



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.04.04-TDI

## ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE CORRENTE CONTÍNUA EM RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS

Claudia Medeiros

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 26 de agosto de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A79PQ8>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORIAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.04.04-TDI

## **ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE CORRENTE CONTÍNUA EM RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS**

Claudia Medeiros

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 26 de agosto de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A79PQ8>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Medeiros, Claudia.

M461e Estudo da ocorrência de corrente contínua em relâmpagos  
nuvem-solo negativos / Claudia Medeiros. – São José dos Cam-  
pos : INPE, 2011.

xxii+86 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.04.04-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmos-  
féricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos  
Campos, 2011.

Orientador : Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba.

1. Relâmpagos 2. Raios. 3. Descargas elétricas. 4. Corrente con-  
tínua. I. Título.

CDU 550.3:551.594.22

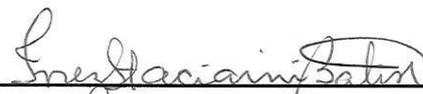
---

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dra. Inez Staciarini Batista



---

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Lara Regina Cardoso de Almeida Pinto



---

Vice-Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

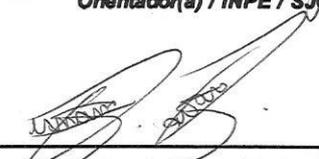
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



---

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Fernanda São Sabbas Tavares



---

Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Moacir Lacerda



---

Convidado(a) / UFMS / Campo Grande - MS

*Este trabalho foi aprovado por:*

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Claudia Medeiros**

**São José dos Campos, 26 de agosto de 2011**



*A mim, a meu filho Luís Guilherme e a meus pais, Celina Bárbara de Miranda e José Medeiros Filho.*



*“Conceda-me serenidade para aceitar as coisas que não posso modificar, coragem para modificar as que eu posso e sabedoria para distinguir umas das outras. Só por hoje”.*

*Oração da Serenidade*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, por me incentivar, apoiar e sempre acreditar que eu conseguiria.

Agradeço aos professores e doutores do INPE que me acompanharam durante esse trajeto, dando-me a oportunidade de aprender um pouco mais sobre a vida e a ciência. Ao Dr. Osmar Pinto Junior, a Dra. Iara, ao grupo ELAT e ao Dr. Marco Antonio Ferro pela infraestrutura e apoio oferecidos durante o trabalho.

Agradeço ao Dr. Gilmar Miranda pelo trabalho desenvolvido, o qual me ajudou a estruturar minha vida para que eu alcançasse meu objetivo.

Agradeço especialmente aos meus amigos: Ana Cláudia, Fernanda Tortosa, Ivan Soares e Rodrigo Varga; que sempre estiveram ao meu lado dando apoio emocional e, quando possível, também acadêmico.

Agradeço ao meu ex-chefe, Antonio Carlos de Oliveira Pereira (Pinda), por me apoiar nos primeiros passos e me ajudar a não desistir frente às dificuldades. Aos meus superiores: Renato, Baruel, Luiz Celso, Carlos Felipe e Mario Selingardi; pelo auxílio com as atividades e a tolerância para que eu conseguisse conciliar meu sonho com minha realidade. Ao meu chefe atual, Dr Pawel, e também ao Jun, Odair e Roberto pela compreensão e incentivo. Aos meus colegas de trabalho: Luiz Fernando, Rogério, Ellen, Christian, Sandro, Henrique e, principalmente, ao Paulo; pelas trocas de jornada e atividades, pelo apoio e confiança, além do incentivo.

Ao grande profissional, quem me deixou o exemplo e um sinal de que o momento e nossas escolhas são fundamentais, pois não sabemos o que teremos amanhã, Dr. Evandro Ferraz.

Aos meus colegas que cursaram as disciplinas comigo, participando de todo o processo dessa busca pessoal: Denis, Talita, Ricardo, Karlayne. Aos colegas que permaneceram nessa busca e continuam ao meu lado: Laysa, Angela, Vania, Henrique, Hernan, Paulo Bonzato, Paulo, Juliano, Carlos,

Rafael, Caitano, Marcos, Fabio Egito, Arian. Aos alunos de iniciação científica: Geraldo, Mayara, Luís, Raphael, Jeferson e Shailine; pelo trabalho executado sem o qual este estudo seria impossível de ser concretizado a tempo.

Agradeço à Carina por trabalhar nas noites de Sábado e Domingo, pelas conversas e diversões e por todo seu dinamismo. Ao Leandro Zanella por horas de discussão e ideias, pelas confidências e pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço ao Clayton pela doação, pelo incentivo, paciência e esforço para tolerar minhas horas de estudo, de impaciência e de ausência.

Agradeço a meu filho Luís Guilherme por existir em minha vida, ser tão compreensivo e motivador; por me olhar com admiração e doar um pouco de seu tempo para que eu pudesse realizar este trabalho.

Agradeço a meus pais por tudo o que eu consegui. Vocês foram a base do meu Ser, pois nunca me negaram ajuda e sempre acreditaram em mim; ensinaram-me o que é responsabilidade, permitiram-me sonhar e correr atrás desse sonho.

## RESUMO

No presente trabalho estudamos a presença de corrente contínua em raios negativos. O banco de dados utilizado nesse estudo é o maior de que se tem conhecimento até o momento. As técnicas de observação utilizadas - campo elétrico e vídeos de alta resolução temporal - ampliaram a capacidade de análise da corrente contínua presente em raios. Para este estudo foram selecionados 971 raios ocorridos entre os anos de 2003 e 2011. Analisamos a ocorrência de: corrente contínua, sua duração, sua relação com o intervalo de tempo desde a descarga de retorno anterior, o pico de corrente da descarga de retorno que a contém, a multiplicidade do raio, a influência dos novos canais, a ordem das descargas em que ela ocorre e a eficiência da detecção destas pela rede brasileira de detecção de raios (BrasilDAT). Este trabalho apresenta ainda uma metodologia para o cálculo da carga elétrica transferida ao longo de uma corrente contínua através de um sensor de campo elétrico lento, e de um programa desenvolvido para a correção da forma de onda obtida através dele. Esta metodologia foi aplicada a dez casos selecionados de corrente contínua longa. A análise dos resultados permitiu entender melhor algumas das condições que favorecem a ocorrência das correntes contínuas: intervalo anterior entre descargas de retorno com duração menor, pico de corrente estimado da descarga que possuem intensidade menor e sua maior incidência em descargas que ocorrem no mesmo canal. Observou-se que uma corrente contínua longa, frequentemente, encerra o raio. Quando o raio não é encerrado, novas descargas ocorrem no mesmo canal, indicando que a corrente contínua longa pode ser um fator importante no estabelecimento de um canal condutor da nuvem ao solo. Raios contendo corrente contínua de intensidade média menor costumam possuir maior multiplicidade. Já os raios que possuem maiores intensidades de corrente contínua são menos múltiplos, pois esta costuma encerrar o raio. Observou-se que descargas com corrente de longa duração são menos detectadas por sistemas de localização de relâmpagos do que os casos com curta duração ou em que não houve o desenvolvimento de corrente contínua.



# **PRESENCE OF CONTINUING CURRENT IN NEGATIVE CLOUD-TO-GROUND FLASHES**

## **ABSTRACT**

In this paper we study the presence of continuing currents negative flashes. The database used in this study is the largest among those reported in the literature. The combined techniques of observation (electric field measurements and high resolution videos) increased the analytical capacity to discriminate the presence of continuing currents in flashes. 971 flashes that occurred between 2003 and 2011 were selected for this study. We analyzed the occurrence of continuing current, its duration and its relation to the previous interstroke time interval, the peak current of the discharge that contains it, the flash multiplicity, the influence of new channels, the order in which the discharge occurs, and the detection efficiency of the lightning location network (BrasilDat) for flashes containing continuing current. This paper also presents the methodology used to calculate the charge transferred during the long continuing current occurrence using the slow electric field sensor and a program developed for the correction of the waveform obtained by the sensor. This methodology was applied for ten cases of long continuing current. The results allowed us to better understand the usual conditions that favor the occurrence of continuing current: a shorter interstroke interval preceding the continuing current, a lower peak current stroke initiating a continuing current and that continuing currents usually occur in a subsequent stroke which follows the same channel used by the previous strokes. The occurrence of long continuing current usually ends a flash or promotes another stroke in the same channel indicating that long continuing currents can be an important factor in establishing a channel. Long continuing current that have lower current intensity usually occurs in flashes with higher multiplicity. Long continuing current with higher current intensity usually ends the flash causing a lower multiplicity lightning flash. Strokes containing long continuing current were less detected when compared with those containing currents with shorter duration or without continuing currents.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ramificações durante a propagação do líder escalonado de um relâmpago nuvem-solo negativo. ....	6
Figura 2.2- Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	7
Figura 2.3 – Sequência temporal de alguns dos processos envolvidos na ocorrência de um relâmpago nuvem-solo negativo. ....	10
Figura 2.4 - Variação do campo elétrico rápido do líder escalonado precedendo uma DR de um raio NS- .....	11
Figura 2.5 - Curva característica de um raio negativo obtida pela antena rápida e lenta.. ....	12
Figura 2.6 - Variação da luminosidade do canal de um relâmpago NS+, devido à corrente contínua e suas componentes M, que precederam à descarga de retorno. ....	13
Figura 2.7 - Propagação do líder bi-direcional. ....	15
Figura 2.8 - Seqüência de quadros de um vídeo de raio filmado com câmera de alta velocidade .....	15
Figura 2.9 - Circuito equivalente a um canal nuvem-solo de um raio.. ....	16
Figura 2.10 - Diagrama de estabilidade para o canal de um raio. ....	17
Figura 2.11 – Variação do campo elétrico obtido pela antena lenta versus tempo. ....	19
Figura 2.12 - Variação do campo elétrico rápido observado para um raio negativo. ....	20
Figura 2.13 - Trecho do campo elétrico de um raio obtido pela antena de campo rápido .....	21
Figura 3.1 - Torre de observação de raios em São José dos Campos.....	23
Figura 3.2 - Câmera HS1 e HS2 com as respectivas placas de interface com o PC. ....	26
Figura 3.3 - Localização dos pontos sobre o globo terrestre (fora de escala). ....	29
Figura 3.4 - Dados de radiossondagem para o dia 11 de fevereiro de 2011. ....	31
Figura 3.5 – Diagrama simplificado da antena de campo elétrico rápido e seu circuito amplificador. ....	32
Figura 3.6 – Representação esquemática dos equipamentos utilizados para coleta dos dados de campo elétrico gerado por descargas nuvem-solo.....	34
Figura 3.7 – Imagens do sistema de medição. (a): antena plana, integrador / amplificador, antena GPS e baterias; (b): CPU com as interfaces de sincronização e aquisição; (c) interface antena-micro. ....	34
Figura 3.8 - Foto da antena instalada no topo da torre de observações no CTA.....	35
Figura 3.9 - Curva de resposta do sensor de campo elétrico lento. ....	36
Figura 3.10 - Exemplo das formas de onda obtida durante a calibração das antenas de campo lento, para o mesmo raio.....	38
Figura 3.11 – Curva de campo elétrico lento original e sua deconvolução, obtida através do tratamento do sinal obtido, feita pelo programa deconvolecarga. ....	39
Figura 3.12 – Método das imagens para cálculo da carga a partir do campo elétrico. ....	42
Figura 4.1 - Distribuição da porcentagem de descargas seguidas de corrente contínua para raios simples e raios múltiplos, por tipo de corrente contínua.....	47
Figura 4.2 - Distribuição da duração da corrente contínua.....	49

Figura 4.3 – Distribuição da duração de corrente contínua com duração entre 3 e 40 ms, denominadas Curta(CCC) e Muito Curta (CCMC).....	50
Figura 4.4 - Distribuição da duração de CCL. ....	51
Figura 4.5 - Duração da CCL versus intervalo anterior .....	52
Figura 4.6 - Distribuição do pico de corrente das descargas de retorno em relação ao tipo de raio e a ordem em que aparecem no raio.....	53
Figura 4.7 - Pico de corrente da descarga de retorno seguida por CC versus a duração da CC.....	54
Figura 4.8 - Porcentagem de descargas seguidas por CCL em cada ordem da descarga.....	56
Figura 4.9 - Duração média da CC e Pico de corrente médio por ordem da descarga.. ..	56
Figura 4.10 -Representação esquemática da relação entre a ocorrência de uma descarga de retorno e a próxima descarga contendo CCL. ....	58
Figura 4.11 - Representação esquemática da relação entre a ocorrência de CCL e a formação de canais após a ocorrência de uma CCL.....	59
Figura 4.12 - Porcentagem de descargas seguidas por CCL para raios com diferentes multiplicidades.. ..	60
Figura 4.13 - Porcentagem de formação de novos canais para diferentes ordens da descarga.....	61
Figura 4.14 – Representação da relação entre a multiplicidade do raio com CCL e sua capacidade de estabelecer o canal ou encerrar com CCL. ....	62
Figura 4.15 - Eficiência de detecção por tipo de corrente contínua e por pico de corrente médio.....	64
Figura 4.16 - Campo elétrico rápido e lento obtido para o raio 459.....	65
Figura 4.17 - Dados de entrada do programa para o cálculo de carga e intensidade média de corrente, sendo eles: fator torre, razão V/E, distância e RC. ....	66
Figura 4.18 - Curva original em preto e curva deconvolucionada em azul, obtida pelo programa deconvolecarga. ....	66
Figura 4.19 - Quadro dos dados obtidos pelo programa .....	67
Figura 4.20 – Valor estimado da carga de acordo com a duração da CCL.....	69
Figura 4.21 – Intensidade de corrente média de acordo com a multiplicidade do raio.	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores típicos dos relâmpagos apresentados na literatura .....	9
Tabela 3.1 - Dados obtidos da calibração do sensor de campo elétrico lento. ....	36
Tabela 3.2 – Medidas de tensão elétrica obtidas para antenas em diferentes posições .....	37
Tabela 4.1 – Comparação entre estudos anteriores e o atual para quantidade de eventos analisados e quantidade de corrente contínua encontrada em cada evento.....	45
Tabela 4.2 – Estatística dos raios e descargas de retorno em relação à presença de corrente contínua em raios simples e múltiplos.....	47
Tabela 4.3 – Comparação dos dados obtidos para este estudo com relação a estudos anteriores.....	63
Tabela 4.4 – Tabela descritiva dos raios analisados.....	67
Tabela 4.5 – Resultados obtidos pelo programa deconvolecarga para os raios com CCL analisados. ....	68



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$\Delta T_1$	Variação do tempo entre intervalos
$\Delta T_{cc}$	Duração da corrente contínua
$\mu S$	Microssegundos
A	Amperes
ALDIS	<i>Austrian Lightning Detection and Information System</i>
Avi	<i>Audio Video Interleave</i>
BrasilDat	Rede Brasileira de detecção de descargas atmosféricas
C	Coulomb
CC	Corrente Contínua
CCL	Corrente Contínua Longa
CCC	Corrente Contínua Curta
CCMC	Corrente Contínua Muito Curta
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
cm	Centímetros
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
$dE/dt$	Derivada do campo elétrico em função do tempo
DR	Descarga de Retorno
ELAT	Eletricidade Atmosférica
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HS1	<i>High Speed 1</i>
HS2	<i>High Speed 2</i>
Hz	Hertz
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IMPACT	<i>IMProved Accuracy from Combined Technology</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Ip	Pico de Corrente
kA	Quiloamperes
Km	Quilômetros
kS/s	<i>Kilo Samples per Second</i> (mil amostras por segundo)
CCL	<i>Long Continuing Current</i> (Corrente Contínua Longa)
LPATS	<i>Lightning Position and Tracking System</i>
m	Metro
m/s	Metros por segundos
mA	Miliamperes
MG	Média geométrica
MHz	Megahertz
ms	Milisse segundos
MS/s	<i>Mega Samples per Second</i> (um milhão de amostras por segundo)
mV	Milivolts
NOx	Mono-Nitrogen Oxides
NS-	Relâmpago nuvem-solo negativo
°C	Graus Celsius
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
RC	Constante de tempo resistor-capacitor
s	Segundos
SCC	<i>Short Continuing Current</i> (Corrente Contínua Curta)
SP	São Paulo
TLE	Eventos Luminosos Transientes
Txt	Extensão de arquivo de texto
V/m	Volt por metro
VSCC	<i>Very Short Continuing Current</i> (Corrente Contínua Muito Curta)

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Este trabalho.....	3
2	REVISÃO CONCEITUAL.....	5
2.1.	Relâmpagos nuvem-solo negativos.....	5
2.1.1.	Formas de onda obtidas durante a descarga de um relâmpago nuvem-solo	11
2.2.	Corrente contínua em raios negativos.....	14
2.2.1.	Teoria sobre corrente contínua.....	14
2.2.2.	Estudos anteriores.....	17
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	23
3.1.	Matriz Padrão de dados.....	24
3.2.	Câmeras rápidas HS1 e HS2.....	25
3.3.	Rede BrasilDAT.....	27
3.4.	Método de cálculo da distância entre a descarga de retorno e os sensores.....	28
3.5.	Cálculo da altura estimada do centro de carga na nuvem.....	30
3.6.	Sensor de campo elétrico rápido.....	32
3.7.	Sensor de campo elétrico lento.....	35
3.7.1.	Influência da torre na medição do campo elétrico lento.....	37
3.7.2.	Programa <i>deconvolecarga</i> .....	40
3.8.	Modelo eletrostático utilizado para o cálculo de carga e corrente média de eventos de corrente contínua.....	41
4	RESULTADOS GERAIS.....	45
4.1.	Características gerais.....	46
4.2.	Duração da Corrente Contínua.....	49
4.3.	Relação entre a descarga com CCL e a duração do intervalo que a precede. .	51
4.4.	Relação entre o pico da corrente da descarga de retorno e a duração da corrente contínua.....	52
4.5.	Relação entre a ocorrência de CCL e a ordem das descargas.....	55
4.6.	Relação entre a ocorrência da CCL e novos canais.....	57
4.7.	Relação entre a ocorrência da CCL e a multiplicidade do raio.....	59
4.8.	CCL finalizando o raio.....	62
4.9.	Ocorrência de mais de uma CCL por raio.....	63

4.10.	Relação entre a CCL e a eficiência de detecção .....	64
4.11.	Carga transferida por CCL.....	65
5	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
	Apendice A – Programa fonte <i>deconvolecarga</i> .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

Relâmpagos são descargas de alta corrente elétrica, que ocorrem na atmosfera da Terra e de outros planetas com comprimentos típicos da ordem de quilômetros. A maioria dessas descargas ocorre no interior de nuvens de tempestades do tipo cúmulo-nimbos. Durante a evolução dessas nuvens de grande amplitude vertical ocorrem intensas colisões entre cristais de gelo e gotículas de água super resfriadas. As razões para ocorrerem os relâmpagos, embora ainda desconhecidas, estão associadas à eletrificação das partículas que compõem a nuvem e, portanto, à microfísica do gelo (KRIDER, 1986).

A nuvem de tempestade tende a se organizar com uma estrutura tripolar, podendo ser representada simplesmente pelos dois centros de carga, onde as regiões de carga elétrica líquida positiva e negativa estão distribuídas dentro da nuvem, separadas por uma distância da ordem de centenas de metros a quilômetros (WILLIAMS, 2006). A intensificação do campo elétrico entre esses centros de carga dá origem à quebra de rigidez local e à formação de uma estrutura semelhante a um tronco (*tail*) de dupla terminação, que se propaga em direção aos centros de carga opostos (MAZUR, 2002), conhecido como líder.

O líder pode descer até o solo promovendo uma descarga elétrica entre nuvem e solo, conhecida como relâmpago nuvem-solo ou, simplesmente, raio. Para o líder que possui em sua terminação mais próxima ao solo um saldo de cargas elétricas negativo, o raio é denominado negativo. Este, quando atingir o solo, transferirá a carga negativa para o solo. Quando o líder possui em sua terminação mais próxima ao solo, saldo de cargas elétricas positivo é denominado raio positivo e, ao tocar o solo, absorverá a carga negativa proveniente do seu contato com o solo, de forma a neutralizar a carga (PINTO JR. et. al., 2009).

Os raios correspondem a cerca de 30% da ocorrência total de relâmpagos (PINTO JR., et al., 2009). No Brasil, são responsáveis por dezenas de mortes de pessoas por ano, sendo o Estado de São Paulo a região com maior incidência de fatalidades (PINTO et al., 2010). Além disso, os raios causam danos à rede elétrica, incêndios florestais, danos a estrutura de aviões e contribuem para a produção de NO<sub>x</sub>, que é um dos gases principais para o aumento do efeito estufa e produção de ozônio na estratosfera. Os raios também apresentam evidências de estarem associados a fenômenos que ocorrem na média atmosfera como os Eventos Luminosos Transientes (TLE's) mais conhecidos como sprites (SÃO SABBAS, 1999) .

Do início do desenvolvimento do raio até o seu encerramento, ocorrem algumas etapas bem definidas, a começar pela quebra de rigidez local dentro da nuvem, seguida pela propagação do líder, a descarga conectante e a descarga de retorno (RAKOV e UMAN, 2003). Após o estabelecimento do canal entre a nuvem e o solo, também pode ocorrer a presença de corrente contínua e componente-M.

Os raios transferem grande quantidade de cargas elétricas ao solo (FERRAZ, 2009). As três principais formas de transferência de carga entre a nuvem e o solo são: descarga de retorno, componentes M e a corrente contínua (RAKOV e UMAN, 2003).

Conforme estudo feito por Fisher (1991), a corrente contínua em relâmpagos é responsável pelos maiores danos associados a efeitos térmicos, como: buracos provocados por aquecimento na estrutura de aviões (PLUMMER, 2005), derretimento de cabos OPGW (GODA et. al., 2004), incêndios florestais (FUQUAY, 1972) e, mais recentemente, observou-se que está associada à produção de NO<sub>x</sub> (COORAY et al., 2009).

## 1.1. Este trabalho

O objetivo do presente trabalho é apresentar um estudo sobre a presença de corrente contínua em raios negativo e suas características como: (a) ocorrência, (b) duração, (c) relação com intervalo entre as descargas, (d) relação com a ordem das descargas, (e) duração e intensidade do pico de corrente da descarga de retorno que a contem, (f) relação com a multiplicidade de canais. Além disso, comparar os resultados com estudos anteriores, avaliar a eficiência de detecção para descargas seguidas por corrente contínua e estimar a quantidade de carga transferida e intensidade durante a ocorrência de corrente contínua longa.

O banco de dados utilizado no estudo de corrente contínua, resultado de campanhas dos anos anteriores, é o maior de que se tem conhecimento. Visto isso, foi necessário criar uma matriz de dados, aqui chamada de Matriz Padrão que armazena todos os registros de forma a se obter com facilidade os dados que se deseja.

Um programa foi desenvolvido para este trabalho, chamado *Deconvolecarga*, que visa simplificar partes do processo do cálculo de cargas elétricas transferidas no processo de corrente contínua.

A dissertação apresenta uma breve revisão literária sobre as características dos raios negativos e a corrente contínua, seguida pela descrição da instrumentação e metodologia utilizadas para a análise dos dados. Por fim serão apresentados os resultados encontrados, as conclusões obtidas e as sugestões para estudos posteriores.



## 2 REVISÃO CONCEITUAL

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os conceitos que são utilizados como referência para este estudo. A abordagem principal será feita de forma a descrever as características principais dos relâmpagos nuvem-solo negativos e da corrente contínua.

### 2.1. Relâmpagos nuvem-solo negativos

Relâmpagos nuvem-solo negativos, ou simplesmente raios negativos (NS-) são descargas elétricas entre a nuvem e o solo que tem origem numa região de carga negativa na nuvem. Eles correspondem a mais que 90% das ocorrências de relâmpagos nuvem-solo no mundo (RAKOV e UMAN, 2003; PINTO JR. et al., 2009).

O relâmpago inicia dentro da nuvem, com a quebra de rigidez preliminar (*preliminary breakdown*), um processo ainda não compreendido integralmente, mas que apresenta características de possuir várias descargas fracas que ocorrem entre dois centros com grande concentração de cargas negativas e positivas (KRIDER, 1986). Essas descargas emitem radiação eletromagnética com máxima intensidade na faixa de frequência de centenas de quilohertz (kHz) a centenas de megahertz (MHz) (PINTO JR. et al., 2009).

Após a quebra de rigidez é possível observar ramificações que se propagam em direção ao solo que é chamado de líder escalonado (*stepped-leader*). Essas ramificações (*branches*) podem ser visíveis a olho nu e desenvolvem-se a passos de cerca de 50 metros, com velocidade da ordem de  $10^5$  metros por segundo (CAMPOS et al., 2009). A Figura 2.1 mostra as ramificações de um relâmpago nuvem-solo negativo durante sua propagação.

As ramificações de um raio negativo possuem uma concentração de cargas negativas na sua terminação (*leader tip*) mais próxima ao solo. Devido à diferença de potencial da ordem de  $10^6$  volts, o líder escalonado induz, em

qualquer superfície ou estrutura próxima, um acúmulo de cargas que pode dar origem a líderes ascendentes positivos, denominado líder conectante (*upward connecting leaders*), promovendo uma descarga conectante (*connecting discharge*) (KRIDER, 1986).

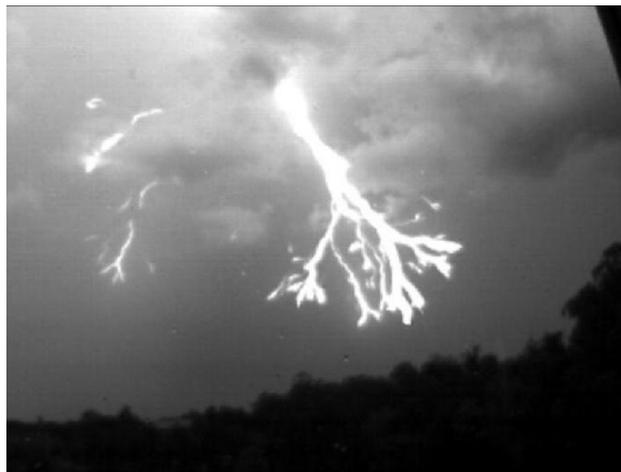


Figura 2.1 - Ramificações durante a propagação do líder escalonado de um relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: Banco de dados ELAT (2010).

Embora apresente diversas ramificações, é mais comum que somente uma dessas ramificações atinja o solo. O encontro entre o líder escalonado e o líder conectante faz com que as cargas acumuladas ao longo do canal de propagação do líder escalonado, se movam em direção ao solo na forma de uma intensa descarga, seguida de um pulso de luminosidade ao longo do canal principal, se propagando a partir do solo em direção a nuvem.

Esta descarga consiste em uma onda intensa de ionização que começa no solo e se propaga pelo canal do líder com cerca de um terço da velocidade da luz é conhecida como descarga de retorno (*return stroke*). A corrente envolvida nessa transferência de carga é da ordem de alguns dezenas a centenas de milhares de ampéres.

O pico de potência dissipada pela descarga de retorno (DR) é da ordem de 100 milhões de watts por metro do canal (GUO et al., 1982) e a temperatura chega a atingir 30.000 K (ORVILLE, 1968). Uma onda de choque é produzida pela expansão rápida do canal devido a alta pressão e é conhecida como trovão (RAKOV e UMAN, 2003). A Figura 2.2 mostra as etapas envolvidas na ocorrência do raio.

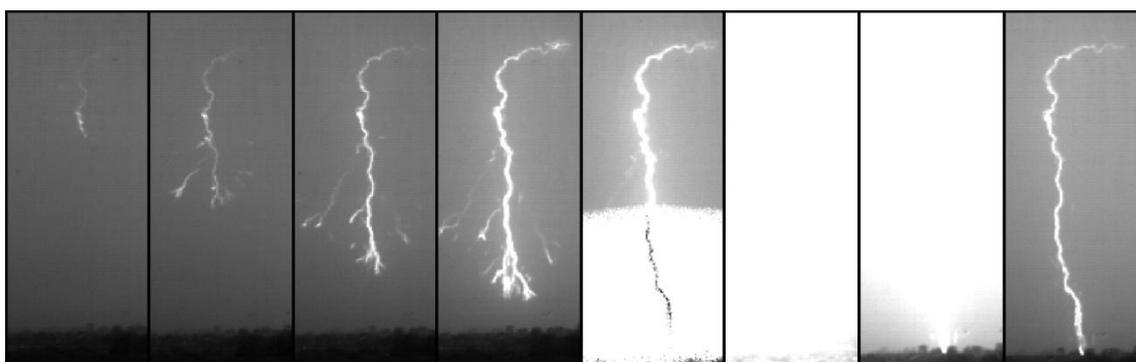


Figura 2.2- Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo. Nos primeiros quadros observa-se a propagação do líder e suas ramificações aproximando do solo até o estabelecimento do contato. Imediatamente após o contato, observa-se a luminosidade intensa da descarga de retorno, que satura a imagem, e a formação do canal nuvem-solo.

Fonte: Banco de dados ELAT(2010)

Após estabelecer o canal nuvem-solo, conforme mostrado na Figura 2.2, o raio negativo pode estabelecer um arco quase-estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo, mantendo um fluxo de corrente elétrica. Os valores típicos dessa corrente são da ordem de dezenas a algumas centenas de ampéres com duração de dezenas até algumas centenas de milissegundos (RAKOV e UMAN, 2003). Essa corrente é denominada corrente contínua (*continuing current*) (HAGENGUTH et al., 1952), e será descrita mais detalhadamente no tópico 2.2 desse capítulo.

A corrente contínua pode ser observada tanto pelas medidas de campo elétrico quanto pelas imagens obtidas por uma câmera de alta resolução temporal. Com o sensor de campo elétrico, observa-se que após a descarga de retorno,

a sua curva de resposta permanece sofrendo variações sem retornar ao seu estado inicial. Já a câmera rápida registra em vídeo a persistência da luminosidade no canal indicando a presença de corrente contínua.

Muitas vezes, durante a corrente contínua, podemos observar em vídeo e na curva do sensor de campo elétrico, intensificações da luminosidade associadas a variações rápidas de campo elétrico produzidas por flutuações de alta intensidade de corrente e de curta duração. Essas variações são conhecidas como componentes-M (*M-components*) e são responsáveis por transferir considerável quantidade de carga para o solo, além da carga já transferida pela descarga de retorno e pela corrente contínua, podendo atingir correntes elétricas da ordem de várias centenas ou até alguns milhares de ampères (THOTTAPPILLIL et al., 1995).

Em cerca de 80% das ocorrências de raios negativos, quando é encerrado o canal (*cutoff*) estabelecido pela descarga principal, ocorrem novas descargas de retorno. Essas descargas são iniciadas por um novo líder que, por sua vez, pode atravessar o canal previamente ionizado pelo líder escalonado e, por se propagar de forma contínua, é conhecido como líder contínuo (*dart leader*). O líder pode também atravessar parte desse canal previamente ionizado e desenvolver um novo canal em seguida, comportando-se como um líder contínuo-escalonado (*dart-stepped leader*). Essas descargas são conhecidas como descargas de retorno subsequente (*subsequent stroke*).

O raio com somente uma descarga é chamado raio simples (*single stroke flash*) e o raio com mais de uma descarga é chamado raio múltiplo (*multiple stroke flash*). A multiplicidade de um raio é a quantidade de descargas de retorno que ocorrem após a descarga principal em um intervalo de tempo observável em vídeo (até 2 segundos) ou registradas por sensores campo elétrico. A multiplicidade em geral está relacionada com a ocorrência das descargas subsequentes não levando em conta se elas ocorreram em um mesmo canal ou não.

A Tabela 2.1 apresenta um sumário dos valores característicos dos raios negativos em cada uma de suas etapas e a Figura 2.3 mostra uma sequência temporal para os alguns dos processos que ocorrem durante a descarga de um raio.

Tabela 2.1 - Valores típicos dos relâmpagos apresentados na literatura

CARACTERÍSTICA	VALORES TÍPICOS
<b>Líder Escalonado</b>	
Comprimento dos passos	50 m
Intervalo de tempo entre os passos	20 - 50 $\mu$ s
Velocidade média de propagação	$2 \cdot 10^5$ m/s
Corrente	100 A
Duração total	35 ms
<b>Descarga de Retorno</b>	
Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^8$ m/s
Pico de corrente	30 kA
Comprimento do canal	5 km
Duração	70 $\mu$ s
<b>Líder Contínuo</b>	
Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^7$ m/s
Corrente	1 kA
Duração total	1 – 2 ms
<b>Descarga Subseqüente</b>	
Corrente	10 – 15 kA
Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^8$ m/s
<b>Corrente Contínua</b>	
Duração	4 a 500 ms (*)
Intensidade	10 a 1000 A
<b>Características Gerais de um Raio</b>	
Diâmetro do canal	1-2 cm
Número médio de descargas de retorno	3,8(*)
Intervalo médio entre as descargas	61 ms(*)
Duração média total	163 ms(*)
Carga média total transferida	20 C

Fonte: (RAKOV e UMAN, 2003) e \*(SABA et al., 2006a)

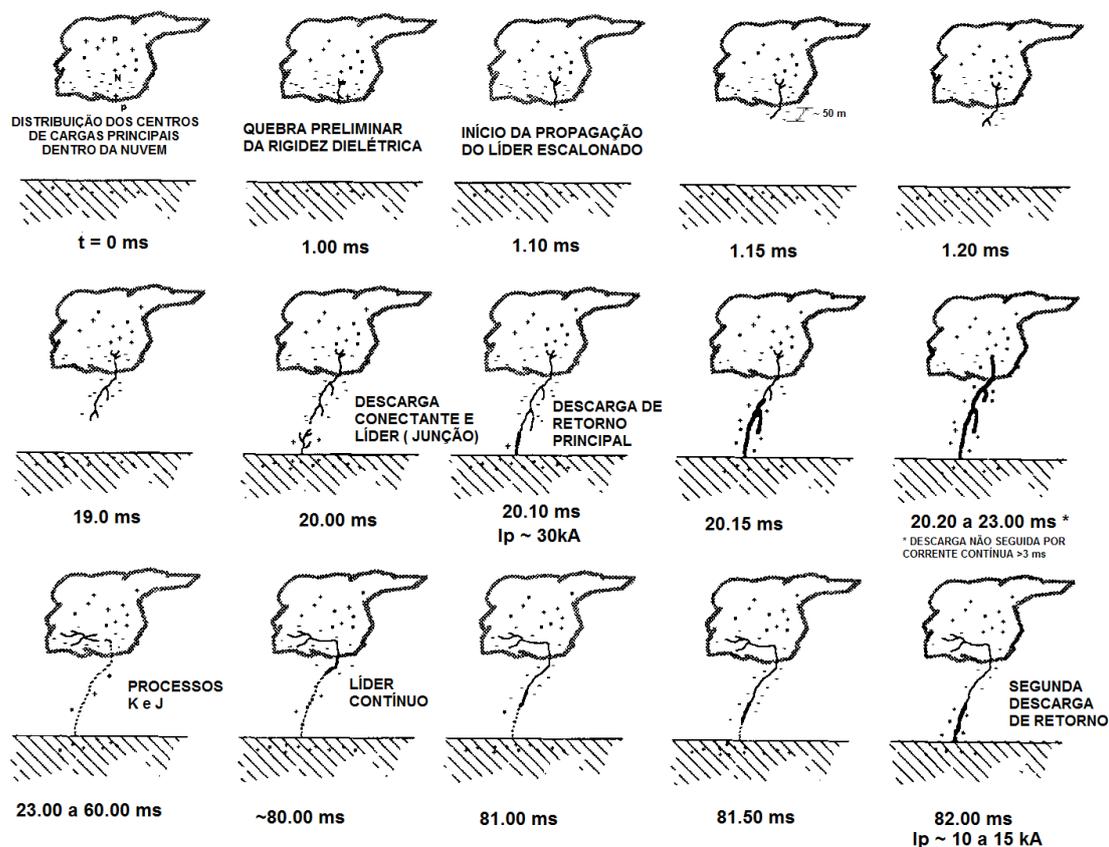


Figura 2.3 – Sequência temporal de alguns dos processos envolvidos na ocorrência de um relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: Adaptada de Uman (1987)

Outros eventos intermediários às descargas podem ser observados no campo elétrico durante o relâmpago, como é o caso dos processos J e descargas K que ocorrem dentro da nuvem. Os processos de junção J são variações da escala de dezenas de milissegundos e podem ser de ambas as polaridades. As descargas K têm duração menor e estão associadas à propagação do líder de retorno (*recoil leader*) que retrai a propagação do líder positivo dentro da nuvem (Saba et al., 2008).

### 2.1.1. Formas de onda obtidas durante a descarga de um relâmpago nuvem-solo

A obtenção de formas de onda de campo eletromagnético distintas possibilita, através de modelos matemáticos ou de instrumentação adequada, a realização de estudos dos processos que ocorrem durante o relâmpago (KRIDER, 1986). Este estudo utiliza medidas de intensidade da componente vertical do campo elétrico através de antenas (FERRAZ, 2009; SCHULZ et al., 2005) e imagens de vídeo obtidas por câmeras de alta resolução temporal (BALLAROTTI et al., 2005).

Os raios negativos iniciam-se com uma seqüência de pulsos na escala de microssegundos, que caracterizam a quebra da rigidez dielétrica (RAKOV, 1999). A quebra da rigidez dielétrica é seguida por um sinal característico da propagação do líder até a ocorrência da descarga de retorno, conforme mostra a Figura 2.4.

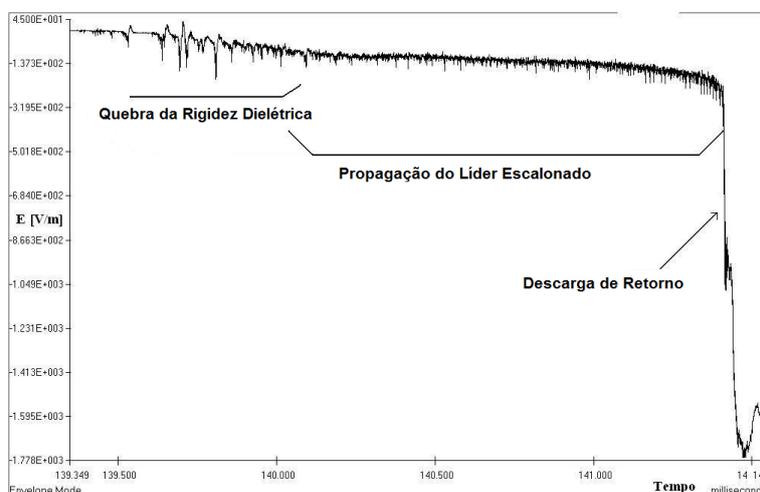


Figura 2.4 - Variação do campo elétrico rápido do líder escalonado precedendo uma DR de um raio NS- registrado em 23/3/2005, a 26 km de distância da antena em São José dos Campos - SP.

Fonte: Adaptada de Ferraz (2009)

A descarga de retorno é caracterizada por um pulso de alta intensidade (RAKOV, 1999), conforme se observa na Figura 2.5. Duas antenas de campo elétrico, denominadas antena rápida e antena lenta, e que serão descritas com mais detalhes no capítulo 3, mediram os sinais emitidos pelas descargas do raio, que também foi filmado. Esse raio aconteceu em São José dos Campos no dia 31 de janeiro de 2011 e possuía sete descargas de retorno e uma corrente contínua curta seguindo a sexta descarga de retorno.

As descargas de retorno (DR) estão sinalizadas em ordem de acordo com a sequência temporal em que ocorrem. A associação entre os campos medidos pela antena rápida e lenta mostra compatibilidade entre os pulsos de sinais medidos e descrevem de forma distinta os mesmos processos envolvidos na descarga.

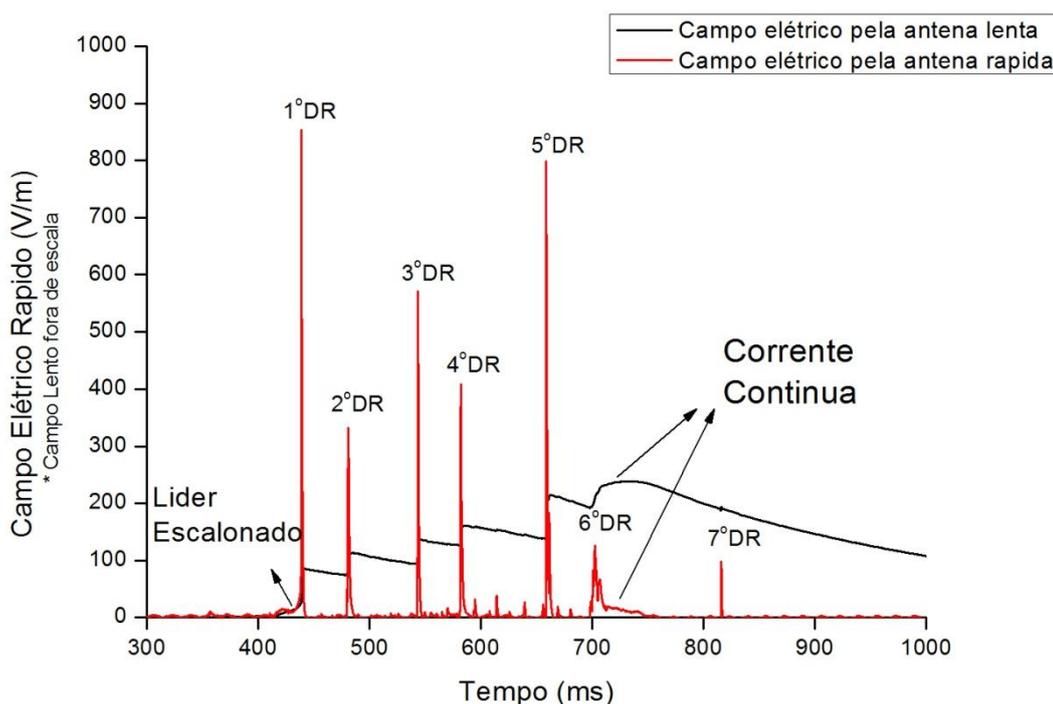


Figura 2.5 - Curva característica de um raio negativo obtida pela antena rápida e lenta. Podem-se observar as descargas de retorno, o trecho de propagação do líder escalonado e a presença de corrente contínua.

Fonte: Banco de dados do ELAT (2011)

Embora não utilizada para o presente trabalho, outra perspectiva do estudo dos raios também pode ser obtida através da curva gerada pela luminosidade apresentada no vídeo. A análise do brilho e da corrente em relâmpagos solo-nuvem induzidos em torres (DIENDORFER et. al., 2003) mostram uma estreita correlação entre a luminosidade apresentada pelas imagens de vídeo e as medidas diretas de corrente elétrica para uma mesma descarga. Isso ocorre devido ao aumento da intensidade da corrente contínua, observada em vídeo, estar associado à intensificação do brilho do canal observado.

Em relâmpagos nuvem-solo naturais é possível obter uma estimativa da variação da corrente no canal destas descargas a partir da variação do valor dos *pixels* das imagens obtidas pela câmera de alta resolução temporal (CAMPOS et al., 2009). É possível assim observar as componentes-M que ocorrem durante a corrente contínua, utilizando apenas dados fornecidos pelas câmeras, conforme exemplificado na Figura 2.6.

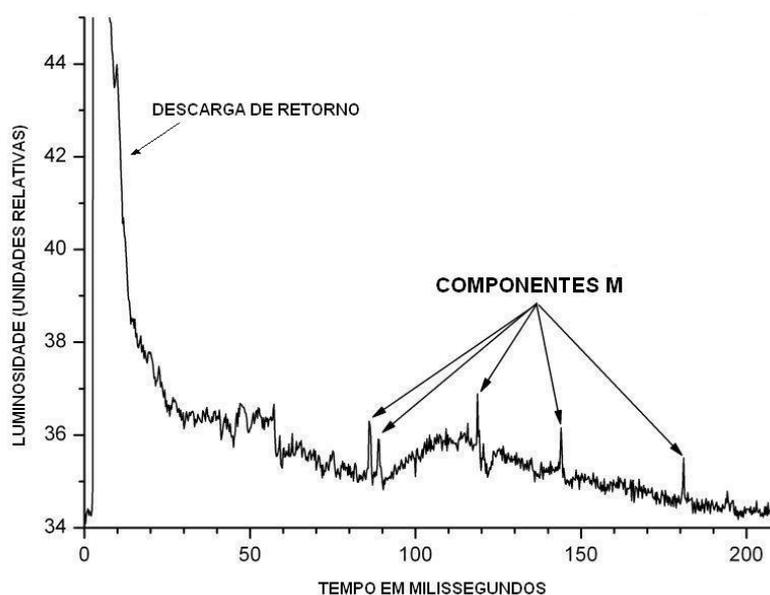


Figura 2.6 - Variação da luminosidade do canal de um relâmpago NS+, devido à corrente contínua e suas componentes M, que precederam à descarga de retorno.

Fonte: Adaptada de Campos et. al.(2009)

## **2.2. Corrente contínua em raios negativos**

### **2.2.1. Teoria sobre corrente contínua**

De acordo com a teoria clássica, a presença de corrente contínua está ligada a capacidade de drenar cargas de regiões dentro da nuvem. Acredita-se que a distinção entre a corrente da descarga de retorno e a corrente contínua está relacionada com a fonte da carga transferida por esses dois processos. A descarga de retorno remove cargas depositadas ao longo do canal pelo líder que precede a descarga de retorno, enquanto que a carga removida pela corrente contínua parece estar associada com a drenagem de um novo centro de carga em regiões dentro da nuvem (RAKOV e UMAN, 2003). O encerramento da corrente contínua segundo a teoria clássica se dá devido ao esgotamento da carga disponível (RAKOV e UMAN, 1990).

Outra teoria que vem sendo apresentada com crescente aceitação na comunidade científica é a teoria do líder bidirecional, onde está presente o conceito de carga líquida no canal igual a zero durante a propagação do líder (MAZUR, 2002).

A teoria do líder bidirecional tem como entendimento que a corrente contínua é resultado da mudança de distribuição das cargas no canal do líder durante seu desenvolvimento dentro da nuvem (MAZUR, 2002). Dessa forma a corrente contínua seria inseparável do processo de propagação do líder independentemente de sua polaridade. A Figura 2.7 mostra como seria a propagação do líder antes da descarga de retorno (instantes  $t_1$  e  $t_2$ ).

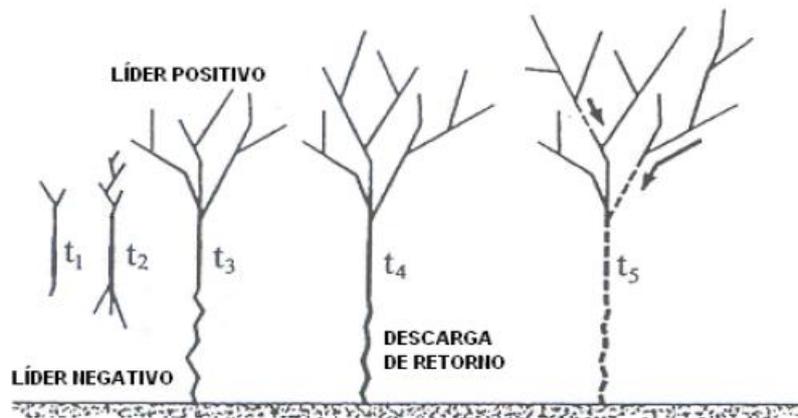


Figura 2.7 - Propagação do líder bi-direcional.

Fonte: Adaptada de Mazur (2002)

A corrente contínua, seria então uma indicação da propagação do líder dentro da nuvem e estaria presente em todas as descargas com diferentes durações (MAZUR, 2002). A figura 2.8 mostra imagens de vídeo de alta resolução temporal que ilustram o prolongamento do canal do raio pelo líder dentro da nuvem (seta vermelha) ao longo das descargas subseqüentes.

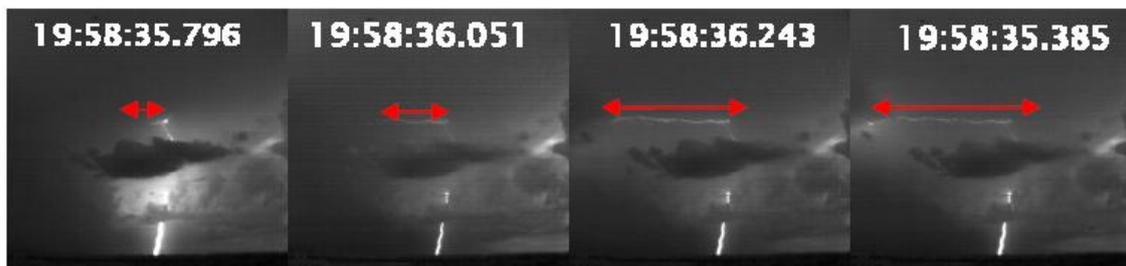


Figura 2.8 - Seqüência de quadros de um vídeo de raio filmado com câmera de alta velocidade no dia 13/02/2008. As imagens representam as descargas de ordem 7, 11, 14 e 16. As linhas vermelhas indicam o crescente desenvolvimento do canal.

Fonte: Adaptada de Saraiva (2010)

Heckman (1992) analisou a estabilidade de corrente em canais de raios. Segundo ele, a extensão do canal em um campo elétrico externo funcionaria como uma fonte quase estacionária de corrente.

A figura 2.9 mostra um circuito equivalente que representa a situação de um raio contendo um canal nuvem-solo. A fonte de corrente se encontra paralela à capacitância por unidade de comprimento  $C$  do canal e pela resistência não linear por unidade de comprimento  $R$  do canal. Segundo o autor, o canal perde energia por processos de condução, convecção turbulenta e radiação, sendo que todos estes processos de perda de energia são agrupados em uma constante de tempo  $\tau$  obtida empiricamente em laboratórios.

Enquanto a propagação do líder ocorre, cargas elétricas fluem pelo canal, mantendo uma corrente elétrica capaz ou não de sustentar o canal. Correntes contínuas longas somente serão possíveis se  $\tau > RC$ . Se  $\tau < RC$ , o canal torna-se instável e assim há interrupção da corrente (cutoff) e a possibilidade de ocorrência de descargas subseqüentes.

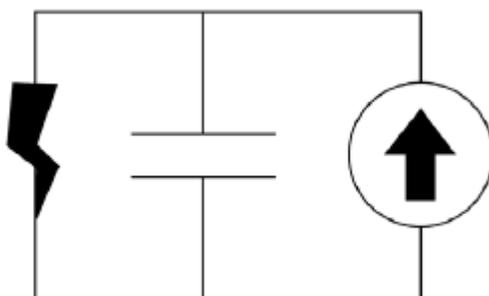


Figura 2.9 - Circuito equivalente a um canal nuvem-solo de um raio. O contínuo prolongamento do canal do raio dentro da nuvem carregada constitui a fonte de corrente; a capacitância do canal é representada pelo símbolo de capacitor, que juntos seriam responsável por manter a estabilidade no canal visto que o mesmo apresenta uma resistência proporcional ao seu comprimento.

Fonte: Heckman (1992)

A Figura 2.10 representa o diagrama de estabilidade do canal de um raio, que se comporta de forma semelhante ao circuito da Figura 2.9. A instabilidade do canal e, conseqüentemente, o encerramento da corrente se encontra na região do gráfico que combina comprimentos de canais maiores e/ou intensidade de correntes menores. Já a estabilidade do canal ocorre quando a intensidade da corrente é maior e/ou o canal menor, sendo que as duas regiões são separadas pela linha obtida da constante de tempo  $\tau$ . O encerramento do canal e a maior multiplicidade são favorecidos tanto por correntes de pouca intensidade quanto por canais mais longos.

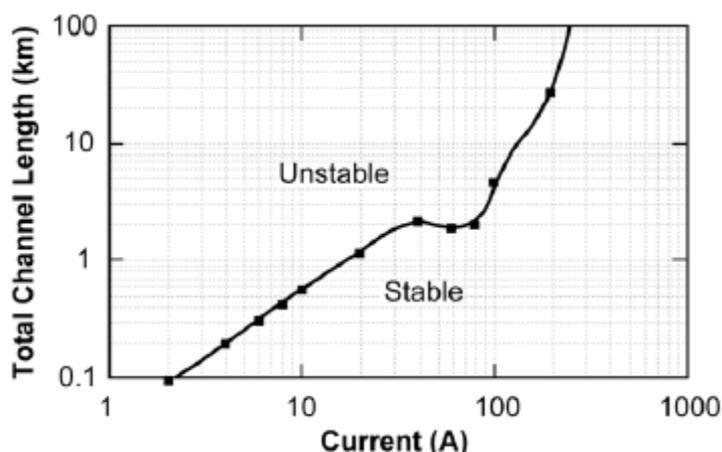


Figura 2.10 - Diagrama de estabilidade para o canal de um raio. Instabilidade (*unstable*) com encerramento da corrente no canal (*cutoff*) acima e a esquerda da região demarcada no gráfico e a estabilidade (*stable*) com presença de corrente contínua, abaixo e à direita.

Fonte: Williams (2006)

### 2.2.2. Estudos anteriores

Devido à transferência de carga significativa, a corrente contínua é responsável pelos maiores danos associados a efeitos térmicos dos raios, como buracos na

superfície metálica das aeronaves (FISHER et al., 1991) e derretimento de cabos das linhas de transmissão de energia (NAKAHORI et al., 1982), queimadas em florestas (FUQUAY, 1972) além de fundir os fusíveis usados na proteção dos transformadores dos sistemas de distribuição de energia elétrica (McEACHRON, 1939).

A maioria dos estudos sobre corrente contínua, avalia os efeitos das chamadas correntes contínuas longas (*long continuing currents*) que é o termo definido por Kitagawa et. al. (1962) para definir casos cuja duração da corrente contínua excede quarenta milissegundos. Correntes contínuas com duração inferior a 40 milissegundos foram estudados por Shindo e Uman (1989) e Ballarotti et al. (2005). Correntes contínua com duração entre 10 e 40 milissegundos foram definidas como corrente contínua curta (*short continuing current*) (SHINDO e UMAN, 1989) e as com duração entre 3 e 10 milissegundos como corrente contínua muito curta (*very short continuing current*) (BALLAROTTI et al., 2005).

Da análise simultânea de fotografias e observação de campo elétrico de raios no Novo México a assinatura de campo elétrico produzida pela corrente contínua foi identificada como sendo uma grande variação do campo elétrico lento na mesma polaridade da descarga de retorno a seguir (KITAGAWA et al., 1962; BROOK et al., 1962). Este comportamento é ilustrado na Figura 2.11, gerada a partir do registro de um raio contendo corrente contínua longa.

A corrente contínua longa aparece após a segunda descarga de retorno, na Figura 2.11, depois de um intervalo  $\Delta T_1$ . Essa corrente tem uma duração representada pelo símbolo  $\Delta T_{cc}$ . Logo após o seu encerramento, ocorre um intervalo sem corrente contínua  $\Delta T_2$ , que precede a terceira descarga de retorno. O raio se encerra com a quarta descarga de retorno que apresenta novo período de corrente contínua curta, i.e., com duração inferior a 40 milissegundos.

A Figura 2.12 mostra o campo elétrico rápido obtido para o mesmo raio. É possível observar os pulsos da descarga de retorno e uma sutil variação do campo nos trechos de corrente contínua. A análise conjunta das medidas de campo elétrico (lento e rápido) e a de vídeo de alta resolução temporal obtidos simultaneamente permitem identificar e caracterizar a corrente contínua (SABA et al., 2006a).

O principal trabalho que serviu de base para este estudo foi realizado por Rakov e Uman (1990). Neste artigo são apresentadas estatísticas da ocorrência de corrente contínua longa em raios negativos naturais ocorridos na Flórida e Novo México.

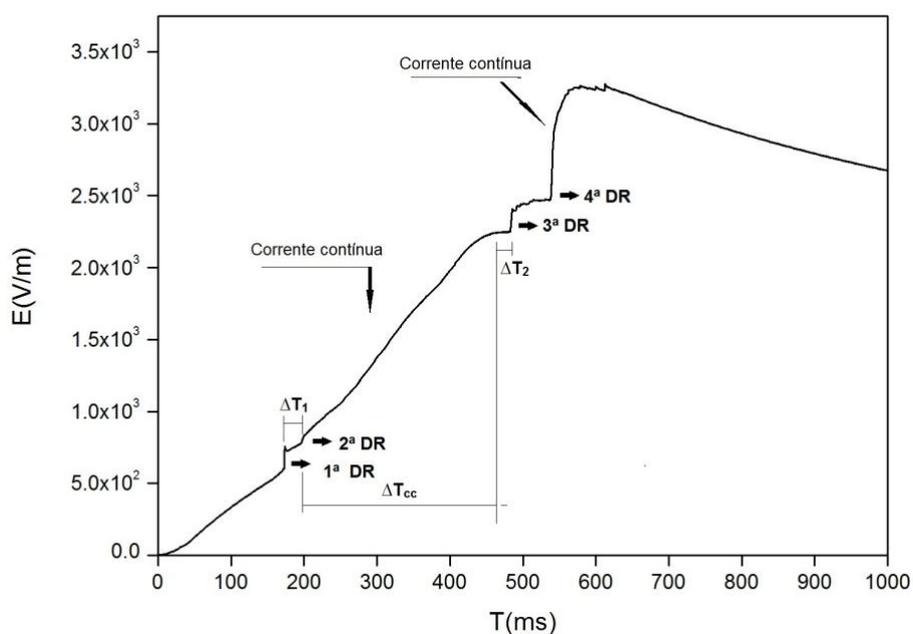


Figura 2.11 – Variação do campo elétrico obtido pela antena lenta *versus* tempo referente a um raio negativo. Este raio apresentou quatro descargas de retorno e dois trechos de corrente contínua, sendo o primeiro classificado como corrente contínua longa.

Fonte: Banco de dados ELAT (2011)

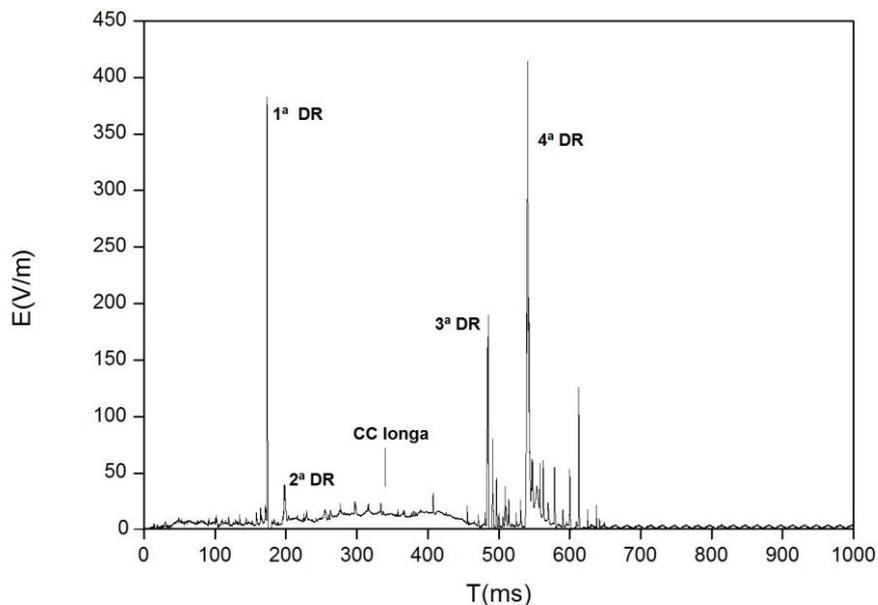


Figura 2.12 - Variação do campo elétrico rápido observado para um raio negativo com quatro descargas de retorno e dois trechos de corrente contínua, sendo o primeiro corrente contínua longa.

Fonte: Banco de dados ELAT (2011)

Para obter os resultados, os autores analisaram as curvas de campo elétrico detectadas por três antenas circulares do tipo prato, instaladas no telhado de um laboratório em Tampa, Flórida. Os raios ocorreram durante três dias (15, 18 e 27 de julho) em 1979. Uma rede com cinco câmeras cobrindo 60 km<sup>2</sup> registraram os mesmos eventos e o som gerado pelas descargas. Dessa forma foi possível estimar a distância da descarga.

Durante esse período, eles observaram que a maioria das ocorrências de corrente contínua longa acontece em descarga subsequente de raios múltiplos em comparação a sua ocorrência em raios simples ou em primeiras descargas de raios múltiplos. Isso sugere o estabelecimento de um padrão na ocorrência de corrente contínua longa.

O primeiro padrão encontrado seria o fato de que descargas de retorno que são seguidas por corrente contínua longa usualmente possuem um pico de

corrente com menor intensidade se comparado com descargas sem corrente contínua longa.

Outro padrão encontrado por Rakov e Uman (1990), foi o pico de corrente elevado para descargas de retorno que precedem descargas que são seguidas por correntes contínuas longas (>40 milissegundos).

Eles observaram também que o intervalo que antecede a descarga de retorno seguida por corrente contínua, tende a ter uma duração inferior aos intervalos regulares entre descargas que não são seguidas por corrente contínua longa.

A Figura 2.13 mostra o trecho de um raio que contém corrente contínua longa e em que as características citadas acima foram observadas.

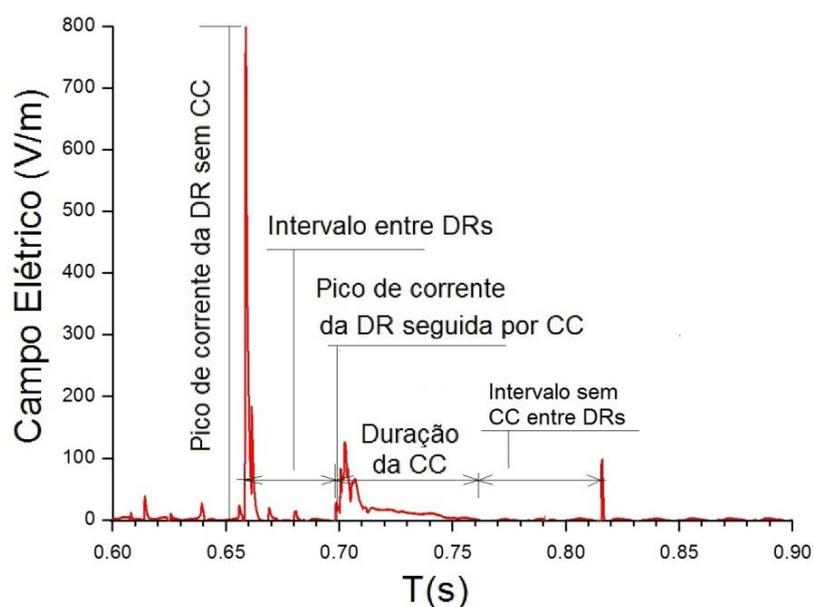


Figura 2.13 - Trecho do campo elétrico de um raio obtido pela antena de campo rápido que apresenta características padrões da presença de corrente contínua longa semelhantes as observadas por Rakov e Uman (1990).

Fonte: Banco de dados ELAT (2011).

Em geral, a máxima duração associada a uma descarga de retorno é menor do que 3 milissegundos (MALAN e SCHONLAND, 1951; BEASLEY et al., 1982; RAKOV et al., 1990). Partindo destes resultados, para esse estudo, os intervalos de corrente contínua assumidos seguirão os intervalos definidos anteriormente, sendo: (1) corrente contínua muito curta (CCMC), para correntes com duração maior ou igual a 3 e menor ou igual a 10 milissegundos (BALLAROTTI et al., 2005); (2) corrente contínua curta (CCC), para duração acima de 10 e menor ou igual a 40 milissegundos (SHINDO e UMAN, 1989); (3) corrente contínua longa (CCL), para casos cuja duração exceda 40 milissegundos (KITAGAWA et al., 1962).

### 3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

A detecção dos raios negativos pode ser feita através de sensores de campo elétrico e magnético, sensores de luminosidade (fotodiodos, câmeras de vídeo e fotografia), sensores de ondas acústicas, e por outros sensores capazes de detectar qualquer processo, primário ou secundário, associado ao movimento de cargas.

O grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE possui uma parceria com o DCTA que oferece uma estrutura física preparada para a observação das descargas elétricas. No DCTA em São José dos Campos estão instalados em uma torre os instrumentos de medição. A torre de observação, Figura 3.1, possui cerca de 20 metros de altura e janelas quase todos os lados, de forma a possibilitar a instalação das câmeras apontadas para qualquer direção. Como não possui prédios altos ao lado, também possui um campo de visão favorável a observação além de estar em local isolado, o que diminui a quantidade de ruídos que podem interferir na medição dos sinais.



Figura 3.1 - Torre de observação de raios em São José dos Campos.

Fonte: (FERRAZ, 2009)

Neste capítulo serão descritos os instrumentos utilizados em cada etapa da detecção e que foram utilizados para compor o banco de dados de raios negativos aqui estudados.

A Matriz Padrão de dados, as câmeras e os dados da rede BrasilDat descritos nesse capítulo são as componentes principais de todos os resultados obtidos. Os sensores de campo elétrico rápido e lento, o programa *Deconvolecarga* e toda a metodologia para o cálculo de carga foram aplicados para um banco de dados resumido de 11 casos da matriz.

### **3.1. Matriz Padrão de dados**

Todos os dados adquiridos para esse trabalho estão armazenados no banco de dados do ELAT e registrados na Matriz Padrão que consiste em uma planilha do Excel com informações obtidas ao longo das campanhas de observação de relâmpagos do qual o grupo participou.

A Matriz foi uma idéia que surgiu a partir desse trabalho devido à necessidade de padronizar os registros e prepará-los para a inserção em um banco de dados único que pudesse ser acessado por pesquisadores interessados em analisar os eventos das tempestades.

A construção da Matriz contou com a colaboração de toda a equipe de pesquisa. São mais de 10.000 eventos registrados em mais de 10 locais diferentes, desde 2003 até a presente data, com informações obtidas através da análise de vídeos de alta resolução, dados de campo elétrico rápido e lento, dados da rede BrasilDat para os raios filmados no Brasil e da rede NLDN, para os raios filmados nos Estados Unidos da América.

Esses dados vêm sendo objeto de pesquisa de trabalhos no grupo, que possui o maior banco de dados de raios filmados no mundo, juntamente com outras técnicas de observação.

O presente estudo unificou as matrizes em um banco de dados único e implementou rotinas que podem fornecer informações de forma mais rápida e acessível.

As informações de entrada da matriz são os dados de vídeo analisados quadro a quadro. Registram-se criteriosamente os eventos observados: descargas de retorno, correntes contínuas e componentes-M, além das informações de tempo, do pico de corrente, da latitude e da longitude das descargas.

As informações de saída da matriz são: a classificação das ordens das descargas de retorno e dos demais eventos dentro do raio, a distância com relação ao ponto de observação, a polaridade das descargas, os intervalos entre eventos, a duração do relâmpago filmado, as relações de tempo com as descargas precedentes, o tipo de corrente classificada para a descarga, as relações de utilização do canal para diferentes descargas, a contagem de eventos das descargas para cada raio, a padronização de nomenclatura dos raios e as informações de campo elétrico rápido e lento para os eventos onde se obteve a curva de campo elétrico.

### **3.2. Câmeras rápidas HS1 e HS2**

A aquisição dos vídeos de raios é feita por duas câmeras de alta resolução temporal conhecidas como câmeras dos modelos Redlake *MotionScope PCI* e Photron *Fastcam 512 PCI* aqui citadas como HS1 e HS2, respectivamente.

As câmeras possuem um sistema baseado num sensor *Charge Couple Device* (CCD) para a captura das imagens que adquire e grava uma seqüência de imagens digitais. As câmeras adquirem as imagens em uma taxa ajustável de 60 a 8.000 quadros por segundo, para HS1 e de 50 a 32.000 quadros por segundo para HS2. Elas geram arquivos com extensão avi e com dados de tempo para cada quadro utilizando para isso uma sincronização temporal via Sistema de Posicionamento Global (GPS). Esta sincronização permite a

posterior comparação da imagem com os dados da rede de localização de relâmpagos BrasilDat (FERRAZ, 2009) e com os dados de campo elétrico.

As câmeras estão acopladas a placas de captura que faz a interface com os respectivos microcomputadores de forma a armazenar as imagens em disco rígido, conforme a Figura 3.2.

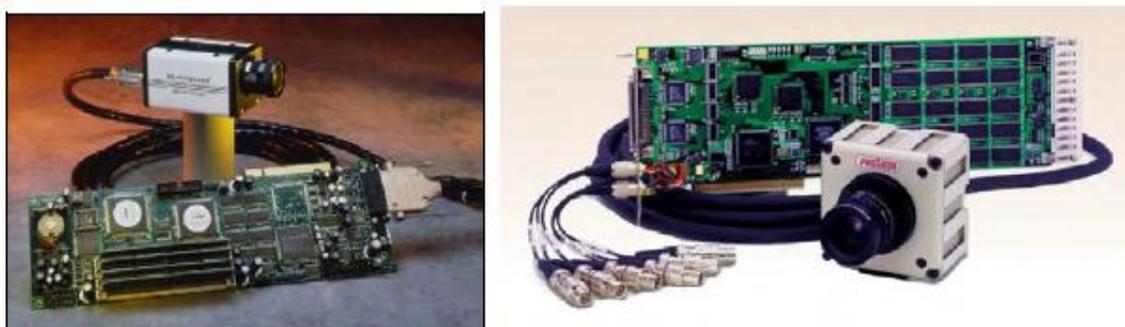


Figura 3.2 - Câmera HS1 e HS2 com as respectivas placas de interface com o PC.

Fonte: Adaptada de Saraiva (2010).

As câmeras são direcionadas para a região de ocorrência de raios. É feito um ajuste de luminosidade de acordo com as condições ambientais da região de forma a garantir o contraste adequado na imagem. Um operador é responsável por ativar o sistema de gravação quando observar uma descarga no campo de visão da câmera e armazenar o arquivo.

O recurso computacional chamado Fila Circular, permite gravar os dados continuamente em uma determinada região de memória. Quando o selecionado o acionamento da gravação, são mantidas as imagens registradas no segundo anterior e posterior, de forma a garantir que se obtenham dois segundos de imagens respectivas aquela descarga. Em nossos estudos utilizamos a taxa de captura de 500 a 8.000 quadros por segundo para as câmeras.

### 3.3. Rede BrasilDAT

A rede brasileira de detecção de descargas atmosféricas que possui sensores instalados ao longo do Brasil foi responsável por fornecer os dados de distância das descargas de retorno dos raios nuvem-solo negativo registrado para esse estudo.

A rede BrasilDat começou em 1988 utilizando sensores LPATS pela CEMIG. Em 2003 o INPE firmou convênios que ampliaram a cobertura da rede e a integração deu origem a RINDAT. Esta rede possuía 8 sensores IMPACT e 17 LPATS (NACCARATO, 2006). A BrasilDat veio da ampliação dessas parcerias e da inclusão de mais 22 sensores e da perspectiva da inclusão de mais de 50 novos sensores que dão origem a um projeto de cobertura de todo o território nacional.

Os sensores LPATS, utilizam apenas o método de detecção por tempo de chegada (TOA) enquanto que os sensores ALDF utilizam o método IMPROVED Accuracy from Combined Technology (IMPACT), sendo mais conhecidos simplesmente por sensores IMPACT. A tecnologia IMPACT combina o método TOA com o método Magnetic Direction Finder (MDF), que mede as componentes ortogonais do campo magnético radiado pela descarga (através de dois loops magnéticos ortogonais entre si), o que lhe permite fornecer a direção (ou azimute) da fonte de radiação em relação ao norte geográfico (FERRAZ, 2009). Mais detalhes sobre os sensores IMPACT E LPATS podem ser obtidos em Naccarato (2006).

Os sensores da rede registram a radiação eletromagnética das descargas atmosféricas e após validá-los, enviam os dados medidos para uma central de processamento. Como resultados são apresentados: data, horário, latitude e longitude e diversos parâmetros como a polaridade, multiplicidade, pico de corrente da descarga de retorno, entre outros (FERRAZ, 2009).

Nem todas as descargas ocorridas são detectadas pela rede haja vista que existem limitações próprias da rede e outras independentes dela. A precisão da rede é definida por três parâmetros sendo: a eficiência de detecção, a precisão de localização e as limitações do sistema.

A eficiência de detecção é a capacidade da rede de detectar raios. Como nem todas as descargas são detectadas a eficiência não é de 100%. Os principais fatores que afetam a eficiência de detecção são: a eficiência de cada sensor, o número médio de sensores participantes dessa solução, a distância entre os sensores e a distribuição das correntes de pico das descargas.

A precisão de localização é a região de segurança que possui a probabilidade da ocorrência da descarga. Essa precisão pode ser afetada pelo desvio padrão das medidas angulares e temporais na detecção individual dos sensores, pelo número de sensores envolvidos na solução e pela localização do sensor em relação à localização da descarga e em relação aos outros sensores.

As limitações do sistema ocorrem devido a qualquer incerteza que exista em um parâmetro medido pelo sensor (SARAIVA, 2010). O fator que impera na eficiência de detecção é a intensidade do pico de corrente, sendo a distribuição da densidade de raios, dependente do pico de corrente (PINTO JR. et al., 2009).

As informações utilizadas nesse estudo que foram obtidas da rede são: localização da descarga e polaridade definida pelo pico da corrente em kA. Os dados da rede utilizados para esse trabalho foram obtidos durante o período de 2003 a 2011.

#### **3.4. Método de cálculo da distância entre a descarga de retorno e os sensores**

Os dados da rede utilizados nesse estudo foram: latitude e longitude, polaridade através do pico de corrente medido. O banco de dados analisado

neste estudo possui somente raios com pelo menos uma descarga de retorno detectada com a polaridade negativa e a uma distância de até trinta quilômetros do local de observação no CTA em São José dos Campos. Isso porque a perda de eficiência para a observação da câmera é significativa para distâncias maiores (FERRAZ, 2009)

O cálculo da distância entre a descarga de retorno e o local de observação no CTA foi realizado utilizando os dados de latitude e longitude fornecidos pela BrasilDat juntamente com dados de latitude e longitude da torre.

Uma planilha no Excel, denominada como Matriz Padrão foi utilizada para cadastrar as descargas filmadas e detectadas pelos sensores, assim como calcular da distância baseado em equações trigonométricas conhecidas para coordenadas esféricas.

O exemplo abaixo, Figura 3.3, foi extraído de Ferraz (2009) que implementou o cálculo anteriormente.

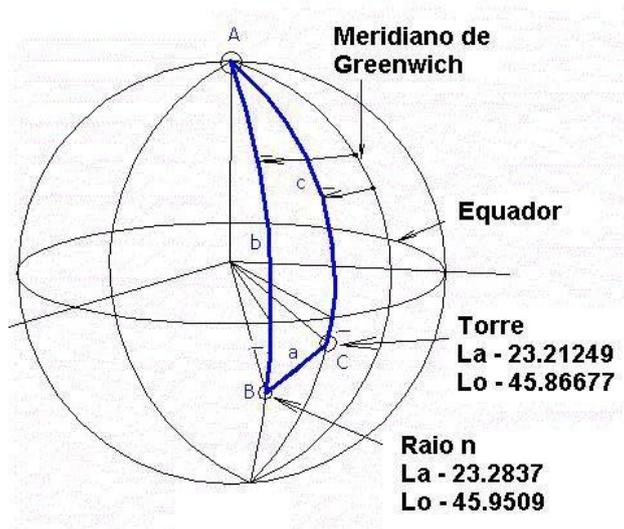


Figura 3.3 - Localização dos pontos sobre o globo terrestre (fora de escala).

Fonte: Ferraz (2009)

	<b>Torre</b>	⋮	<b>Raio</b>
<b>Latitude</b>	-23,2125		-23,2837

<b>Longitude</b>	-45,8667	⋮	-45,9509
------------------	----------	---	----------

$$b = \text{arco AB} = 90 - (-23,2837) = 113,2837 \quad (3.1)$$

$$c = \text{arco AC} = 90 - (-23,21249) = 113,2125 \quad (3.2)$$

$$a = \text{arco BC} = -45,9509 - (-45,8667) = 0,0842 \quad (3.3)$$

Utilizando-se a equação trigonométrica esférica:

$$\cos(\alpha) = \cos(b) * \cos(c) + \text{sen}(b) * \text{sen}(c) * \cos(a) \quad (3.4)$$

Substituindo a,b,c, teremos

$$\cos(\alpha) = 0,999998 \quad (3.5)$$

$$\text{arc cos}(0,999998) = 0,105098 \quad (3.6)$$

Sendo o perímetro aproximado da Terra no Equador igual a 40050 km o que corresponde a 360 graus. Para o arco encontrado de 0,105098 graus pode-se obter a distancia de 11,7km, que é a distância entre os pontos B e C, ou seja, a distância entre o raio e a torre.

### 3.5. Cálculo da altura estimada do centro de carga na nuvem

A altura  $H$ , do centro de carga dentro da nuvem para raios negativos está em torno de 6 km para nuvens de tempestades do tipo cúmulos nimbos (Ferraz, 2009). Estima-se que o centro de carga negativo dentro da nuvem esteja localizado na região onde a temperatura está entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $-20^{\circ}\text{C}$  (RAKOV e UMAN, 2003). Para determinar a altitude do centro de carga para a nossa região, foram utilizados dados de radiossondagem obtidos para o dia da tempestade que gerou o raio.

A plataforma de coleta de dados de radiossondagem está localizada no Campo de Marte em São Paulo, sendo denominada SBMT 83779, na latitude  $-23.5^{\circ}$  e

longitude  $-46.63^\circ$  sendo a mais próxima das tempestades estudadas (em torno de 100 km). É importante ressaltar apesar da distância, o perfil de temperatura para a região de S. Paulo não costuma apresentar variações significativas em relação a radiossondagem feita no Rio de Janeiro (a aproximadamente 300 km) para o cálculo da altura  $H$ . Assim, o uso da radiossondagem de S. Paulo neste trabalho foi considerado adequado.

A Figura 3.4 mostra a imagem e a tabela obtida para um dia de tempestade. Foi adotada para  $H$  a média aritmética entre as alturas relativas às temperaturas mais próximas de  $-10^\circ\text{C}$  e  $-20^\circ\text{C}$  medidas.

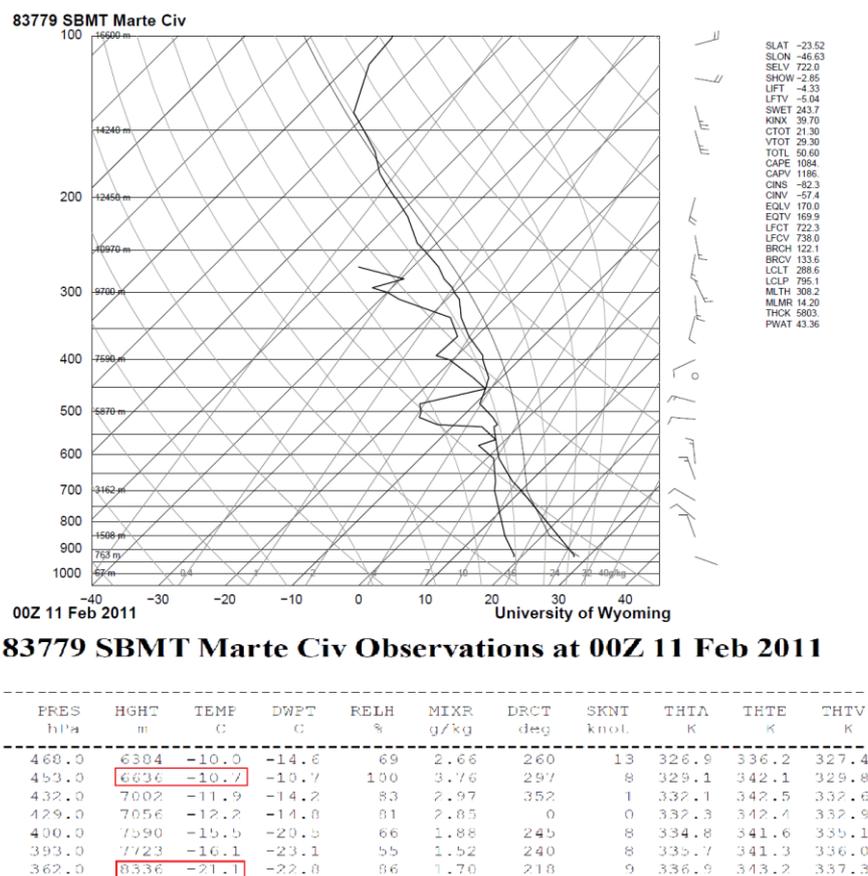


Figura 3.4 - Dados de radiossondagem para o dia 11 de fevereiro de 2011.

Fonte: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (Extraído em 21/07/2011)

### 3.6. Sensor de campo elétrico rápido

Todos os processos de descargas no relâmpago estão associados com o movimento de cargas elétricas e podem ser estudados através da medida de variações do campo elétrico associado com o movimento dessas cargas (RAKOV e UMAN, 2003).

Partindo de um modelo físico simples, uma antena do tipo prato, de dipolo simples, pode ser utilizada para medir o campo elétrico dos relâmpagos. (PICHLER, 2004). A figura 3.5 abaixo mostra a configuração principal do sistema de aquisição de campo elétrico rápido utilizado nesse estudo. A medida de corrente  $i$  é proporcional à variação temporal do campo elétrico  $dE/dt$  conforme a equação (7), onde a área “A” representa a área do prato circular e  $\epsilon_0$  é a permissividade dielétrica do ar.

$$i = \epsilon_0 \cdot A \cdot \frac{dE}{dt} \quad (3.7)$$

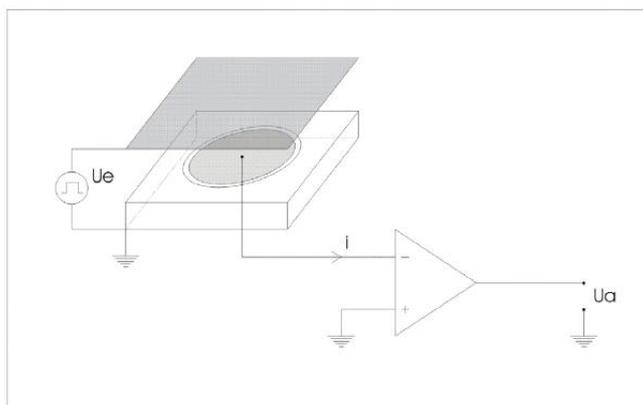


Figura 3.5 – Diagrama simplificado da antena de campo elétrico rápido e seu circuito amplificador.

Fonte: (PICHLER, 2004)

Para se obter um sinal de saída proporcional ao campo elétrico, o amplificador precisa comportar-se como um integrador que deverá armazenar o sinal medido em um capacitor de forma contínua. A correlação entre o sinal de saída

e a tensão de entrada é definida pela equação (3.8), onde  $U_s$  é a tensão de saída,  $C$  é a capacitância e  $E$  é o campo elétrico que produziu o sinal medido.

$$U_s = -\frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt = -\frac{1}{C} \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot \Delta E \quad (3.8)$$

O módulo integrador é ligado a um circuito amplificador de sinal que compensa as perdas da transmissão de dados pelos cabos e pelo sistema. Dois módulos integradores amplificadores foram utilizados com ganhos diferentes, sendo um com 43,3 mV/(V/m) e outro com 4,34 mV/(V/m), de tal forma a otimizar as observações em relação a sensibilidade da antena, sua dependência da posição da descarga e intensidade.

Além do módulo integrador/amplificador, o sistema de medida de campo elétrico rápido, também utiliza um microcomputador dedicado com a interface modelo GPS 170 PCI da empresa *Meinberg*, para sincronização temporal dos equipamentos, e a interface modelo NI PCI-6110 da empresa *National Instruments* para aquisição dos dados.

Dessa forma, duas antenas planas de campo rápido com uma largura de banda que vai de 306 Hz a 1,5 MHz, são conectadas aos integradores/amplificadores que, durante a ocorrência da descarga, transmitem as variações de campo elétrico, convertidas em variações de corrente pela antena, para o módulo de aquisição ou através de um cabo coaxial tipo RG-58 com impedância de 50 Ohms ou por fibra óptica, com uma taxa de 5 MS/s ou seja, cinco milhões de aquisições por segundo. O módulo de aquisição armazena os dados em um microcomputador que serve de interface para o usuário dos dados (FERRAZ, 2009) A figura 3.6 e a Figura 3.7 representam o esquema utilizado para o funcionamento do sensor de campo elétrico rápido, ou antena rápida.

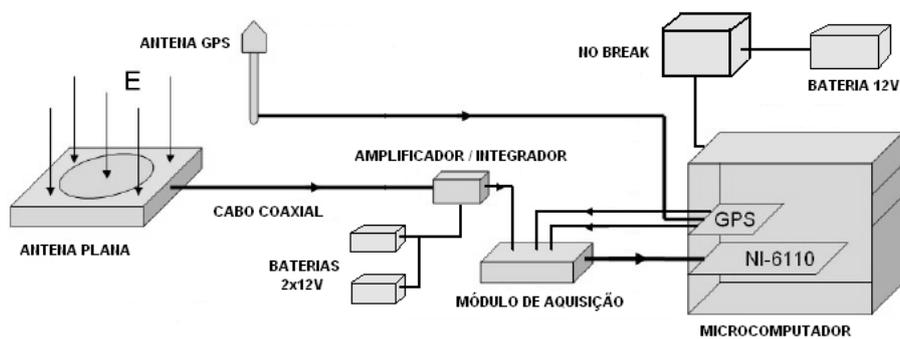


Figura 3.6 – Representação esquemática dos equipamentos utilizados para coleta dos dados de campo elétrico gerado por descargas nuvem-solo.

Fonte: Schulz et al.( 2005)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 – Imagens do sistema de medição. (a): antena plana, integrador / amplificador, antena GPS e baterias; (b): CPU com as interfaces de sincronização e aquisição; (c) interface antena-micro.

Fonte: Ferraz (2009)

### 3.7. Sensor de campo elétrico lento

O sensor de campo elétrico lento, apresentado na Figura 3.8, foi desenvolvido pelo ELAT e tem a finalidade de medir a variação do campo elétrico produzida pela corrente contínua dos raios (FERRAZ, 2009). A corrente contínua possui longa duração e baixa intensidade, não produzindo campos eletromagnéticos irradiados de grandes amplitudes, mesmo em regiões próximas do seu local de ocorrência. Dessa forma, o sensor de campo elétrico lento, tem a capacidade de amplificar e medir sinais de baixa frequência (corrente contínua) e separar dos sinais de alta frequência e amplitude (descarga de retorno).



Figura 3.8 - Foto da antena instalada no topo da torre de observações de tempestades do ELAT no CTA.

Fonte: Ferraz (2009)

A antena de campo elétrico lento foi calibrada de acordo com as características do local de observação, conforme descrito por Ferraz(2009). A tabela 3.1 mostra os dados obtidos durante a calibração do sistema. Três intensidades de tensão elétrica para três distâncias distintas foram aplicadas na antena de forma a promover uma diferença de potencial entre elas. Como em um capacitor, onde, entre as placas planas existe um meio dielétrico, distância e diferença de potencial promove um campo elétrico. Sabendo o campo elétrico

aplicado, foi possível obter o fator de correlação entre esse campo elétrico e o sinal medido, em Volts.

Tabela 3.1 - Dados obtidos da calibração do sensor de campo elétrico lento.

Espaçamento (m)	Tensão Aplicada (V)	Campo Aplicado (V/m)	Tensão Medida (mV)	Razão do sensor	Erro Relativo(%)
0.065	160	2462	2160	1140	15.5
	476	7323	6120	1197	11.0
	784	12062	9100	1325	1.6
0.165	160	970	712	1362	1.0
	476	2885	2160	1336	0.9
	802	4861	3620	1343	0.4
0.250	158	632	416	1519	11.6
	472	1888	1300	1452	7.1
	774	3096	2120	1460	7.7

A curva de calibração obtida através dos dados acima se encontra na Figura 3.9 e mostra um coeficiente de correlação de 0.99658. O ajuste indica que cada volt medido no sinal de saída da antena, corresponde ao campo elétrico de 1295 V/m aplicado na antena sendo o erro médio relativo de aproximadamente 7%.

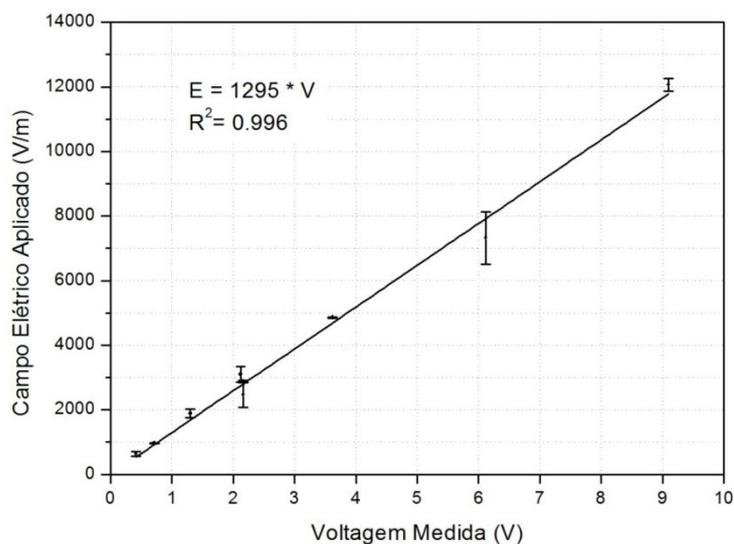


Figura 3.9 - Curva de resposta do sensor de campo elétrico lento.

### 3.7.1. Influência da torre na medição do campo elétrico lento

O campo elétrico sofre influência de acordo com o local onde está sendo medido. O fato das antenas estarem instaladas sobre uma estrutura metálica faz com que seja necessário dimensionar a influência da posição da antena com relação ao que se espera que seja medido para uma antena que estivesse no solo (FERRAZ, 2009).

Para a calibração, as antenas foram instaladas em três pontos diferentes no local de aquisição. Uma das antenas foi montada com a placa sensível para baixo, no topo da torre, fora da sua estrutura, sendo denominada “antena fora”. Outra antena também foi montada sobre a torre, com a placa sensível apontando para baixo, porém situada mais próximo ao centro da estrutura, denominada “antena dentro”. A antena utilizada como referência, foi montada no solo, a 80 metros da torre, sendo denominada, “antena solo”.

O fator de correção da influência da torre encontrado nesse trabalho foi obtido a partir da análise da curva de campo elétrico da antena de campo lento de quatro raios negativos medidos simultaneamente pelas antenas instaladas nas três configurações descritas acima. A Tabela 3.2 apresenta os dados de variação de tensão, que são proporcionais a variação do campo elétrico obtidos para os quatro raios analisados para a obtenção do fator torre.

Tabela 3.2 – Medidas de tensão elétrica obtidas para antenas em diferentes posições

	<b>1(V)</b>	<b>2(V)</b>	<b>3(V)</b>	<b>4(V)</b>	<b>Média</b>	<b>Erro(%)</b>
<b>FORA</b>	1.636	3.232	2.122	1.890		
<b>DENTRO</b>	0.782	1.426	0.975	0.975		
<b>SOLO</b>	0.260	0.474	0.309	0.288		
<b>FORA/SOLO</b>	<b>6.292</b>	<b>6.819</b>	<b>6.867</b>	<b>6.563</b>	<b>6.635</b>	<b>3</b>
<b>DENTRO/SOLO</b>	<b>3.008</b>	<b>3.008</b>	<b>3.155</b>	<b>3.385</b>	<b>3.139</b>	<b>4</b>

A Figura 3.10 mostra um exemplo das curvas obtidas pelas antenas. A antena solo apresenta amplitude consideravelmente inferior às outras duas antenas para o mesmo raio, como era esperado. Os fatores de correção para o campo

medido foram 6.635 para a antena fora em relação à antena solo e 3.139 para a antena dentro em relação à antena solo. Influência do fator de decaimento no campo elétrico lento.

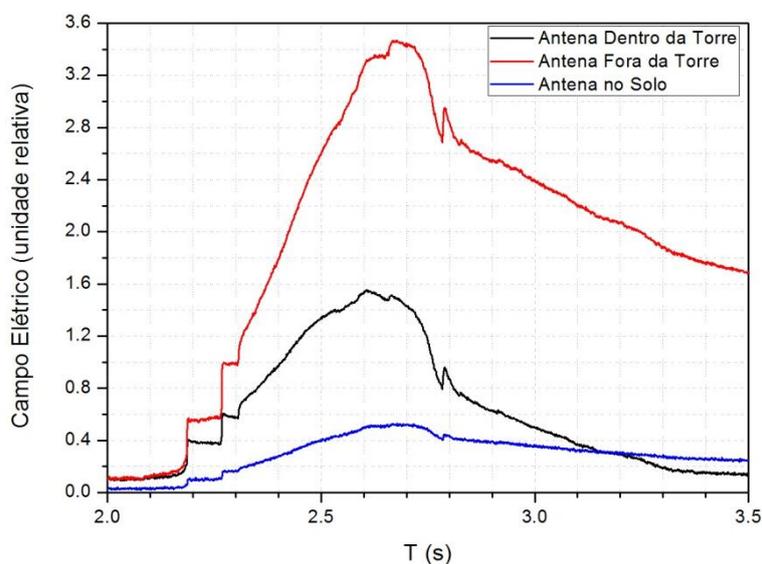


Figura 3.10 - Exemplo das formas de onda obtida durante a calibração das antenas de campo lento, para o mesmo raio.

Fonte: Banco de dados ELAT (2011)

O sensor de campo lento possui um decaimento natural do circuito, que necessita ser corrigido no processo de avaliação da forma de onda adquirida através dele. O fator de decaimento, em variações de campos lentos como o da corrente contínua, influencia no valor da amplitude real do sinal, ao longo do trecho de corrente contínua. Para efetuar essa correção é necessário realizar a deconvolução da curva de campo elétrico. A correção é significativa para processos lentos do raio como a corrente contínua, mas não é significativa para processos rápidos como descargas de retorno.

Para recuperar a curva original, a correção da mesma é feita pelo programa “*deconvolecarga*”, desenvolvido especialmente para essa dissertação. A deconvolução aplicada na curva utiliza a mesma técnica de tratamento de sinal

feito por Mazur e Ruhnke (2003) para medidas de campo elétrico utilizando sensor de campo elétrico lento.

Através do programa, selecionamos um trecho da curva que esteja sujeita ao decaimento natural do circuito. É calculado o valor da constante RC da curva e posteriormente aplicada a equação 3.2 para o sinal medido, onde  $E$  é a intensidade do campo elétrico,  $V$  é a tensão do sinal de saída da antena, o produto  $RC$  é a constante de decaimento obtida e  $t$  é o tempo. Assim é possível obter a forma de onda corrigida para o raio, como o exemplo observado na Figura 3.11.

$$E \propto V = V(t) + \frac{1}{RC} \int V(t) dt \quad (3.9)$$

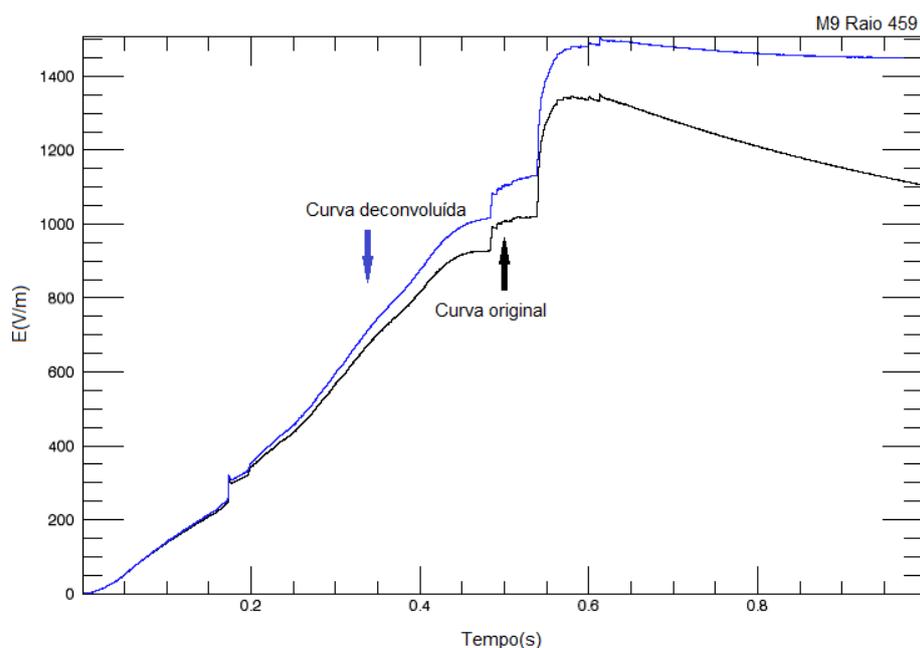


Figura 3.11 – Curva de campo elétrico lento original e sua deconvolução, obtida através do tratamento do sinal obtido, feita pelo programa deconvolecarga.

Fonte: Banco de dados ELAT (2011)

A técnica de deconvolução foi utilizada recentemente por Ferraz (2009) para o cálculo da quantidade de cargas elétrica transferida no processo de corrente

contínua e mostrou que a deconvolução da curva altera significativamente os valores obtidos, possibilitando assim uma reconstrução da curva medida pelo sensor de campo lento de forma mais realística. O autor estimou que a carga média calculada para um trecho com deconvolução é cerca de 80% maior do que para o mesmo trecho sem deconvolução.

### **3.7.2. Programa *deconvolecarga***

O programa *deconvolecarga* foi desenvolvido na plataforma IDL6.0 visando corrigir o decaimento natural do sensor e fator de amplificação da Torre.

A curva obtida pelo sensor de campo lento é adquirida juntamente com a curva de campo rápido pelo mesmo sistema de interface modelo NI PCI-6110 através dos canais de aquisição disponíveis.

As curvas obtidas para o campo lento, juntamente com o rápido, possuem sincronismo temporal GPS e podem ser observadas pelo programa DataView v1.4 desenvolvido pela ALDIS. Para o campo elétrico lento, o sistema está configurado de forma a realizar a leitura da tensão de saída do integrador. Dessa forma, a curva mostrada pelo DataView fornece a relação entre a tensão elétrica e o tempo.

O programa *deconvolecarga* realiza o cálculo da carga e da intensidade média da corrente transferida pela descarga elétrica durante o trecho de corrente contínua selecionado durante a execução do programa.

O programa adquire os pontos da curva que são formatados em extensão “.txt” em duas colunas, uma contendo dados de tempo e a outra de tensão em milivolts. A curva é então desenhada para que o usuário possa selecionar o trecho de onde obterá o fator de decaimento natural da antena (constante RC) através da função *curvefit* do IDL6.0. Este fator é então aplicado sobre a curva para realizar a deconvolução, conforme a equação 3.2.

O campo elétrico do raio é novamente desenhado, juntamente com a sua curva já deconvolucionada, conforme figura 3.11. O trecho para análise de corrente contínua pode então ser selecionado.

Como parâmetros de saída, o programa informa o cálculo da carga transferida pelo trecho selecionado, a corrente média durante esse período, os dados da curva deconvolucionada em padrão *.txt* e o gráfico na função *plot* do próprio IDL6.0.

O programa foi desenvolvido para esse estudo, conforme apêndice A, e continua em fase de aprimoramento, para uso operacional dentro do ambiente de pesquisa no ELAT.

### **3.8. Modelo eletrostático utilizado para o cálculo de carga e corrente média de eventos de corrente contínua.**

O cálculo da carga de uma região dentro da nuvem pressupõe certas condições de forma a simplificar as variáveis envolvidas, haja vista que o sistema físico real da descarga é extremamente complexo e ainda com muitas questões em aberto, como a própria distribuição de cargas dentro da nuvem e a distribuição de cargas ao longo do canal.

O modelo normalmente utilizado para o cálculo de carga é baseada no método das imagens. Considerando-se o solo como um condutor perfeito e desprezando-se a variação da condutividade do ar com a altura, através do campo medido no solo, podemos calcular a carga na nuvem. Para isso utilizamos uma carga imagem de igual magnitude à carga na nuvem (SADIKU, 1994), conforme mostra a Figura 3.12.

A altura  $H$  mostrada na Figura 3.12 é determinada pela altura do centro de carga negativo na nuvem.

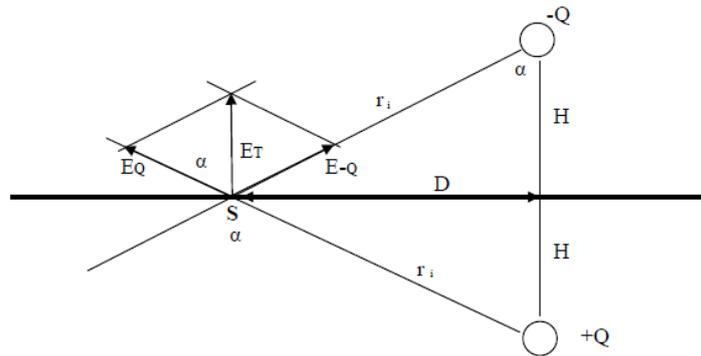


Figura 3.12 – Método das imagens para cálculo da carga a partir do campo elétrico, considerando o solo como sendo um condutor perfeito e o campo elétrico como sendo medido em um ponto na superfície.

Fonte: Adaptada de Ferraz (2009)

A distância  $D$  por sua vez, pode ser calculada a partir dos dados da rede BrasilDat. A intensidade do campo elétrico é medida através do sensor de campo lento.

Finalmente, através das equações abaixo, é possível estimar a carga envolvida no processo de corrente contínua (Equação 3.13) e a corrente média (Equação 3.14) transferida durante esse evento, onde  $E_T$  é o campo elétrico medido,  $H$  é a altura do centro de carga dentro da nuvem,  $D$  é a distância do ponto em que o raio toca o solo,  $\epsilon_0$  é a constante de permissividade dielétrica do ar,  $\Delta Q$  é a carga transferida calculada,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo do evento e  $I_{med}$  é a corrente média calculada para esse intervalo.

$$E_Q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_i^2} \quad (3.10)$$

$$E_T = \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \cos\alpha \quad (3.11)$$

$$\Delta E_T = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\Delta Q H}{[H^2 + D^2]^{3/2}} \quad (3.12)$$

$$\Delta Q = \frac{2\pi\epsilon_0 [H^2 + D^2]^{3/2}}{H} \Delta E_T \quad (3.13)$$

$$I_{med} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Esse é o processo que utilizaremos para estimar o valor da carga através do campo elétrico (RAKOV e UMAN, 2003), que utilizaremos ao longo deste trabalho.



## 4 RESULTADOS GERAIS

Para esse estudo foram selecionados raios negativos ocorridos em 124 dias entre os anos de 2003 e 2011, que foram filmados por pelo menos uma das câmeras de alta resolução temporal e que tiveram pelo menos uma descarga de retorno detectada num raio de uma distância de até 30 km do local onde os sensores e as câmeras estavam instalados para observação, o que compreende a região do Vale do Paraíba, mais especificamente São José dos Campos.

As estatísticas aqui apresentadas foram obtidas através da análise dos vídeos das câmeras de alta resolução temporal HS1 e HS2.

Este estudo apresenta um total de 971 raios negativos contendo 4495 descargas de retorno. Esse é o maior banco de dados para o estudo da ocorrência de corrente contínua de que se tem conhecimento até o presente entre os grupos de pesquisa no mundo. A tabela 4.1 mostra em síntese, a quantidade de casos de corrente contínua apresentada em estudos anteriores. Observe que a quantidade de dados apresentados nesse estudo é significativamente maior do que em estudos relevantes anteriores.

Tabela 4.1 – Comparação entre estudos anteriores e o atual para quantidade de eventos analisados e quantidade de corrente contínua encontrada em cada evento.

<b>Referência</b>	<b>Este Estudo São José dos Campos</b>	<b>Rakov e Uman (1990) Tampa, Flórida</b>	<b>Kitagawa et al. (1962) Socorro, Novo México</b>
<b>Tipo de medida</b>	Vídeo câmera de alta resolução temporal	*Campo elétrico e VHS	*Fotografia e campo elétrico
<b>Número de dias de tempestades</b>	124 dias entre 2003 e 2011	*3 dias em 1979	*1 noite em 1959
<b>Número de raios</b>	971(162)	*76(63)	*193(27)

\*: Dados obtidos de Rakov a Uman(1990). Entre parênteses se encontra o número de relâmpagos simples.

#### 4.1. Características gerais

A análise dos dados registrados dos vídeos permitiu obter os seguintes resultados descrita abaixo.

A multiplicidade média aritmética para a ocorrência de descargas de retorno encontrada foi de 4,6 descargas por raio. A média aritmética do número de canais por raios é de 1,7. A razão entre a multiplicidade média e o número médio de canais é de 2,7.

Em relação à ocorrência de qualquer tipo de corrente contínua, ou seja, corrente com duração igual ou superior a 3 milissegundos, foi encontrado que 759 (78% dos 971) raios possuem algum tipo de corrente contínua. Para somente corrente contínua longa (CCL), 259 (27% dos 971) raios apresentam pelo menos uma descarga seguida de CCL.

Os raios estão divididos em raios simples e raios múltiplos, conforme convenção descrita no Capítulo 2. O banco de dados do presente trabalho apresenta que, dos 971 raios filmados, 162 (17%) são raios simples contra 809 (83%) raios múltiplos.

Os raios simples que apresentam qualquer tipo corrente contínua são 94(58% de 162) enquanto que para raios múltiplos esse número aumenta para 759 (82% de 809). Isso se deve ao fato de haver mais descargas em raios múltiplos. Se analisar somente a ocorrência de corrente contínua longa, elas estão presentes em 24(15% em 162) raios simples e em 235 (29% em 809) raios múltiplos.

Ainda baseado na análise dos vídeos, das 4495 descargas registradas, 162 pertencem a raios simples e 4333 pertencem a raios múltiplos. Dos raios múltiplos, 2365(55%) possuem algum tipo de corrente contínua. A tabela 4.2 apresenta um resumo dos dados apresentados acima.

A Figura 4.1 apresenta a porcentagem de corrente contínua e suas classificações para raios simples e múltiplos. A porcentagem de descargas sem corrente é maior para raios múltiplos. Observa-se que raios simples apresentam proporcionalmente mais do que o dobro de CCL em relação a raios múltiplos.

Tabela 4.2 – Estatística dos raios e descargas de retorno em relação à presença de corrente contínua em raios simples e múltiplos.

Tipo de raios	Raios	Quantidade de DR	DR seguidas por algum tipo de CC	DR seguidas por CCL
<b>Total</b>	971	4495	2459 (55%)	328 (7%)
<b>Simples</b>	162 (17%)	162	94 (58%)	24 (15%)
<b>Múltiplos</b>	809 (83%)	4333	2365 (55%)	304 (7%)

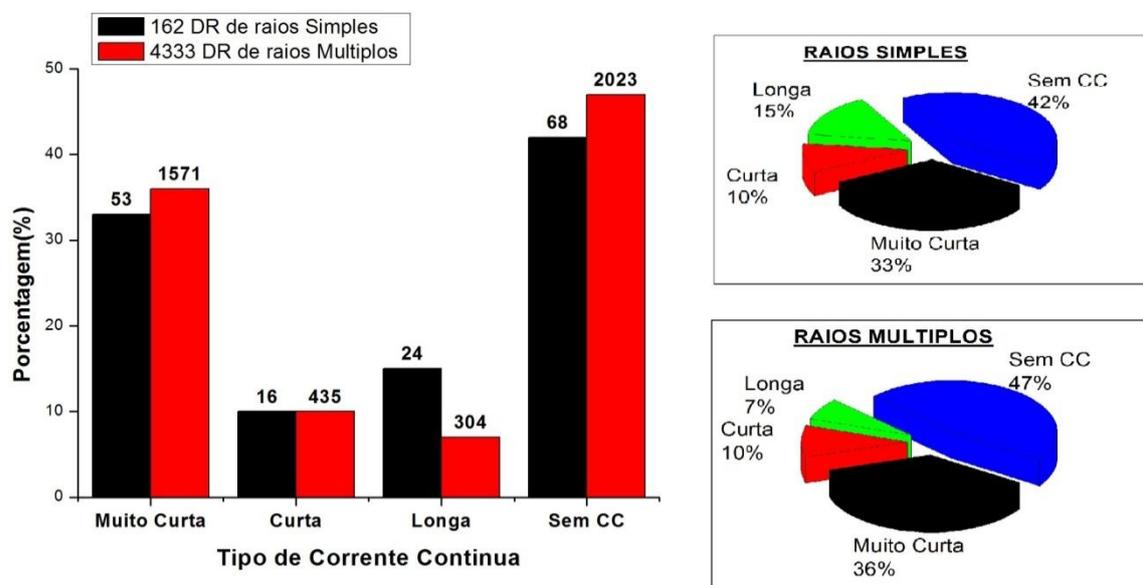


Figura 4.1 - Distribuição da porcentagem de descargas seguidas de corrente contínua para raios simples e raios múltiplos, por tipo de corrente contínua.

Rakov e Uman 1990 reportaram que relâmpagos simples são seguidos por CCL somente em 6% dos casos em um conjunto de dados que incluía 23 (1 caso) raios negativos da Flórida e 27(2 casos) no Novo México. Uma possível explicação para essa diferença seria a limitação no número de raios analisados em comparação com os 162 raios simples desse estudo.

Outra possível explicação seria o tipo de tempestade que deu origem as descargas. Para realizar uma comparação simplificada, foi feito um levantamento para o dia com a ocorrência de CCL semelhante à descrita pelos autores com o intuito de avaliar se a presença de CCL varia de acordo com o tipo de tempestade e se as tempestades reproduzem um comportamento semelhante para eventos semelhantes.

Como não havia informações mais específicas a respeito da tempestade registrada por Rakov e Uman(1990), admitiu-se que a característica comum entre ambas seria a porcentagem de CCL. O dia 24 de março do ano de 2008 apresentou 220 descargas de retorno em 35 raios sendo que em 21 (66%) deles, houve a presença de CCL.

Nesse dia, foi filmado apenas um raio simples e este não foi seguido por CCL. Dos outros 21 raios múltiplos com CCL em 2 continham cada um 5 CCL, que é o número máximo de CCL observado em um mesmo raio.

Dessa forma, pode se admitir que tempestades intensas com características específicas apresentem comportamentos que não correspondem ao padrão encontrado para a maioria dos casos, o que deixa um ponto em aberto para novas investigações, que seria o estudo da influência do tipo de tempestade no favorecimento da ocorrência de CCL.

## 4.2. Duração da Corrente Contínua

A duração da corrente contínua foi obtida através do registro do tempo transcorrido entre a descarga de retorno principal e a ausência de luminosidade no canal dessa descarga, baseado nos registros de vídeo gravados dos raios.

Das 4495 descargas registradas, 2404 (53%) possuem algum tipo de corrente com duração igual ou superior a 3 ms. A média aritmética de duração dessas descargas é de 30,6 ms. A moda é 4 ms e a mediana está em 7 ms. O maior valor encontrado de duração da corrente para esse banco de dados foi de 714 ms. A Figura 4.2 mostra a distribuição da duração da corrente contínua dos raios.

Separando as correntes contínuas com duração inferior a 40 ms das correntes contínuas com duração maior que 40 ms, podemos observar melhor a distribuição da duração das correntes nesses intervalos. A figura 4.3 mostra a distribuição para as correntes com duração entre 3 e 40 ms.

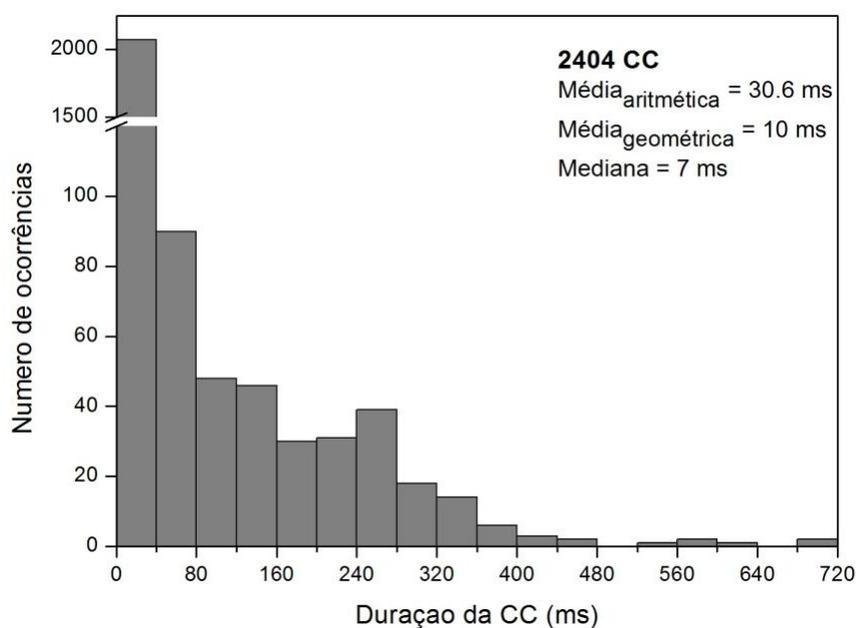


Figura 4.2 - Distribuição da duração da corrente contínua

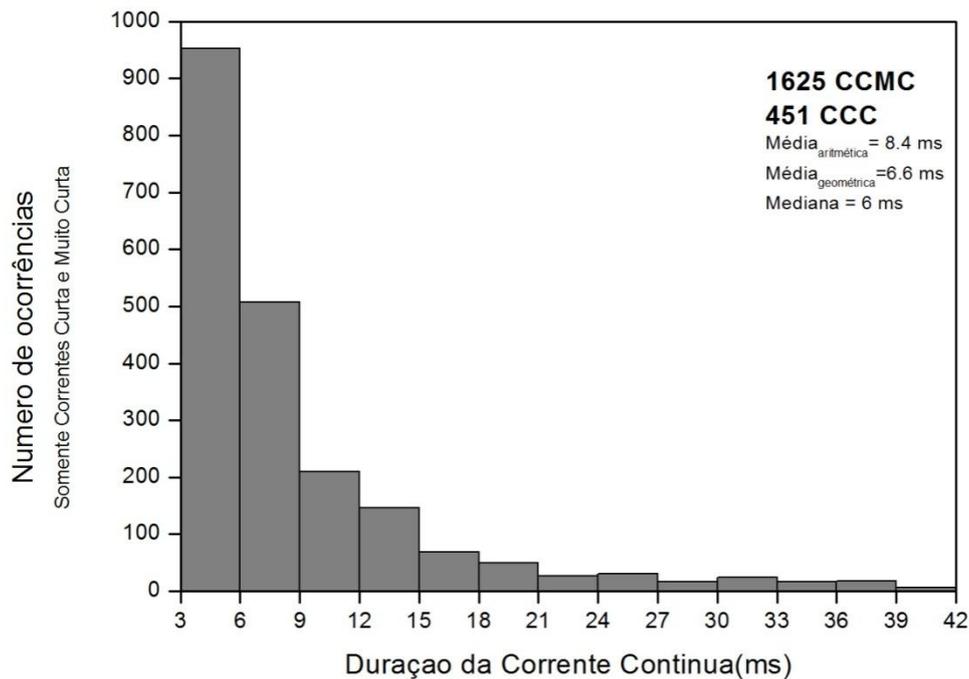


Figura 4.3 – Distribuição da duração de corrente contínua com duração entre 3 e 40 ms, denominadas Curta(CCC) e Muito Curta (CCMC).

As correntes contínuas longas (CCL) são o objeto principal do nosso estudo, visto que são responsáveis pela maior transferência de carga. A média aritmética da sua duração é de 171,4 ms, a média geométrica é igual a 137,7 ms, a mediana é de 146 ms. A distribuição para as CCLs se encontra na Figura 4.4. Em 95% das ocorrências, sua duração está acima de 46 ms. Mais do que 80% das CCL possuem duração acima de 80 ms, que é um valor extremamente longo de duração para correntes seguindo descargas de retorno. Shindo e Uman (1989) calcularam a média geométrica de duração da CCL para 22 raios que continham uma CCL, obtendo o valor de 115 ms.

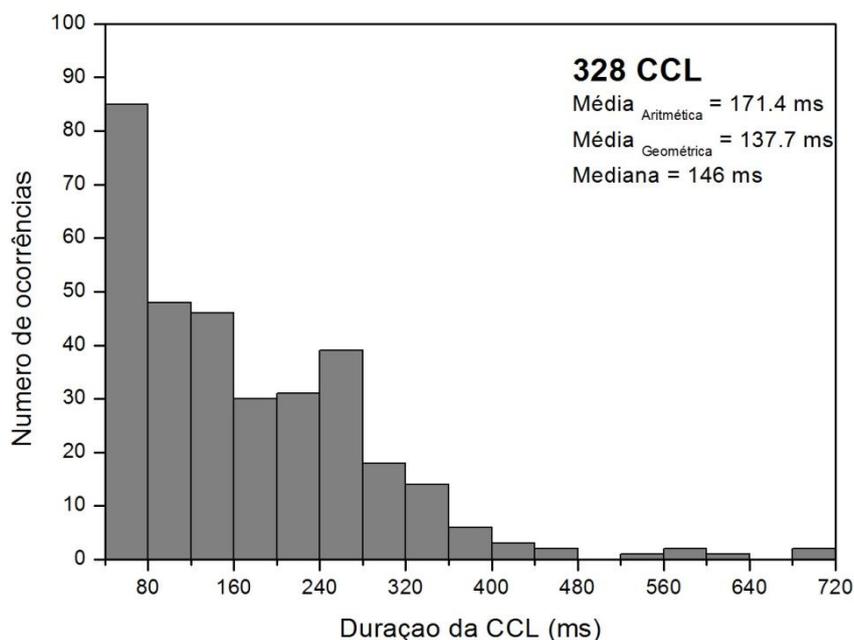


Figura 4.4 - Distribuição da duração de CCL.

#### 4.3. Relação entre a descarga com CCL e a duração do intervalo que a precede.

Algumas relações importantes foram observadas em estudos anteriores (RAKOV e UMAN, 1990; SHINDO e UMAN, 1989; KITAGAWA et al., 1962; SABA et al., 2006a ) para o intervalo de tempo precedendo a descarga que inicia a CCL e o pico de corrente desta descarga. A duração de intervalos entre descargas que precedem aquelas que contem CCL são mais curtos do que os seguidos por descargas sem CCL.

Esse estudo encontrou a média de duração de um intervalo entre descargas subseqüentes de raios múltiplos que não possuem CCL igual a 82.1 milissegundos (MG= 55.4 ms). Já para intervalo que antecede a descarga com CCL a média é de 56.6 milissegundos (MG=38.3 ms)

A figura 4.5 mostra a relação entre a duração da CCL e a duração do intervalo que a antecede. Foram selecionados intervalos entre descargas que possuíam

CCL e seu intervalo anterior. Dos 283 intervalos casos analisados, 95% dos intervalos que antecedem a descarga com CCL são inferiores a 146 ms. Intervalos superiores a esse valor tendem a apresentar CCL com duração menor. Isso confirma as relações apresentadas em estudos anteriores quanto à ocorrência de CCL estar vinculada a um intervalo anterior menor do que os intervalos que não envolvem CCL.

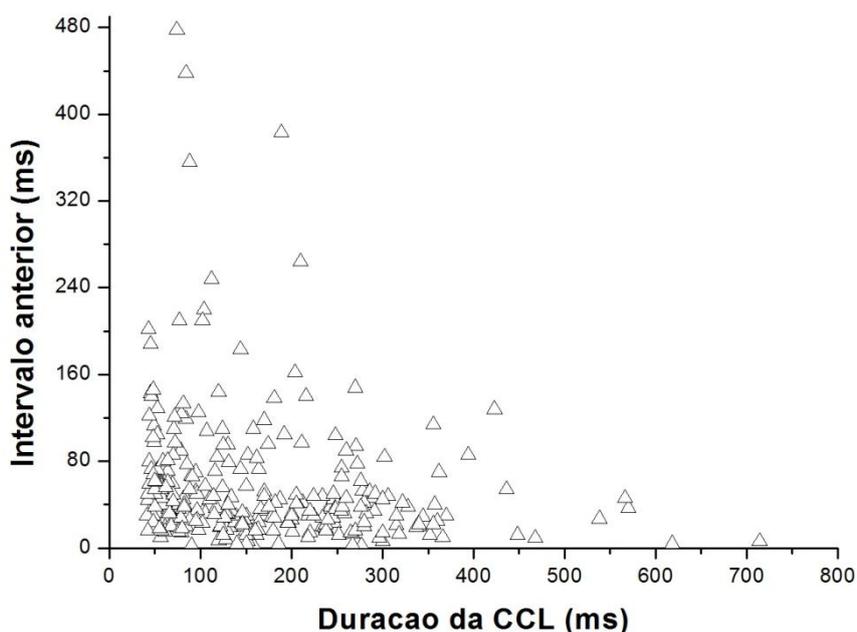


Figura 4.5 - Duração da CCL *versus* intervalo anterior

#### **4.4. Relação entre o pico da corrente da descarga de retorno e a duração da corrente contínua.**

Descargas de retorno detectadas que foram identificadas em vídeo como sendo aquelas que foram seguidas ou não por CC, tiveram associados o pico de corrente baseado no registro da rede BrasilDat.

Essa análise permitiu observar que nas descargas de retorno que não possuem CCL em média o pico de corrente é de 19.7 kA (MG =16.6kA). Já a descarga seguida por CCL tem em média pico de corrente de 12.9 kA

(MG=11.1kA) . As descargas que iniciam CCL tendem a serem menos intensas do que as regulares. Essa relação confirma os estudos anteriores e justifica o fato da presença de CCL em 1ª descargas de múltiplos ser rara, visto que elas costumam ser mais intensas.

A Figura 4.6 mostra a distribuição do pico de corrente médio para descargas de diferentes ordens inclusive descargas de raios simples. Note a semelhança entre o pico de corrente dos raios simples e dos raios subseqüentes. Raios simples apresentam maior presença de CCL em contraposição com primeira descarga de múltiplos na qual é rara a presença de CCL.

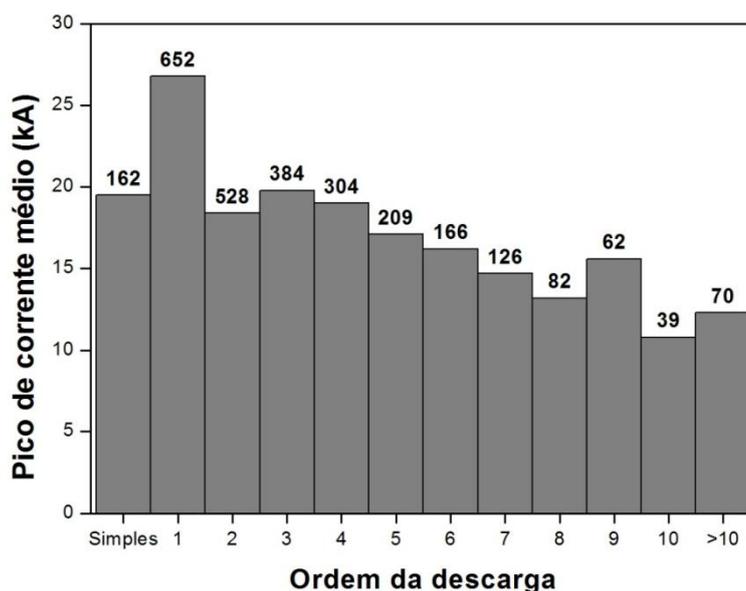


Figura 4.6 - Distribuição do pico de corrente das descargas de retorno em relação ao tipo de raio e a ordem em que aparecem no raio.

A relação entre o pico de corrente da descarga e os valores observados de duração do canal, seguidos pela ocorrência de corrente contínua é apresentada no gráfico de dispersão abaixo na Figura 4.7.

A grande maioria dos picos de corrente de maior intensidade está associada à duração de corrente contínua menor. Picos de corrente da ordem de centenas de quiloampères, observados em primeiras descargas de múltiplos (triângulo

azul da Figura 4.7), não foram encontrados para descargas subseqüentes e descargas de raios simples. Em contraposição, onde há picos inferiores a 40 kA e com duração acima de 80 ms de corrente contínua estão as descargas subseqüentes de múltiplos e as descargas dos raios simples, sendo mais raro as primeiras descargas de múltiplos. Esse comportamento dos raios negativos difere dos raios positivos pelo fato de que em raios positivos, é comum a existência de picos de corrente elevado associado às correntes contínuas de longa duração (SABA et al., 2006b).

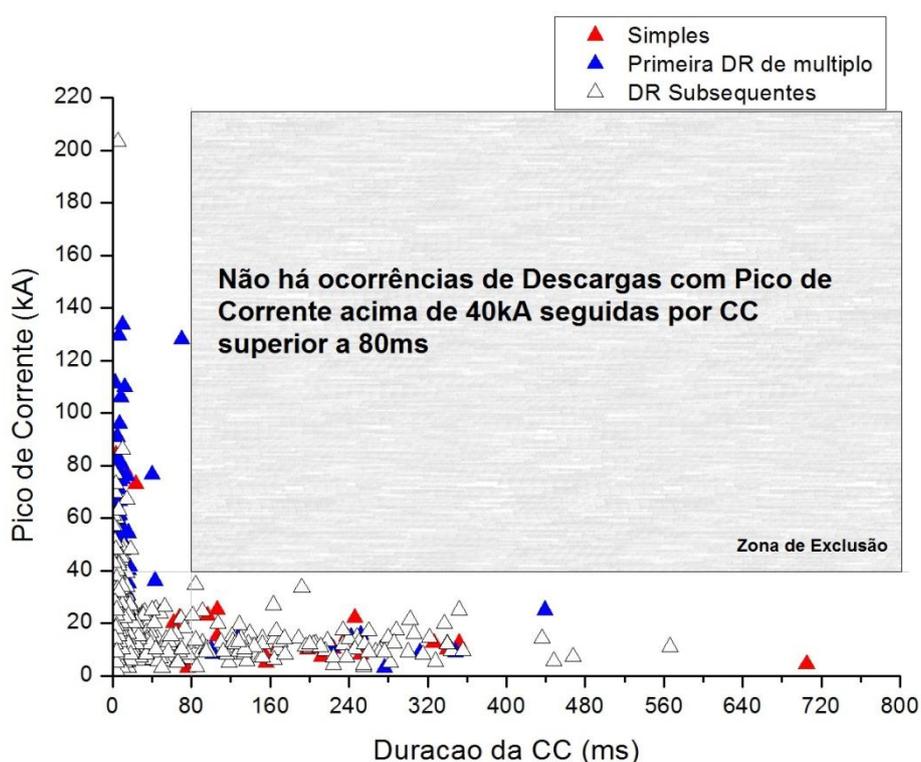


Figura 4.7 - Pico de corrente da descarga de retorno seguida por CC *versus* a duração da CC. Note a zona de exclusão que delimita a região onde não há valores de pico de corrente acima de 40 kA associados a CC com duração superior a 80 ms.

Dessa forma, pode-se concluir que deve existir uma relação entre o pico de corrente da descarga de retorno com a duração da corrente contínua que a segue. Observa-se uma zona de exclusão para a relação entre pico de corrente

e duração da CC semelhante a que foi apresentado anteriormente por Saba et. al. (2006b).

#### **4.5. Relação entre a ocorrência de CCL e a ordem das descargas**

Rakov e Uman 1990 encontraram na relação de porcentagem de descargas com CCL em relação à ordem das descargas, que somente em 2% raios múltiplos, uma primeira descarga é seguida por CCL. De fato, a primeira descarga de um raio múltiplo, não parece ser favorável à ocorrência da CCL. Apenas 19 (2,4%) primeiras descargas de 809 raios múltiplos foram seguidas por CCL. Já a probabilidade de raios simples conterem uma CCL é bem maior (15%, 24 em 162 raios simples).

A figura 4.8 mostra a distribuição de probabilidade de ocorrência de CCL em descargas de diferentes ordens. A quinta descarga é a que possui maior incidência de CCL. Esse resultado difere do encontrado em estudos anteriores (RAKOV e UMAN, 1990).

Provavelmente a quantidade limitada de casos tenha apontado essa tendência, que não aparece para este estudo que possui uma amostra de dados significativamente maior. Inclusive, a sugestão do autor de que a quinta descarga seria semelhante a uma primeira descarga no interior da nuvem, não é procedente para uma amostra maior de raios. A quinta descarga de um raio além de possuir uma maior incidência de CCL, apresenta um menor valor médio de pico de corrente, o que não é característica de primeiras descargas de múltiplos, conforme podemos observar na Figura 4.9.

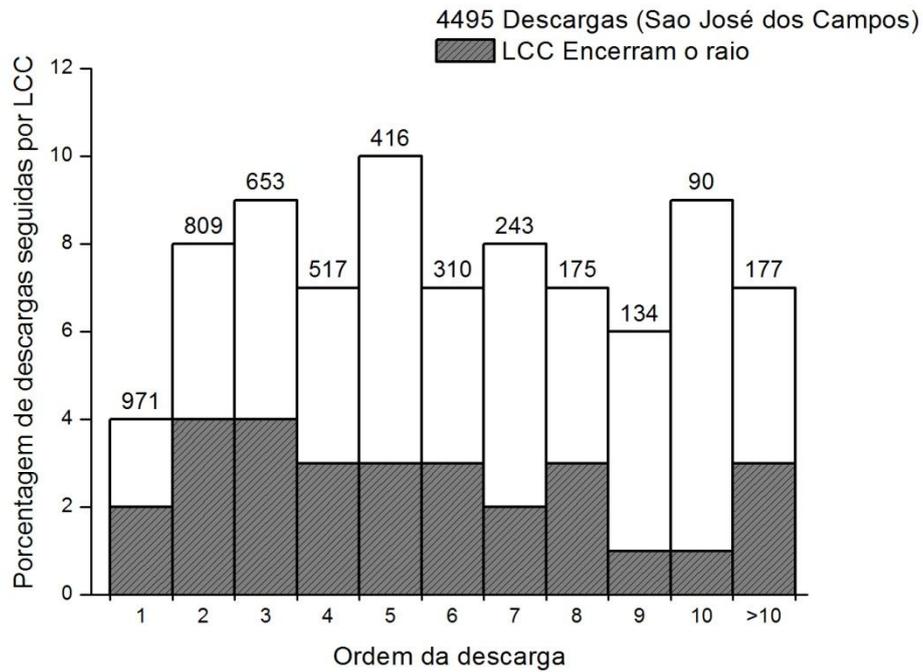


Figura 4.8 - Porcentagem de descargas seguidas por CCL em cada ordem da descarga. A área hachurada corresponde à porcentagem em que a CCL encerra o raio.

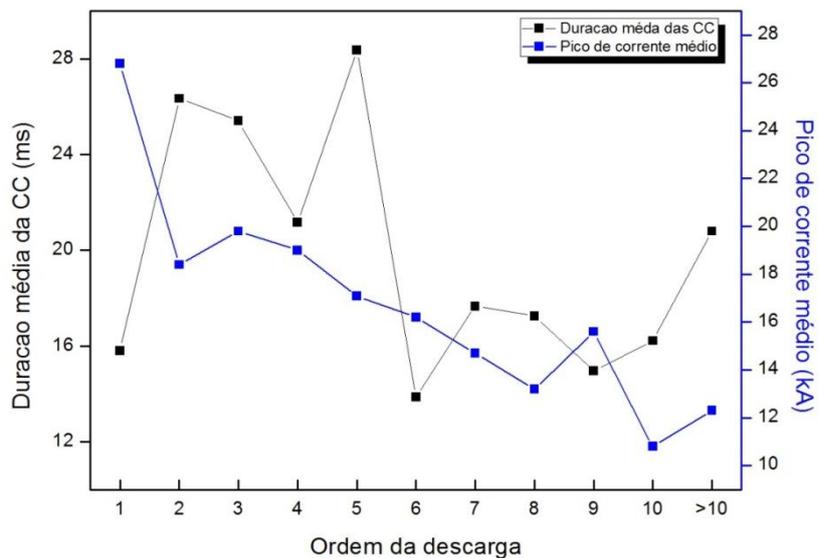


Figura 4.9 - Duração média da CC e Pico de corrente médio por ordem da descarga.

A porcentagem de raios contendo CCL nesse estudo é inferior a apresentada nos estudos anteriores. Conforme citado anteriormente, os valores observados em outros estudos são obtidos de uma a três tempestades e a partir de uma pequena amostra de raios. A quantidade de dados analisados nesse estudo é quase seis vezes maior que a soma dos dados dos outros dois estudos. Além disso, a limitação da instrumentação utilizada para identificar a presença de CCL nos trabalhos anteriores torna o presente estudo muito relevante para análises que dependam da informação sobre a ocorrência de CCL.

#### **4.6. Relação entre a ocorrência da CCL e novos canais**

Após a primeira descarga de retorno, outras descargas podem ocorrer sequencialmente em um mesmo local que apresentou luminosidade anterior conforme descrito no Capítulo 2. Nos registros de vídeos podemos observar que um caminho é traçado pelo líder até o solo, sendo então fortemente ionizado pela descarga de retorno que forma o chamado canal do descarga. As descargas subseqüentes podem ou não ocorrer por esse canal. Estudou-se aqui de que forma a presença de CCL está relacionada com a formação de novos canais.

A figura 4.10 apresenta a relação encontrada entre a ocorrência de CCL e a descarga anterior, com relação a formação de novos canais. Em 217(66%) descargas, a CCL ocorreu em um mesmo canal que a descarga anterior. A formação de um novo canal, em uma descarga de retorno que seja seguida por CCL aconteceu em 47(14%) das 328 CCL registradas. Isto significa que a CCL costuma ocorrer em um canal previamente ionizado pela ocorrência de outra descarga. A chance de ocorrência de uma descarga de retorno seguida por CCL utilizando o canal da descarga de retorno anterior é quase 5 vezes maior do que utilizando um novo canal.

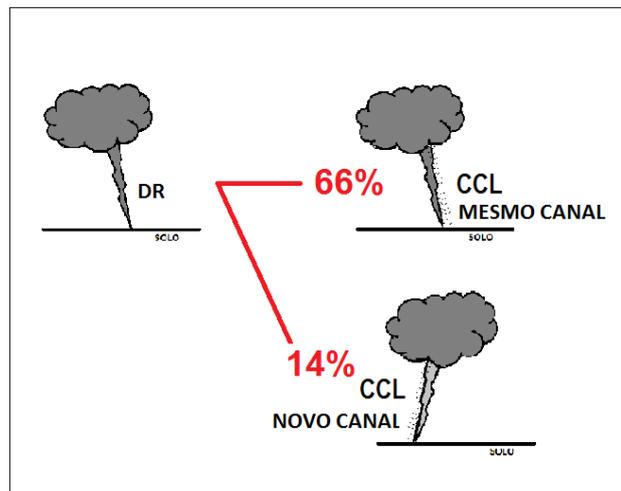


Figura 4.10 - Representação esquemática da relação entre a ocorrência de uma descarga de retorno e a próxima descarga contendo CCL. Observa-se que em 66% das vezes, a descarga contendo CCL ocorre num mesmo canal de uma descarga anterior.

Após a ocorrência de uma CCL também existe a possibilidade de novas descargas ocorrerem ou não em um novo canal. A probabilidade de ocorrência de um novo canal após a ocorrência de uma CCL é pequena, como indicado na Figura 4.11. Somente 12 (4%) das 328 CCL foram seguidas por uma descarga em um novo canal. Após a ocorrência de uma CCL, em 93% dos casos, ou as descargas subsequentes acontecem no mesmo canal (50%) ou o raio é terminado (43%). Isso fortalece a idéia de que a presença de CCL é fator determinante no estabelecimento do canal devido à promoção da condutividade desse canal. No restante dos casos analisados, em 2% dos casos avaliados não foi possível determinar uma relação entre os canais, pois a descarga subsequente ocorreu de forma difusa e em 1% dos casos a descarga de retorno posterior ocorreu em outro canal utilizado anteriormente.

A sucessiva ocorrência de descargas de um raio no mesmo ponto de contato tem um impacto muito maior sobre a estrutura atingida do que apenas uma descarga (DARVENIZA, 2000). Assim sendo, a informação de que em 93% dos casos, uma vez que a CCL acontece, ela tende a encerrar o raio ou favorecer a ocorrência de novas descargas pelo mesmo canal é de extrema

importância para a elaboração de sistemas de proteção contra descargas, visto que a chance de iniciar um novo canal será muito baixa e conseqüentemente, outros locais no solo dificilmente serão atingidos.

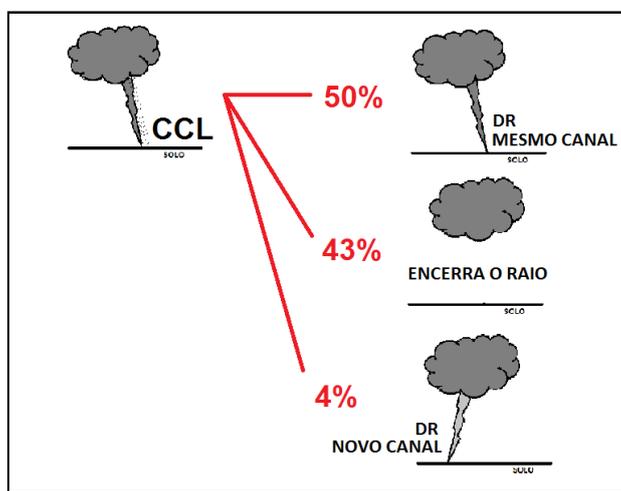


Figura 4.11 - Representação esquemática da relação entre a ocorrência de CCL e a formação de canais após a ocorrência de uma CCL. Raramente (4%) a próxima descarga de retorno acontece em um novo canal, sendo mais comum o raio ou ser encerrado (43%) ou promover novas descargas nesse mesmo canal (50%).

#### 4.7. Relação entre a ocorrência da CCL e a multiplicidade do raio

Raios múltiplos apresentam uma probabilidade de possuírem ao menos uma CCL de 29%. Os raios que possuem maior probabilidade (39%) de conterem ao menos uma CCL são os raios com multiplicidade igual a seis, ou seja, que possuem seis descargas de retorno. Isso se deve ao fato de que descargas de ordem 2 e 3 costumam ser responsáveis pelo estabelecimento do canal, favorecendo assim a ocorrência de CCL nas descargas seguintes que tendem a encerrar o raio (RAKOV e UMAN, 2003).

A Figura 4.12 apresenta a distribuição de probabilidade de CCL em raios com diferentes multiplicidades. Conforme a multiplicidade aumenta, também

aumenta a porcentagem de ocorrência de CCL. Isto se deve aparentemente a alguns fatores:

1. A primeira descarga, por ser usualmente mais intensa, é pouco propensa a conter CCL, conforme observamos no item 4.6 desse mesmo capítulo;
2. A segunda e a terceira descargas dos raios múltiplos têm boa probabilidade de acontecerem em novos canais (50% e 33% respectivamente, Figura 4.13) e, portanto como foi visto acima, tem menos chances de conterem CCL;
3. Como visto acima, é favorável ao acontecimento de uma CCL que a descarga siga o canal da descarga anterior.

Estas condições explicam o aumento da porcentagem de ocorrência de CCL com o aumento da multiplicidade (até uma multiplicidade igual a 6).

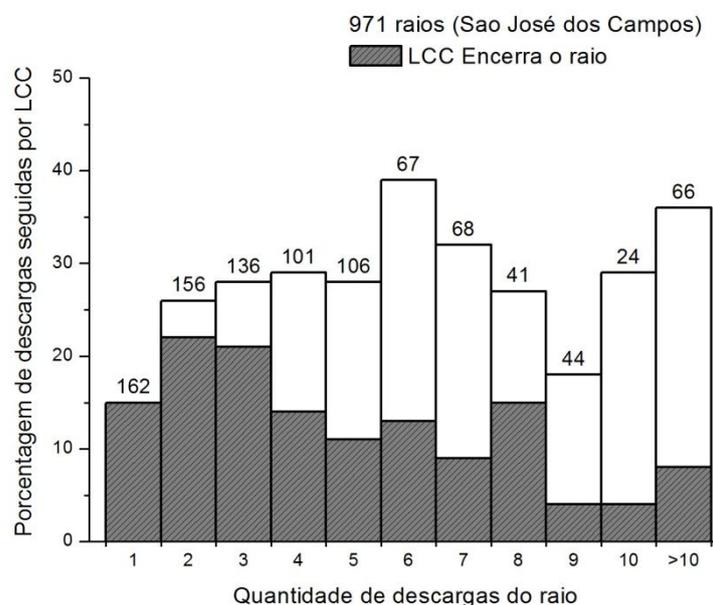


Figura 4.12 - Porcentagem de descargas seguidas por CCL para raios com diferentes multiplicidades. A área hachurada corresponde a porcentagem das CCL que encerram o raio.

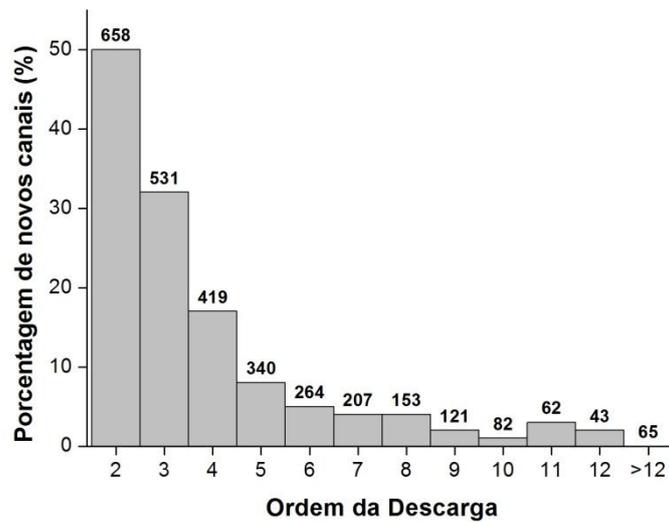


Figura 4.13 - Porcentagem de formação de novos canais para diferentes ordens da descarga. Não há casos de formações de novos canais para descargas de ordem superior a doze

No entanto, a partir da multiplicidade seis, apesar do canal estar bem condicionado para a ocorrência de uma CCL, a porcentagem de CCL não aumenta. Uma provável explicação está no fato de que a carga transferida pela CCL é de aproximadamente 3 vezes a de uma descarga de retorno sem CCL (KREHBIEL et al., 1979). Assim, a limitada quantidade de carga disponível na nuvem inibiria uma maior ocorrência de CCL.

Outra explicação provável deve-se ao fato de que conforme a ordem da descarga é maior, tanto maior é o comprimento do canal (Figura 4.14). Canais mais longos se tornam mais instáveis para correntes de menor intensidade, favorecendo a quebra do canal e promovendo maior multiplicidade por estarem menos propensos a apresentarem CCL, conforme descrito no Capítulo 2.

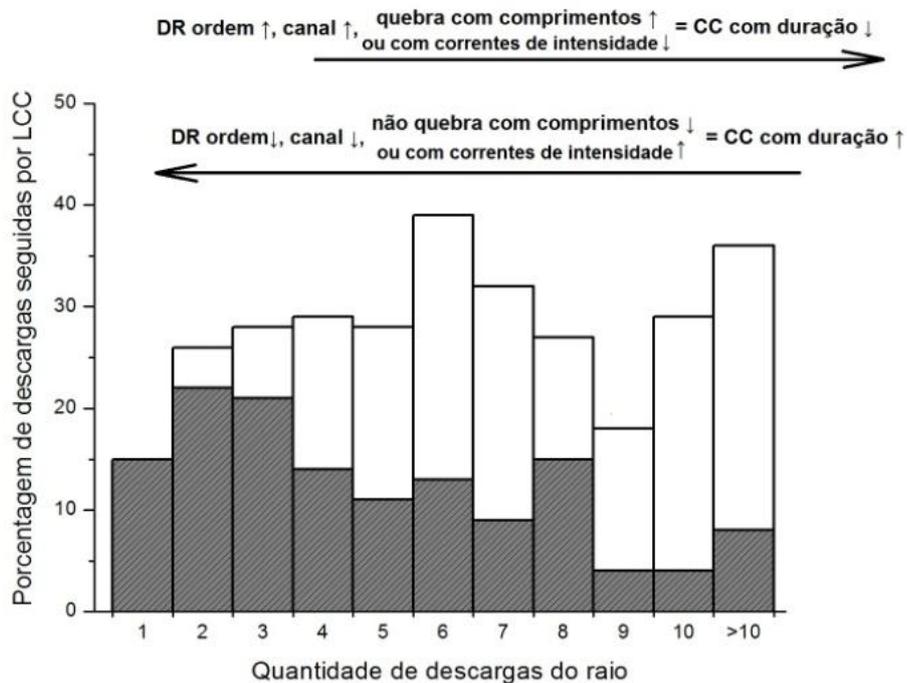


Figura 4.14 – Representação da relação entre a multiplicidade do raio com CCL e sua capacidade de estabelecer o canal ou encerrar com CCL.

Ao contrário disso, canais mais curtos são mais estáveis mesmo com correntes de intensidade menor possibilitando a CCL de maior duração.

#### 4.8. CCL finalizando o raio

Em raios com duas ou três descargas de retorno, a probabilidade de ocorrência de CCL é mais baixa do que de descargas multiplicidades maiores. Quando a CCL acontece nessas descargas, a probabilidade de o raio terminar com CCL são altas, conforme observamos na Figura 4.14.

Já nos casos com multiplicidade maior que 3, a ocorrência da CCL torna-se igualmente provável em qualquer das descargas anteriores e não necessariamente na última descarga. Assim a probabilidade de uma CCL encerrar o raio mantém-se estável nas multiplicidades maiores (Figura 4.14).

#### 4.9. Ocorrência de mais de uma CCL por raio

A ocorrência de mais de uma CCL por raio está presente nesse estudo, na mesma proporção que a apresentada por Kitagawa et al., 1962. Shindo e Uman(1989) e Rakov e Uman (1990) não encontraram raios com 2 ou mais CCL. Nosso banco de dados de 971 raios possui 49 casos de raios com pelo menos 2 CCL sendo cinco o número máximo de CCL observadas em um único raio.

Tabela 4.3 – Comparação dos dados obtidos para este estudo com relação a estudos anteriores.

Referência	Este Estudo São José dos Campos	Rakov e Uman (1990) Tampa, Flórida	Kitagawa et al. (1962) Socorro, Novo México
<b>Tipo de medida</b>	Vídeo de alta resolução temporal	Campo elétrico e VHS	Fotografia e campo elétrico
<b>Número de dias de tempestades</b>	124 dias entre 2003 e 2011	3 dias em 1979	1 noite em 1959
<b>Número de raios múltiplos</b>	809	63	72
<b>Número de raios com CCL</b>	235(29%)	27(43%)	36(50%)
<b>Número de raios com CCL que encerram o raio</b>	118(15%)	11(17%)	16(22%)
<b>Número de raios com pelo menos 2 CCL</b>	49(6%)	0	4(6%)
<b>Número de descargas seguidas por CCL iniciando um novo canal</b>	47	1	3
<b>Média do número de descargas por raios</b>			
<b>Sem CCL</b>	5.3	4.3	7.2
<b>Com pelo menos uma CCL entre intervalos</b>	6.8	8.5	8.5
<b>Com CCL que encerra o raio</b>	4.3	3.8	5.5
<b>Todos os raios com CCL</b>	5.6	6.6	7.2

#### 4.10. Relação entre a CCL e a eficiência de detecção

Como a presença de CCL é um fator relevante na relação entre a incidência de raios e os danos por eles causados, a análise da eficiência de detecção das descargas que os contem se faz necessário. As descargas com CCL possuem pico de corrente inferior as demais, portanto tendem a ser menos detectadas pela rede. Para isso foram selecionadas 3710 descargas ocorridas de 2003 a 2010. A eficiência de detecção total foi de 67% para esse período.

A figura 4.15 apresenta a eficiência de detecção da rede e a média do pico de corrente estimado para diferentes durações de CC. A média do pico de corrente estimado apresenta valores menores para durações maiores de CC. Como a eficiência de detecção está também condicionada à intensidade do pico de corrente da descarga, ela também é menor para valores maiores de duração de CC.

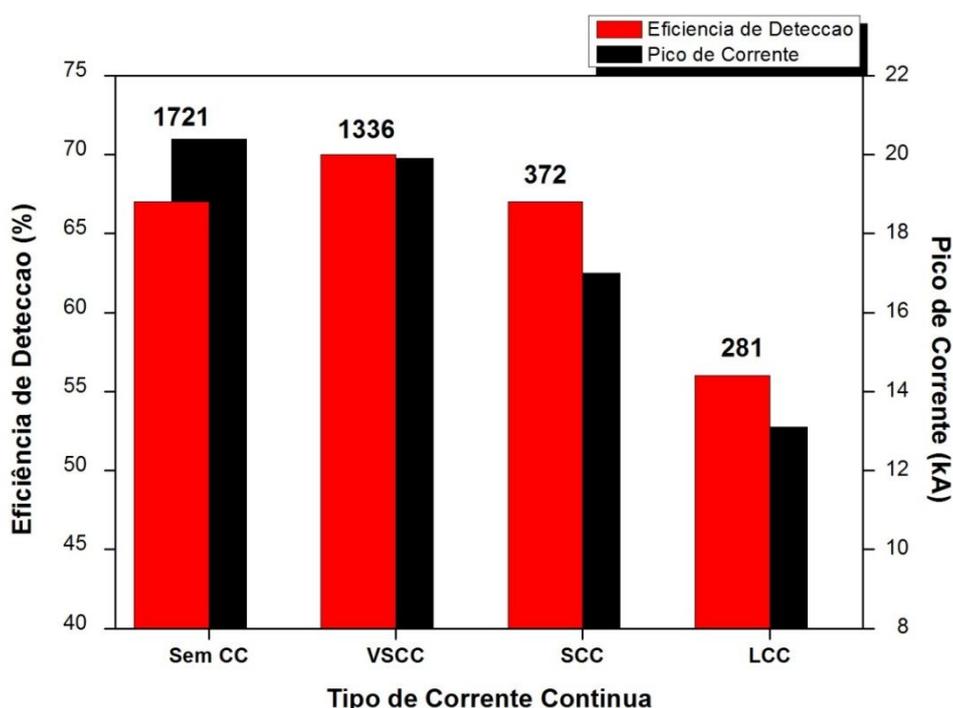


Figura 4.15 - Eficiência de detecção por tipo de corrente contínua e por pico de corrente médio.

#### 4.11. Carga transferida por CCL

Uma carga de cerca de 6C é transferida durante a ocorrência da descarga de retorno. No caso da presença de corrente contínua esse valor pode chegar a 19 Coulombs (KREHBIEL et al., 1979). Ferraz (2009) encontrou para uma amostra dos dados do ano de 2005, que também faz parte desse banco de dados, o valor médio de carga transferida para corrente contínua de 36,5 Coulombs. A presença de corrente contínua, conforme dito anteriormente é, portanto, um dos principais modos de transferência de carga entre a nuvem e o solo.

Utilizando um método análogo ao utilizado por Ferraz (2009), selecionamos 9 raios negativos ocorridos em 5 dias diferentes e calculamos a carga transferida por 11 CCL destes raios também observados por câmeras de alta resolução.

O raio 459 registrado como M9R459 ocorreu no dia 11/02/2011, as 21:45:51,173. Esse raio possuía 4 descargas de retorno e CCL na segunda descarga, com duração observada em vídeo de 145 ms. Pode-se verificar na figura 4.16 a curva obtida pelos sensores de campo elétrico rápido (E-fast) e lento (E-slow).

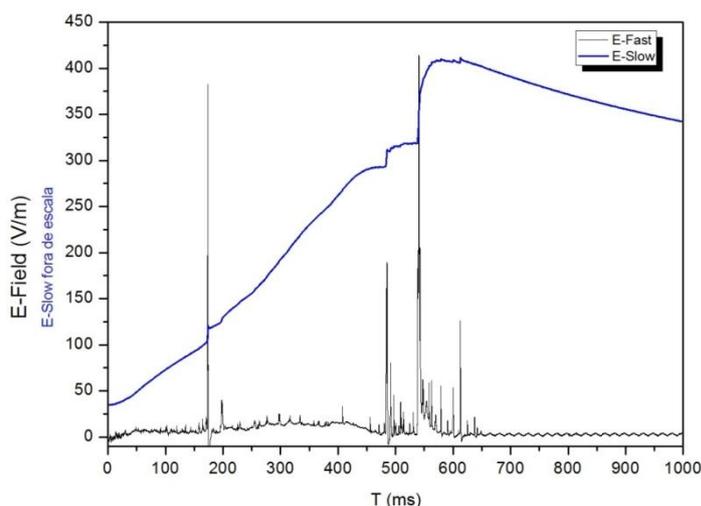


Figura 4.16 - Campo elétrico rápido e lento obtido para o raio 459.

A descarga de retorno contendo a CCL ocorreu a 17,6 km do ponto de observação, sendo a distância obtida pela rede BrasilDat. O programa *deconvolecarga* obteve o valor de RC em 0.41s para a curva de decaimento do campo elétrico. A altura média para o centro de carga da nuvem associada foi de 7187 metros, obtido através da análise dos dados de radiossonda para o dia, conforme descrito no Capítulo 3. A figura 4.17 mostra os parâmetros de entrada do programa *deconvolecarga*.



Figura 4.17 - Dados de entrada do programa para o cálculo de carga e intensidade média de corrente, sendo eles: fator torre, razão V/E, distância e RC.

A Figura 4.18 apresenta a curva deconvolucionada obtida pelo programa de acordo com os parâmetros acima.

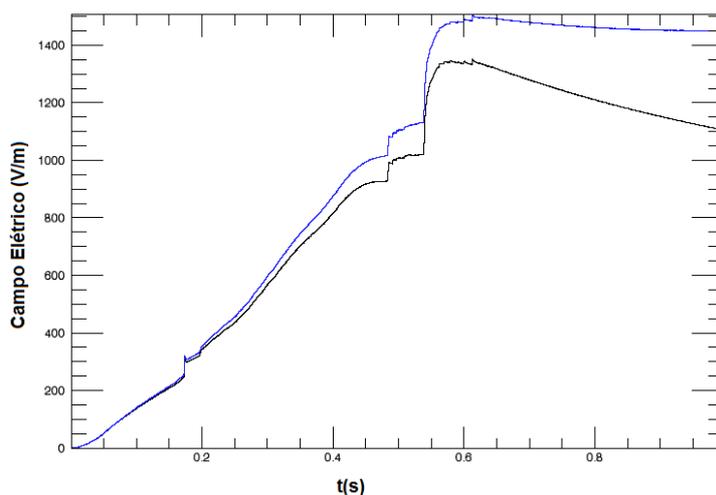


Figura 4.18 - Curva original em preto e curva deconvolucionada em azul, obtida pelo programa *deconvolecarga*.

Utilizando o programa *deconvolecarga*, obteve-se a carga transferida de 32,8 C para um intervalo de 281 ms selecionado a partir da curva deconvolucionada. A corrente média para esse trecho de CCL foi de 116,6 A. Após a ocorrência dessa CCL houve mais duas novas descargas no mesmo canal em que ocorreu a CCL. Figura 4.19 tem-se os valores calculados para a carga e a corrente média de acordo com o trecho de CCL selecionado.

DADOS OBTIDOS DA DECONVOLUÇÃO DA CURVA	
*TRECHO DE CC LONGA	
Raio ->459	CARGA-> 32.7751C
Tempo total ->	281.110ms
Imedia ->	116.592A
Intervalo selecionado:	0.197870 até 0.478980

Figura 4.19 - Quadro dos dados obtidos pelo programa

A mesma análise foi realizada para as outras 10 CCL. Os dados de entrada no programa estão relacionados na Tabela 4.4 abaixo. O código do programa utilizado para o cálculo de carga encontra-se no Apêndice A.

Tabela 4.4 – Tabela descritiva dos raios analisados. Nome do raio, data, hora, multiplicidade, identificação da ordem da descarga que possui CCL e duração foram obtidas pelo vídeo. Os outros campos, fator torre, proporção V-E, altura do centro de carga, distância da DR e duração pelo campo, foram obtidos através das metodologias descritas no Capítulo 3 e são os dados de entrada do programa *deconvolecarga* para os raios com CCL analisados.

RAIO	DATA	HORA DO PRIMEIRO REGISTRO	QTDE DE DRs	DR QUE POSSUI CC	FATOR TORRE	FATOR V-E	ALTURA DO CENTRO DE CARGA (m)	DISTANCIA DA DR (km)	DURAÇÃO DA CC PELO VIDEO (ms)	DURAÇÃO DA CC PELO CAMPO LENTO
M9R24	25/11/2010	20:55:01	9	7	6.635	1.295	7161	9.1	200	207.4
M9R25	25/11/2010	20:55:01	10	5	6.635	1.295	6718	6.84	170	119.7
M9R25	25/11/2010	20:55:01	10	10	6.635	1.295	6718	6.84	98	43.7
M9R109	26/12/2010	17:44:30	5	4	6.635	1.295	7823	6.29	88	91.9
M9R311	31/01/2011	17:16:31	2	2	3.139	1.295	7306	8.45	150	157.22
M9R378	2/2/2011	18:01:45	3	3	3.139	1.295	7561	14.55	200	293.1
M9R434	11/2/2011	20:42:27	2	2	3.139	1.295	7187	5.46	315	188.2
M9R451	11/2/2011	21:21:47	10	7	3.139	1.295	7187	10.22	300	298
M9R453	11/2/2011	21:26:07	2	1	3.139	1.295	7187	10.42	348	280.9
M9R453	11/3/2011	22:26:07	2	2	3.139	1.295	7187	10.42	81	20.4
M9R459	11/2/2011	21:45:51	4	2	3.139	1.295	7187	17.62	146	281

Na Tabela 4.5 estão relacionados para cada raio a quantidade de descargas de retorno, a ordem da descarga que foi seguida por CCL e que foi analisada pelo programa, o tempo de duração da CC selecionado para o cálculo da carga e os resultados obtidos para a intensidade média da corrente contínua e a intensidade (em módulo) da carga envolvida. Pode-se observar que as descargas que transferem uma carga maior, ou corrente de maior intensidade ocorrem em raios de menor multiplicidade e na maioria dos casos são responsáveis pelo encerramento do raio.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos pelo programa *deconvolecarga* para os raios com CCL analisados.

RAIO	QTDE DE DRs	Ordem da DR com CCL	DURAÇÃO DA CC PELO CAMPO LENTO (ms)	Imédia (A)	Carga (C)	Erro(C)
M9R24	9	7	207	19.4	4.0	0.9
M9R25	10	5	120	26.9	3.2	0.8
M9R25	10	10	44	26.3	1.1	0.3
M9R109	5	4	92	20.3	1.9	0.4
M9R311	2	2	157	122.7	19.3	4.2
M9R378	3	3	293	153.4	45.0	8.2
M9R434	2	2	188	55.6	10.5	2.3
M9R451	10	7	298	23.1	6.9	1.5
M9R453	2	1	281	165.1	46.4	9.8
M9R453	2	2	20	300.7	6.3	1.3
M9R459	4	2	281	116.6	32.8	5.5

A Figura 4.20 apresenta a relação entre a carga estimada envolvida na ocorrência da CCL e a duração da CCL. A média aritmética da carga estimada, envolvida na CCL para esses dados, foi de 16 C e a intensidade média da corrente foi de 93,6 A. A média geométrica para o valor da carga é de 8.5 C e a média geométrica para a intensidade de corrente é de 60,4 A.

A distribuição da intensidade média de corrente estimada para o trecho contendo CCL com relação à multiplicidade dos raios, apresentada na Figura 4.21, mostra que intensidades maiores de corrente costumam ocorrer em raios de menor multiplicidade. Um exemplo é o raio M9R378 em que a CCL ocorre na descarga de ordem 3, que é a ultima descarga do raio e cujo a intensidade de corrente é de 153,4 A. Isso é mais um indício da importância da presença

de CCL na descarga, pois como citado anteriormente, elas podem ser responsáveis por encerrar o raio, uma vez que tornam o canal condutivo o suficiente para promover a transferência de carga por mais tempo sem a quebra do canal.

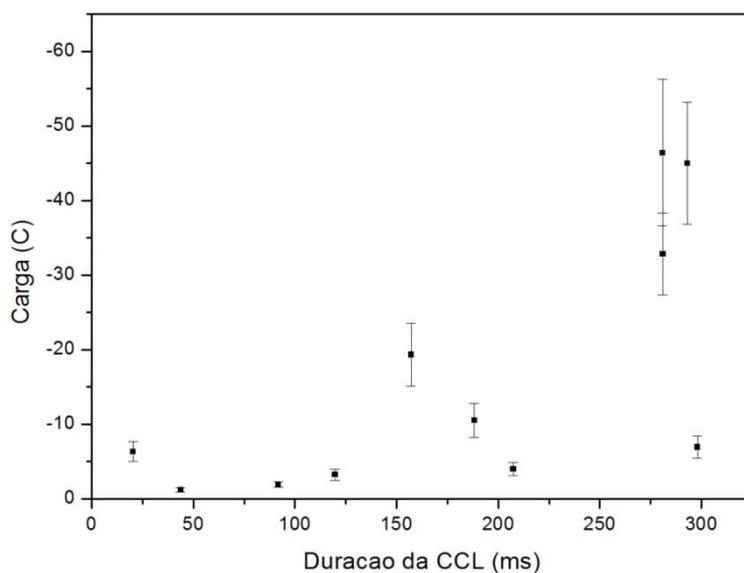


Figura 4.20 – Valor estimado da carga de acordo com a duração da CCL.

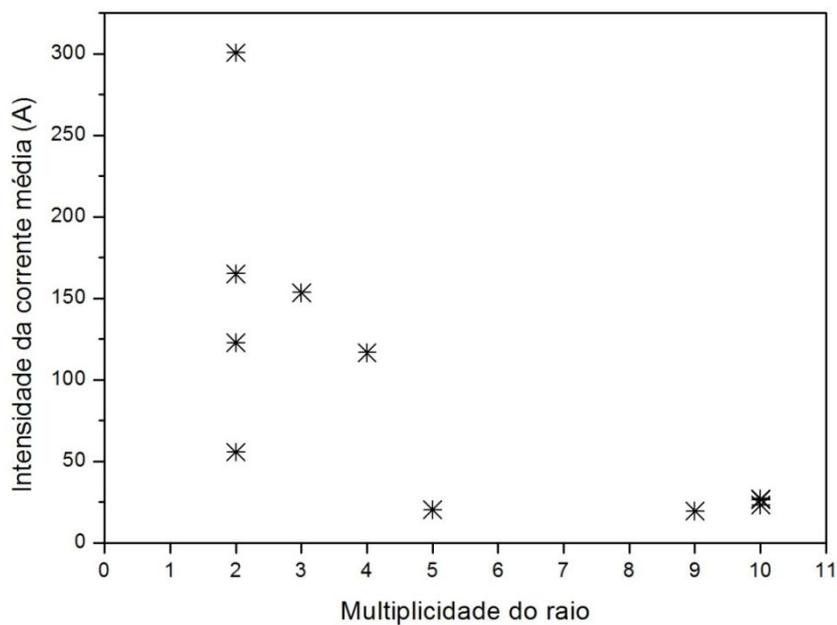


Figura 4.21 – Intensidade de corrente média de acordo com a multiplicidade do raio.

Outra observação importante é que nas descargas com CCL cuja intensidade média de corrente é menor, a CCL parece não ser suficiente para encerrar o raio e novas descargas ocorrem. Um exemplo disso é o raio M9R25 que possui multiplicidade 10. A descarga contendo a primeira CCL é a de ordem 5 porém a intensidade dela é baixa, cerca de 26,9 A. Após sua ocorrência, tem-se a quebra do canal e novas descargas subsequentes ocorrem, sendo a de ordem 10 seguida por uma nova CCL, que encerra o raio. Isso pode ser explicado pelo fato de a CCL na ordem 5 não ser suficiente para manter o canal condutivo dando início a quebra do canal, e permitindo que novas descargas ocorram após essa quebra.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi apresentar um estudo sobre a presença e as características da corrente contínua em raios negativos.

A presença de corrente contínua em raios nuvem-solo negativo é, significativamente, alta e, apesar de a corrente contínua longa ser menos frequente do que as correntes curtas e muito curtas, sua duração tem uma expressiva importância para os sistemas de proteção, visto que em 50% dos casos excedem 146 ms.

Foi confirmada a hipótese de estudos anteriores, de que existe uma relação entre o intervalo de tempo anterior à descarga que inicia uma CCL e a duração da CCL. As descargas seguidas por CCL com maiores duração são precedidas por intervalos de tempo menores.

Com relação à ordem das descargas, foi observado que existe uma chance maior da ocorrência de CCL em descargas de ordem 5, em oposição às descargas de ordem 1, que raramente possuem CCL. Este resultado, que tem por base uma grande amostragem de casos, mostra que a limitação no número de dados de uma amostra - por exemplo, 76 casos em Rakov e Uman (1990) - pode comprometer o resultado estatístico de uma análise.

Raios simples possuem uma incidência de CCL de 15%. Este resultado contrapõe-se a resultados anteriores - também realizados com uma pequena amostragem - que indicavam uma rara presença de CCL em raios com uma única descarga.

Foi confirmada a relação inversa entre a duração da CCL e o pico da descarga que a precede. CCL com duração maior costuma ocorrer após descargas de retorno com intensidade menor do pico de corrente. Este pode ser o fator preponderante que explicaria porque as primeiras descargas dos raios múltiplos negativos possuem uma incidência menor de CCL. Como a primeira

descarga de um raio costuma possuir um pico de corrente mais alto que as demais descargas, a presença de CCL é bastante rara.

Rakov et al.(1990) entende por condicionamento do canal do raio os fatores que contribuem para manter a sua ionização elevada de forma que possíveis descargas subsequentes fluam por este mesmo canal. Neste estudo, concluímos que descarga de retorno contendo CCL costuma acontecer (em 66% dos casos) em um mesmo canal já utilizado por uma descarga anterior. Somente em 14% dos casos, uma descarga será seguida por uma CCL se ela ocorrer em um novo canal. Isto se deve à falta de condicionamento do canal para a ocorrência da CCL. Assim, a utilização prévia do canal por uma descarga de retorno ioniza o canal de tal forma que possibilita a ocorrência de uma CCL. Da mesma forma, percebemos neste estudo que a CCL promove um condicionamento do canal. A grande transferência de carga pela CCL intensifica sua condutividade e, conseqüentemente, descargas de retorno subsequentes tendem a seguir o canal previamente estabelecido pela CCL - 50% dos casos. Raramente - em 4% dos casos - haverá uma descarga de retorno subsequente que inicie um novo canal após a ocorrência de uma CCL. Além disso, também pela grande transferência de carga que promovem, após uma CCL - em 43% dos casos - o raio será encerrado.

Estatisticamente, poderíamos esperar que um raio com maior número de descargas apresentasse maior probabilidade de conter ao menos uma CCL. No entanto, descargas de ordens maiores, por apresentarem comprimento de canal maior, precisam de uma corrente de intensidade maior para que não haja a sua interrupção (*cutoff*). Assim, como maiores intensidades de CC são menos prováveis em descargas de ordem maior, ocorre mais facilmente à ruptura do canal, o que inviabiliza a presença de CCL.

A ocorrência de mais de uma CCL por raio está presente nesse estudo, na mesma proporção que a apresentada por Kitagawa et al.(1962). Shindo e

Uman(1989) e Rakov e Uman (1990) não encontraram raios com 2 ou mais CCL.

Uma análise da eficiência de detecção para raios contendo qualquer tipo de corrente contínua mostra que a descarga que inicia uma CCL possui intensidade de pico de corrente significativamente menor e, portanto, são menos detectadas pela rede.

O programa *deconvolecarga* desenvolvido para este estudo, visando aprimorar o cálculo da carga transferida pela corrente contínua, foi apresentado e utilizado para o cálculo da carga de 11 CCL presente em 10 raios diferentes. A identificação da CCL e o cálculo da carga foi possível devido à aquisição simultaneamente feita pelas câmeras de alta resolução temporal, pelo campo elétrico rápido e lento e pela rede BrasilDat.

A CCL com corrente de intensidade menor costuma ocorrer em descargas de maior multiplicidade. A menor intensidade da CCL não sustenta o canal que se quebra dando lugar a novas descargas. Já as descargas com CCL de maior intensidade ocorrem em raios de menor multiplicidade, pois na maioria dos casos, ela é responsável por encerrar a descarga.

Sugestões para trabalhos posteriores:

- 1- Análise mais aprofundada da relação entre a ocorrência da CCL e sua relação com a formação de novos canais.
- 2- Análise da relação entre os tipos de tempestades e a ocorrência da CCL.
- 3- Aprimoramento do sensor de campo elétrico lento de forma a diminuir a relação de sinal/ruído e a automatização de processos intermediários entre a medida de sinal e a análise da forma de onda obtida.

- 4- Aprimoramento do programa *deconvolecarga* para diminuir o seu tempo de execução e para criar rotinas que possam ser utilizadas a critério do usuário.
- 5- Estudar possibilidades de aumentar a eficiência de detecção da rede para os raios que possuem CCL.
- 6- Estudo integrado das diferentes medidas para cada raio, com ênfase na microfísica da corrente contínua longa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLAROTTI, M.G.; SABA, M.M.F.; PINTO JR., O. High speed camera observations of negative ground flashes on a milisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, v. 32 n. 23, 2005. DOI: 10.1029/2005GL023889.

BEASLEY, W.; UMAN, M. A.; RUSTAN JR., P. L. Electric Fields Preceding Cloud-to-Ground Lightning Flashes, **J. Geophys. Res.**, v.87, n.C7, pp 4883–4902, 1982. DOI: 10.1029/JC087iC07p04883.

BROOK, M.; KITAGAWA, N.; WORKMAN, E.J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. **J. Geophys. Res.**, v.67, n.2, pp 649-659, 1962. DOI: 10.1029/JZ067i002p00649

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F. Estudo dos líderes de relâmpagos naturais. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE), 2009, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 39. CD-ROM; Papel; On-line. (INPE-16330-PRE/10909). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/08.10.15.04>>.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JÚNIOR, O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 91, p. 416-424, 2009. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.02.020.

COORAY, V.; RAHMAN, M.; RAKOV, V. On the NO<sub>x</sub> production by laboratory electrical discharges and lightning. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 71, pp. 1877-1889, 2009. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.07.009.

DARVENIZA, E. P.M. Some lightning parameters revisited. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2000, Rhodes, Greece. **Proceedings...** Rhodes: ICLP, 2000.

DIENDORFER G.; VIEHBERGER M.; MAIR M.; SCHULZ W.. An attempt to determine currents in lightning channels branches from optical data of a high speed video system. INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING AND STATIC ELECTRICITY (ICOLSE), 2003, Blackpool, United Kingdom. **Proceedings...** Blackpool: ICOLSE, 2003.

FERRAZ, E. C. **Medidas de corrente contínua em raios nuvem-solo negativos naturais no Brasil**: desenvolvimento de instrumentação e primeiros resultados. 2009. 133 p. (INPE-15786-TDI/1529). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em:

<http://urlib.net/rep/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/06.29.19.40?languagebutton=pt-BR>>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

FISHER R.J.; SCHNETZER G,H. Damage to metallic samples produced by measured lightning currents. INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING AND STATIC ELECTRICITY (ICOLSE), 1991, Sandia National Labs. Albuquerque, New Mexico (USA). **Proceedings...** Albuquerque : ICOLSE, 1991.

FUQUAY, D. M.; TAYLOR, A. R.; HAWE, R. G.; SCHIMD JR., C. W. Lightning discharges that caused forest fires. **J. Geophys. Res.**, v. 77, n. 12, pp 2156-2158, 1972. DOI: 10.1029/JC077i012p02156.

GODA, Y; YOKOYAMA, S.; WATANABE, S.; KAWANO, T. Melting and Breaking Characteristics of OPGW Strands by Lightning. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 19, pp 1734-1739, 2004. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.07.009.

GUO, C. e KRIDER, E. P. The optical and radiation field signatures produced by lightning return strokes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.87(C11), pp. 8913-8922, 1982. DOI: 10.1029/JC087iC11p08913.

HAGENGUTH, J. H. e ANDERSON, J. G. Lightning to the Empire State Building. **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v.71, pp. 641-649, 1952. DOI: 10.1109/AIEEPAS.1952.4498521.

HECKMAN, S. **Why does a lightning flash have multiple strokes?**. Thesis (Ph. D. Departament of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences) - Massachussets Institute of Technology, Massachussets, 1992. Disponivel em: <http://hdl.handle.net/1721.1/17300>.

KITAGAWA, N.; BROOK, M. e WORKMAN, E.J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.**, v.67, n. 2, pp. 637-647, 1962. DOI: 10.1029/JZ067i002p00637.

KREHBIEL, P. R.; BROOK, M. e McCRRORY, R.A. An Analysis of the Charge Structure of Lightning Discharges to Ground. **J. Geophys. Res.**, v.84(C5), pp. 2432-2456, 1979.

KRIDER, E. P. **Physics of lightning**. the Earth's electrical environment (studies in geophysics). Washington, DC: National Academy Press, 1986.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. The electrical process in the intervals between the strokes of a lightning discharge. **Proceedings...**, v. 206, pp.145-163, Londres, 1951.DOI: 10.1098/rspa.1951.0061.

MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Determining the striking distance of lightning through its relationship to leader potential. **J. Geophys. Res.**, v.108(D14), pp. 4409-4415, 2003. DOI:10.1029/2002JD003047.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Physique**, v. 3, n. 10, pp. 1393-1409, 2002. DOI: 10.1016/S1631-0705(02)01412-3.

McEACHRON, K. B. Lightning to the Empire State Building. **Journal of Franklin Institute**, v.227, 1939.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00>>. Acesso em: 19 out. 2011.

NAKAHORI, K.; EGAWA, T.; MITANI, H. Characteristics of winter lightning currents in Hokuriku district. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v.101, n.11, pp. 4407-4412, 1982.

ORVILLE, R. E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke. **Journal of the Atmospheric Sciences**. v. 25, pp. 827-838, 1968.

PICHLER H. **Amplifier with automatic offset correction for recording the E-field of lightning pulses**. Viena: Institute of Power Systems and Energy Economics, 2004.

PINTO, I.R.C.A.; CARDOSO, I; PINTO JR., O.; GEIER, N. Lightning fatalities in Brazil in the last decades. In: 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2010, Orlando. **Proceedings...** Orlando:ICLP, 2010.

PINTO, I. R. C. A.; PINTO JUNIOR, O.; CAMPOS, D. R.; NACCARATO, K. P. Climatology of large peak current cloud-to-ground lightning flashes in the Southeast Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 114. doi: 10.1029/2009JD012029.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R.C.A. **Relâmpagos**. São Paulo : Brasiliense, 2009.

PLUMMER, J. A. **A proposed addition to the lightning environment standards applicable to aircraft to account for effects of positive lightning strokes of long duration and moderate intensity**. Massachusetts : Lightning Technologies Inc., 2005.

RAKOV, V.A.,UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. Cambridge: University Press, 2003.

RAKOV, V. A. e UMAN, M. A. Long continuing current in negative lightning ground flashes. **J. Geophys. Res.** v. 95, pp 5455-5470, 1990.

RAKOV V. A. Lightning Electric and Magnetic Fields. **J. Geophys. Res.**, p. 561-566, 1999.

- RAKOV, V.A.; UMAN, M. A.; JORDAM, D.M., PRIORE, C.A. III. Ratio of leader to return stroke field change for first and subsequent lightning strokes. **J. Geophys. Res.** v.95, n. 16, p. 579-587, 1990.
- SABA, M.M.F.; BALLAROTTI, M.G. e PINTO JR., O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high speed video observations. **J. Geophys. Res.**, v. 111, n. D3, 2006a.
- SABA, M. M. F.; PINTO JR., O. e BALLAROTTI, M. G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters.**, v. 33, 2006b.
- SADIKU M.N.O. **Elements of electromagnetics**. Oxford, USA: University Press, 1994.
- SÃO SABBAS, F. T. **Estudo da relação entre sprites e os relâmpagos das tempestades associadas**. 2010. 150 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10.19.17.51-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38EMG42>>. Acesso em: 19 out. 2011.
- SARAIVA, A. C. V. **Estudo dos fatores determinantes das características dos raios negativos**. 2010. 189 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.17.17.41-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37GG4RP>>. Acesso em: 19 out. 2011.
- SCHONLAND, B.F.J. The lightning discharge. **Handbusck der Physik**. Berlin : Springer-Verlag, v. 22, p. 576-628, 1956.
- SCHULZ, W.; LACKENBAUER, B.; PICHLER, H.; DIENDORFER, G. LLS data and correlated continuous E-Field measurements. In: INT. SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION (SIPDA), 8., 2005, São Paulo,. **Proceedings...** Sao Paulo:SIPDAI, 2005.
- SHINDO, T.; UMAN, M. A. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 94, n. d4, pp 5189-8198, 1989.
- THOTTAPPILLIL, R.; GOLDBERG, J. D.; RAKOV, V. A.; UMAN, M.A.; FISHER, R. J.; SCHNETZER, G. H. Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base. **J. Geophys. Res.**, v. 100. n.D12, p. 711-720, 1995.DOI: 10.1029/95JD02734
- UMAN, M. A. **The lightning discharge**. Orlando, FL: Academic Press, 1987
- WILLIAMS, E. R. Problems in lightning physics—the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Sci. and Technol.**, v. 15, n. 2, pp. 91-108, 2006. DOI: doi:10.1088/0963-0252/15/2/S12

## APENDICE A – Programa fonte *deconvolecarga*

Programa desenvolvido em IDL6.0 utilizado para o cálculo de carga e intensidade média de corrente durante a ocorrência de CCL em descargas.

```
PRO gfunct, X, A, F, pder
  bx = EXP(A[1] * X)
  F = A[0] * bx
```

```
;If the procedure is called with four parameters, calculate the
;partial derivatives.
```

```
  IF N_PARAMS() GE 4 THEN $
    pder = [[bx], [A[0] * X * bx], [replicate(1.0, N_ELEMENTS(X))]]
  END
```

Pro deconvolecarga

```
SET_PLOT,'WIN'
DEVICE, DECOMPOSE = 0
LOADCT, 0
ok = 'Yes
```

```
while (ok eq 'Yes') do begin
```

```
  j = 0LL      ;Quantidade de pontos do gráfico
  R2 = 0.0      ;
  tvec = 0      ;
  colA = 0.0    ;
  colB = 0.0    ;
  hnuv = 0.0    ;Altura da nuvem
  mx = 0LL      ;
  dt = 0.0
  raio = string(20)
  dist=0.0
  ftorre=0.0
```

```
    mx = 500000 ;QTDE DE PONTOS ATÉ 500.000 MAS PODE SER MAIS SE
    NECESSÁRIO, BASTA AUMENTAR
```

```
  ; ***** ENTRADA DE DADOS *****
```

```
  READ, 'Raio ->', raio
  read, 'Digite a distância da descarga em km: ', dist
  read, 'Altura do centro de carga na nuvem em m: ', hnuv
  read, 'Fator torre para o dia: ', ftorre
```

```
  dist=dist*1000
```

```
  .***** ABERTURA DE ARQUIVO COM DADOS DO CAMPO ELÉTRICO
  *****
```

```
  ;file = dialog_pickfile(path = 'c:\ bin/',title = 'abrir arquivo inicial...', filter = '*.bin')
```

```

;arq = READ_BINARY(file)

arq = dialog_pickfile(path = 'c:\ txt/',title = 'abrir arquivo inicial...', filter = '*.txt')
openr, 1, arq[0]
;-----

mx=file_lines(arq)
vecA = fttarr(mx) ;DEFINE O TAMANHO DO VETOR DE DADOS DE ACORDO COM A QTDE
DE PONTOS(MAXIMO DE 500.000)
vecB = fttarr(mx)

;hnuv=6107 ;ALTURA DA NUVEM PARA CENTROS DE CARGA NEGATIVOS

SET_PLOT,'WIN'
DEVICE, DECOMPOSE = 0
LOADCT, 0

ok = 'Yes' ;***** DEFINIÇÃO DE POLARIDADE DO RAI0*****
ok = dialog_message('Relâmpago negativo?','/q)

;-----
if ok eq 'No' then begin ; PARA RELÂMPAGOS POSITIVOS
  while NOT EOF(1) do begin ; le arquivo fonte ---> arquivos .bin diferem de .csv do
osciloscópio(x 1000)
    readf, 1, colA, colB
    vecA[j] = colA
    vecB[j] = colB*(-1)*1.295/ftorre ;fator V/V/m dividido pelo fator torre do arquivo:
CalibEslow(06/05/2011)ms.xls Torre Dentro ; INVERTE O GRÁFICO NO EIXO Y
    j = j + 1
  endwhile

  ;hnuv=9000 ;ALTURA ESTIMADO DA NUVEM PARA CENTRO DE CARGA POSITIVO
  close, 1 ; fecha arquivo fonte
endif

;-----
if ok eq 'Yes' then begin ;PARA RELÂMPAGOS NEGATIVOS
  while NOT EOF(1) do begin ; le arquivo fonte ---> arquivos .bin diferem de .csv do
osciloscópio(x 1000)
    readf, 1, colA, colB
    vecA[j] = colA ; DEFINE VETOR TEMPO
    vecB[j] = colB*1.295/ftorre ;fator V/V/m dividido pelo fator torre do arquivo:
CalibEslow(06/05/2011)ms.xls Torre Dentro ; DEFINE VETOR CAMPO MEDIDO
    j = j + 1
  endwhile

  close, 1 ; fecha arquivo fonte
endif

;-----

ok = 'Yes'
while ok eq 'Yes' do begin

```

```

;***** ESCOLHA DO TRECHO DE DECAIMENTO PARA CÁLCULO DO RC
;*****

```

```

NMX = 0.5 + MAX(vecB) ; obtem valor maximo tensão sem correção
NMN = MIN(vecB) - 0.5 ; obtem valor minimo tensao com correção

```

```

TEK_color ; habilita cores
!P.Color = 0 & !P.Background = 1

```

```

WINDOW, 0, XSIZE = 700, YSIZE = 700
WSET, 0
plot, vecA, vecB, ystyle = 1, yrange = [NMN, NMX], title ='SELECIONE O TRECHO DE
DECAIMENTO PARA CÁLCULO DO RC';EXIBIR TELA SEM CORREÇÃO
;xyouts, 0, 13, string(arq[0]) , /data

```

```

CURSOR, X1, Y1, /UP, /DATA
PRINT, 'X1=', X1, ' Y1=', Y1
CURSOR, X2, Y2, /UP, /DATA
PRINT, 'X2=', X2, ' Y2=', Y2

```

```

j = 0LL
tvec = 0LL

```

```

while j lt mx do begin ; tamanho do vetor do trecho de ICC

```

```

    if double(vecA(j)) gt double(X1) and double(vecA(j)) lt double(X2) then begin
        tvec=tvec + 1
    endif
    j = j + 1
endwhile

```

```

Vexp = fltarr(tvec) ;vetor com dados do exponencial(mesmo tamanho da área de seleção
para calculo do RC
Texp = fltarr(tvec)

```

```

j = 0LL
tvec = 0LL

```

```

while j lt mx do begin ; tamanho do vetor do trecho de ICC

```

```

    if double(vecA(j)) gt double(X1) and double(vecA(j)) lt double(X2) then begin
        Texp(tvec)=vecA(j)
        Vexp(tvec)=vecB(j)
        tvec=tvec + 1
    endif
    j = j + 1
endwhile

```

```

;----- FIT EXPONENCIAL -----

```

```

;Define a vector of weights.
weights = 1.0/Vexp

```

```

;Provide an initial guess of the function's parameters.
A = [Vexp[0],0,0]

;Compute the parameters.
yfit = CURVEFIT(Texp, Vexp, weights, A, SIGMA, FUNCTION_NAME='gfunct')

;Print the parameters returned in A.
PRINT, 'Function parameters: ', A

,***** DEFININDO O VETOR DECONVOLUÇÃO *****
Tdeconv=fltarr(mx) ; vetor com dados da deconvolução (mesmo tamanho do vetor
principal)
V=fltarr(mx)
somatoria=0LL
j=0LL

dt=vecA[2]-vecA[1] ;DEFININDO O DELTA TEMPO
print,dt
while j lt mx do begin
somatoria=somatoria+vecB(j) ;SOMATORIA DO VETOR CAMPO ELÉTRICO

if j eq 0 then begin
Tdeconv(j)=vecA(j)
V(j)=vecB(j)
endif

if j lt mx then begin
Tdeconv(j)=vecA(j)
V(j)=vecB(j)+(abs(A[1])*somatoria*dt)
endif
j=j+1
endwhile

,***** PLOTA O VETOR NA TELA E(V/m) X T(ms) e SUA DECONVOLUÇÃO *****
NMX = 0.5 + MAX(V) ; obtem valor maximo tensão sem correção
NMN = MIN(V) - 0.5 ; obtem valor minimo tensao com correção

TEK_color ; habilita cores
!P.Color = 0 & !P.Background = 1

WINDOW, 0, XSIZE = 700, YSIZE = 700
WSET, 0
plot, vecA, vecB, ystyle = 1, yrange = [NMN, NMX], title ='SELECIONE A REGIÃO DE CC'
;EXIBIR TELA SEM CORREÇÃO ;plota os dados originais
oplot, Tdeconv,V, color = 4

;plota os dados deconvolucionados

```

```

SET_PLOT,'WIN'
DEVICE, DECOMPOSE = 0
LOADCT, 0
ok = dialog_message('Deseja selecionar novo trecho?'/q)

endwhile

arq = dialog_pickfile(path = 'c:\ txt/',title = 'Salvar arquivo...', filter = '*.txt')
print, "Gerar TXT com os pontos da curva corrigida"
OPENW, 2,arq+'.TXT'
j=0LL
  while j LT mx do begin
    PRINTF, 2, Tdeconv(j), ";", V(j)
    j = j + 1
  endwhile

  CLOSE, 2

SET_PLOT,'WIN'
DEVICE, DECOMPOSE = 0
LOADCT, 0

ok = 'No'
ok = dialog_message('Deseja selecionar pontos?(Sim). Para entrar com valores de
tempo(Não)'/q)

if ok eq 'Yes' then begin

  ;----- AGUARDA A ESCOLHA DE DOIS PONTOS A SEREM SELECIONADOS COM
MOUSE -----

  CURSOR, X1, Y1, /UP, /DATA
  PRINT, 'X1=', X1,' Y1=', Y1
  CURSOR, X2, Y2, /UP, /DATA
  PRINT, 'X2=', X2,' Y2=', Y2
endif

if ok eq 'No' then begin

Read, 'Digite o inicio da CC em ms: ', X1

Read, 'Digite o fim da CC em ms: ', X2

endif

;----- DIMENSIONANDO O VETOR DA CC-----
j=0LL
fim=0
i=0

while j lt mx do begin ; tamanho do vetor do trecho de ICC
  if double(vecA(j)) gt double(X1) and double(vecA(j)) lt double(X2) and i lt 1 then begin

```

```

        i=j
        print, j
    endif
    if double(vecA(j)) gt double(X2) and fim lt 1 then begin
        fim=j
        print, j
    endif
    j=j+1
endwhile

T=fltarr(fim-i) ; VETOR COM DADOS DA REGIÃO DE CC SELECIONADA
E=fltarr(fim-i)

j=0LL
x=0LL

while j lt mx do begin
    if (j ge i) and (j lt fim) then begin
        T(x)=Tdeconv(j)
        E(x)=V(j)
        x=x+1
    endif
    j=j+1
endwhile

aux=(fim-i)/20

Vauxiliar=fltarr(fim-i) ; VETOR COM DADOS DA REGIÃO DE DECONVOLUÇÃO
Vauxiliar=TS_smooth(E,aux)

;***** PLOTA O VETOR DA REGIÃO SELECIONADA PARA ESCOLHA DO
; TRECHO DE CALCULO DA CARGA *****

    NMX = 0.5 + MAX(E) ; obtem valor maximo tensão sem correção
    NMN = MIN(E) - 0.5 ; obtem valor minimo tensao com correção

    TEK_color ; habilita cores
    !P.Color = 0 & !P.Background = 1

    WINDOW, 1, XSIZE = 700, YSIZE = 700
    WSET, 1
    plot, T, E, ystyle = 1, yrange = [NMN, NMX], title ='SELECIONE O TRECHO PARA
    CÁLCULO DE CARGA ' ; EXIBIR TELA SEM CORREÇÃO
    oplot, T, Vauxiliar, color = 7

;----- AGUARDA A ESCOLHA DE DOIS PONTOS A SEREM SELECIONADOS COM
MOUSE -----

    CURSOR, X1, Y1, /UP, /DATA
    PRINT, 'X1=', X1, ' Y1=', Y1
    CURSOR, X2, Y2, /UP, /DATA
    PRINT, 'X2=', X2, ' Y2=', Y2

;----- DIMENSIONANDO O VETOR DA CC-----
j=0LL

```

```

fim=0
i=0
mx=n_elements(Vauxiliar)

while j lt mx do begin ; tamanho do vetor do trecho de ICC
;print, vecA(j)
    if double(T(j)) gt double(X1) and double(T(j)) lt double(X2) and i lt 1 then begin
        i=j
        print, j
    endif
    if double(T(j)) gt double(X2) and fim lt 1 then begin
        fim=j
        print, j
    endif
    j=j+1
endwhile

CCx=fltarr(fim-i) ; VETOR COM DADOS DA REGIÃO DE CC SELECIONADA
CCy=fltarr(fim-i)

j=0LL
x=0LL

while j lt mx do begin
    if (j ge i) and (j lt fim) then begin
        CCx(x)=T(j)
        CCy(x)=E(j)
        x=x+1
    endif
    j=j+1
endwhile

aux=(fim-i)/5.0

derivada=fltarr(fim-i)

derivada=deriv(CCx,CCy)
teste=TS_smooth(derivada,aux)
integral=int_tabulated(CCx,teste)

aux=2*3.14*8.84e-12 ; [2.pi.E0]
h=0.0
h=hnuv
hnuv=hnuv^2.0
dist=dist^2.0
aux=aux*((hnuv+dist)^1.5)/h ; [2.pi.E0.(H2+D2)3/2]/H
integral=integral*aux

tempo=(fim-i)*dt*1000
imedia=1000*integral/tempo

```

```

PRINT, 'Raio ->', raio, ' CARGA->', integral, 'C'
print, 'Tempo total ->', tempo, 'ms'
print, 'Imedia ->', imedia, 'A'
print, 'Intervalo selecionado:', T(i), ' até ', T(fim)

.***** SALVAR GRÁFICO DA DECONVOLUÇÃO ? *****
,
SET_PLOT, 'WIN'
DEVICE, DECOMPOSE = 0
LOADCT, 0

ok = 'No'
ok = dialog_message('Salvar gráfico da deconvolução?', /q)

if ok eq 'Yes' then begin

NMX = 0.5 + MAX(V) ; obtem valor maximo tensão sem correção
NMN = MIN(V) - 0.5 ; obtem valor minimo tensao com correção

iplot, vecA, vecB, ystyle = 1, yrange = [NMN, NMX], TITLE = 'CURVA CAMPO ELÉTRICO E
DECONVOLUÇÃO' ; EXIBIR TELA SEM CORREÇÃO
iplot, Tdeconv, V, overplot=1, color=[29,29,255]

endif

ok = dialog_message('Continua?', /q)

endwhile

wdelete, 0, 1

print, "Fim"
end

```