - 1975.
- Borovsky, J.E. An electrodynamics description of lightning returns strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. D2, p. 2697-2726, Feb. 1995.
- Chang, J.; Beuthe, T.G.; Seto, L.; Duft, A. Hayashi, N.; Chisholm, W.; Janischewskyj, W. An investigation of the possible relationships between thundercloud electric fields and the lightning parameters for tall structures. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13.197-13.205, Sep. 1989.
- Chang, H. C.; Inan, U. S. Lightning-induced electron precipitation from the magnetosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. A2, p. 1531-1541, Feb. 1985.

- Diels, Jean Claude; Bernstein, Ralph; Stahlkopf, Karl E; Zhao, Xin Miao – Lightning Control with Lasers – **Scientific American** – Aug. 1997.
- Diniz, J.H; Carvalho, A.M; Soares Filho, J.J. **Parâmetros de descargas atmosféricas; resultados de nove anos de pesquisa na Estação do Cachimbo período 1985-1994.** Belo Horizonte: CEMIG, 1995. (CEMIG nº 02.110 ST/DN1-001).
- Eriksson, A. J. **The lightning ground flash - an engineering study.** Pretoria. 400 p. South Africa. (Doutorado em Engenharia) - University of Natal, Dez. 1979.
- French, J.R.; Helsdon, J.H.; Detwiler, A.G.; Smith, P.L. Microphysical and electrical evolution of a Florida thunderstorm. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D14, p.18.961-18.977, Aug. 1996.
- Garbagnati, E.; Lo Piparo, G. B. Stazione sperimentale per il rilievo delle caratteristiche dei fulmini. **L'Elettrotecnica**, v. 57, n. 7, 1970.
- Goto, Y; Narita, K.I. Electrical characteristics of winter lightning – **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, vol. 57 no 5 p 449-458, 1994.
- Kasemir, H.W. Current budget of the atmospheric electric global circuit. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D5, p. 10.701-10.708, May, 1994.
- Hagenghuth, J. H. e G. Anderson. Lightning to the Empire State Building – **AIEEE** (pt. 3); 641-649 – 1952.
- Johnk, C.T.A. **Engineering electromagnetic fields and waves.** London: John Wiley, 1975.
- 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)** São José dos Campos (INPE-4761-TDL/349). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

- Malan, D. J.; Collens, H. Progressive Lightning III: the fine structure of lightning return strokes. **Proceedings of the Royal Society of London**, v.162: p. 175, 1937.
- Malan, D. J.; Schonland, B. F. J. Progressive lightning vii: directly-correlated photographic and electrical studies of lightning form near thunderstorms. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 191: 485-503, Dez. 1947.
- Miranda, Fernando Júnio de – **Estudo da forma de onda de campo elétrico de relâmpago**. 119p – (INPE-8173-TDI/757) Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- Mazur, V.; Ruhnke L.H.; Common physical process in natural and artificially triggered lightning. **Journal of Geophysical Research**, v.98, n.D7, p.12913-12930, July. 1993.
- Mazur, V.; Ruhnke L.H.; Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning - **Journal of Geophysical Research**, v.103, n. D18, p.23299-23308, Set. 1998.
- Mazur, V.; Ruhnke L.H.; Computer Simulation of Downward Negative Stepped Leader. **Journal of Geophysical Research**, v.105, n.D17, p.22361-22369, Sept. 2000
- McEachron, K. B. Wave shapes of successive lightning current peaks. **Electrical World**, n. 56, p. 428-431, July, 1940.
- Melo, Julio Cesar D.; Schroeder, Marco Aurélio O.; Visacro F. Sivério; - Enhancement of Morro do Cachimbo Station – LRC UFMG Brasil – In: Ground International Conference on Grounding and Earthling – Proceedings – Belo Horizonte, 2000 – **Proceeding** – Belo Horizonte: UFMG, 2000. p.11-13.
- Orville, R.E., Huffines, G. R. – Lightning ground flash measurements over contiguous United States: 1995-97 – **Annual Summary** – Texas A&M University College Station – Texas – 1998.

- Schroeder, M. A; Soares, Amilton- "Waveform decontamination of measured lightning currents" – LRC UFMG Brasil – In: Ground International Conference on Grounding and Earthling – Proceedings – Belo Horizonte, 2000 – **Proceeding** – Belo Horizonte: UFMG, 2000. p.15-18.
- Sommerfeld, A.; **Electrodynamics lectures on theoretical physics**, v. 3, Academic Press, 1964.
- Triginelli, Wagner A. C.; Carvalho, André M.; Diniz, José H.; Cherchiglia, Luis Carlos L.; Principais parâmetros aplicáveis a estudos de engenharia. – In: III SIPDA – Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas – São Paulo, 1995. – **Anais** – São Paulo : USP, 1995.
- Uman, M. A. **The lightning discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. 377p. Vol. 39 (International Geophysics Series).
- Volland, H. **Atmospheric Electrodynamics**. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- Yoshihash S; Kawasaki Z. – Verification of Bi-directional Concept Using Interferometric – In: International Conference on Atmosphere Electric – (**Anais**). Hamilton, Ontario: 1999 p. 34-37.
- Wang, D; T. Ushio A possible way to trigger lightning using a laser - **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics** v. 57 no 5 p 459-466, 1994
- Kitagawa N; Kobayashi, M. (1958) – Distribution of negative charge in the Cloud-to-ground lightning in a flash ground. **Pap Met. Geophys.** Tokyo 9, 99-105