

Evandro Moimaz Anselmo

**ESTUDO DA RAZÃO ENTRE O  
NÚMERO DE RELÂMPAGOS  
INTRANUVEM E NUVEM-SOLO PARA  
SISTEMAS CONVECTIVOS NA CIDADE  
DE CAMPO GRANDE - MS**

Campo Grande - MS

2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Evandro Moimaz Anselmo

**ESTUDO DA RAZÃO ENTRE O  
NÚMERO DE RELÂMPAGOS  
INTRANUVEM E NUVEM-SOLO PARA  
SISTEMAS CONVECTIVOS NA CIDADE  
DE CAMPO GRANDE - MS**

Dissertação apresentada ao Departamento de Física da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul sendo parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física Aplicada.

Orientador:

Prof. Dr. Widinei Alves Fernandes

Co-orientador:

Prof. Ph. D. Moacir Lacerda

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Campo Grande - MS

2009

*À minha mãe Aparecida Moimaz*

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro referente ao edital FUNDECT/CAPES N° 03/2008 – PAPOS.

Aos orientadores desta pesquisa, Professores: Dr. Widinei Alves Fernandes e Ph. D. Moacir Lacerda (co-orientador).

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE por disponibilizarem os dados da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas – BrasilDAT associados os dias analisados nesta dissertação.

Ao Prof. Ph. D. Carlos Augusto Morales pelas suas sugestões de referências que contribuiriam bastante para minha melhor compreensão das variáveis que envolvem o tema desta pesquisa.

À minha esposa, agora Mestra Sabrina Miranda Areco, por toda a atenção e companheirismo durante todo o desenvolver desse mestrado.

À minha irmã Minéia, pelo carinho.

Aos amigos, Cássia e Érico pela companhia nos trabalhos referentes aos créditos realizados, momento de grande empenho. Vocês foram muito importantes para minha aprendizagem. Aos monitores de Física Quântica, Neri, Aleandro e Afonso, pela paciência e grande amizade.

Aos amigos da Ciência da Computação Brivaldo Jr. e Roberto, pelas orientações de como proceder no tratamento de grande quantidade de dados utilizando métodos computacionais. Ao Laboratório de Engenharia de Software - LEDES/UFMS pelas orientações em momentos em que a programação precisava de alguma idéia a mais.

Aos companheiros de Laboratório de Ciências Atmosféricas – LCA/UFMS, João, Lillian, Ícaro e Karin.

Aos meus professores do Departamento de Física – DFI/UFMS, com muito respeito e admiração: Dr. Alfredo Roque Salvetti, Ph. D. Glaucius Iahnke de Oliveira, Dr<sup>a</sup>. Isabela Porto Cavalcante, Dr. João Vítor Batista Ferreira, Ph. D. Paulo Ricardo da Silva Rosa e Me. Sergio Luiz Piubeli.

## RESUMO

Esta pesquisa realizou o monitoramento de tempestades através do cálculo da razão entre o número de relâmpagos intranuvens e nuvem-solo ( $Z$ ) utilizando dois sistemas de detecção de descargas atmosféricas: a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas – BrasilDAT e uma Antena Lenta. A partir dos dados de campo elétrico obtidos, o cálculo de  $Z$  foi determinado com o uso de rotinas computacionais desenvolvidas em linguagem de programação Python e processamentos em um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Objeto-Relacional (SGBDOR) PostgreSQL. O monitoramento de  $Z$  é realizado na região urbana do município de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul (MS), com objetivo de fazer um levantamento de informações meteorológicas para essa região do Brasil. Observa-se nos resultados desta dissertação que razão  $Z$  média obtida em Campo Grande – MS foi de  $(15 \pm 6)$ , e há uma dependência de  $Z$  em função da taxa de relâmpagos. As maiores taxas de relâmpagos, atingiram valores de até  $(29 \pm 5) \text{ min}^{-1}$  e correspondem ao período seco do ano, indicando que os elevados valores de  $Z$  estão relacionados ao acentuado desenvolvimento vertical dos sistemas convectivos dessa região.

Palavras-chave: relâmpagos, tempestades, monitoramento.

## ABSTRACT

This research makes the monitoring of storms through the ratio between the amount of intra-cloud and cloud-to-ground lightning ( $Z$ ) using two systems of lightning detection: the Brazilian Lightning Detection Network – BrasilDAT and a Slow Antenna. The calculation of  $Z$  was determined with the use of computational routines developed in the Python programming language and processing in an object-relational database management system PostgreSQL. The monitoring of  $Z$  is done in urban areas of the city of Campo Grande, state of Mato Grosso do Sul (MS), with the objective to make a survey of meteorological informations for that region of Brazil. In results of this dissertation that average ratio  $Z$  in Campo Grande - MS was  $(15 \pm 6)$ , and there is a dependency between the ratio  $Z$  and total flash rate. The highest flash rates ( $\text{min}^{-1}$ ), reached values up to  $(29 \pm 5)$  and correspond to the dry period of the year, indicating that the high values of  $Z$  are related to strong vertical development of convective systems in that region.

Key-words: lightning, storms, tracking.

## LISTA DE FIGURAS

1	Registro de nuvens convectivas sobre a cidade de Campo Grande - MS. . . . .	20
2	Representação do tripolo eletrostático para nuvens de tempestade. O comportamento padrão do campo elétrico medido na superfície (parte inferior da figura), corresponde à distribuição dos centros de cargas $Q_+$ , $Q_-$ e $q_+$ (adaptada de Ogawa (1995)). . . . .	22
3	Síntese de medidas referentes a estrutura elétrica, realizadas no interior de nuvens de tempestades (adaptada de Stolzenburg et al. (1998, apud Fernandes (2006))). . . . .	22
4	Representação do processo convectivo de eletrização. . . . .	23
5	Devido a diferença de massa entre o <i>graupel</i> e o cristal de gelo, o <i>graupel</i> precipita com velocidade $\mathbf{v}_g$ enquanto o cristal de gelo tende a subir com velocidade $\mathbf{v}_c$ junto à correntes ascendentes. Estando essas partículas imersas em um campo elétrico $\mathbf{E}$ a eletrização no momento da colisão torna-se possível. . . . .	25
6	Cada resultado obtido desenha uma linha de fronteira entre as regiões nas quais a temperatura e quantidade de água líquida influenciam na carga, positiva ou negativa, adquirida pelo <i>rimer</i> (adaptada de Saunders (2008)).	26
7	Campo elétrico de tempo bom e corrente corona (adaptada de Feynman et al. (1964)). . . . .	27
8	Correspondência entre os horários com picos de ocorrências de tempestades globais e horários com picos de valores do campo elétrico de tempo bom na superfície terrestre para o nível do mar. . . . .	28
9	Iustração da assinatura do campo elétrico emitido por um relâmpago nuvem-solo negativo e o registro da variação do campo elétrico durante o evento. Identifica-se que nesse relâmpago as descargas de retorno (DR1,DR2,...,DR8), a propagação do Líder (L), as descargas M, os processos J e K (adaptada de Kitagawa et al. (1962, apud Berger (1977))). . . . .	32



10	Desenvolvimento de tempestades observadas por radiosondagem, radar e sensores de campo elétrico (adaptada de Workman e Reynolds (1949, apud. Goodman (1990))). . . . .	33
11	Configuração da BrasilDAT em todo território Brasileiro . . . . .	35
12	Espiras . . . . .	36
13	Determinação da localização de relâmpagos pelo método da Direção Magnética - MDF. . . . .	37
14	Representação de um sistema de localização de raios usando o Método da Direção Magnética - MDF com triangulação (adaptada de Cummins et al. (1993, p. 5)). . . . .	38
15	Representação de um sistema de localização de raios usando o Método de intersecção circular (adaptada de Cummins et al. (1993, p. 7)). . . . .	39
16	Representação de um sistema de localização TOA-MDF, em situação menos favorável, quando uma DR sensibiliza apenas dois sensores e atinge uma posição sobre a linha que une os sensores (adaptada de Cummins et al. (1993, p. 7)). . . . .	40
17	As descargas 1, 3, 4 e 5 serão associadas a um relâmpago enquanto as descargas 2, 6 e 7 serão atribuídas a outros relâmpagos. (adaptada de Cummins et al. (1998, p. 9038)). . . . .	40
18	Estação de coleta de dados instalada na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul . . . . .	42
19	Etapas de funcionamento da Antena Lenta . . . . .	43
20	Alcance estimado para detecção de relâmpagos totais. Essa região está compreendida no município de Campo Grande - MS abrangendo toda a área urbana. . . . .	45
21	Roteiro do processamento de dados. . . . .	47
22	As figuras mostram o processamento realizado pelo algoritmo de identificação as descargas atmosféricas em situações diferentes. . . . .	49
23	Ruídos apresentados na aquisição da Antena Lenta e resultados gerados pelo algoritmo de filtragem de ruídos. . . . .	50

24	Resultados referentes a concentração de descargas em função do intervalo de tempo entre descargas subsequentes. . . . .	54
25	Seleção dos raios detectados pela BrasilDAT na região de estudo. A seleção corresponde a uma média entre as descargas inscritas nas circunferências de raios $R_1$ e $R_2$ . . . . .	57
26	Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS. . . . .	64
27	Comportamento de $Z$ durante as tempestades monitoradas. A curva obtida corresponde ao ajuste polinomial conforme a equação $f(x) = -3792.97x^6 + 11561.7x^5 - 13098.2x^4 + 6688.46x^3 - 1405.24x^2 + 34.4032x + 24.7346$ . . . .	71
28	Relação entre $Z$ e a taxa de relâmpagos totais por minuto ( $T_r$ ). . . . .	71
29	Desenvolvimento dos valores médio de $Z$ (gráfico superior), taxa de relâmpagos totais (gráfico mediano) e nuvem-solo (gráfico inferior), por tempestades, na cidade de Campo Grande - MS no decorrer dos meses de monitoramento. . . . .	73
30	Desenvolvimento dos valores médio de $Z$ (gráfico superior), taxa de relâmpagos totais (gráfico mediano) e nuvem-solo (gráfico inferior), por hora, na cidade de Campo Grande - MS no decorrer dos dias de monitoramento. . . . .	74
31	Porcentual de eventos identificados pela Antena Lenta, comparados com os eventos identificados pela BrasilDAT. . . . .	75
32	Tempo de duração dos grupos de pulsos classificados como um evento. . . . .	75
33	Análise comparativa em as curvas obtidas por Rutledge et al. (1992), Soriano e de Pablo (1995) e Anselmo, (2009) que corresponde a curva obtida nesta pesquisa. . . . .	77
34	Crescimento linear dos valores mais elevados de $Z(T_r)$ . Os ajustes realizados nos gráficos foram realizados considerando apenas os pontos circulados, nos quais se aproximam mais do ajuste linear obtido. . . . .	78
35	Representação de uma descarga de retorno idealizada, em que, considera-se uma corrente elétrica vertical retilínea ocorrendo em uma superfície condutora plana. . . . .	92

36	Representação da localização de raios pelo método do tempo de chegada - TOA, também denominado como método das hipérboles. Nessa figura observa-se as hipérboles determinadas com base nas diferenças de caminhos percorridos pela radiação entre o sensor com menor tempo de detecção e os demais sensores. . . . .	96
----	--	----

## LISTA DE TABELAS

1	Características da rede (PINTO JR, 2003). . . . .	42
2	Resultados associados a multiplicidade de descargas de retorno considerados como parâmetro no processamento dos dados providos da Antena Lenta. . . . .	53
3	Critérios temporais de identificação da multiplicidade de descargas em raios detectados pela Antena Lenta. . . . .	54
4	Comportamento de $Z$ durante as estações do ano. . . . .	72

## LISTA DE CÓDIGOS FONTE

1	Formatador das linhas de dados, corretor das informações temporais, identificador de pulsos e filtro de ruídos desenvolvido em linguagem de programação python. . . . .	82
2	Programa desenvolvido em linguagem de programação python, que gera um novo arquivo desconsiderando os pulsos de campo elétrico nulo. . . . .	83
3	Programa desenvolvido em linguagem de programação python, que escreve as informações referente aos raios totais em <i>tags</i> SQL para inserção no banco de dados. . . . .	84
4	Referente ao arquivo SQL de inserção de milhões de linhas de dados no SGBDOR . . . . .	84
5	Função programada em PL/PGSQL para identificação da multiplicidade dos raios detectados pela Antena Lenta. . . . .	85
6	Z. . . . .	87

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>2 MORFOLOGIA DAS NUVENS DE TEMPESTADES</b>	<b>19</b>
2.1 EVOLUÇÃO DE SISTEMAS CONVECTIVOS . . . . .	19
2.2 ESTRUTURA ELÉTRICA DAS NUVENS DE TEMPESTADES . . . . .	21
2.2.1 Teoria convectiva de eletrificação . . . . .	23
2.2.2 Teoria precipitativa de eletrificação . . . . .	24
<b>3 ELETRICIDADE NA ATMOSFERA</b>	<b>27</b>
3.1 OS RELÂMPAGOS . . . . .	29
3.1.1 Tipos de relâmpagos . . . . .	30
3.1.2 Aspectos físicos . . . . .	30
3.1.3 Desenvolvimento elétrico das nuvens de tempestades . . . . .	31
<b>4 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS</b>	<b>34</b>
4.1 A BrasilDAT . . . . .	34
4.1.1 Sistemas de localização de descargas atmosféricas . . . . .	34
4.1.2 Multiplicidade das descargas de retorno . . . . .	39
4.1.3 Estimativa do pico de corrente . . . . .	41
4.1.4 Eficiência da rede . . . . .	41
4.2 A ANTENA LENTA . . . . .	41

4.2.1	Funcionamento . . . . .	43
4.2.2	Alcance de detecção dos relâmpagos . . . . .	44
<b>5</b>	<b>PROCESSAMENTO DOS DADOS DA ANTENA LENTA</b>	<b>46</b>
5.1	FORMATAÇÃO DOS ARQUIVOS DE REGISTRO . . . . .	48
5.2	IDENTIFICAÇÃO DAS DESCARGAS . . . . .	48
5.3	TRATAMENTO DE RUÍDOS . . . . .	49
5.3.1	Eficiência estimada da Antena Lenta . . . . .	50
5.4	IMPORTAÇÃO DOS DADOS PARA O BANCO DE DADOS . . . . .	51
5.5	MULTIPLICIDADE DOS EVENTOS . . . . .	52
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA DO CÁLCULO DE Z</b>	<b>55</b>
6.1	SELEÇÃO DOS RAIOS . . . . .	56
6.1.1	Eficiência da BrasilDAT e o cálculo de $Z$ . . . . .	56
6.1.2	Critérios espaciais de seleção . . . . .	56
6.2	AS CONTAMINAÇÕES . . . . .	58
6.3	IDENTIFICAÇÕES DOS RELÂMPAGOS INTRANUVENS . . . . .	60
6.3.1	Seleção dos dados da Antena Lenta . . . . .	60
6.3.2	Análise comparativa entre a Antena Lenta e a BrasilDAT . . . . .	60
6.4	O CÁLCULO DE $Z$ . . . . .	61
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>63</b>
7.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .	76
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>80</b>
8.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	80
<b>Apêndice A - CÓDIGOS FONTE DO PROCESSAMENTO DOS DADOS DA ANTENA LENTA</b>		<b>82</b>

<b>Apêndice B - ESTRUTURA COMPUTACIONAL DO CÁLCULO DE Z</b>	<b>87</b>
<b>Apêndice C - CAMPO ELÉTRICO IRRADIADO POR UMA DESCARGA DE RETORNO</b>	<b>92</b>
C.1 ESTIMATIVA DA CORRENTE ELÉTRICA . . . . .	93
<b>Apêndice D - MÉTODO DO TEMPO DE CHEGADA – TOA</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>97</b>
<b>Índice Remissivo</b>	<b>104</b>



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AD	Analógico Digital
ADC-40	Equipamento de aquisição de dados desenvolvido pela empresa <i>Pico Technology</i>
BrasilDAT	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
DR	Descarga(s) de retorno
EN	Entre-nuvens
GPS	<i>Global Position Satellite</i>
IMPACT	<i>Improved Performance from Combined Technology</i>
IN	Intranuvem(ns)
LF	<i>low-frequency</i> , indica frequências entre 10-300kHz
LIS	<i>Lightning Imaging Sensor</i>
LPATS	<i>Lightning Position and Tracking System</i>
MDF	<i>Magnetic Direction Finder</i>
MS	Mato Grosso do Sul
NA	Relâmpagos no ar
NS	Nuvem-solo
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
PL/PGSQL	<i>Procedural Language/PostgreSQL Structured Query Language</i>
QLL	<i>Quasi-liquid Layer</i>
RC	Resistor Capacitor, nome dado a circuitos com estes componentes eletrônicos

RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
RNSS	<i>Range Normalized Signal Strength</i>
SGBDOR	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Objeto-Relacional
SIDDEM	Sistema de Informações Integradas Baseado no Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SN	Solo-nuvem
SQL	<i>Structured Query Language</i>
STARNET	<i>Sferics Timing And Ranging NETWORK</i>
TLM	<i>Transmission Line Model</i>
TOA	<i>Time of Arrival</i>
TOA-MDF	Combinação entre os sistemas de localização de Tempo de Chegada e Direção Magnética
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D$	Distância
$E_{ir}$	Campo elétrico irradiado
$E_p$	Intensidade máxima do campo elétrico
$Ed$	Número de eventos detectados
$Eo$	Número de eventos ocorridos
$Es_{NSR_1}$	Estimativa para o números de raios detectados pela BrasilDAT contidos na área circular de $R_1$ conforme a figura 25
$Es_{NSR_2}$	Estimativa para o números de raios detectados pela BrasilDAT contidos na área circular de $R_2$ conforme a figura 25
$Es_{NS}$	Representa o cálculo referente a estimativa dos relâmpagos NS
$N_{AL}$	Número de eventos efetivamente identificados pela Antena Lenta
$N_{IN}$	Números de relâmpagos intranuvens
$N_{NS}$	Números de relâmpagos nuvem-solo
$N_{rt}$	Estimativa dos relâmpagos totais
$R_{BrR_1}$	Quantidade raios detectados pela BrasilDAT contidos na área circular de raio $R_1$ conforme a figura 25
$R_{BrR_2}$	Quantidade raios detectados pela BrasilDAT contidos na área circular de raio $R_2$ conforme a figura 25
$R_{Br}$	Quantidade de raios detectados pela BrasilDAT
$T_r$	Taxa de relâmpagos totais por minuto
$Z$	Razão entre o número de relâmpagos intranuvens e o número de relâmpagos nuvem-solo
$Z(T_r)$	Razão entre o número de relâmpagos intranuvens e nuvem-solo, em função da taxa de relâmpagos totais por minuto
$\varepsilon_0$	Permissividade elétrica no vácuo ( $8,854 \times 10^{-12}$ C <sup>2</sup> /Nm)
$\xi$	Força eletromotriz
$c$	Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$ m/s)
$d_{AL}$	Erro associado à eficiência da Antena Lenta
$d_C$	Erro associado à estimativa das contaminações
$d_{IN}$	Erro associado à determinação das descargas intranuvens

$d_{NSR_1}$	Erro de eficiência da BrasilDAT para os raios detectados na área circular de raio $R_1$ conforme a figura 25
$d_{NSR_2}$	Erro de eficiência da BrasilDAT para os raios detectados na área circular de raio $R_2$ conforme a figura 25
$d_{NS}$	Erro referente a estimativa dos raios incidentes na região de estudo deste trabalho
$e$	eficiência de detecção
$lat$	latitude
$lon$	longitude
$r^2$	quadrado do coeficiente de correlação
$v$	Velocidade
$v_i$	Velocidade da corrente elétrica no canal de uma descarga de retorno

## 1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação é uma pesquisa na área de eletricidade atmosférica, que realizou o monitoramento da variação temporal para a razão entre o número de relâmpagos intra-nuvens e nuvem-solo ( $Z$ ), em tempestades ocorridas na região urbana do município de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul (MS).

Esta pesquisa objetiva realizar um levantamento de informações meteorológicas relacionadas ao desenvolvimento de tempestades na região da cidade de Campo Grande – MS.

Esta dissertação está estruturado de maneira em que o leitor compreenda que a eletricidade atmosférica depende principalmente dos processos de formação de nuvens de tempestade. Portanto inicialmente é realizado uma revisão bibliográfica relacionada à morfologia das nuvens de tempestades, descrevendo os processos de formação, eletrificação e estruturas de cargas presentes nessas nuvens. Posteriormente, é realizada uma abordagem a respeito do comportamento elétrico da atmosfera, apresentando medidas do campo elétrico de tempo bom, medidas do campo elétrico emitido por descargas atmosféricas, tipos de relâmpagos e desenvolvimento das descargas atmosféricas durante os estágios evolutivos das nuvens de tempestades.

Após a descrição dos conceitos que contextualizam a pesquisa em sua temática, são apresentadas as bases de dados utilizadas, os processamentos de dados realizados, a metodologia para o cálculo de  $Z$  e os resultados e conclusões obtidas.

Esse levantamento de dados corresponde ao monitoramento de  $Z$  para 26 sistemas convectivos, no qual utiliza-se uma metodologia para o cálculo de  $Z$  a partir de dados provindos da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas – BrasilDAT e uma Antena Lenta, o que possibilitou a distinção entre os relâmpagos intranuvens e nuvem-solo para a determinação do cálculo de  $Z$ . Toda a metodologia foi sistematizada em rotinas computacionais desenvolvidas em linguagem de programação Python e processamentos em um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Objeto-Relacional (SGBDOR)

PostgreSQL.

Essa pesquisa pretende contribuir no estudo do monitoramento de  $Z$  durante todo o desenvolvimento de nuvens de tempestade, integrando a coleta de dados de campo elétrico com o processamento computacional de dados.

A escolha do objeto de pesquisa deve-se ao fato de que o cálculo da razão entre o número de relâmpagos intranuvens e nuvem-solo ( $Z$ ), promove um levantamento de dados com extensa quantidade de informações meteorológicas. Conforme aponta Boccippio et al. (2001), o conhecimento da razão  $Z$ , pode fornecer informações a respeito da energia dissipada relacionada as descargas atmosféricas, indicar estimativas para a produção global e regional de  $NO_x$ , analisar a contribuição de relâmpagos na manutenção do Circuito Elétrico Atmosférico Global, contribuir no estudo da microfísica dos processos de separação de cargas, em que a taxa de relâmpagos intranuvens e nuvem-solo, relaciona-se com a cinemática das tempestades, na identificação de advecção nas tempestades entre outros.

## 2 MORFOLOGIA DAS NUVENS DE TEMPESTADES

Neste capítulo é realizada uma abordagem geral dos processos físicos identificados na literatura relacionados a formação de nuvens responsáveis por produzirem descargas atmosféricas, descrevendo a evolução desses sistemas convectivos, sua principal composição e teorias mais aceitas para o entendimento da eletrificação das nuvens de tempestades.

### 2.1 EVOLUÇÃO DE SISTEMAS CONVECTIVOS

Seja na superfície de um lago, rio, oceano, no solo ou na transpiração dos animais e vegetais, as moléculas de água líquida destacam-se continuamente desses sistemas constituindo o processo de evapotranspiração<sup>1</sup>. Esse processo está diretamente relacionado ao grau de agitação das moléculas de água, sendo então a sua taxa dependente da temperatura na superfície da Terra.

Devido à incidência da radiação solar na superfície, regiões do solo que possuem maior calor específico aquecem o ar atmosférico próximo com maior intensidade, causando a diminuição da densidade dessas parcelas de ar, o que proporciona a formação de correntes ascendentes denominadas como térmicas. Assim, o vapor d'água é transportado para regiões mais elevadas da troposfera podendo vir a constituir as nuvens convectivas<sup>2</sup>.

As nuvens convectivas são classificadas como cumulus conforme proposto pela *World Meteorological Organization* em 1956, correspondendo ao método de análise proposto por Jean Baptiste Lamarck (1744 – 1829), que divide as regiões de formação das nuvens em três camadas. Dessa forma, Luke Howard (1772 – 1864) adaptou a terminologia de Jean Baptiste Lamarck para o Latim, originando a classificação das nuvens como cumulus

<sup>1</sup>Termo proposto por Thornwaite (1948), definido como a combinação dos processos de evaporação da água na superfície do solo com a transpiração das plantas, sendo esses processos responsáveis pelo retorno da água ao ar atmosférico.

<sup>2</sup>“O termo convecção foi introduzido por William Prout em 1834. O fenômeno térmico da convecção em fluídos foi descoberto em 1797 por Count Rumford [...]. O fato de que parcelas aquecidas da atmosfera sofrem ascensão foi percebido por Benjamin Franklin em 1749.”(WALLACE; HOBBS, 1977, p. 216, tradução nossa).

(monte ou pilha), cirrus (fios de cabelo) e stratus (uma camada). No foco desta pesquisa encontra-se as nuvens de tempestades, que são classificadas como cumulonimbus no qual o termo nimbus faz referência a presença de chuva. As setas ilustradas na figura 1 indicam a presença de 4 nuvens cumulonimbus sobre a cidade de Campo Grande (WALLACE; HOBBS, 1977, p. 217).



Figura 1: Registro de nuvens convectivas sobre a cidade de Campo Grande - MS.

As cumulonimbus são produzidas por fortes convecções na troposfera, que elevam parcelas de ar úmido a altitudes de até 12 km com diâmetro de poucos quilômetros. Conforme uma parcela de ar eleva-se, em consequência da diminuição da pressão atmosférica com a altitude, essa expande perdendo temperatura sem a troca de calor com o meio externo, ocorrendo o resfriamento adiabático até que a parcela possua 100% de umidade relativa. Se a parcela tornar-se fria o suficiente para condensar antes de parar de subir, aproximadamente quando atinge a pressão de 9 mbar à temperatura de 5,5 °C, a taxa de resfriamento é diminuída em função da energia liberada na forma de calor latente de condensação, o que proporciona mais ascensão para a parcela. Na fase de condensação é quando se define a base da nuvem (WALLACE; HOBBS, 1977; GOODY; WALKER, 1975).

A parcela de ar com água saturada pode alcançar regiões com altitude superior a isoterma de 0° C favorecendo os processos de glaciação. Como a pressão do vapor de saturação é maior para água líquida do que para o gelo, a parcela de ar imersa em uma região com temperatura inferior a 0° C, tornam-se supersaturada em relação ao gelo fazendo com que o vapor d'água seja mais difundido para os núcleos de gelo. Na solidificação da água, energia na forma de calor latente é liberada intensificando a ascensão da parcela. Conforme a temperatura da atmosfera diminui (entre 0° C e -15° C) com a



altitude, as gotículas de água podem congelar formando cristais de gelo, ou permanecerem no estado líquido porém superresfriadas. A parcela pode alcançar temperaturas de até  $-40^{\circ}\text{C}$ , fazendo com que apenas vapor d'água e gelo coexistam.

A precipitação ocorre se os hidrometeoros possuem massa suficiente para que a força peso atuante seja suficiente para vencer às correntes ascendentes.

## 2.2 ESTRUTURA ELÉTRICA DAS NUVENS DE TEMPESTADES

É evidente a presença de grandes centros de cargas associados ao desenvolvimento de nuvens de tempestades, seja pela ocorrência dos relâmpagos ou presença de intensos campos elétricos medidos na superfície sob as nuvens.

Porém, a microfísica dos processos de separação de cargas nas nuvens ainda não é completamente entendida devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo.

Experimentos relacionados a simulação de nuvens em laboratório mostram que a presença de gelo é fundamental no processo e que a carga adquirida pelos granizos depende da temperatura do ambiente, do conteúdo de água líquida da nuvem, da velocidade de colisão entre os hidrometeoros e dos tamanhos dos cristais de gelo (TAKAHASHI, 1978; SAUNDERS, 2008).

Williams (1989) expõe uma síntese de trabalhos que buscaram compreender quais as estruturas de cargas geradas pelos processos de separação de cargas das nuvens de tempestades, apresentando resultados de trabalhos que apresentam medidas de campo elétrico de nuvens no período de 1752 a 1989, nos quais percebe-se uma maior aceitação do modelo denominado como **tripolo eletrostático**, em que as nuvens de tempestades, geralmente possuem um centro de carga positiva na parte superior, um centro de carga negativa na região central e um centro de carga positiva menos intenso na base da nuvem conforme mostra a figura 2.

No entanto, observações mais recentes realizadas por Rust e Marshall (1996) verificam mais centros de carga com diferentes características. Stolzenburg et al. (1998) aponta que em regiões onde ocorrem ventos ascendentes existem 4 ou mais centros de carga e em regiões com correntes descendentes podem ocorrer 6 ou mais centros de cargas conforme é representado na figura 3.

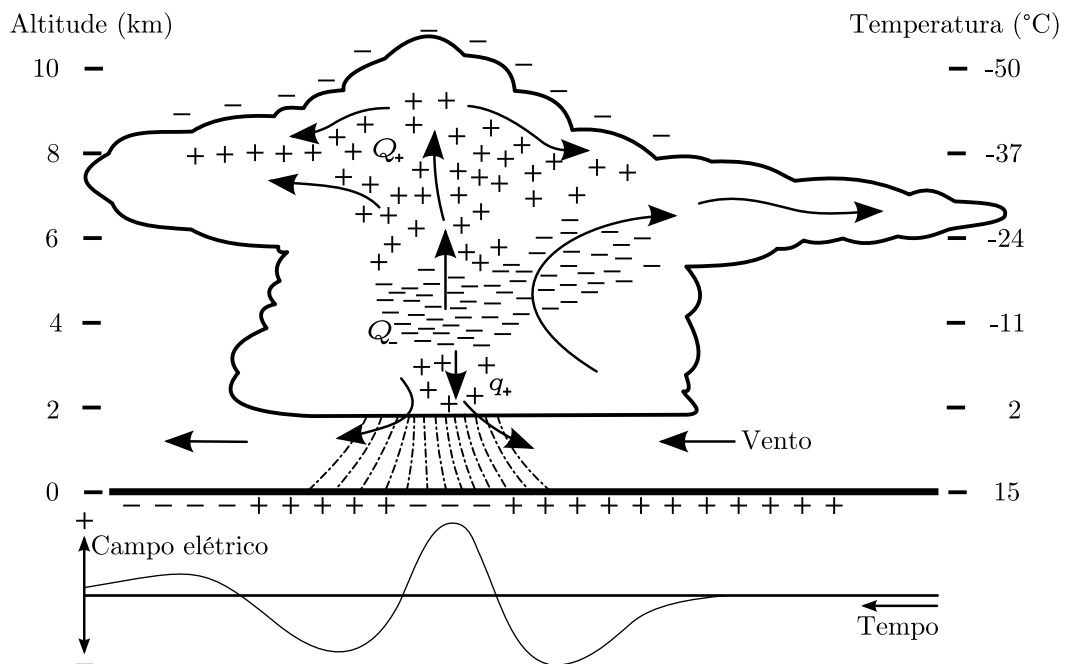


Figura 2: Representação do tripolo eletrostático para nuvens de tempestade. O comportamento padrão do campo elétrico medido na superfície (parte inferior da figura), corresponde à distribuição dos centros de cargas  $Q_+$ ,  $Q_-$  e  $q_+$  (adaptada de Ogawa (1995)).

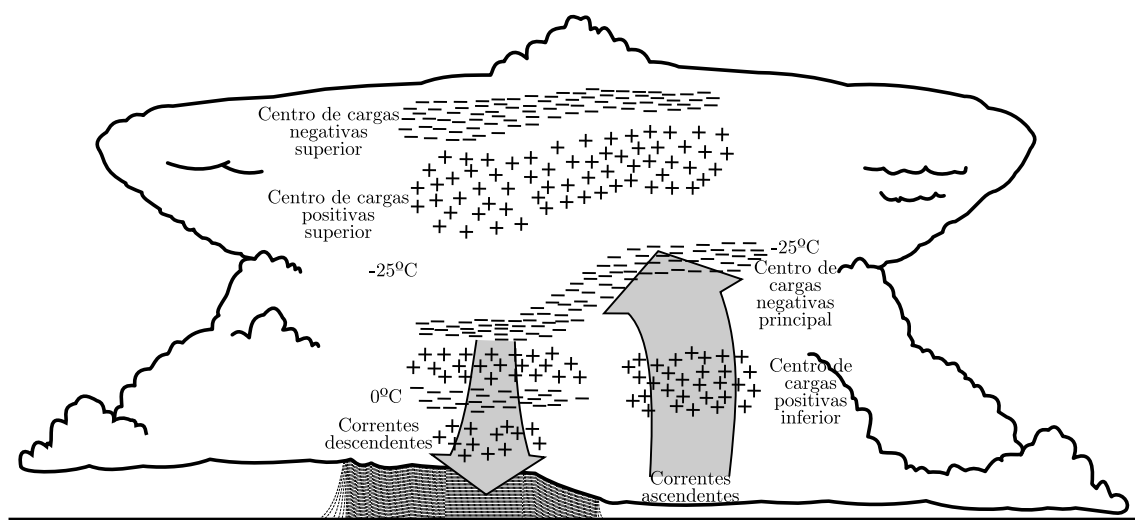


Figura 3: Síntese de medidas referentes a estrutura elétrica, realizadas no interior de nuvens de tempestades (adaptada de Stolzenburg et al. (1998, apud Fernandes (2006))).

### 2.2.1 Teoria convectiva de eletrificação

Nessa teoria é proposto que as fontes de cargas negativas e positivas são fornecidas por fontes externas às nuvens. Esse mecanismo de eletrificação pode ser produzido pela distribuição de íons livres na atmosfera (WILSON, 1956; PHILLIPS, 1967) (GRENET, 1947; WAGNER; TELFORD, 1981, apud (VONNEGUT et al., 1995)). Conforme descrito por Vonnegut et al. (1995), o campo elétrico de tempo bom pode concentrar íons positivos na baixa atmosfera. Na ocorrência de térmicas os íons positivos podem ser transportados para o interior das nuvens eletrificando-as positivamente, conforme pode ser visualizado na figura 4a. Com o crescimento vertical da nuvem e o excesso de cargas positivas, íons negativos são atraídos tornando o topo da nuvem negativamente carregado (ver figura 4b).

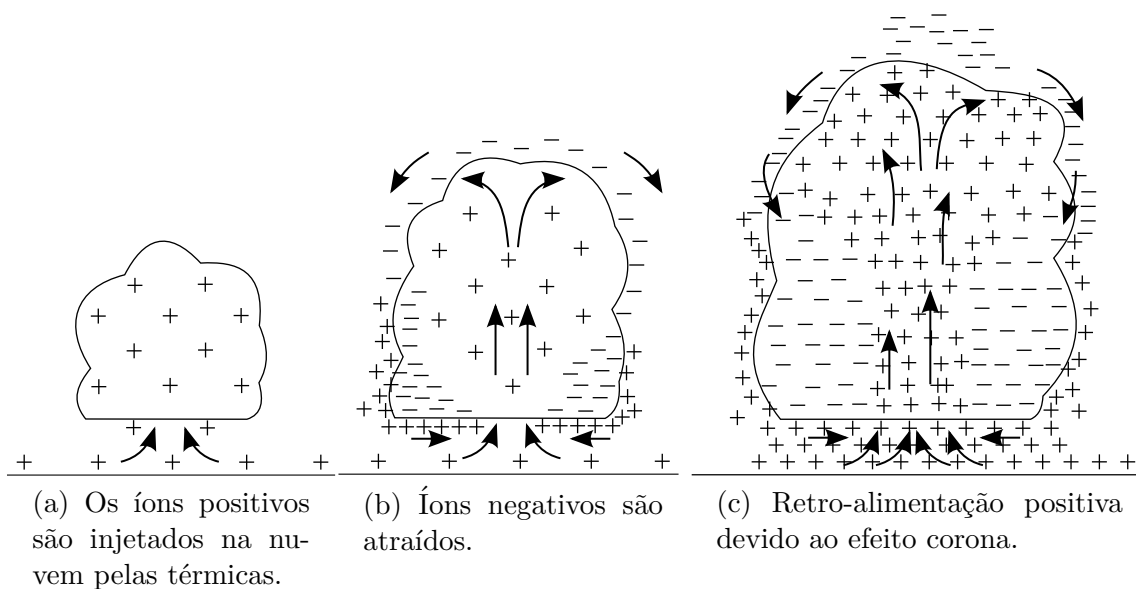


Figura 4: Representação do processo convectivo de eletrização.

Conforme a nuvem cresce, ela penetra em níveis mais altos na troposfera, encontrando ar no qual a mobilidade de íons livres (ou condutividade do ar) aumenta com o aumento da altura. Esses íons são produzidos na ionosfera ou acima de 6 km de altura por radiação cósmica. (ALBRECHT, 2008, p. 10).

Os íons negativos são transportados para as laterais da nuvem<sup>3</sup> e, em um estágio mais maduro, correntes descendentes de ar concentram os íons negativos nas regiões mais baixas tornando mais forte o fluxo de cargas positivas para o interior da nuvem. Com o

<sup>3</sup>Processo conhecido como estranhamento lateral.

acúmulo de cargas negativas na base da nuvem os íons positivos são induzidos por efeito corona (ver figura 4c).

Conforme Vonnegut (1991), existem evidências que comprovem a ocorrência do processo convectivo de eletrificação, portanto acredita-se que esse não é suficiente para promover campos elétricos tão intensos, principalmente nos estágios iniciais da eletrificação, devido à baixa disponibilidade de íons na atmosfera. Dessa forma, entende-se que o processo convectivo contribui para a manutenção de outros processos de separação de cargas.

### 2.2.2 Teoria precipitativa de eletrificação

Durante o desenvolvimento vertical das nuvens de tempestades a água sofre mudanças de fase intermediadas por processos de formação de gotículas, cristais de gelo e granizo, que ao interagirem com o campo gravitacional da Terra sofrem uma sedimentação diferenciada de acordo com a força peso atuante em cada hidrometeoro. Desta forma a combinação da força gravitacional com correntes ascendentes, fazem com que as partículas das nuvens obtenham velocidades diferenciadas ocorrendo colisões entre as mesmas. Durante as colisões, cargas elétricas são transferidas entre as partículas, seja relacionadas a processos de eletrificação indutivo ou não indutivo.

#### Processo colisional indutivo

Ocorre quando não há coalescência, portanto, torna-se mais provável na colisão entre o *graupel*<sup>4</sup> e cristais de gelo.

Pressupõe-se que um campo elétrico inicial consiga induzir a polarização do *graupel* e dos cristais de gelo conforme na figura 5a. Ao colidirem, cargas são transferidas tornando o *graupel* carregado negativamente e os cristais de gelo positivamente, conforme ilustrado na figura 5b.

Porém, MacGorman e Rust (1998) apontam que o campo elétrico de tempo bom não é suficiente para polarizar as partículas de gelo. Assim, para a ocorrência do processo colisional indutivo, é necessária primeiramente a separação de cargas por processos não indutivos que irão gerar campos elétricos no interior da nuvem para que ocorra a eletrificação colisional indutiva.

---

<sup>4</sup>Granizo com diâmetro menor que 2 mm.

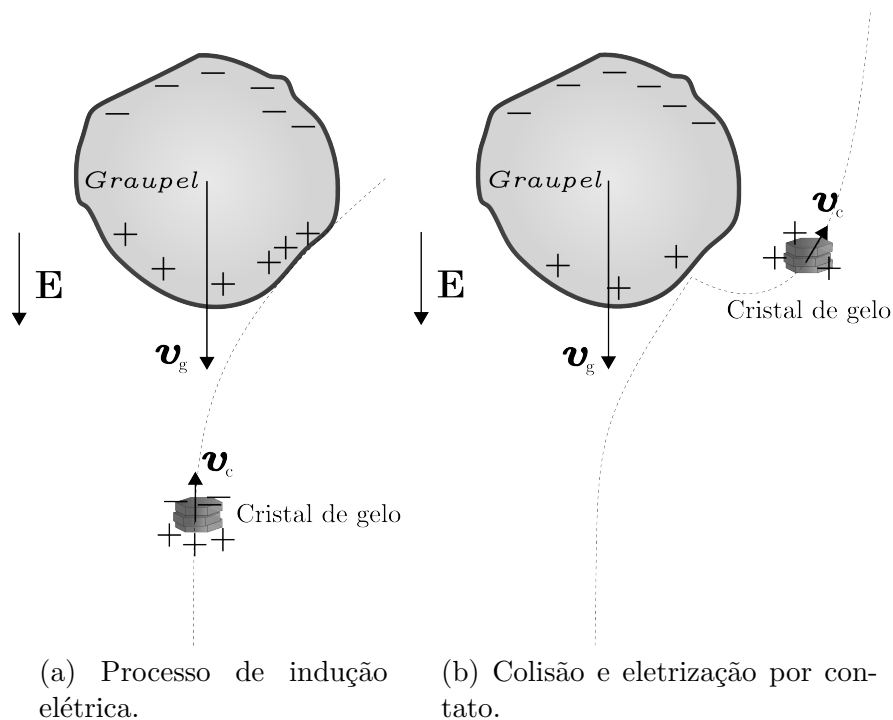


Figura 5: Devido a diferença de massa entre o *graupel* e o cristal de gelo, o *graupel* precipita com velocidade  $v_g$  enquanto o cristal de gelo tende a subir com velocidade  $v_c$  junto à correntes ascendentes. Estando essas partículas imersas em um campo elétrico  $\mathbf{E}$  a eletrização no momento da colisão torna-se possível.

### Processo colisional não indutivo

Experiências realizadas em laboratório conforme Reynolds et al. (1957), Takahashi (1984) e Takahashi (1978, apud Saunders et al. (1999)) evidenciam que a colisão entre partículas de gelo em crescimento (*rimer*) e partículas menores são fundamentais no processo de eletrificação colisional não indutivo. Porém, o carregamento não-indutivo depende do tamanho das partículas, do conteúdo de água líquida dentro da nuvem, da temperatura (T), e da velocidade de impacto entre os hidrometeoros.

Associado ao tamanho das partículas considera-se que exista uma interface entre a água e o ar, gelo e ar, e água e gelo, composta de água quase líquida (QLL), que no momento da colisão, é transferida das partículas com maior quantidade de QLL para as partículas com camada de QLL menor (BAKER; DASH, 1994, apud (ALBRECHT, 2008)). Em Saunders (2008) são mostrados resultados de experiências controladas em laboratório nas quais analisa-se a polaridade adquirida pelo *rimer* em função da temperatura e presença de água líquida (ver figura 6).

O estudo da microfísica dos processos de eletrificação não indutiva apresenta pouco

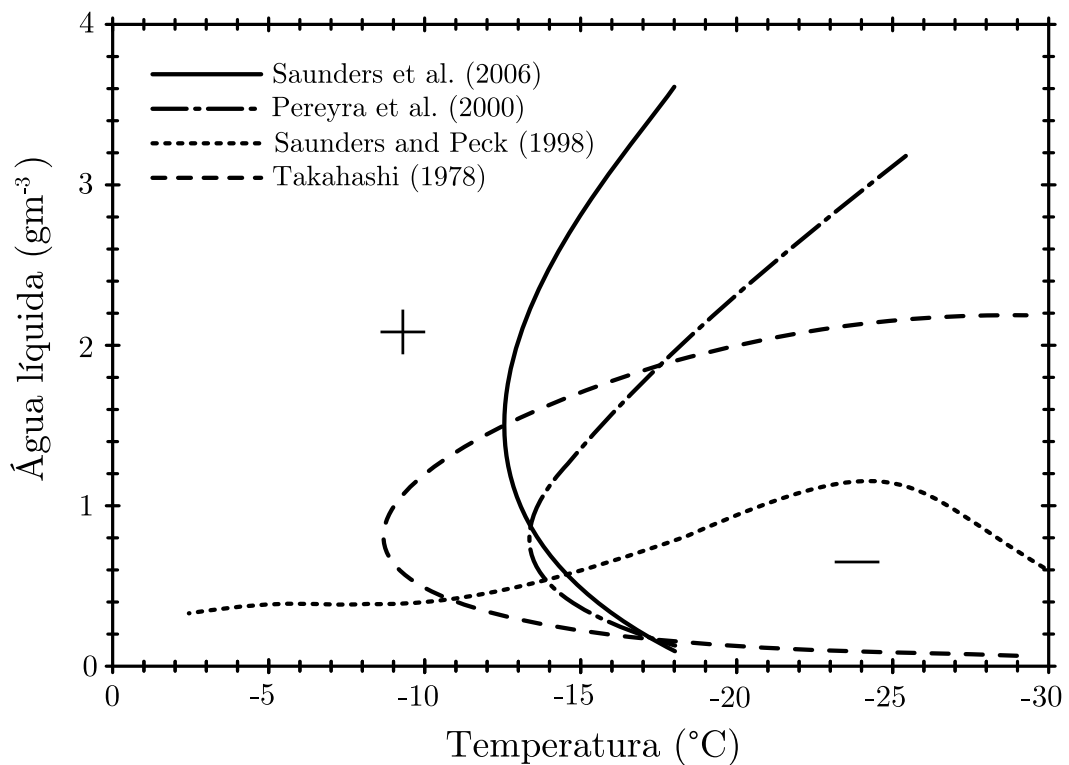


Figura 6: Cada resultado obtido desenha uma linha de fronteira entre as regiões nas quais a temperatura e quantidade de água líquida influenciam na carga, positiva ou negativa, adquirida pelo *rimer* (adaptada de Saunders (2008)).

consenso entre os pesquisadores, conforme mostra a figura 6 em que os resultados obtidos por diferentes autores, divergem. Porém, é o processo que melhor compreende a estrutura tripolar das nuvens de tempestades, pois, converge com o fato de que os centros de cargas identificados no interior das nuvens correspondem à sedimentação de partículas de mesma massa e mesma polaridade elétrica.

### 3 ELETRICIDADE NA ATMOSFERA

Medidas de campo elétrico na superfície da Terra em condições de tempo bom mostram que existe um campo elétrico na atmosfera variante durante o dia, que pode alcançar a intensidade de até 120 V/m conforme as medidas realizadas pelas expedições marítimas de Maud e Carnegie representas na figura 8a.

Em função desse campo elétrico de tempo bom, identifica-se que o planeta Terra possui um excesso de cargas negativas em sua superfície enquanto a alta atmosfera permanece eletrizada positivamente gerando um campo elétrico de milhares de volts que movimenta as cargas elétricas da superfície da Terra até regiões mais altas da atmosfera (ver figura 7). Essa corrente elétrica de tempo bom é denominada de corrente corona (FEYNMAN et al., 1964; DEVENDRAA et al., 2007).

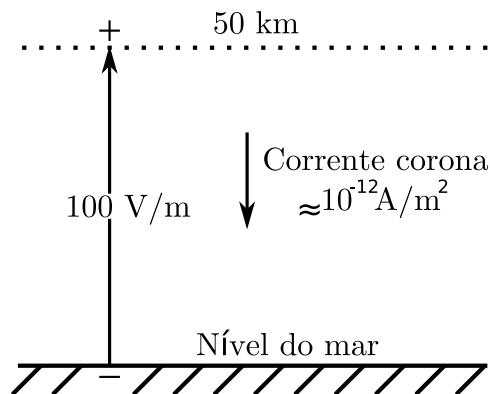
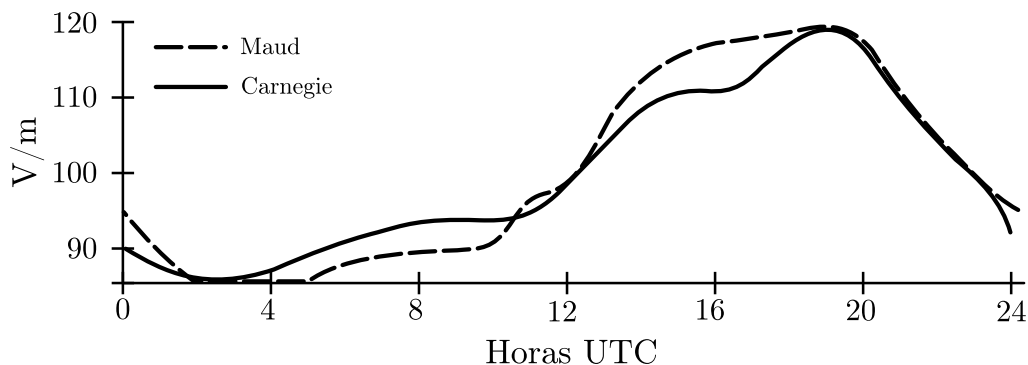


Figura 7: Campo elétrico de tempo bom e corrente corona (adaptada de Feynman et al. (1964)).

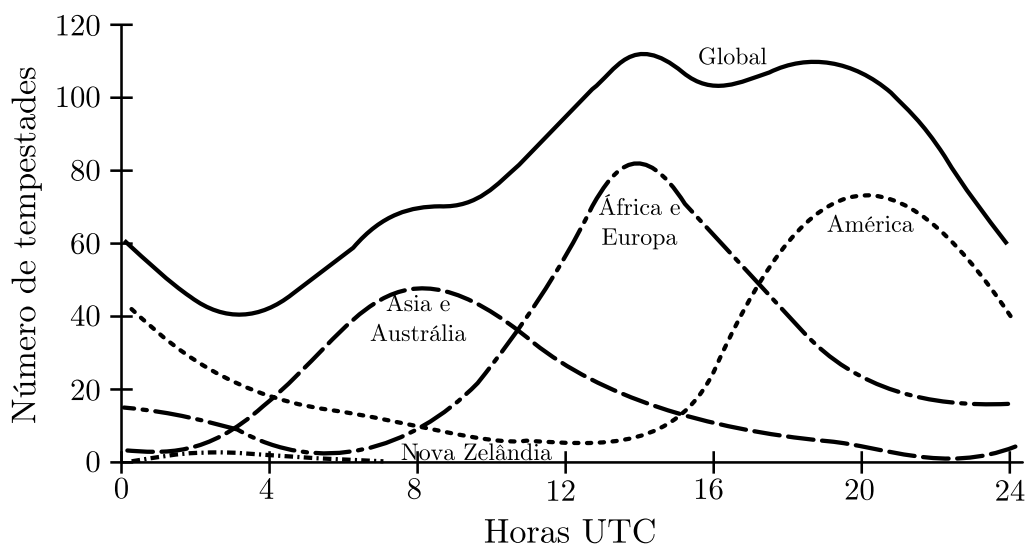
A corrente corona poderia neutralizar todo esse sistema em aproximadamente 10 minutos se não houvesse mecanismos de manutenção desse ciclo denominado de Circuito Elétrico Atmosférico Global. Entre os mecanismos de manutenção das condições elétricas da atmosféricas em tempo bom, encontra-se no foco deste trabalho, as nuvens de tempestades, responsáveis por produzirem os relâmpagos.

O Circuito Elétrico Atmosférico Global pode ser idealizado como um capacitor esférico, em que sua esfera externa é carregada positivamente enquanto a superfície da Terra é a

esfera interna, carregada negativamente. A nuvem de tempestade é o gerador elétrico que mantém a carga negativa da esfera interna, e contribuiu para a manutenção das cargas positivas na esfera externa (LACERDA, 1998).



(a) Média anual da variação global diurna do gradiente de potencial elétrico de tempo bom, segundo medidas realizadas pelas expedições marítimas de Carnegie e Maud (adptada de Parkinson e Torrenson (1931, apud Devendraa et al. (2007))).



(b) Média anual da variação global diurna de ocorrência de tempestades (adptada de Whipple e Scrase (1936, apud Goodman e Christian (1993))).

Figura 8: Correspondência entre os horários com picos de ocorrências de tempestades globais e horários com picos de valores do campo elétrico de tempo bom na superfície terrestre para o nível do mar.

Além das nuvens de tempestades, os efeitos dínamo ionosférico<sup>5</sup> e dínamo magnetosférico<sup>6</sup> contribuem para a manutenção do campo elétrico de tempo bom, porém a

<sup>5</sup>“O dínamo ionosférico é consequência do movimento do plasma ionosférico, produzido pelos ventos gerados abaixo da atmosfera superior, dentro do campo geomagnético que também resulta na geração de correntes e campos elétricos. (MEDINA, 2006)”.

<sup>6</sup>“O dínamo magnetosférico resulta do fluxo do vento solar ao redor e parcialmente dentro da magnetosfera, que gera movimentos de plasma dentro da magnetosfera. Este movimento do plasma dentro da magnetosfera e, portanto, dentro do campo geomagnético, gera correntes e campos elétricos. (MEDINA,



hipótese de que os maiores geradores elétricos desse circuito são as nuvens de tempestades, torna-se mais consolidada quando se observa que o pico de intensidade do campo elétrico de tempo bom mostrado na figura 8a coincide com o horário de maior número de tempestades ocorrentes no globo terrestre conforme mostra a figura 8b (DEVENDRAA et al., 2007).

### 3.1 OS RELÂMPAGOS

Os relâmpagos são descargas elétricas atmosféricas com intensa corrente elétrica ocorrendo com mais frequência devido a separação de cargas no interior das nuvens de tempestades, porém são identificados também em tempestades de areia, neve e atividades vulcânicas.

Os relâmpagos são descargas elétricas atmosféricas com intensa corrente elétrica ocorrendo com mais frequência devido à separação de cargas no interior das nuvens de tempestades, porém são identificados em tempestades de areia, neve e atividades vulcânicas.

Para ocorrência de um relâmpago associado a uma nuvem de tempestade é preciso que a diferença de potencial entre os centros de cargas da nuvem, ou entre algum centro de carga e a superfície terrestre, seja intensa o suficiente para que haja a quebra da rigidez dielétrica da atmosfera ( $\simeq 10^6$  V/m), porém, em média os valores máximos de campo medidos em nuvens são ao redor de  $2 \times 10^5$  V/m. Estes campos não são intensos o suficiente para a quebra da rigidez dielétrica do ar para as altitudes nas quais as nuvens se formam (COORAY; JAYARATNE, 2000).

Conforme descrito em Ogawa (1995, p. 97), gotículas de águas imersas no campo elétrico gerado pela nuvem, ao serem polarizadas, podem deformar até que quebram proporcionando o movimento de gotículas menores (*spray*) carregadas, assim transformando algumas partes da nuvem em um condutor, dessa forma facilitando a quebra de rigidez dielétrica.

Medidas mais recentes da radiação elétrica emitida por relâmpagos, associadas ao momento da quebra de rigidez dielétrica, detectaram raios gama irradiados, evidenciando processos de alta energia além da deformação e ruptura das gotículas de água (DWYER et al., 2004; SMITH et al., 2005; KHAERDINOV et al., 2005).

Portanto, sugere-se a participação de radiação cósmica no início da descarga, em um processo no qual os raios cósmicos, ao colidirem com outras partículas da atmosfera, pro-

---

2006)”

vocam uma reação em cadeia a proporcionando uma avalanche de elétrons com alta energia, sendo assim, quebrada a rigidez dielétrica dando início ao relâmpago (GUREVICH et al., 1992; RAKOV; UMAN, 2003; KHAERDINOV et al., 2005).

### 3.1.1 Tipos de relâmpagos

Os relâmpagos podem ocorrer da nuvem para o solo denominadas como nuvem-solo (NS), do solo para a nuvem denominados solo-nuvem (SN), entre as nuvens (EN) ou dentro de uma mesma nuvem classificados como intranuvem (IN), como também da nuvem para a atmosfera, classificados como relâmpagos no ar (NA). Os relâmpagos SN também são denominados de relâmpagos nuvem-solo positivo, devido a corrente elétrica dessas descargas possuírem sentido contrário às correntes dos relâmpagos NS, assim as descargas que envolvem a nuvem e o solo podem ser classificadas como relâmpagos nuvem-solo positivo (NS+) e relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-). Os relâmpagos que envolvem a nuvem e o solo também são classificados como raios.

De todos os tipos de relâmpagos, os intranuvem são os mais frequentes, devido às regiões de cargas opostas estarem mais próximas. As descargas intranuvens, representam cerca de 80% do número total de relâmpagos. Dentre os outros tipos de relâmpagos, os mais frequentes são os relâmpagos nuvem-solo, sendo os demais comparativamente raros.

Os relâmpagos são fundamentais na manutenção do Circuito Elétrico Atmosférico Global, mantendo a superfície terrestre carregada negativamente, pois 90% dos relâmpagos NS são negativos (RAKOV; UMAN, 2003).

A classificação de relâmpago engloba todo o processo da descarga atmosfera, desde o seu início até o término.

### 3.1.2 Aspectos físicos

Existe uma série de processos desde a formação até o término de um relâmpago. Percebe-se intensas correntes elétricas denominadas como descargas de retorno (DR) ou choques de retorno, porém na quebra da rigidez dielétrica apenas um pequeno centro de cargas se propaga ( $\simeq 5-10\text{C}$ ) constituindo um canal de ar ionizado onde ocorrerá a descarga de retorno. A propagação desse pequeno centro de carga é denominada de líder escalonado ou condutor por passos (*stepped leader*). Analisando macroscopicamente, o líder escalonado move-se em passos com até dezenas de metros com pausas entre 30 e 125  $\mu\text{s}$ , momento em que ocorre uma concentração de cargas em sua extremidade pos-

sibilitando uma nova quebra de rigidez dielétrica e um novo passo, definindo assim a forma ramificada do relâmpago (OGAWA, 1995; RAKOV; UMAN, 2003; FERNANDES, 2006). O líder escalonado pode ser ascendente ou descendente e quando se aproxima de um centro de cargas positivo, seja no solo ou na nuvem, induz a formação de um líder conectante unindo-se ao líder escalonado. Neste momento um canal condutor é formado onde ocorrerá a primeira descarga de retorno que em média possui a intensidade de 40kA.

Após a primeira DR, podem ser detectadas correntes elétricas posteriores sem a ocorrência de um novo líder ionizando o canal que são denominadas de componentes M de corrente<sup>7</sup>. Se estiverem disponíveis mais centros de cargas na nuvem, podem ocorrer outras descargas de retorno, porém, antecedidas por um novo líder chamado de líder contínuo que percorre o canal sem pausas, ionizando novamente o ar e possibilitando uma nova DR. Os processos de reorganização das cargas no interior das nuvens entre as descargas de retorno subsequentes são chamados de processos J e K (OGAWA, 1995; BERGER, 1977).

Quando se analisa o campo elétrico de um relâmpago distante, é possível identificar a assinatura de cada processo durante o evento: a formação do líder (L), as descargas de retorno (DR), as componentes M, processos J e K conforme mostra a figura 9 na qual apresenta a detecção de campo elétrico de um relâmpago na parte superior e a derivada da curva do campo elétrico detectado.

### 3.1.3 Desenvolvimento elétrico das nuvens de tempestades

Conforme dados de detecções por radar mostrados na figura 10, observa-se que tipicamente as descargas intranuvens ocorrem entre 5 e 10 minutos após a eletrificação inicial, associadas ao crescimento de cristais de gelo na nuvem. Já as descargas nuvem-solo são identificadas em média entre 15 e 20 minutos após “[...] o eco do radar observar crescimento vertical da nuvem (GOODMAN, 1990, p. 17, tradução nossa).” Observa-se que as descargas intranuvens associam-se com o crescimento vertical da nuvem e processos de separação de cargas, que conforme vão se intensificando provocam as descargas nuvem-solo (GOODMAN, 1990).

---

<sup>7</sup>Ou descargas M

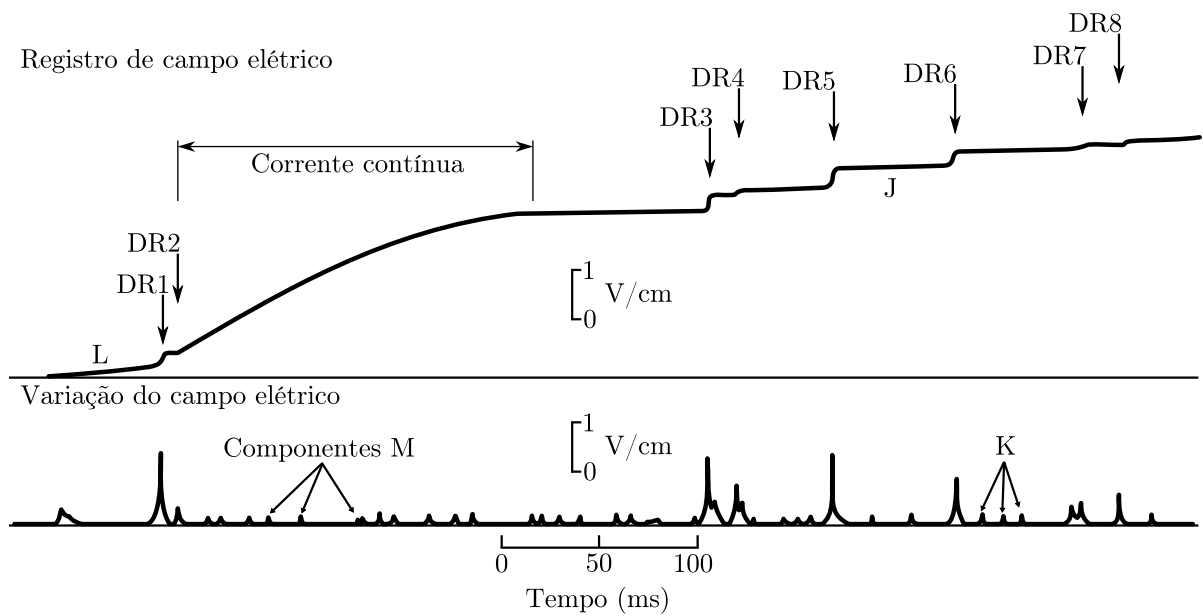


Figura 9: Ilustração da assinatura do campo elétrico emitido por um relâmpago nuvem-solo negativo e o registro da variação do campo elétrico durante o evento. Identifica-se que nesse relâmpago as descargas de retorno (DR1,DR2,...,DR8), a propagação do Líder (L), as descargas M, os processos J e K (adaptada de Kitagawa et al. (1962, apud Berger (1977))).

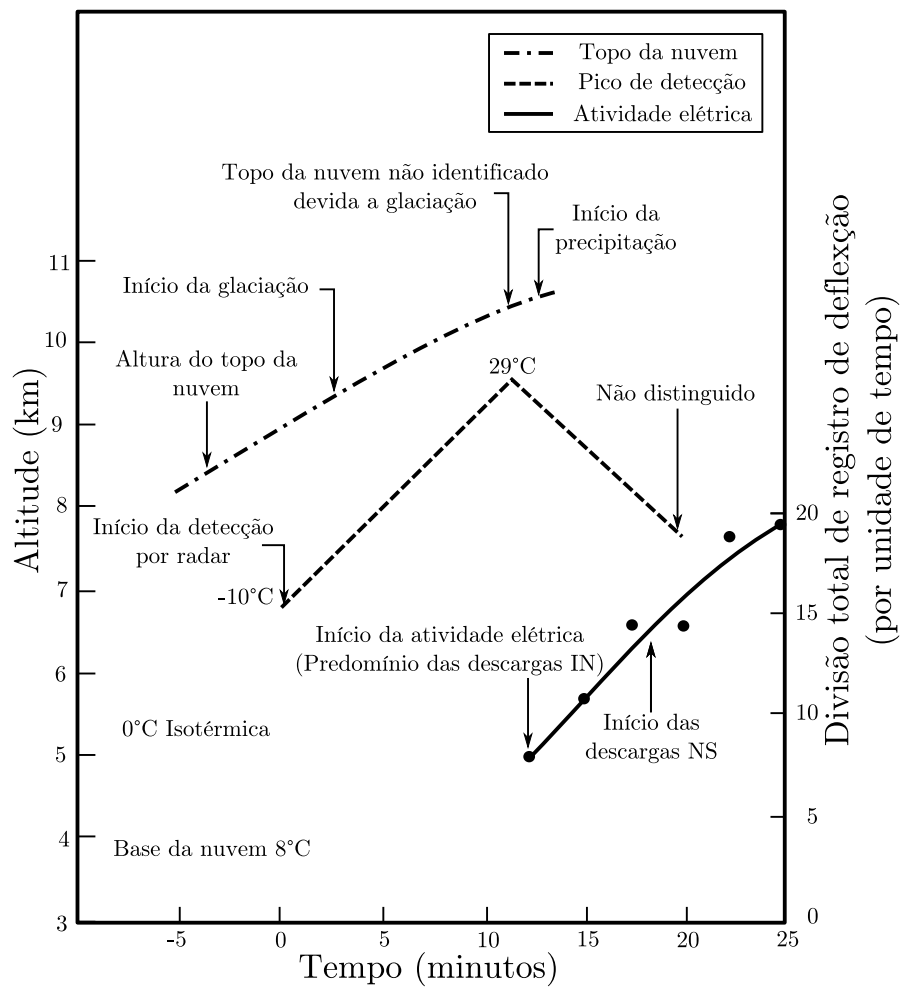


Figura 10: Desenvolvimento de tempestades observadas por radiosondagem, radar e sensores de campo elétrico (adaptada de Workman e Reynolds (1949, apud. Goodman (1990)).)

## 4 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS

Os resultados deste trabalho provêm da análise comparativa entre duas fontes de dados, a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas - BrasilDAT e uma Antena Lenta fixada na região urbana do município de Campo Grande - MS.

### 4.1 A BrasilDAT

É composta por 47 sensores de campo eletromagnético com frequência LF (*low-frequency*), sendo 18 IMPACT (*Improved Accuracy from Combined Technology*), 29 LPATS (*Lightning Position and Tracking System*) e centrais de processamento, sendo todo o sistema fabricado pela empresa VAISALA. A BrasilDAT é resultado da integração entre três redes regionais: SIDDEM (Sistema de Informações Integradas Baseado no Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas), SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) e RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas). A figura 11 representa a configuração dos sensores desta rede a qual realiza a cobertura aproximada de 60% do país (NACCARATO et al., 2008; SOUZA, 2006; NACCARATO, 2006).

#### 4.1.1 Sistemas de localização de descargas atmosféricas

São utilizados dois métodos de localização de raios, conforme descritos por Cummins et al. (1998), denominados como **Método da Direção Magnética - MDF** e **Método do Tempo de Chegada - TOA**.

O sistema MDF de localização é composto por dois ou mais sensores com duas espiras ortogonais, contidas em sua estrutura eletrônica, conforme representadas na figura 12.

Ao serem permeadas por um fluxo de campo magnético

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

em que  $\mathbf{A}$  corresponde a um vetor normal a superfície da espira e numericamente igual a

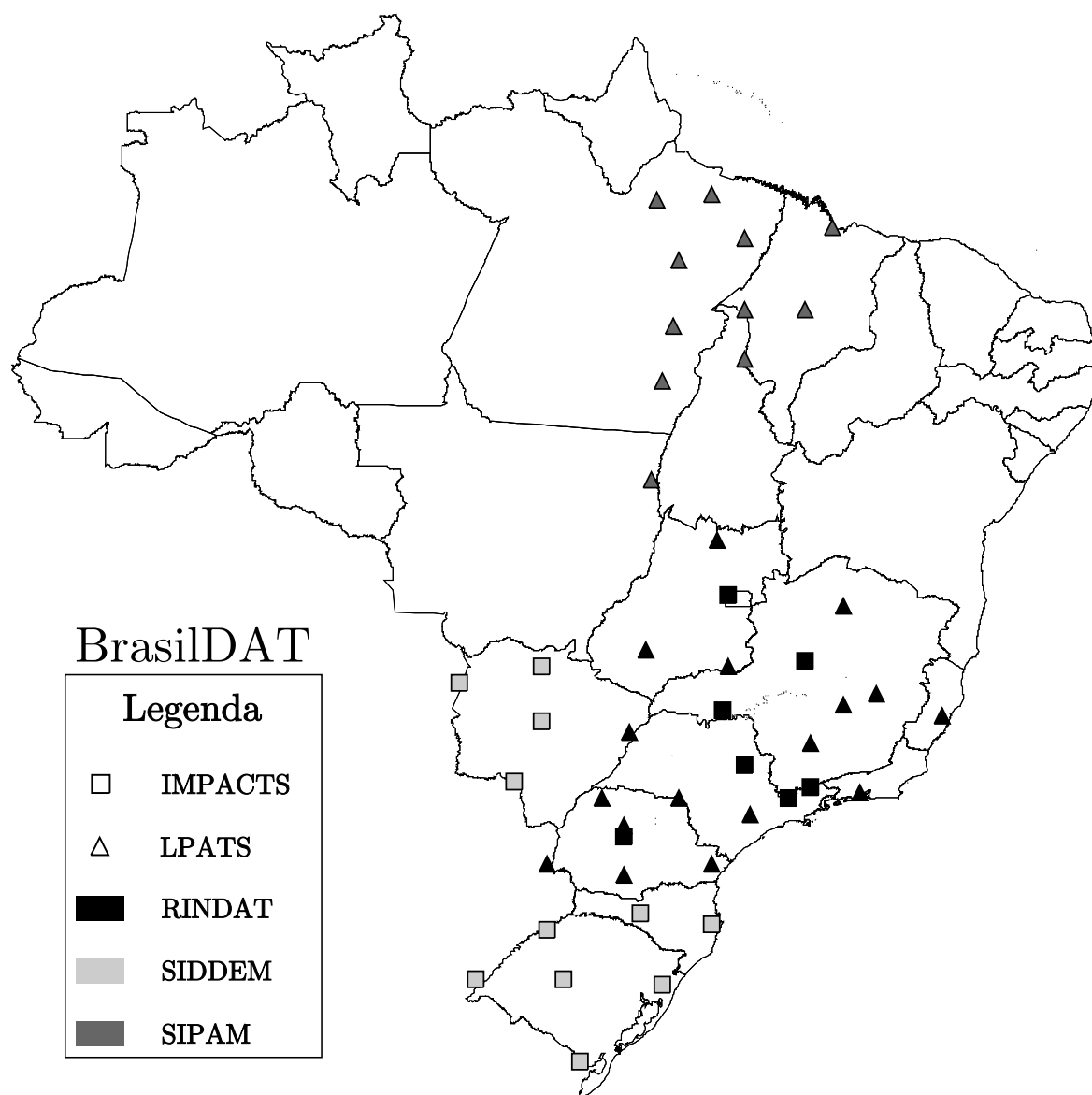


Figura 11: Configuração da BrasilDAT em todo território Brasileiro

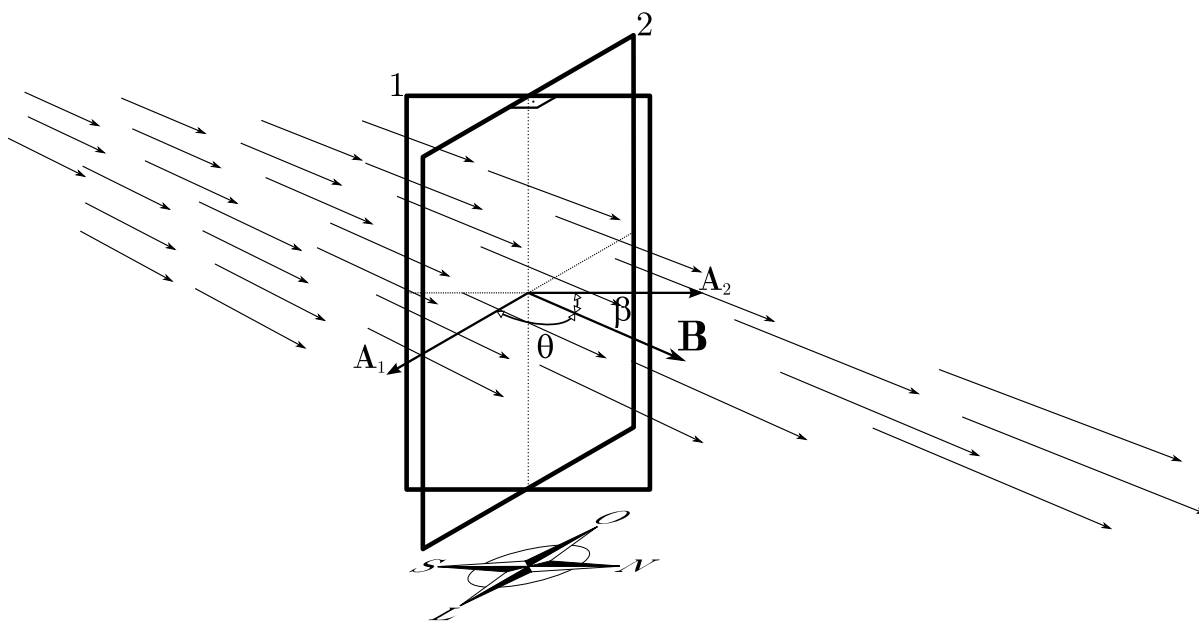


Figura 12: Espiras

área de uma das espiras (ver figura 12), a força eletromotriz ( $\xi$ ) induzida em cada espira será,

$$\xi = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Assim, de acordo com a figura 12 e substituindo a equação 1 em 2, pode-se obter  $\xi$  para as espiras 1 e 2 conforme as equações

$$\xi_1 = -A_1 \cos(\theta) \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

e

$$\xi_2 = -A_2 \cos(\beta) \frac{dB}{dt}. \quad (4)$$

Como as espiras (figura 12) são instaladas orientadas pelos pontos cardeais, determina-se a direção da origem do relâmpago através da inclinação  $\beta$  em relação ao norte geográfico. Essa inclinação é determinada pela razão entre a força eletromotriz em cada espira

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{A_1 \cos(\theta)}{A_2 \cos(\beta)}. \quad (5)$$

Como as espiras são projetadas para que

$$A_1 = A_2 = A \quad (6)$$



e as espiras 1 e 2 são ortogonais (figura 12),

$$\theta + \beta = \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

portanto,

$$\cos(\theta) = \sin(\beta) \quad (8)$$

então, 5 corresponde a

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)} = \tan(\beta). \quad (9)$$

Quando dois ou mais sensores identificam a  $\tan(\beta)$  associada a direção de origem de uma DR, torna-se possível determinar um ponto onde possivelmente a DR atingiu o solo conforme ilustra a figura 13.

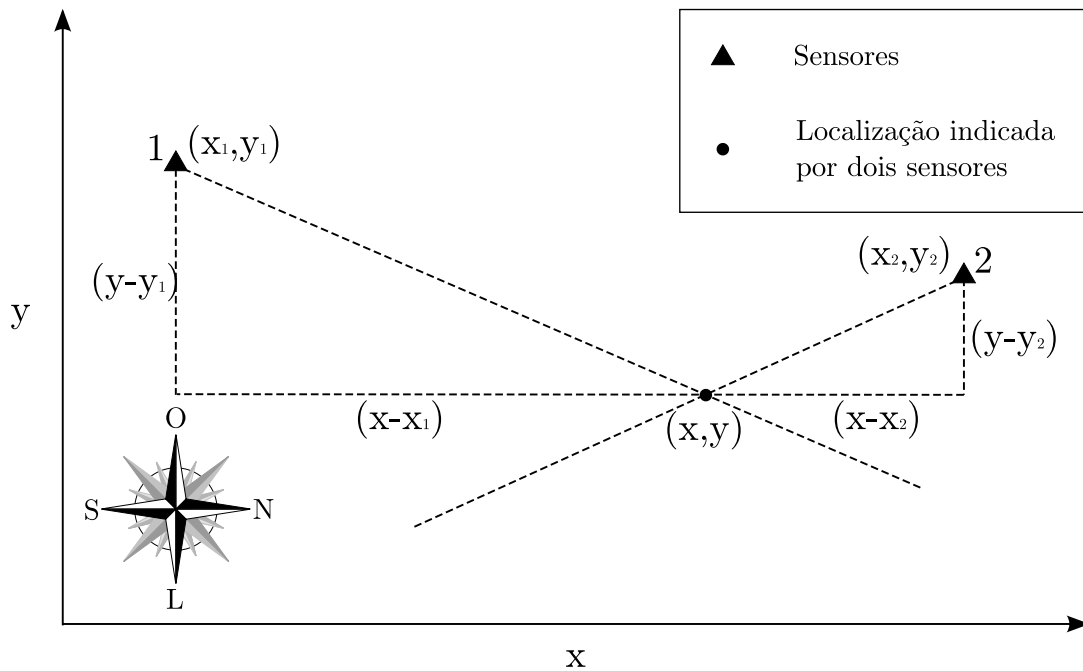


Figura 13: Determinação da localização de relâmpagos pelo método da Direção Magnética - MDF.

Note que, considerando um sistema de coordenadas cartesianas<sup>8</sup>, pode-se obter o ponto onde possivelmente ocorreu um raio resolvendo o seguinte sistema de equações

<sup>8</sup>Nesse exemplo é usado o sistema de coordenadas cartesianas com finalidade didática, porém, para sistemas de detecção com grande cobertura territorial, deve ser utilizado o sistema de coordenadas geográficas.

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \tan(\beta_1) \quad (10)$$

$$\frac{(y - y_2)}{(x - x_2)} = \tan(\beta_2), \quad (11)$$

pois,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são obtidos pelos sensores 1 e 2,  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  são as coordenadas dos sensores, então, determina-se as incógnitas  $x$  e  $y$ , mediante as equações 10 e 11, obtendo assim, a localização estimada pelos sensores.

A fim de melhorar a precisão de localização de raios utilizando o método MDF, usa-se sempre no mínimo três sensores para participarem da solução. Dessa forma determina-se uma região para a possível ocorrência do raio e não apenas um ponto. Esse procedimento é chamado de triangulação (ver figura 14) (CUMMINS et al., 1998).

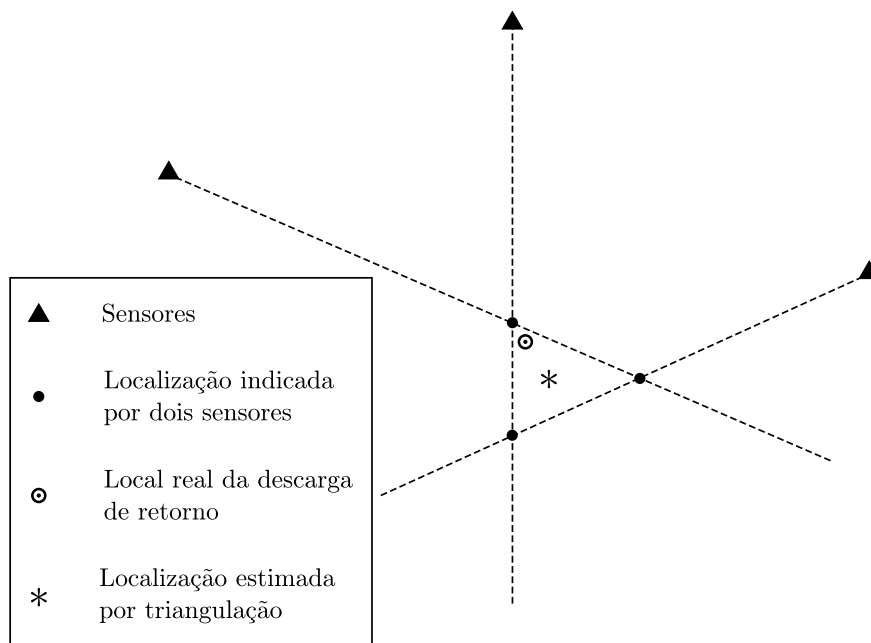


Figura 14: Representação de um sistema de localização de raios usando o Método da Direção Magnética - MDF com triangulação (adaptada de Cummins et al. (1993, p. 5)).

No método TOA, os sensores possuem em sua eletrônica um sistema de sincronismo de tempo por GPS (*Global Position Satellite*) assim, registrando o tempo da detecção do pico de campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) de uma DR. Através da diferença temporal de detecção entre cada sensor é feita uma estimativa do local de origem da DR, conforme descrito no apêndice D (ORVILLE, 1995).

Para a determinação da posição das DR, a BrasilDAT faz uso do método de intersecção circular conforme representado na figura 15.

Nesta situação, a informação de cada sensor pode ser interpretada como sua distância efetiva do ponto de impacto da descarga, definindo assim um lugar geométrico circular ao seu redor. O raio de cada círculo é baseado na diferença entre o horário estimado da descarga e o horário medido no instante da chegada da radiação ao local do sensor.[.] [...] A localização é determinada então selecionando a posição e o horário correspondentes ao ponto de intersecção de todos os círculos. (NACCARATO, 2006, p. 97).

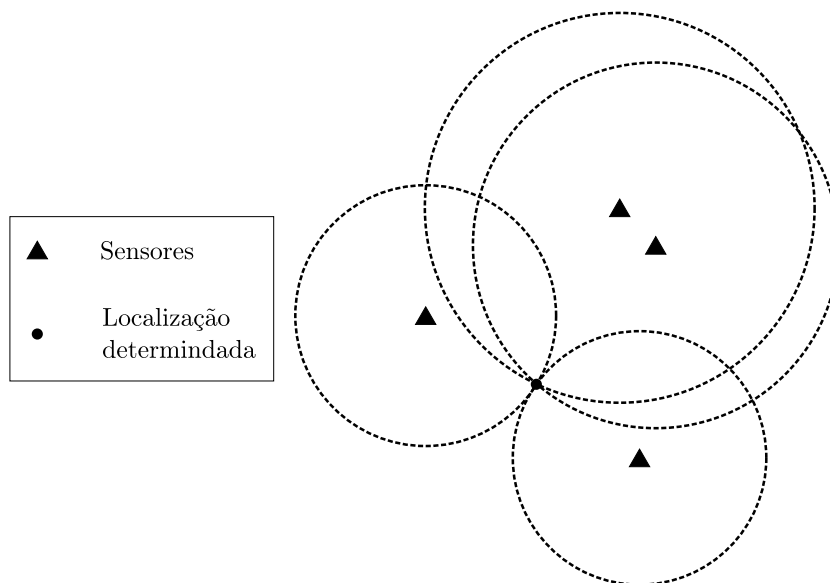


Figura 15: Representação de um sistema de localização de raios usando o Método de intersecção circular (adaptada de Cummins et al. (1993, p. 7)).

A principal diferença entre os sensores LPATS e IMPACT é que os sensores LPATS utilizam apenas o sistema MDF de localização enquanto os sensores IMPACT integram os dois sistemas, TOA e MDF conforme representados na figura 16. Esse método não sofre os problemas inerentes a cada método quando são usados separadamente. Desse modo o método IMPACT possui informações redundantes que permitem uma localização otimizada mesmo em situações menos favoráveis em que a descarga é detectada apenas por dois sensores. Esta combinação supera cada método, tanto na precisão de localização quanto na probabilidade de detecção. (CUMMINS et al., 1993).

#### 4.1.2 Multiplicidade das descargas de retorno

Quando a rede possui a localização estimada através dos sensores sensibilizados pelo evento, é executado pelas centrais de processamento um algoritmo para determinação de erros de localização. Cummins et al. (1998) descreve o Modelo de Eficiência para Detecção usado em sistemas de localização TOA-MDF que basicamente determina uma

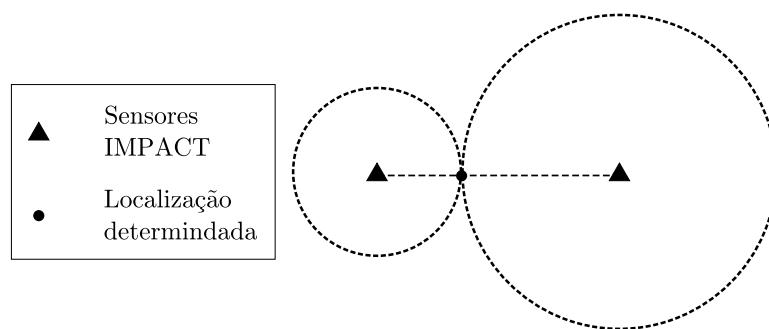


Figura 16: Representação de um sistema de localização TOA-MDF, em situação menos favorável, quando uma DR sensibiliza apenas dois sensores e atinge uma posição sobre a linha que une os sensores (adaptada de Cummins et al. (1993, p. 7)).

elipse centrada na DR localizada onde o verdadeiro evento tem 50% de probabilidade de ser encontrado em seu interior.

A figura 17 representa os critérios espaciais de agrupamento de DR subsequentes, nos quais nota-se que mesmo se a DR estiver compreendida em uma região com até 50 km de distância da primeira descarga e sua elipse estiver contida em uma região que dista 10 km da primeira descarga, esta é agrupada em um único evento.

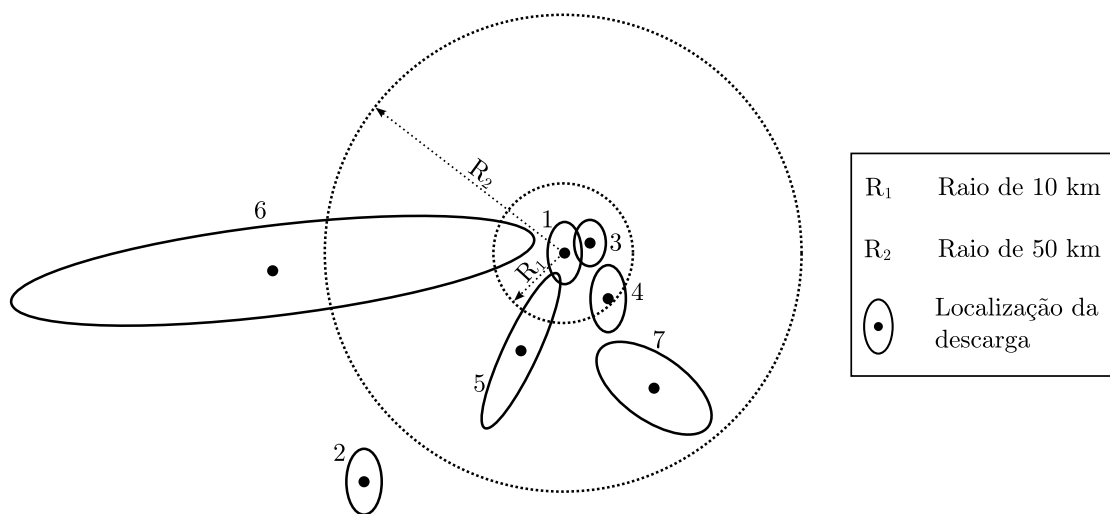


Figura 17: As descargas 1, 3, 4 e 5 serão associadas a um relâmpago enquanto as descargas 2, 6 e 7 serão atribuídas a outros relâmpagos. (adaptada de Cummins et al. (1998, p. 9038)).

O sistema identifica a multiplicidade considerando que: o evento total não ultrapassa o intervalo de 1 s, uma DR subsequente deverá ocorrer após no máximo 500 ms e ser localizada com distância de até 10 km da DR anterior.

### 4.1.3 Estimativa do pico de corrente

Depois de identificada a multiplicidade do raio, a estimativa para o pico de corrente é associada ao pulso mais intenso de campo elétrico detectado pelos sensores. Essa estimativa é feita com base na equação para o campo elétrico de uma DR distante considerando o Modelo de Linha de Transmissão (*Transmission Line Model* - TLM) para a corrente conforme descrito por Mclain e Uman (1971, p. 2102), Uman et al. (1973, p. 3523) e Uman et al. (1975, p. 373), no qual relaciona-se o campo elétrico irradiado com o pico de corrente ( $I_p$ ) pela expressão (ver apêndice C),

$$I_p = \frac{2\pi c^2 \varepsilon_0 D E_p}{v}, \quad (12)$$

que depende da distância ( $D$ ) do evento, da permissividade elétrica no vácuo ( $\varepsilon_0$ ), da velocidade da luz ( $c$ ), do pico de campo elétrico ( $E_p$ ) detectado pelos sensores e da velocidade ( $v$ ) da descarga de retorno (SCHOENE et al., 2003; UMAN et al., 1973).

Além da estimativa realizada pelo TLM, é utilizado um método chamado RNSS (*Range Normalized Signal Strength*) que corrige a aproximação feita pelo TLM considerando os efeitos de propagação que distorcem o pulso de campo elétrico da descarga (CUMMINS et al., 1998).

### 4.1.4 Eficiência da rede

A BrasilDAT possui diferentes eficiências de detecção de raios para determinadas regiões do Brasil. Em (NACCARATO et al., 2008) é apresentado um estudo estimando a eficiência de detecção da BrasilDAT em condições ideais e considerando inoperantes sensores que apresentaram mais problemas de desligamento no período entre 01 de julho de 2005 e 31 de agosto de 2008. Nesse trabalho percebeu-se uma eficiência na detecção de raios (*flash*) de 80% para a região da cidade de Campo Grande - MS.

Pinto Jr (2003) apresenta a seguinte tabela 1 contendo características da rede para uma situação ideal na qual haveria uma distribuição uniforme de sensores LPATS IV e IMPATC ESP.

## 4.2 A ANTENA LENTA

Desenvolvida pelo Dr. Widinei Alves Fernandes em 2005 no decorrer do projeto CNPQPCI/DTI 381679/2005-5, consiste em um dispositivo eletrônico que conectado a

Tabela 1: Características da rede (PINTO JR, 2003).

Alcance nominal	300 km
Eficiência de detecção	80-90%
Detecção de Intranuvs	10-30%
Detecção de descargas de retorno	$\simeq 50\%$ ( $> 5$ kA)
Discriminação dos Intranuvs	$> 90\%$ ( $+ > 10$ kA)
Precisão de Localização	0,5 km
Estimativa de Pico de corrente	$\simeq 20-30\%$

uma antena é capaz de identificar oscilações de campo elétrico na atmosfera associadas a ondas eletromagnéticas com frequência entre 200 Hz e 2 kHz. A figura 18 mostra as instalações da Antena Lenta utilizada, a esquerda, a estação de coleta de dados e a direita um sensor VLF pertencente a STARNET<sup>9</sup> e a antena utilizada nesta pesquisa.



(a) A esquerda o computador de aquisição dos dados da Antena Lenta, e no monitor, pulsos de campo elétricos detectados em tempo real. A direita está a estação de coleta de dados de um sensor pertencente à rede STARNET



(b) A esquerda um sensor VLF pertencente a STARNET. A direita a antena whip utilizada nesse trabalho

Figura 18: Estação de coleta de dados instalada na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

A Antena Lenta não consiste em uma rede de sensores, e sim em apenas um sensor na cidade de Campo Grande - MS.

<sup>9</sup>Morales et al. (2008) faz uma descrição detalhada a respeito da Sferics Timing And Ranging NETwork - STARNET.

### 4.2.1 Funcionamento

Para detecção de descargas atmosféricas pode ser utilizada uma antena capacitiva ou whip, porém neste trabalho foi utilizado uma antena whip, pois mostrou-se mais eficiente na detecção em uma região espacial maior.

A antena whip foi fixada aproximadamente a 1 m do solo conectada por um cabo coaxial até a entrada do dispositivo eletrônico para filtragem e amplificação das oscilações de campo elétrico detectadas. A filtragem dos sinais é realizada por três filtros passa faixa colocados em cascata para frequência entre 200 Hz e 2 kHz. Após, o sinal é conduzido para um circuito RC para que o pulso elétrico seja alargado evitando que na conversão do sinal analógico para digital seja perdido algum pulso devido a aquisição ser lenta. Na saída do circuito RC um diodo permite a passagem de pulsos elétricos com no máximo 5 V<sup>10</sup>.

A saída do dispositivo é conectada a um computador por intermédio do equipamento denominado ADC-40 desenvolvido pela empresa *Pico Technology* que integra as funções de um osciloscópio e *data logger*. O ADC-40 teve a função de um conversor analógico digital que através do seu *software* de controle denominado PicoLog, foi programado para registrar informações no *Hard Disk* do computador com frequência de 20 Hz. Os dados são gravados em um arquivo com extensão PLW contendo: a intensidade do pulso elétrico, data e hora. O sincronismo de tempo foi realizado via NTP (*Network Time Protocol*).

A figura 19 representa o funcionamento exemplificado da Antena Lenta.

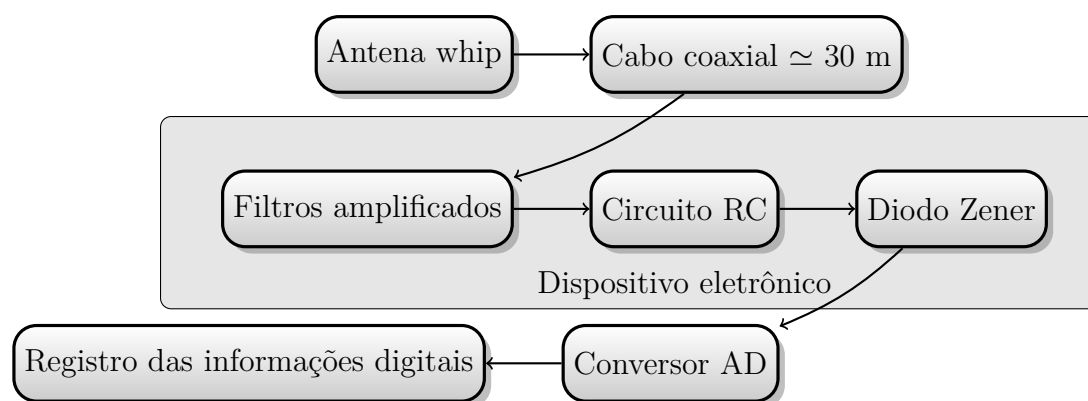


Figura 19: Etapas de funcionamento da Antena Lenta

<sup>10</sup>Voltagem máxima de operação do conversor analógico digital utilizado

### 4.2.2 Alcance de detecção dos relâmpagos

Foi possível perceber durante a análise, que raios com elevado pico de corrente estimado pela BrasilDAT (em torno de 150 kA), podem ser detectados distantes até 1000 km ou mais.

A BrasilDAT, usada como fonte comparativa de dados, não possui informação de detecção dos relâmpagos intranuvens. A única fonte de detecção de relâmpagos totais<sup>11</sup> no Brasil é o sensor LIS (*Lightning Imaging Sensor*) a bordo do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

Ao combinar os dados do sensor LIS e da Antena Lenta com o intuito de determinar o alcance de detecção da mesma, observou-se que, devido ao tempo de observação de 90 s do sensor LIS e a frequência de passagem de no máximo duas vezes por dia do satélite TRMM<sup>12</sup>, não foi identificadas atividades elétricas favoráveis<sup>13</sup> para avaliar o alcance de detecção dos relâmpagos totais.

As informações obtidas pela Antena Lenta foram comparadas com os dados da BrasilDAT em dias favoráveis onde foi possível identificar qual a distância em que a detecção de raios nuvem-solo começa a ficar comprometida e reduzir essa região obtendo um alcance aproximado para a detecção dos intranuvens, desta forma foi estimado o alcance de detecção de relâmpagos totais compreendido em uma região circular com raio de 20 km centrada na Antena Lenta conforme ilustra a figura 20.

Dispositivos similares de detecção de relâmpagos totais encontrados na literatura possuem alcance aproximado ao estimado para Antena Lenta utilizada neste trabalho. Em Rutledge et al. (1992, p. 8) antenas capacitivas conectadas a *data loggers* digitais tiveram alcance estimado em 30-40 km. Outro dispositivo similar é o contador de descargas denominado como CGR3, desenvolvido pela Universidade de Queensland na Austrália (JAYARATNE; RAMACHANDRAN, 1998, p. 236). Esse equipamento tem como objetivo classificar as descargas atmosféricas e determinar a razão entre relâmpagos intranuvens e nuvem-solo. Segundo Mackerras e Darveniza (1994, p. 10814) o CGR3 possui alcance de detecção entre 12 e 16 km.

---

<sup>11</sup>Relâmpagos totais, faz referência a todos os tipos de relâmpagos: os que envolvem apenas as nuvem e os que envolvem a nuvem e o solo.

<sup>12</sup>Informação consultada em National Aeronautics and Space Administration - NASA (2009).

<sup>13</sup>São dias com pouca atividade elétrica e concentradas no município de Campo Grande - MS. Quando se tem muitas descargas espalhadas por todo estado registradas pelo LIS, torna-se impossível avaliar se a Antena Lenta detectou uma descarga intranuvem ou descarga nuvem-solo distante.



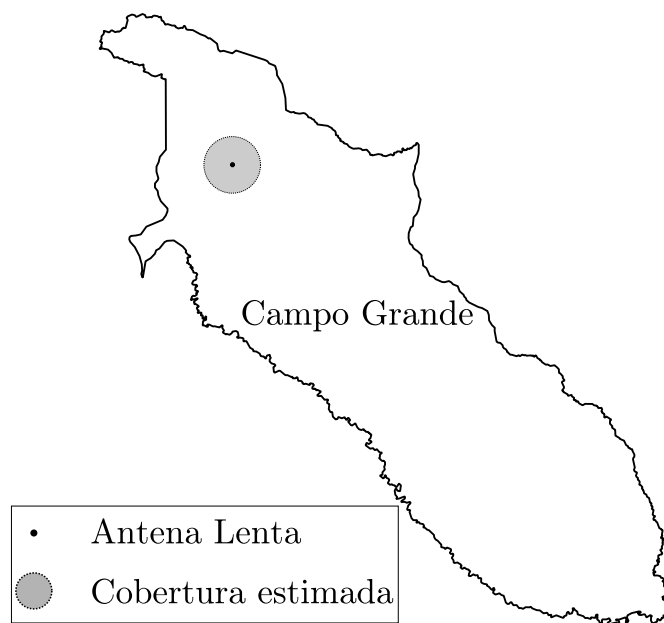


Figura 20: Alcance estimado para detecção de relâmpagos totais. Essa região está compreendida no município de Campo Grande - MS abrangendo toda a área urbana.

## 5 PROCESSAMENTO DOS DADOS DA ANTENA LENTA

Na literatura existem trabalhos que utilizaram dispositivos semelhantes à Antena Lenta para detecção de descargas intranuvens e nuvem-solo, como em Rutledge et al. (1992, p. 13) que duas antenas capacitivas conectadas em *data loggers* digitais detectaram e registraram os dados de relâmpagos totais.

O dispositivo CGR3 utilizado para o cálculo da razão entre relâmpagos intranuvens e nuvem-solo, realiza o processamento das informações de campo elétrico diretamente em seus componentes eletrônicos que através das características dos pulsos de campo elétrico detectados, o equipamento identifica raios positivos, raios negativos e relâmpagos intranuvens, registrando-os separadamente. O CGR3 teve seu processo de identificação de descargas aprimorado, conforme descrito em Baral e Mackerras (1992, p. 932), desde as suas versões iniciais, CGR1 e CGR2 (MACKERRAS, 1985; BARAL; MACKERRAS, 1992; MACKERRAS; DARVENIZA, 1994; JAYARATNE; RAMACHANDRAN, 1998; MACKERRAS et al., 1998; YAIR et al., 1998).

O processamento realizado nos dados da Antena Lenta deste trabalho, objetiva o cálculo da razão  $Z$ , e difere-se dos outros trabalhos por ser executado através de rotinas computacionais. Basicamente os dados brutos registrados em disco rígido (arquivo .PLW) são convertidos em formato de texto (.TXT), passam por filtros de ruídos, são importados para um sistema de banco de dados, no qual é realizado a identificação da multiplicidade dos eventos e o cálculo de  $Z$ , conforme representado no fluxograma da figura 21.

Os *softwares* desenvolvidos para o processamento dos dados descritos nesta seção são mostrados com detalhes no apêndice A. Todo o processamento foi realizado em sistema operacional Debian GNU/Linux.

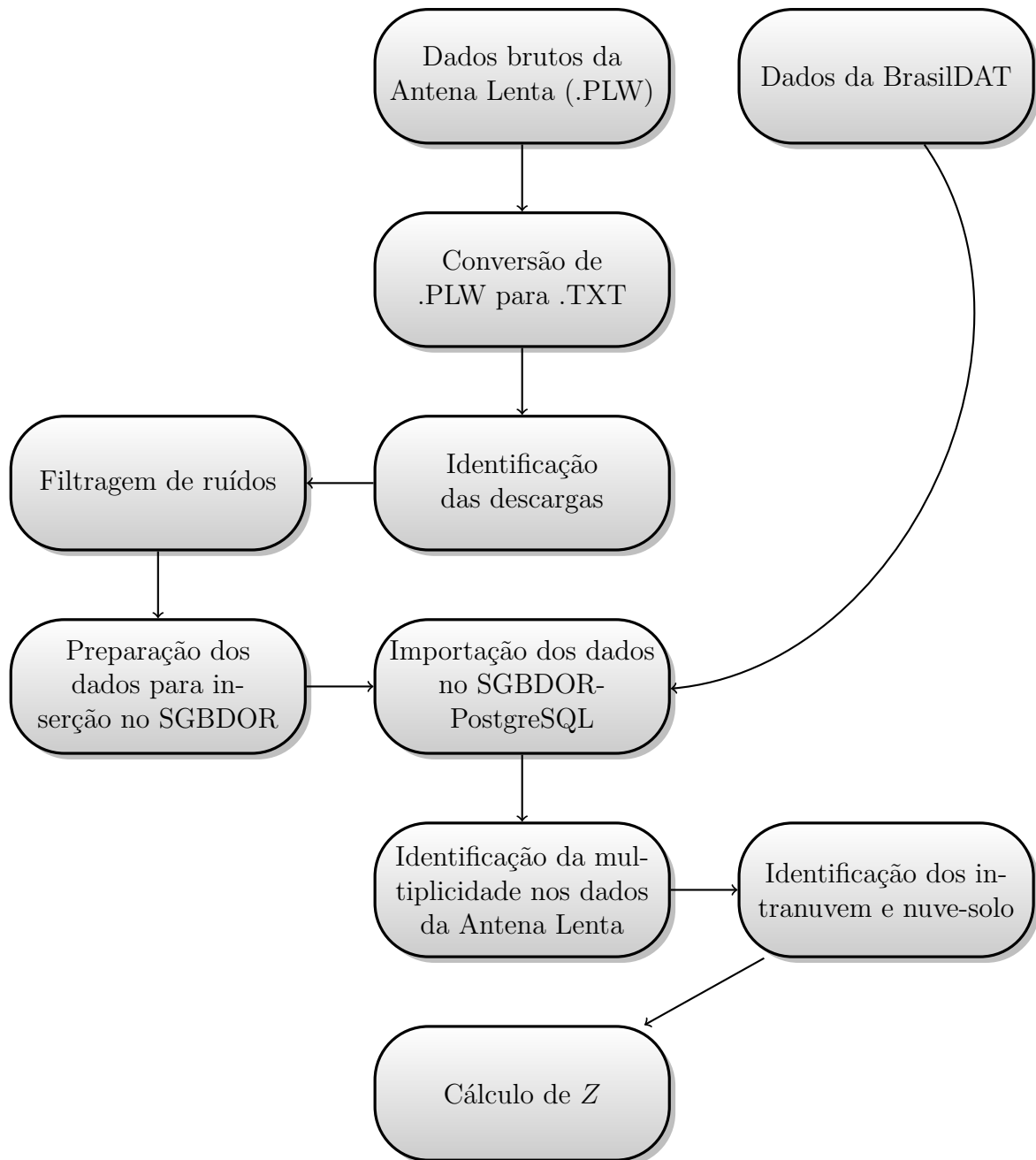


Figura 21: Roteiro do processamento de dados.

## 5.1 FORMATAÇÃO DOS ARQUIVOS DE REGISTRO

Os dados são registrados em um arquivo com extensão .PLW<sup>14</sup> por meio do *software Pico Recorder*<sup>15</sup>, que opera exclusivamente em sistema operacional *Microsoft Windows*. Os arquivos .PLW, permitem análise apenas por programas específicos do seu fabricante, tornando necessário o uso do *software Pico Player* para a conversão das informações registradas em formato de texto ASCII<sup>16</sup>. Esses arquivos foram transferidos para um sistema GNU/Linux, sendo necessário o uso do *unix command dos2unix*<sup>17</sup> para adaptação dos arquivos de texto MSDOS em arquivos de texto UNIX.

Um algoritmo programado em python (descrito no código fonte 1) formata as linhas de dados gerando um arquivo CSV (*Comma-separated values*) propício para análise gráfica na qual verifica-se a integridade das informações antes da importação para o sistema de banco de dados.

## 5.2 IDENTIFICAÇÃO DAS DESCARGAS

Devido a aquisição dos dados ser lenta, os pulsos de campo elétrico identificados pela antena whip, são alargados por um circuito RC presente na “eletrônica” da Antena Lenta conforme descrito em 4.2.1.

O alargamento é gerado através do descarregamento do capacitor que compõe o circuito RC fazendo com que o pulso detectado pela antena whip permaneça durante o tempo de descarregamento do capacitor. Como o dispositivo ADC-40 registra os dados a cada 50 ms, é possível registrar mais que um pulso elétrico diferente de zero associado a uma descarga atmosférica. Portanto foi preciso desenvolver um algoritmo que identifica o comportamento de descarregamento do capacitor e concentra o pulso em seu valor de pico. Esse algoritmo foi programado em linguagem de programação Python (ver código fonte 1) e realizou a identificação das descargas conforme mostrado na figura 22.

---

<sup>14</sup>Estes arquivos possuem criptografia e em alguns casos apresentaram problemas na identificação das informações, o que levou a perda dos dados coletados.

<sup>15</sup>Desenvolvido pela empresa *Pico Technology*.

<sup>16</sup>*American Standard Code for Information Interchange*.

<sup>17</sup>Altera os caracteres responsáveis pela mudança de linha das informações contidas nos arquivos de texto.

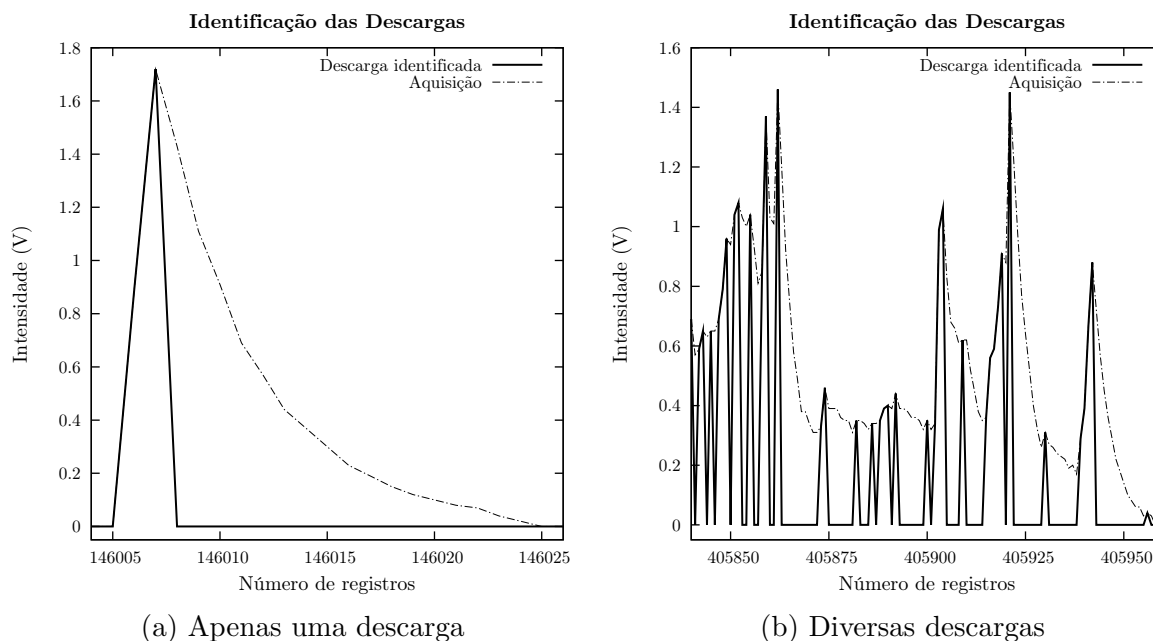


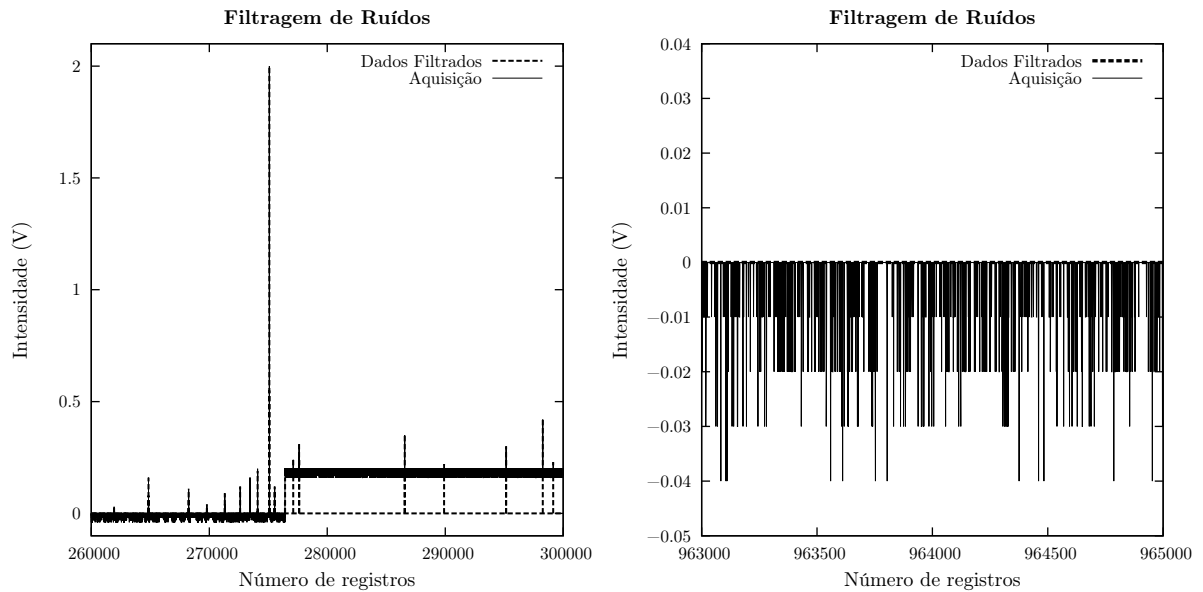
Figura 22: As figuras mostram o processamento realizado pelo algoritmo de identificação as descargas atmosféricas em situações diferentes.

### 5.3 TRATAMENTO DE RUÍDOS

Os dados registrados apresentaram ruídos sistemáticos em alguns dias. Não se sabe ainda a causa efetiva desse problema, mas provavelmente está associada a problemas na amplificação do sinal detectado ou falhas no conversor analógico digital utilizado (ADC-40) que apresentou imprecisões nos registros de tempo e ruídos mesmo quando o equipamento não estava ligado a nenhum dispositivo emissor de pulsos elétricos.

O padrão de ruídos mostrado na figura 23b registra valores negativos sendo que o dispositivo eletrônico que compõe a Antena Lenta converte qualquer oscilação de campo elétrico em pulsos positivos entre 0 e 5 V, pois foi construído para apenas identificar a ocorrência da descarga e não suas polaridades. Observa-se que os ruídos apresentados nas figuras 23a e 23b, possuem a mesma forma, apenas mudando os valores de repetição de 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20 para -0.04, -0.03, -0.02 e -0.01.

Quanto às falhas no registro de tempo, o ADC-40 foi configurado para adquirir dados a cada 50 ms ou seja 20 registros por segundo. Porém, percebe-se que em alguns casos foi registrado a mesma informação de data e tempo durante horas para os pulsos detectados. Como esse conversor AD trabalha em conjunto com seu software de controle que opera em sistema operacional *Microsoft Windows XP Professional*, que possui falhas extremamente críticas e ainda sem correções conforme mostrado em Secunia (2009), o



(a) Ruídos característicos. Possuem a repetição dos números 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20 impedindo a identificação de pulsos com intensidade inferior a 0.20 V

(b) Esse padrão de ruídos apresenta-se mesmo quando o ADC-40 está apenas aquisitando dados sem estar conectado em nenhum dispositivo emissor de pulsos elétricos.

Figura 23: Ruídos apresentados na aquisição da Antena Lenta e resultados gerados pelo algoritmo de filtragem de ruídos.

problema de imprecisão de tempo pode estar associado ao sistema operacional.

Para contornar essas adversidades, as análises deste trabalho correspondem a dias selecionados minuciosamente nos quais não apresentaram imprecisões significativas. Porém, para corrigir pequenos erros, um algoritmo programado em python (código fonte 1), reúne em suas funções, a filtragem de ruídos e reescreve as informações temporais a partir do primeiro, registro considerando a frequência de aquisição configurada no ADC-40, o que mostrou excelente sincronismo de tempo com atividades registradas pela BrasilDAT.

### 5.3.1 Eficiência estimada da Antena Lenta

A eficiência  $e$  de detecção corresponde a razão entre o número de eventos detectados ( $Ed$ ) e números de eventos ocorridos ( $EO$ ) conforme mostra a equação

$$e = \frac{Ed}{EO} 100 \quad (13)$$

Existiram alguns momentos em que a Antena Lenta detectou menos atividade do que a BrasilDAT. A primeira hipótese levantada para compreender essa baixa eficiência de

detecção da Antena Lenta foi que poderia haver uma região onde não fosse detectado os relâmpagos totais, por causa da interferência de prédios ou árvores em algum local específico, que quando a tempestade ocorresse nesse local, a Antena Lenta ficaria “cega”. Porém, ao plotar um gráfico com os dados de relâmpagos nuvem-solo associados aos intervalos de tempo nos quais a Antena Lenta possuiu menos atividade do que a BrasilDAT, foi possível perceber que os relâmpagos nuvem-solo não se concentravam em uma região específica.

Portanto ao analisar os dados brutos da Antena Lenta, em todas as ocasiões em que a Antena Lenta identificou menos descargas atmosféricas do que a BrasilDAT, esses dados possuíam ruídos conforme mostrados na figura 23a. Verifica-se então, que na ocorrência de ruídos, os pulsos com intensidades menores que 0,20 V não são registrados, gerando as situações em que o total de descargas detectadas pela Antena Lenta é menor que as descargas NS identificadas pela BrasilDAT.

A eficiência de detecção da Antena Lenta é diretamente afetada pelos ruídos, desta forma, os eventos em que apresentaram ruídos significativos,<sup>18</sup> foram excluídos dos resultados deste trabalho. Mesmo assim, a eficiência foi estimada considerando a pior hipótese de funcionamento, nas situações em que a detecção foi comprometida devido aos ruídos nas quais a Antena Lenta identificou em média apenas 80% dos eventos (*flashes*) registrados pela BrasilDAT. Subestimando ainda mais a detecção da Antena Lenta, pois essa detecta todos os tipos de relâmpagos, estima-se uma eficiência de 70% para detecção de relâmpagos totais.

#### 5.4 IMPORTAÇÃO DOS DADOS PARA O BANCO DE DADOS

Durante todo o período de coleta de dados, entre outubro de 2007 e fevereiro de 2009, obteve-se um total de 287.640.049 linhas de informações relacionadas ao campo elétrico da atmosfera. Em função do grande número de informações para serem analisadas e comparadas com informações da BrasilDAT, foi utilizado o Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados Objeto-Relacional (SGBDOR) PostgreSQL<sup>19</sup> como ferramenta fundamental de processamento de dados deste trabalho.

Os arquivos CSV filtrados conforme descrito em 5.3 passaram por uma nova análise computacional (ver códigos fonte 2 e 3) que desconsidera os registros com atividade elétrica

<sup>18</sup>Ruídos que duraram mais que 20 minutos durante a detecção.

<sup>19</sup>Para mais detalhes a respeito dessa ferramenta consulte PostgreSQL Global Development Group (2009).

nula e cria um novo arquivo com as informações de relâmpagos totais compreendidas em *tags* SQL para inserção dos dados no SGBDOR.

Se tratando de milhões de linhas, a importação dos dados foi feita utilizando o comando SQL, INSERT, preparado conforme pode-se verificar com detalhes no código fonte 4. A inserção foi realizada em blocos de milhares de linhas com o uso dos comandos BEGIN e COMMIT, anulando os possíveis problemas com o carregamento excessivo de memória RAM<sup>20</sup> e aumentando a performance de processamento.

## 5.5 MULTIPLICIDADE DOS EVENTOS

Conforme descrito em 4.1.2 a BrasilDAT agrupa as descargas de retorno subsequentes com critérios espaciais e temporais. No caso da Antena Lenta, não é possível obter a localização geográfica das descargas, portanto esse agrupamento é realizado apenas considerando critérios temporais que são descritos nessa seção.

Orville (1995) e Saba et al. (2006b) sugerem intervalos de tempo entre 40 e 70 ms como valores típicos para o tempo de ocorrência entre descargas de retorno subsequentes. Janischewskyj et al. (1997) analisando dados coletados por câmeras rápidas instaladas na *Canadian National Tower* entre 1978 e 1995, observou que 41,3% de todos os raios analisados com multiplicidade, possuíam intervalos de tempo entre as descargas subsequentes de 67 a 133 ms. Observações de raios negativos realizadas por câmeras rápidas em Ballarotti et al. (2005) e Saba et al. (2006a) registraram intervalos de tempo entre descargas subsequentes de 31  $\mu$ s a 782 ms com valor médio de 82 ms para a região do Vale do Paraíba, estado de São Paulo no Brasil.

Com base nos intervalos de tempo entre as descargas subsequentes encontrados na literatura (ver tabela 2), observa-se que no Brasil, esse tempo alcançou maiores valores do que em outras localidades. Porém, os intervalos de tempo que concentram a maior parte das descargas subsequentes estudadas mantêm-se igual conforme é mostrado na figura 24.

Como pode ser observado tanto na figura 24a quanto na figura 24b, as ocorrências de descargas múltiplas concentram-se para intervalos de até 200 ms, sendo esses, considerados como parâmetros no processamento dos dados da Antena Lenta.

As descargas consideradas integrantes de um mesmo evento, possuem intervalo de tempo, menor ou igual a 200 ms, entre suas ocorrências, desde que a duração do evento não exceda 1 s. A tabela 3 sistematiza os critérios de tempo utilizados no agrupamento

---

<sup>20</sup>Random Access Memory.



Tabela 2: Resultados associados a multiplicidade de descargas de retorno considerados como parâmetro no processamento dos dados providos da Antena Lenta.

Referências	Local	Total de descargas	Intervalo entre as descargas subsequentes	Tempo de duração do raio
(RAKOV et al., 1994)	USA, Flórida	270	MG de 60 ms	
(JANISCHEWSKYJ et al., 1997)	Canadá, Toronto	1286	Mais frequente entre 67 e 133 ms (41.3%) e 19% com valores menores que 67 ms	Entre 100 e 600 ms para 60%. Maior valor de 1433 ms
(SABA et al., 2006a)	Brasil, São Paulo, Vale do Paraíba	608	Entre 2 e 782 ms. MG de 61 ms e MA de 83 ms	MA de 163 ms. Maior valor de 1356 ms
(BALLAROTTI et al., 2005)	Brasil, São Paulo, Vale do Paraíba	455 raios	Entre 31 $\mu$ s e 782 ms. MG de 61 ms	
(DIENDORFER et al., 1998)	Áustria	126.955	MG de 56 ms	

MG = Média geométrica

MA = Média aritmética

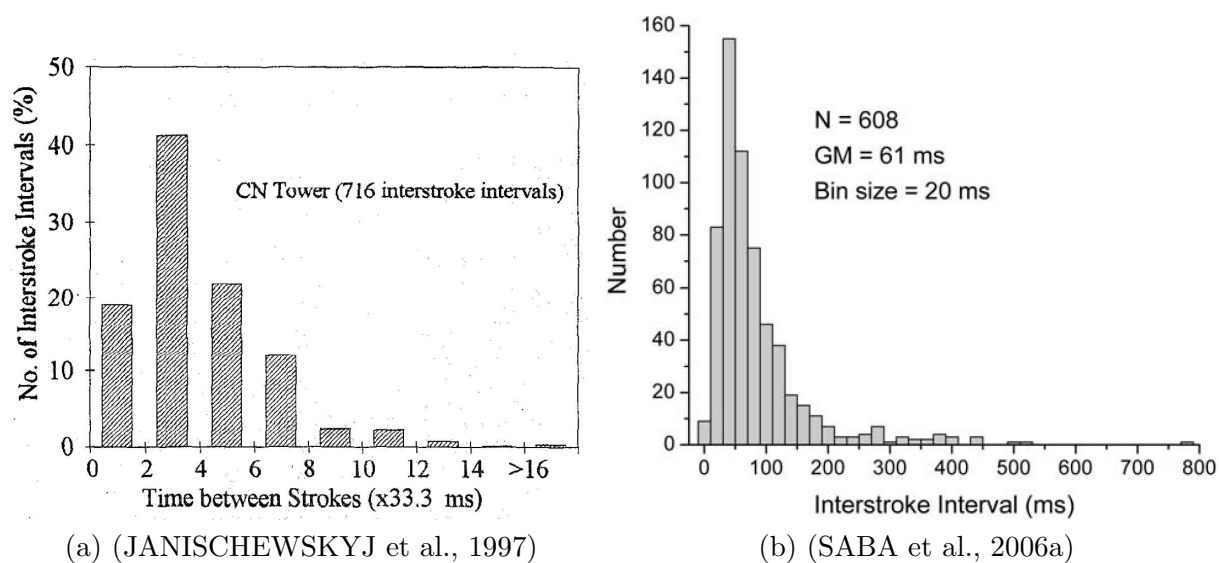


Figura 24: Resultados referentes a concentração de descargas em função do intervalo de tempo entre descargas subsequentes.

dos dados da Antena Lenta.

Tabela 3: Critérios temporais de identificação da multiplicidade de descargas em raios detectados pela Antena Lenta.

<b>Intervalo de tempo entre ocorrências de descargas que são agrupadas em um único evento</b>	$\leq 200$ ms
<b>Tempo de duração máximo de um evento com descargas subsequentes</b>	1 s

O processamento de dados referente ao agrupamento de descargas subsequentes foi realizado por uma função desenvolvida no SGBDOR - PostgreSQL em linguagem PL/PGSQL<sup>21</sup>, descrita com detalhes através do código fonte 5. Ao identificar a multiplicidade do evento, é considerado como um relâmpago, a descarga com maior pulso de campo elétrico registrado.

<sup>21</sup>*Procedural Language/PostgreSQL Structured Query Language*. Para mais informações consulte em (POSTGRESQL 8.1.16 DOCUMENTATION, 2009).

## 6 METODOLOGIA DO CÁLCULO DE $Z$

Consiste na análise de dados relacionados ao campo eletromagnético emitido por descargas atmosféricas detectados por dois sistemas de detecção, a BrasilDAT e a Antena Lenta desenvolvida pelo Dr. Widinei Alves Fernandes, localizada na cidade de Campo Grande – MS.

Pressupõe-se que utilizando os dados de relâmpagos totais detectados pela Antena Lenta conjuntamente com os dados de raios da BrasilDAT, seja possível realizar a distinção entre os relâmpagos IN e NS através de uma análise das informações contidas nas duas fontes de dados, assim calculando a razão

$$Z = \frac{N_{IN}}{N_{NS}} \quad (14)$$

entre o número de relâmpagos intranuvens ( $N_{IN}$ ) e o número de relâmpagos nuvem-solo ( $N_{NS}$ ) para os diferentes estágios das tempestades, ou seja:

Porém, considerando a eficiência dos sistemas de detecção e critérios de diferenciação dos raios IN e NS, a expressão 14 torna-se mais complexa e é explicitado o erro associado para a determinação da mesma conforme será descrito no decorrer desta seção.

A metodologia do cálculo de  $Z$  foi estruturada em um algoritmo programado em PL/PGSQL conforme seu código fonte 6 que visa a obtenção de resultados de maneira empírica <sup>22</sup>. A análise é sistematizada em dois *loops* (ver código fonte 6) para repetição do cálculo de  $Z$  a cada 10 minutos no decorrer das tempestades: o primeiro *loop* identifica se houve descargas detectadas pela Antena Lenta e a BrasilDAT. Havendo informações de descargas atmosféricas nos dois sistemas, uma estrutura condicional direciona o processamento para o segundo *loop* que irá obter o cálculo de  $Z$ , a taxa de descargas totais, o percentual de descargas NS positivas e negativas e erros das medidas no decorrer da tempestade para cada 10 minutos de duração. O processamento apenas sai do segundo *loop* quando não houver nenhum relâmpago NS detectado pela BrasilDAT em um intervalo de

---

<sup>22</sup>O empirismo é uma corrente filosófica cuja gênese na modernidade encontra-se na obra de Francis Bacon, expressa especialmente em (Novum Organum publicado em 1620.)

1 hora, indicando o término da tempestade, assim, o processamento retorna ao primeiro *loop* para identificação de mais tempestades.

## 6.1 SELEÇÃO DOS RAIOS

As informações da incidência de raios (*flashes*) na cidade de Campo Grande foram disponibilizadas pela BrasilDAT. Os dados foram importados para o SGBDOR PostgreSQL em um banco de dados com os registros da Antena Lenta. A seleção dos raios foi feita através de consultas SQL considerando critérios temporais, espaciais e erros associados a eficiência de detecção e localização da BrasilDAT.

### 6.1.1 Eficiência da BrasilDAT e o cálculo de $Z$

A eficiência da rede para a região urbana de Campo Grande foi considerada conforme Naccarato et al. (2008) (já descrito em 4.1.4) que observaram detecção de 80% das descargas na cidade de Campo Grande – MS, portanto, o número de raios estimados ( $E_{SNS}$ ) para o cálculo de  $Z$  deve possuir valor entre o número real de detecção ( $R_{Br}$ ) e uma estimativa para as ocorrências reais considerando que o número de raios detectados correspondem a apenas 80% dos raios (*flashes*) realmente ocorridos conforme a equação 15.

$$E_{SNS} = \frac{\frac{100}{80}R_{Br} + R_{Br}}{2} \pm \frac{\frac{100}{80}R_{Br} - R_{Br}}{2} \quad (15)$$

Dessa forma obtém-se uma quantidade intermediária entre os relâmpagos NS referentes a uma detecção supostamente ideal ( $\frac{100}{80}R_{Br}$ ) e os detectados ( $R_{Br}$ ), com o respectivo erro da estimativa.

### 6.1.2 Critérios espaciais de seleção

Os dados da BrasilDAT possuem as coordenadas geográficas, latitude ( $lat$ ) e longitude ( $lon$ ), dos raios detectados possibilitando através do uso da inequação 16, com base na trigonométrica esférica,<sup>23</sup>

$$\arccos(\sin(-20.5100)\sin(lat) + \cos(-20.5100)\cos(lat)\cos(-54.6195 - lon)) \geq L \quad (16)$$

<sup>23</sup>Essa equação é comumente encontrada em softwares relacionando a sistemas de navegação GPS para o cálculo da distância entre pontos em coordenadas geográficas. Existem outras maneira de realizar esse cálculo conforme mostra Australian Government - Geoscience Australia (2009).

a seleção das descargas que não ultrapassaram o comprimento de arco<sup>24</sup>  $L$  referente a distância de alcance da Antena Lenta fixada na latitude -20.5100 e longitude -54.6195.

Porém, considerando as imprecisões de localização da BrasilDAT (descritas em 4.1.4), descargas incidentes em uma região na fronteira do alcance estimado para a Antena Lenta, podem ter ocorrido fora do alcance da Antena Lenta, sendo descargas que podem não ser identificadas pela Antena Lenta. Portanto, é feito uma média entre as descargas detectadas para duas distâncias conforme mostrado na figura 25.

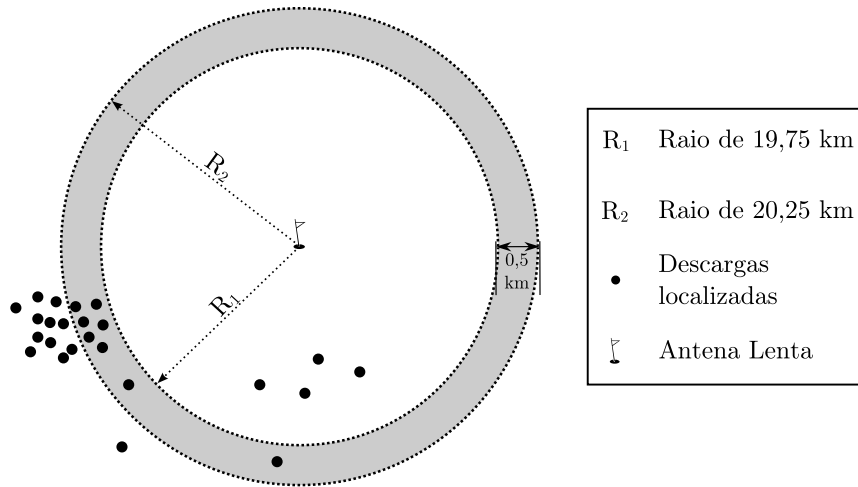


Figura 25: Seleção dos raios detectados pela BrasilDAT na região de estudo. A seleção corresponde a uma média entre as descargas inscritas nas circunferências de raios  $R_1$  e  $R_2$ .

Esse procedimento faz com que o erro do cálculo de  $Z$ , seja alterado conforme mais descargas são detectadas na região de fronteira, pois a seleção dos raios é realizada conforme a equação 15 e se tratando da média entre duas seleções com quantidades de descargas diferentes, o erro das seleções são propagados. Ou seja quanto mais concentrada na cidade de Campo Grande a tempestade estiver, menor o erro de  $Z$ .

Portanto, temos o número de descargas referente a área circular de raio  $R_1$

$$E_{NSR_1} = \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_1} + R_{BrR_1}}{2} \pm \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_1} - R_{BrR_1}}{2}, \quad (17)$$

para a região de raio  $R_2$

$$E_{NSR_2} = \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_2} + R_{BrR_2}}{2} \pm \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_2} - R_{BrR_2}}{2}, \quad (18)$$

e considerando que,

<sup>24</sup>Esse comprimento de arco relaciona-se com o raio do planeta Terra

$$d_{NSR_1} = \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_1} - R_{BrR_1}}{2} \quad (19)$$

e

$$d_{NSR_2} = \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_2} - R_{BrR_2}}{2} \quad (20)$$

temos a estimativa do número de relâmpagos NS para a região de estudo conforme a equação 21

$$N_{NS} = \frac{\frac{\frac{100}{80} R_{BrR_1} + R_{BrR_1}}{2} + \frac{\frac{100}{80} R_{BrR_2} + R_{BrR_2}}{2}}{2} \pm \frac{d_{NSR_1} + d_{NSR_2}}{2}. \quad (21)$$

## 6.2 AS CONTAMINAÇÕES

São descargas atmosféricas detectadas pela Antena Lenta em situações em que não existiam tempestades na região da cidade de Campo Grande (alcance da Antena Lenta), porém, aconteciam atividades elétricas identificadas pela BrasilDAT ao redor do alcance da Antena Lenta.

Nessas condições, como a BrasilDAT possui a informação da estimativa do pico de corrente das descargas, percebe-se que apenas raios distantes<sup>25</sup> e intensos são detectados pela Antena Lenta. Portanto, as contaminações podem aumentar o valor de  $Z$  equivocadamente, durante o monitoramento de tempestades, então, devem ser identificadas e retiradas do cálculo de  $Z$ .

A denominação de raios intensos e distantes, está associada a uma minuciosa investigação de quais intensidades de pico de corrente e distâncias dos raios que promove campos eletromagnéticos capazes de sensibilizar a Antena Lenta.<sup>26</sup>

Para identificar o campo elétrico limiar que sensibiliza a Antena Lenta foi utilizado o Modelo de Linha de Transmissão, pois desta forma pode-se associar o pico de corrente estimado pela BrasilDAT e a distância entre o raio e a Antena Lenta com o pico de Campo Elétrico gerado pela descarga, conforme a equação 22.

<sup>25</sup>Fora da região de estudo, conforme descrito em 4.2.2, onde a eficiência de detecção da Antena Lenta para descargas intranuvens torna-se comprometida.

<sup>26</sup>Existiram raios com estimativa de pico de corrente no valor de 300 kA a aproximadamente 1000 km da Antena Lenta que foi detectado em meio aos relâmpagos totais.

$$E_p(D) = \frac{vI_p}{2\pi\epsilon_0 c^2 D} \quad (22)$$

Identificou-se que os raios responsáveis pelas contaminações correspondem aos que produziram campo elétrico na Antena Lenta com valores superiores a 15 V/m ou 35 V/m. Como o TLM considera a velocidade da descarga como uma constante, não é possível identificar com exatidão o limiar da intensidade do campo elétrico de detecção pois na realidade essas velocidades variam. Segundo Schoene et al. (2003) existem medidas para velocidade da descarga de retorno entre  $4 \times 10^7$  m/s e  $2,99 \times 10^8$  m/s. Neste trabalho considera-se  $v = 1 \times 10^8$  m/s, sendo este valor tipicamente utilizado para estimativa do campo elétrico de descargas de retorno quando usado o TLM (WILLETT et al., 1989; UMAN et al., 2002; SCHOENE et al., 2003; OGAWA, 1995).

Dessa forma, calculou-se a intensidade de  $E_p$  para todas as descargas distantes da Antena Lenta entre as latitudes -23 e -17 e longitudes entre -58 e -51. Primeiramente considerou-se que todas os raios com  $E_p$  maior que 15 V/m correspondem a contaminações ( $C_1$ ). Obtendo o primeiro valor de contaminação, considera-se que apenas as descargas que produziram  $E_p$  superior á 35 V/m é que contaminaram o cálculo de  $Z$  ( $C_2$ ). A contaminação ( $C$ ) foi determinada conforme a equação 23 que tem a função de estimar a contamição e alterar o erro do cálculo de  $Z$  em função da quantidade de relâmpagos NS intensos e distantes.

$$C = \frac{\frac{100}{80}C_1 + C_2}{2} \pm \frac{\frac{100}{80}C_1 - C_2}{2} \quad (23)$$

Os resultados deste trabalho correspondem a dias com maior concentração de descargas na região da cidade de Campo Grande. Dias com quantidade de relâmpagos NS detectados ao redor da região de alcance da Antena Lenta, superior ao dobro dos raios concentradas na cidade de Campo Grande foram descartados da análise.

### 6.3 IDENTIFICAÇÕES DOS RELÂMPAGOS INTRANUVENS

Neste trabalho, as informações dos relâmpagos totais possibilitam o acompanhamento de todo o desenvolvimento elétrico de alguns sistemas convectivos através do cálculo de  $Z$ , o que torna necessário a identificação dos relâmpagos intranuvens em meio aos relâmpagos totais.

### 6.3.1 Seleção dos dados da Antena Lenta

Os dados processados provindos da Antena Lenta, são armazenados em um SGBDOR. A seleção é limitada temporalmente e deve ocorrer apenas para os momentos em que a Antena Lenta e a BrasilDAT detectaram simultaneamente atividade elétrica na região de estudo. É considerado a eficiência da Antena Lenta, conforme em 5.3.1, sendo a quantidade de raios totais detectados pela Antena Lenta ( $N_{al}$ ), estimada de acordo com a equação 24.

$$N_{rt} = \frac{\frac{100}{70}N_{AL} + N_{AL}}{2} \pm \frac{\frac{100}{70}N_{AL} - N_{AL}}{2} \quad (24)$$

O número de relâmpagos totais é estimado entre o valor efetivamente registrado pela Antena Lenta, após o processamento desses dados, e o valor estimado para uma detecção com 100% de eficiência, obtendo também o erro dessa estimativa realizada.

### 6.3.2 Análise comparativa entre a Antena Lenta e a BrasilDAT

A partir da estimativa dos relâmpagos totais ( $N_{rt}$ ), tendo identificado as possíveis contaminações ( $C$ ) e possuindo a seleção dos raios pertencentes a BrasilDAT ( $N_{NS}$ ) o número de descargas intranuvens ( $N_{IN}$ ) corresponde a

$$N_{IN} = N_{rt} - N_{NS} - C \pm \left( \frac{\frac{100}{70}N_{AL} - N_{AL}}{2} + \frac{\frac{100}{80}C_1 - C_2}{2} + \frac{d_{NSR_1} + d_{NSR_2}}{2} \right). \quad (25)$$

Chamemos o erro associado à eficiência da Antena Lenta conforme a expressão

$$d_{AL} = \frac{\frac{100}{70}N_{AL} - N_{AL}}{2}, \quad (26)$$

o erro referente a estimativa dos raios incidentes na região de estudo deste trabalho como

$$d_{NS} = \frac{d_{NSR_1} + d_{NSR_2}}{2} \quad (27)$$

e o erro associado à estimativa das contaminações sendo

$$d_C = \frac{\frac{100}{80}C_1 - C_2}{2}, \quad (28)$$

assim, a equação 25 pode ser reescrita considerando 26, 28 e 27, obtendo

$$N_{IN} = N_{rt} - N_{NS} - C \pm (d_{AL} + d_{NS} + d_C). \quad (29)$$



## 6.4 O CÁLCULO DE $Z$

Objetiva identificar o desenvolvimento elétrico da nuvem, acompanhando as descargas iniciais, que “[...] quase sempre serão intranuvens Goodman (1990, p. 15, tradução nossa)[.]” o estágio maduro e as descargas finais.

Para esse monitoramento das nuvens, tornou-se necessário determinar um intervalo de tempo para que os dados entre a BrasilDAT e a Antena Lenta fossem consultados, processados e determinado o valor de  $Z$  no decorrer dessas parcelas temporais sem que fosse comprometida a identificação do processo evolutivo do sistema convectivo.

Devido a presença de contaminações, descritas em 6.2, identificar qual é a primeira descarga elétrica de uma nuvem na região de estudo é uma tarefa com grande incerteza. Desta forma, quando o primeiro *loop* contido no código fonte 14 identifica descargas nos dois sistemas de detecção usados neste trabalho, o processamento entra no segundo *loop* que inicialmente reconhece o tempo do primeiro raio detectado pela BrasilDAT e começa o cálculo de  $Z$  para 10 min anteriores, partindo desse raio detectado. Portanto o primeiro valor de  $Z$  de uma nuvem monitorada neste trabalho, terá apenas uma descarga nuvem-solo participante no cálculo.

Considerando o sincronismo de tempo entre a BrasilDAT e Antena Lenta, foi detectado uma defasagem de tempo em torno de 1-10 s, e observando a figura 10 percebe-se que em média o intervalo de tempo aproximado de 10 min representa mudanças na atividade elétrica das nuvens.

O calculo de  $Z$  é determinado para cada 10 min de duração da tempestade, pois em intervalos maiores pode-se não identificar os momentos quando a tempestade inicia-se, torna-se madura e entra em processo dissipativo. Em intervalos de tempo menores, o cálculo de  $Z$  pode ficar comprometido devido a defasagem temporal entre os dados da BrasilDAT e da Antena Lenta.

A equação 30 mostra como é obtido o resultado de  $Z$  no decorrer das tempestades identificadas

$$Z = \frac{N_{rt} - N_{NS} - C}{N_{NS}} \pm \frac{1}{N_{NS}^2} [(d_{AL} + d_{NS} + d_C)N_{NS} + d_{NS}(N_{rt} - N_{NS} - C)]. \quad (30)$$

Nomeando o erro associado à identificação das descargas intranuvens como

$$d_{IN} = d_{AL} + d_{NS} + d_C, \quad (31)$$

a equação 30 pode ser reescrita obtendo

$$Z = \frac{N_{rt} - N_{NS} - C}{N_{NS}} \pm \frac{1}{N_{NS}^2} [d_{IN} N_{NS} + (N_{rt} - N_{NS} - C) d_{IN}] \quad (32)$$

## 7 RESULTADOS

Todos os resultados e conclusões obtidas estão relacionadas ao monitoramento de 26 tempestades. Na figura 26 são apresentados os resultados correspondentes ao desenvolvimento elétrico dessas tempestades monitoradas. Na parte superior de cada gráfico, encontram-se os valores de  $Z$ . Na parte inferior de cada gráfico é apresentado a taxa de relâmpagos totais detectados pela Antena Lenta e a taxa de relâmpagos nuvem-solo detectados pela BrasilDAT. Cada ponto foi calculado para um intervalo de 10 minutos no decorrer do tempo de duração de cada tempestade. Os pontos possuem suas respectivas barras de erros determinadas conforme critérios descritos na seção 6.

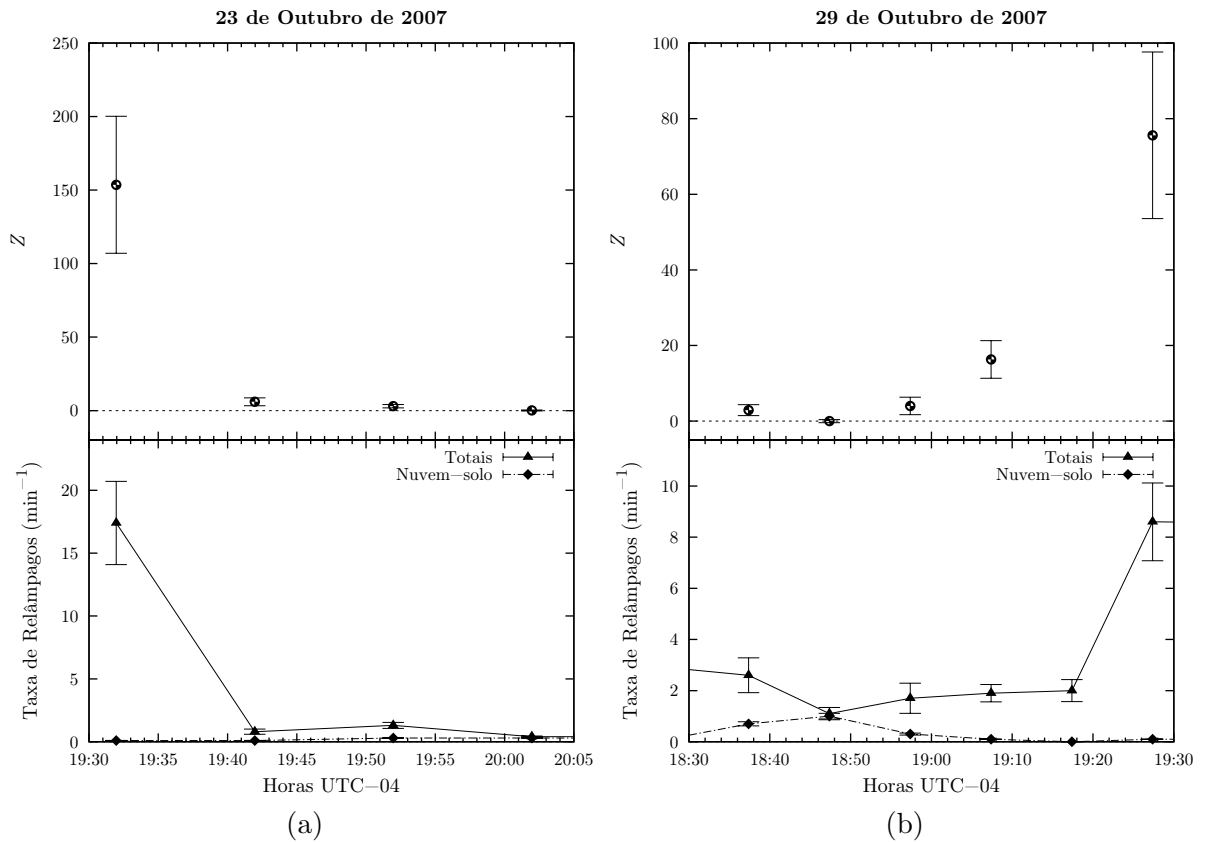


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.

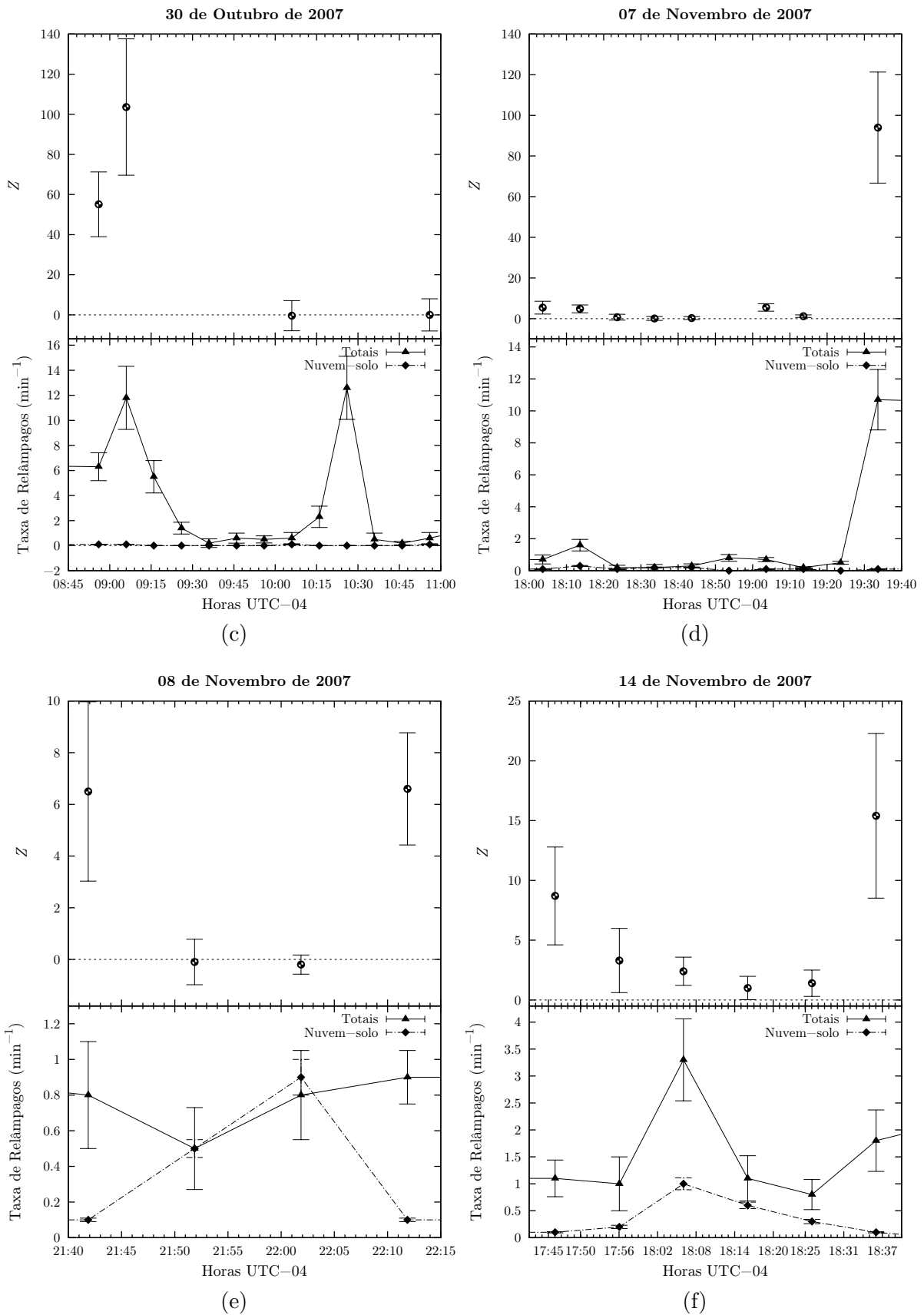


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.

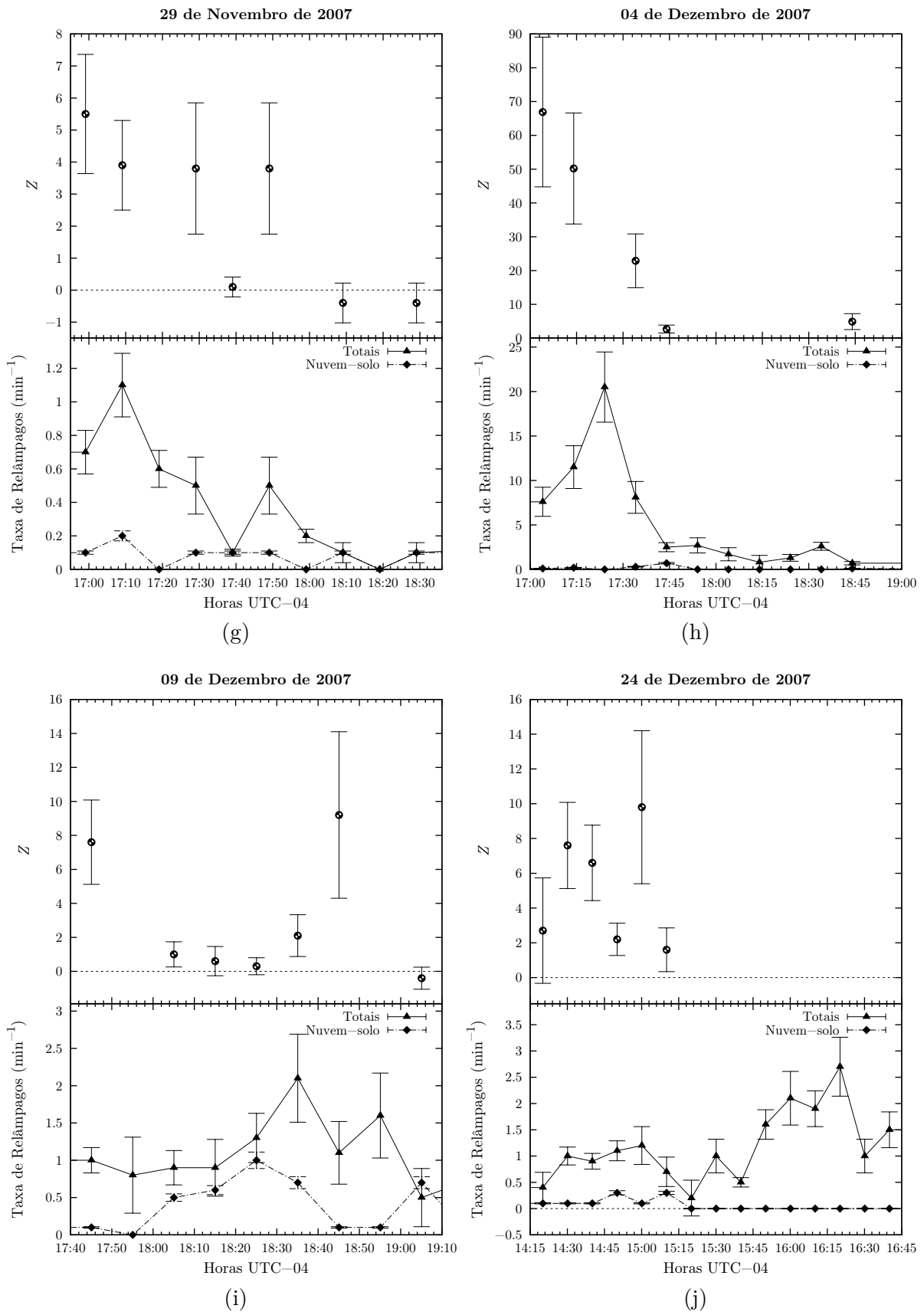


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.

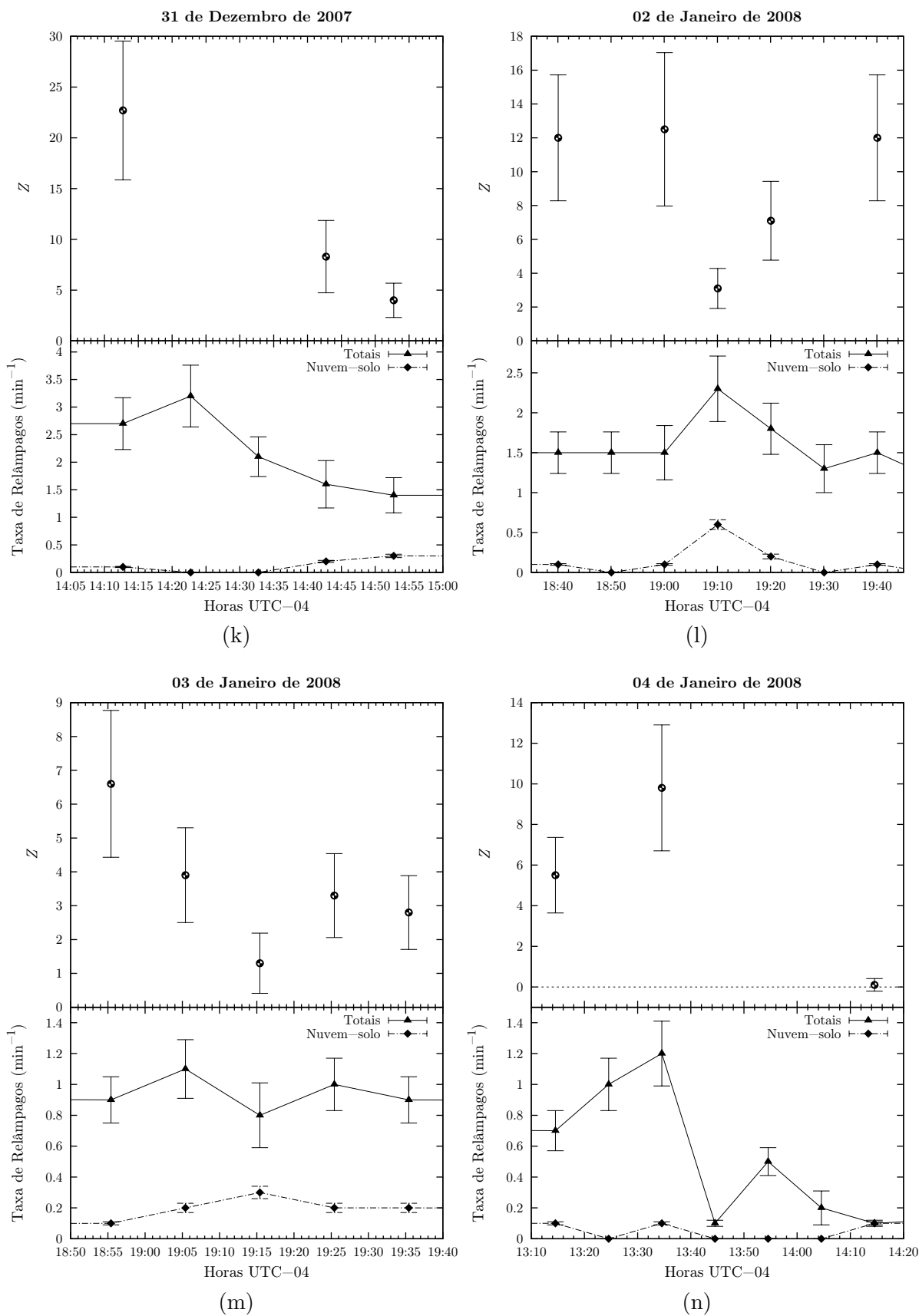


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.

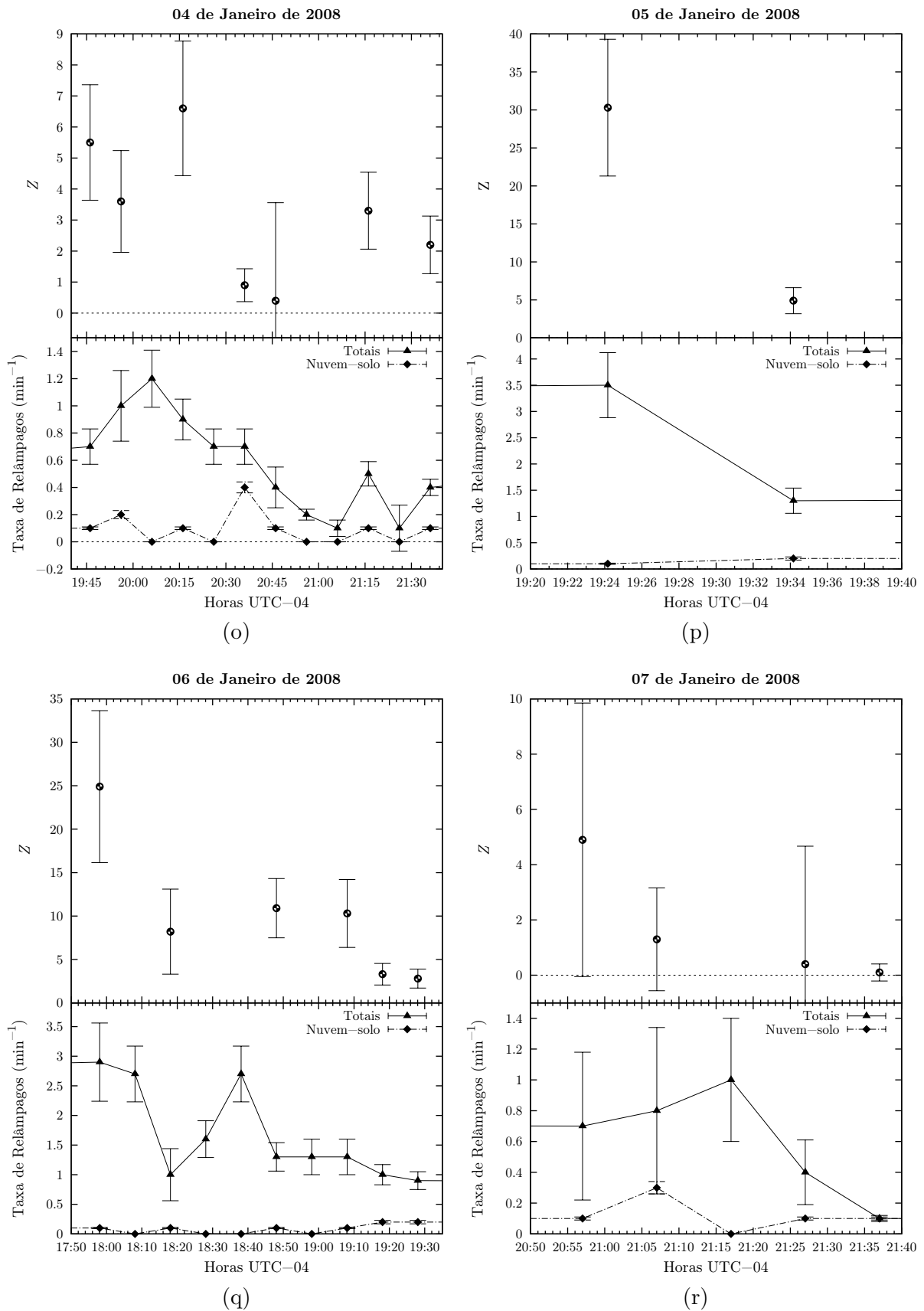


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.

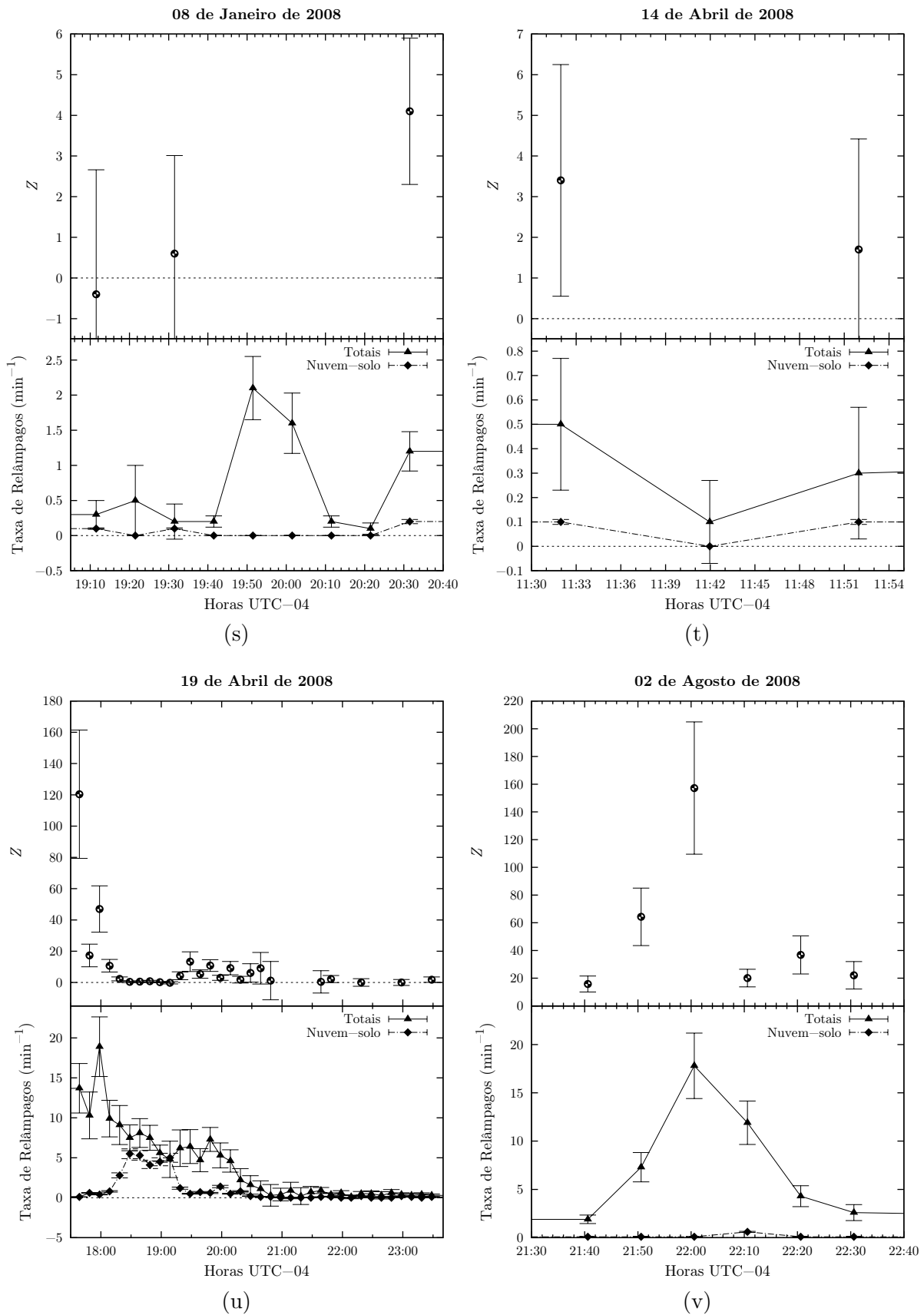


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.



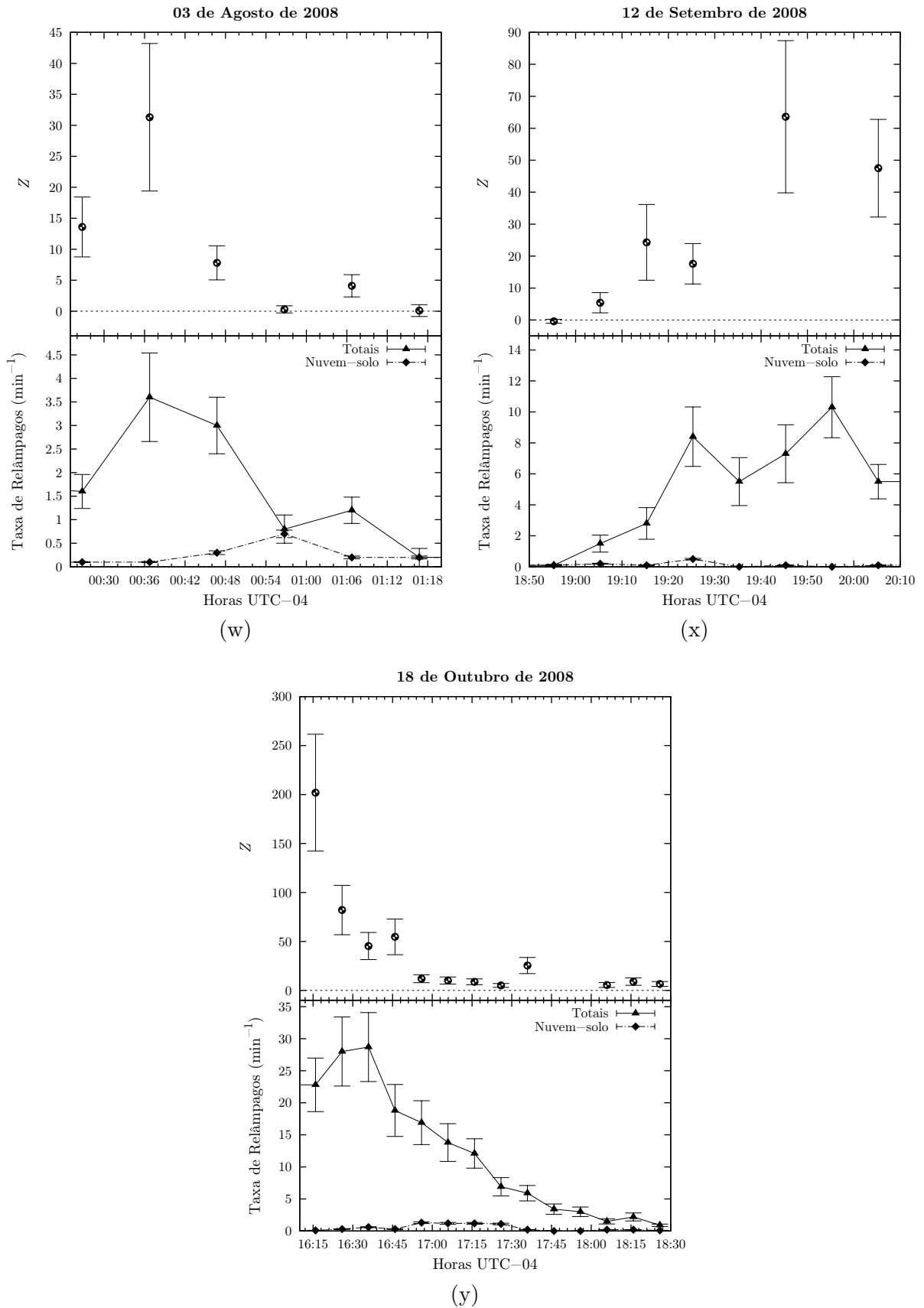


Figura 26: Monitoramento da atividade elétrica para sistemas de tempestades na cidade de Campo Grande - MS.

Em geral, as tempestades possuem maiores valores de  $Z$ , nos estágios iniciais e dissipativos. Essa observação torna-se mais clara quando se observa a figura 27 que reúne todos os valores de  $Z$  calculados e expostos na figura 26 em um eixo temporal normalizado que representa o tempo de duração das tempestades em uma escala de 0 a 1. A curva presente no gráfico corresponde a um ajuste polinomial a partir dos pontos expostos, o quadro superior direito é o mesmo gráfico porém focado no ajuste obtido.

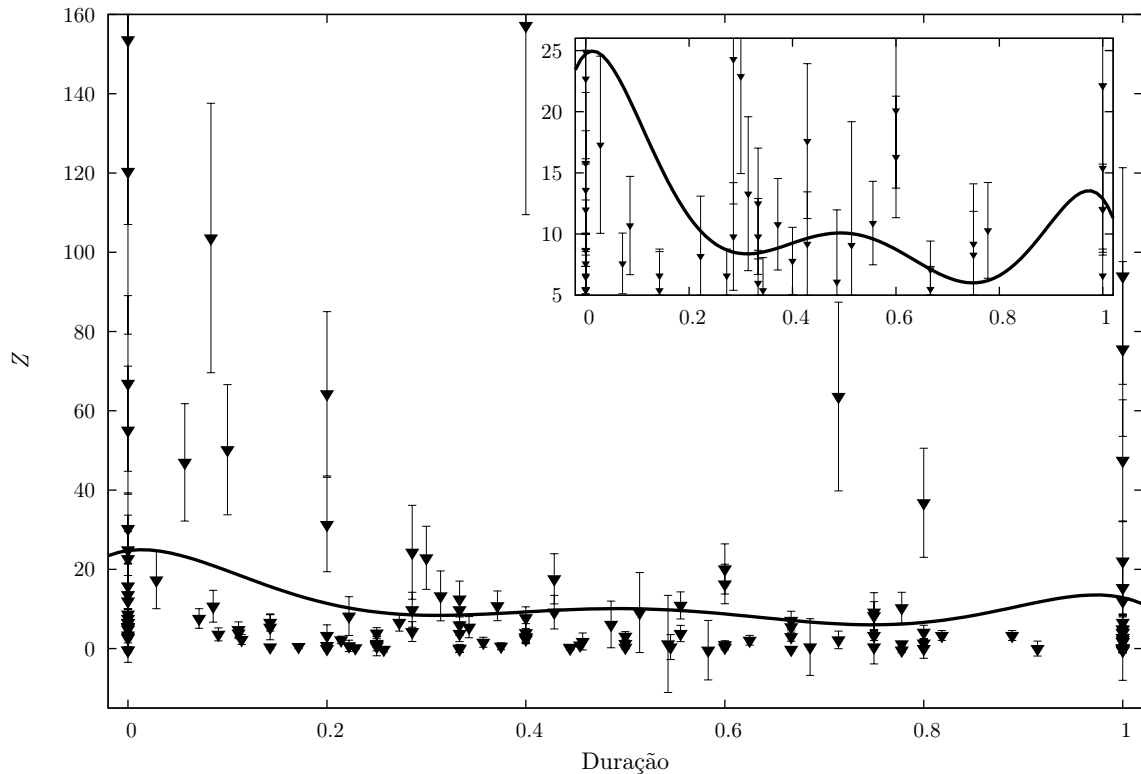


Figura 27: Comportamento de  $Z$  durante as tempestades monitoradas. A curva obtida corresponde ao ajuste polinomial conforme a equação  $f(x) = -3792.97x^6 + 11561.7x^5 - 13098.2x^4 + 6688.46x^3 - 1405.24x^2 + 34.4032x + 24.7346$ .

Verifica-se que as tempestades na cidade de Campo Grande – MS possuem uma relação de crescimento de  $Z$  em função do aumento da taxa de relâmpagos totais conforme mostra o gráfico correspondente à figura 28, que expõe todos os pontos dos gráficos da figura 26, referentes aos valores da razão  $Z$ , no eixo vertical, e taxa de relâmpagos totais, no eixo horizontal.

Esse crescimento corresponde ao ajuste, presente na figura 28, em que se obteve o valor de 0,5 para o quadrado do coeficiente de correlação ( $r^2$ ). Portanto, considerando a precisão do método numérico utilizado no ajuste<sup>27</sup>, a dependência de  $Z$  em função da

<sup>27</sup>Esse ajuste foi realizado pelo Método dos Mínimos Quadrados não Lineares através do software GNUPLOT que utiliza o algoritmo de Marquardt-Levenberg (WILLIAMS; KELLEY, 2007)

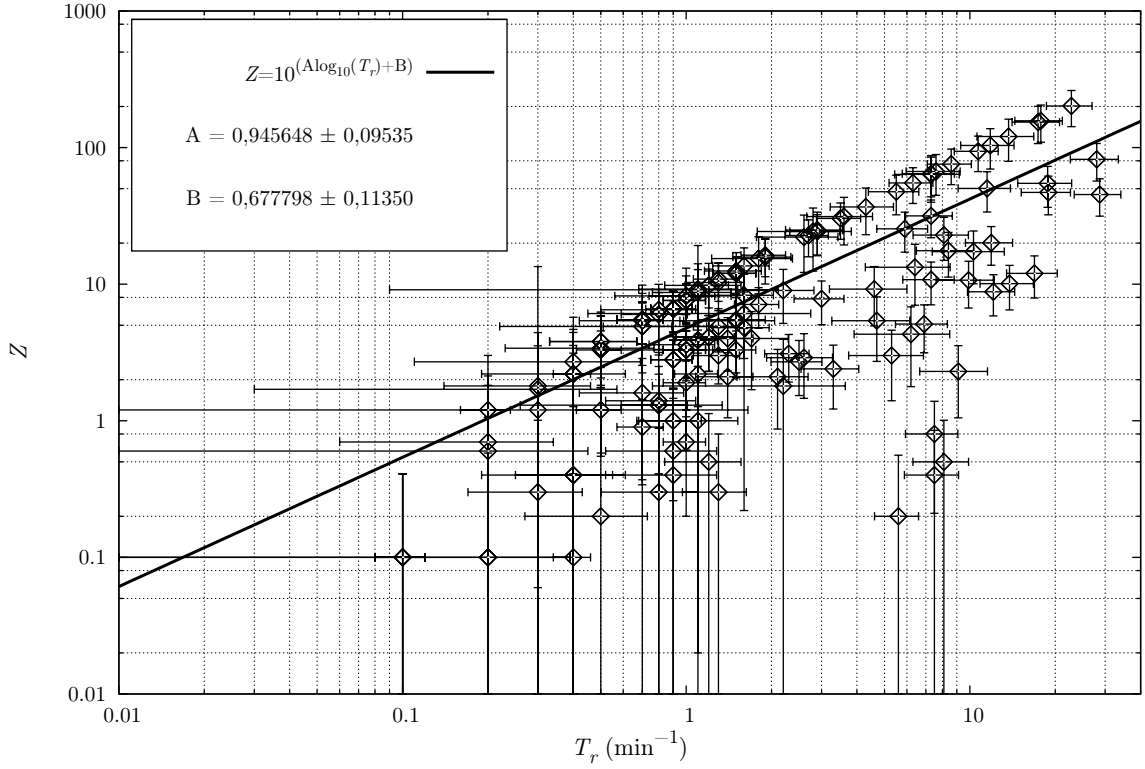


Figura 28: Relação entre  $Z$  e a taxa de relâmpagos totais por minuto ( $T_r$ ).

taxa de relâmpagos totais por minuto ( $T_r$ ) corresponde a equação

$$Z = 5T_r^{0,95}. \quad (33)$$

Observa-se na figura 29, que os maiores valores de  $Z$  concentram-se entre os meses de junho e dezembro, na Primavera e Inverno, e mesmo as tempestades sendo mais frequentes entre os meses de dezembro e março, no Verão, possuem valores de  $Z$  menos elevados. A tabela 4 expõe os valores médios de  $Z$  para os períodos referentes as estações do ano. O valor médio de  $Z$  considerando todo o monitoramento foi de

$$Z = 15 \pm 6. \quad (34)$$

Tabela 4: Comportamento de  $Z$  durante as estações do ano.

Estações do ano	$Z$
Primavera	$27 \pm 9$
Verão	$6 \pm 3$
Outono	$10 \pm 5$
Inverno	$21 \pm 8$

Na figura 30 verifica-se que as tempestades são mais frequentes após as 12h, entretanto,

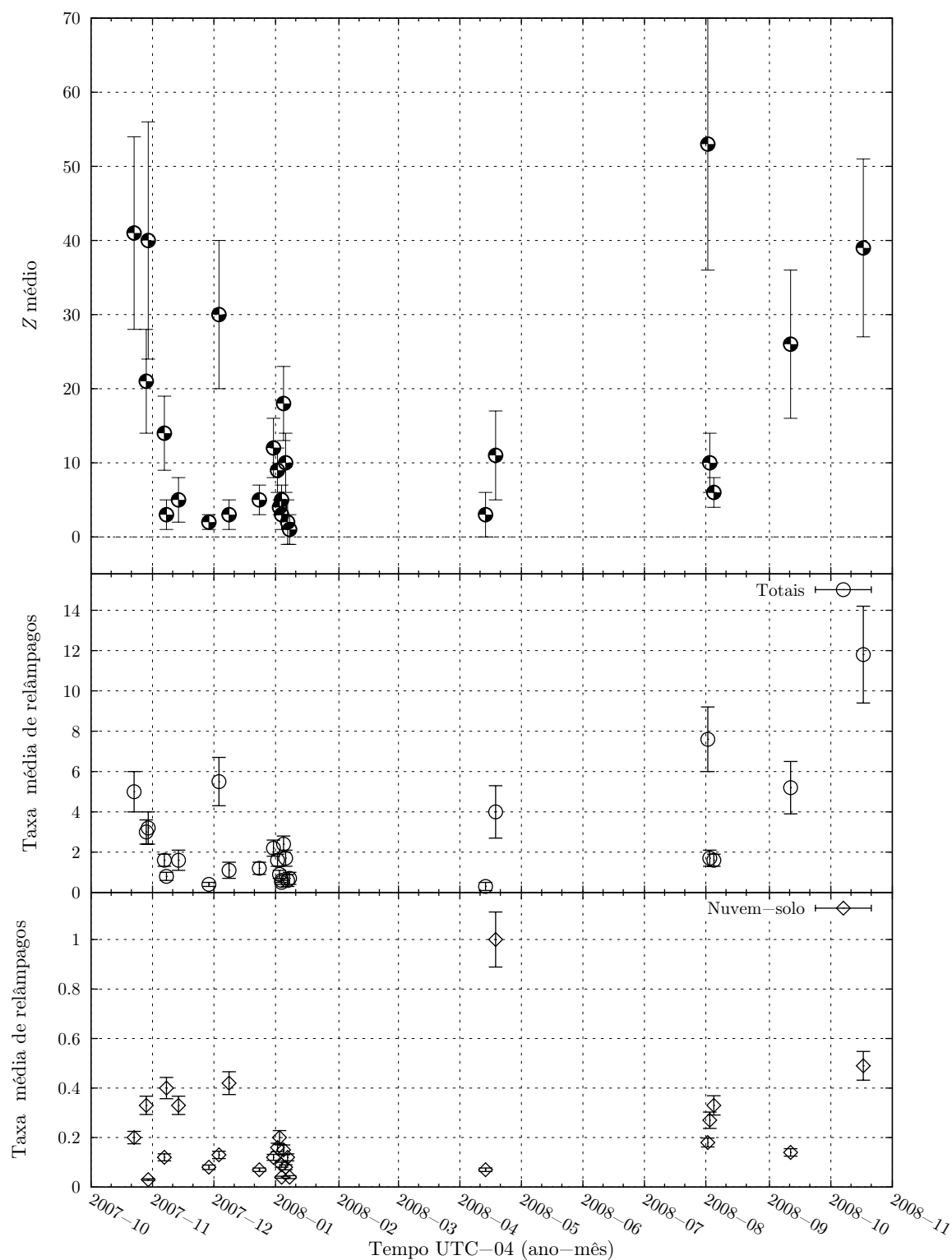


Figura 29: Desenvolvimento dos valores médio de  $Z$  (gráfico superior), taxa de relâmpagos totais (gráfico mediano) e nuvem-solo (gráfico inferior), por tempestades, na cidade de Campo Grande - MS no decorrer dos meses de monitoramento.

as tempestades que ocorreram entre 8h e 10h obtiveram os maiores valores de  $Z$ .

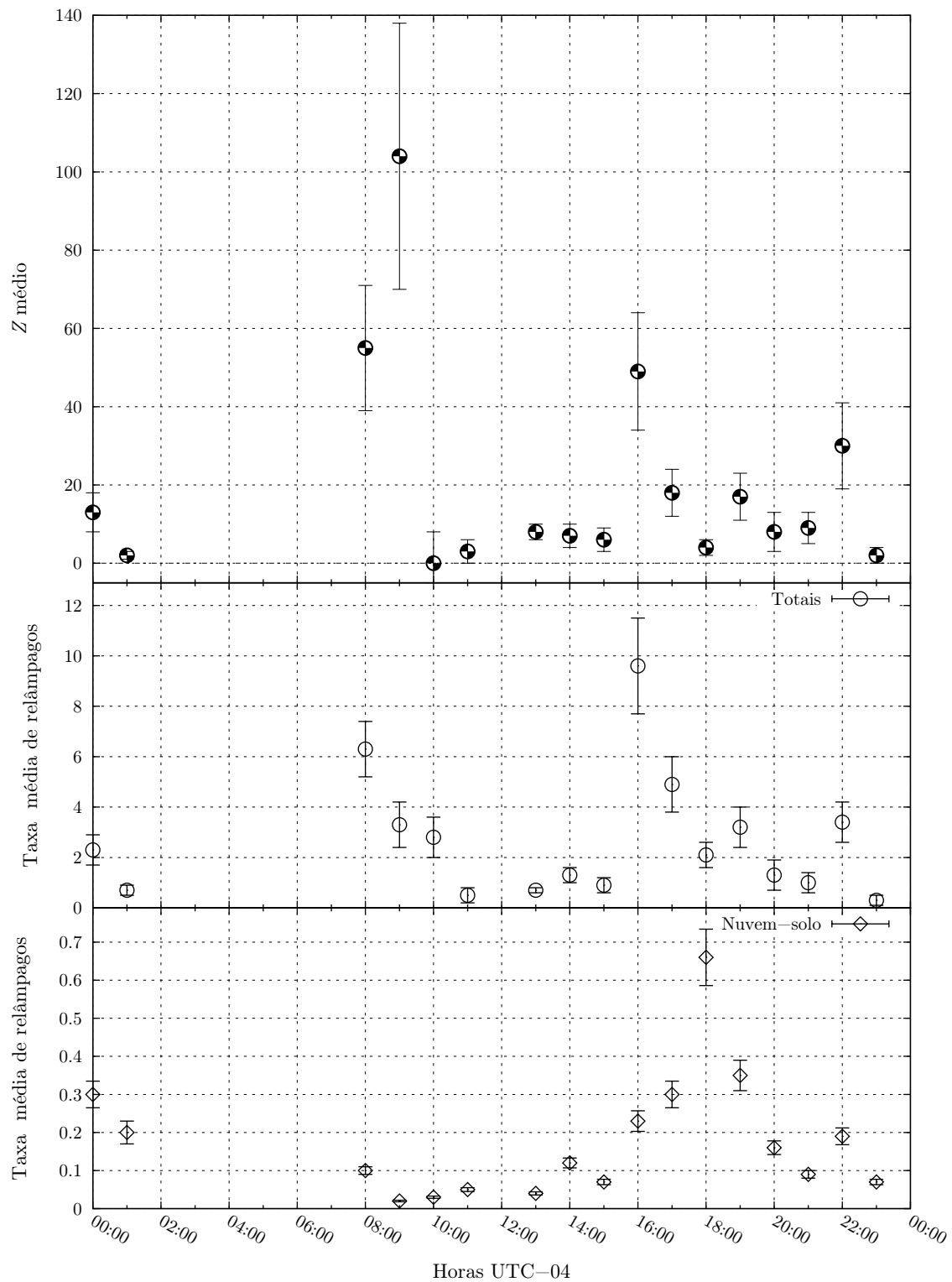


Figura 30: Desenvolvimento dos valores médio de  $Z$  (gráfico superior), taxa de relâmpagos totais (gráfico mediano) e nuvem-solo (gráfico inferior), por hora, na cidade de Campo Grande - MS no decorrer dos dias de monitoramento.

Referente ao agrupamento de pulsos detectados pela Antena Lenta que provavelmente compõem um mesmo evento conforme descrito em 5.5, obteve-se os resultados expostos na figura 31, na qual se comparam os grupos de pulsos associados a relâmpagos totais, que são detectados pela Antena Lenta, com os grupos associados a relâmpagos nuvem-solo detectados pela BrasilDAT correspondentes as descargas que possivelmente sensibilizaram a Antena Lenta.

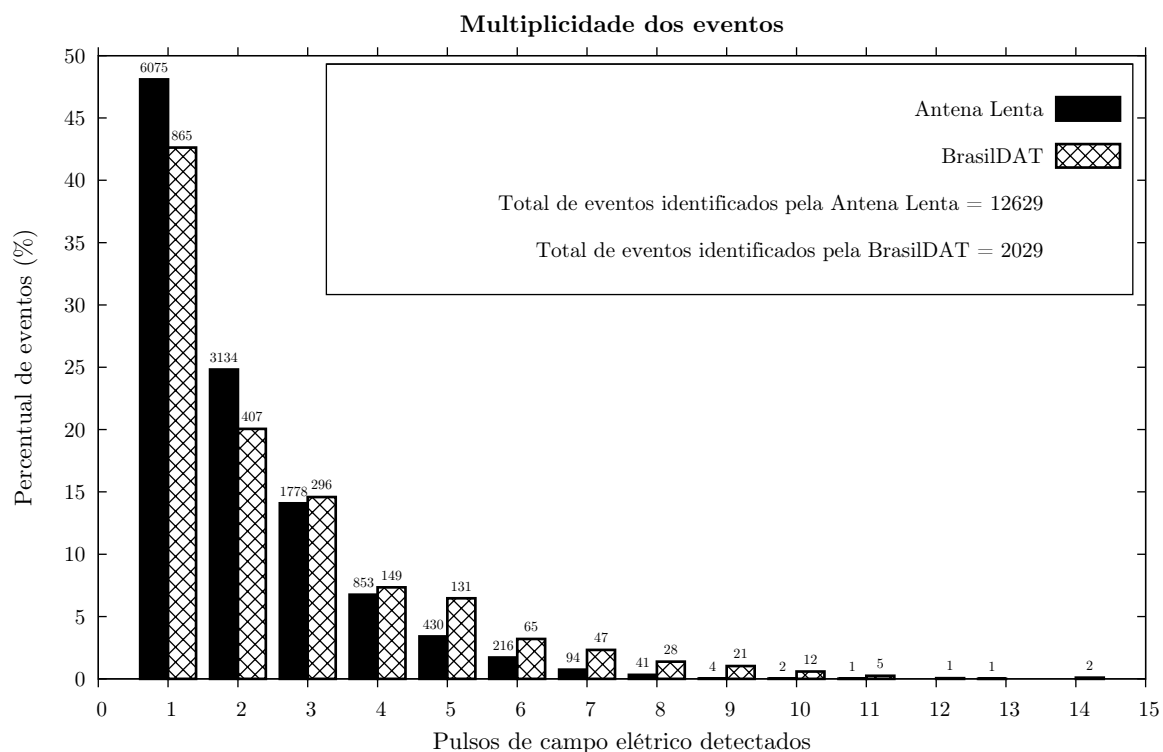


Figura 31: Percentual de eventos identificados pela Antena Lenta, comparados com os eventos identificados pela BrasilDAT.

O tempo de duração dos eventos identificados através do processamento dos dados da Antena Lenta (conforme 5.5) são mostrados na figura 32.

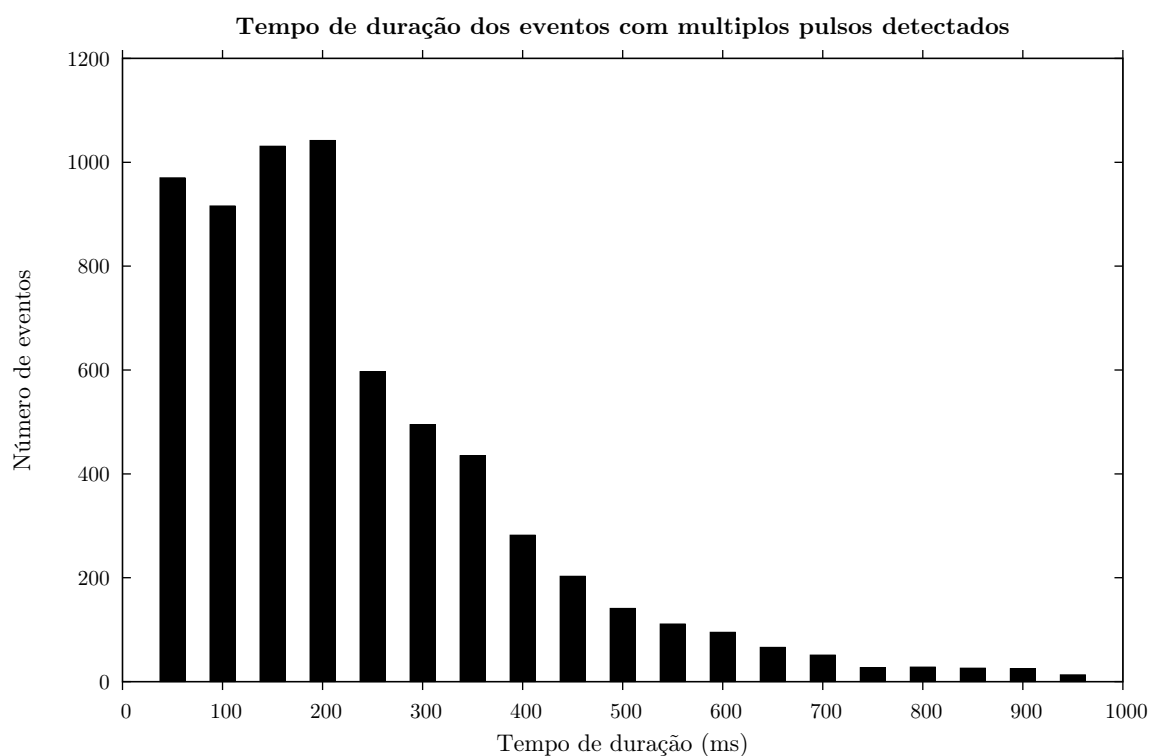


Figura 32: Tempo de duração dos grupos de pulsos classificados como um evento.

## 7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A razão  $Z$  média (equação 34) obtida para a cidade de Campo Grande – MS, apresenta um resultado bastante elevado, em comparação com diversos resultados expostos em Prentice e Mackerras (1977) e Boccippio et al. (2001).

O monitoramento das tempestades que ocorreram na cidade de Campo Grande – MS, mostraram que as descargas intranuvens sofrem crescimento desproporcional em relação às descargas nuvem-solo, e em alguns momentos, conforme aumenta a taxa de relâmpagos intranuvens, diminui a taxa de nuvem-solo, principalmente nos estágios iniciais e dissipativos. Esse comportamento torna-se mais evidente nas tempestades monitoradas mostradas nas figuras 26a, 26b, 26c, 26d, 26e, 26f, 26h, 26i, 26j, 26k, 26n, 26o, 26q, 26u, 26w, 26x e 26y, o que concorda com resultados obtidos por MacGorman et al. (1989), associados ao monitoramento de tempestades severas (*tornadoic storms*) em Oklahoma, Estados Unidos.

MacGorman et al. (1989), mostra também que o aumento da taxa de relâmpagos totais em tempestades severas é dominado por descargas intranuvens e são observados nos estágios de formação de tornados e associados ao desenvolvimento vertical desses sistemas.

Tais observações concordam com os resultados mostrados na figura 28, a qual apresenta um aumento de  $Z$  em função do aumento da taxa de relâmpagos totais ( $T_r$ ). Resultados semelhantes foram identificados por Rutledge et al. (1992) e Soriano e de Pablo (1995) conforme mostra a figura 33. Observa-se que o crescimento de  $Z$  em função de  $T_r$  é mais acentuado para a cidade de Campo Grande - MS do que em medidas realizadas na Península Ibérica (SORIANO; DE PABLO, 1995) e em Darwin, Austrália (RUTLEDGE et al., 1992).

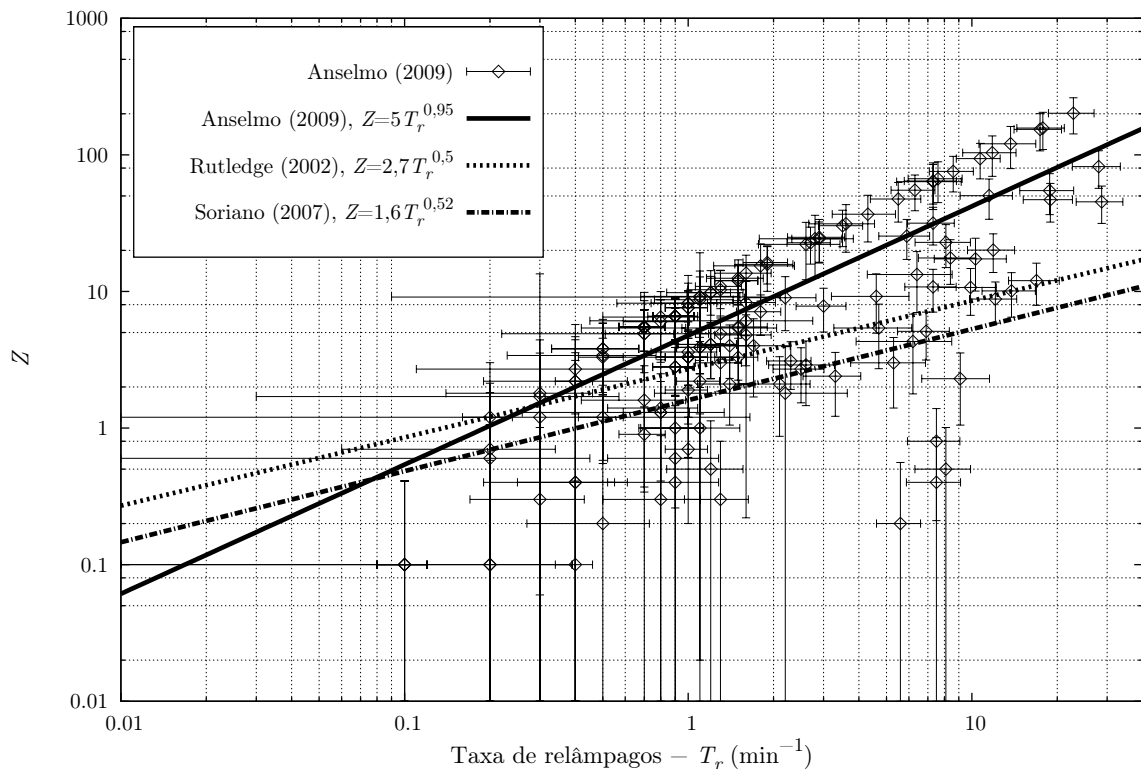


Figura 33: Análise comparativa em as curvas obtidas por Rutledge et al. (1992), Soriano e de Pablo (1995) e Anselmo, (2009) que corresponde a curva obtida nesta pesquisa.

Boccippio et al. (2001), em uma análise do comportamento de  $Z$  em função da taxa de relâmpagos totais para uma extensão territorial que abrange toda a área continental dos Estados Unidos não identificou uma correlação matemática única entre  $Z$  e a taxa de relâmpagos, apontando que o aumento da razão  $Z$  não se relaciona apenas com a taxa de relâmpagos mas também com a topologia e climatologia de cada região.

Os resultados de Jayaratne et al. (1995) mostraram que em Gaborone, África do Sul,  $Z$  diminui em função do crescimento da taxa de relâmpagos. Provavelmente, Boccippio et al. (2001), não encontraram uma correlação matemática entre  $Z$  e a taxa de relâmpagos, devido à heterogeneidade dos dados de uma grande extensão territorial.



Além de Campo Grande – MS estar localizada praticamente no centro da América do Sul, os maiores valores de  $Z$  correspondem aos períodos mais secos dessa localidade<sup>28</sup>, a Primavera e o Inverno. Na Primavera foi obtido o maior valor médio de  $Z$  (ver tabela 4). Apesar de ser um período mais úmido do que o Inverno, esse possui tipicamente temperaturas mais elevadas, indicando, que em Campo Grande – MS, há uma forte relação entre os elevados valores de  $Z$  e o acentuado desenvolvimento vertical das nuvens de tempestades.

Observou-se nesta pesquisa que principalmente para os valores de  $Z$  acima de 10, alguns pontos revelam uma relação de crescimento linear de  $Z$  em função de  $T_r$  ( $Z(T_r)$ ), definindo um patamar superior linear com os maiores valores de  $Z$  (ver figura 34). Nota-se que esses pontos são responsáveis pelo maior crescimento de  $Z(T_r)$  quando comparados com os resultados de outros trabalhos conforme expostos na figura 33.

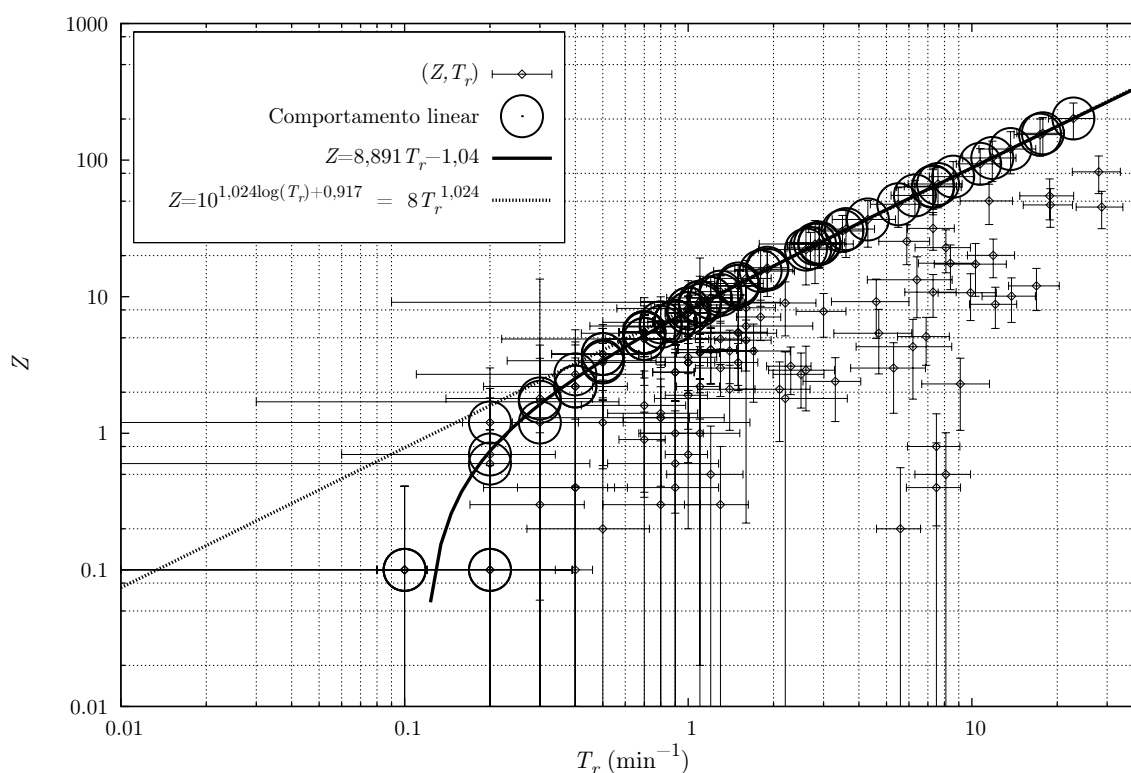


Figura 34: Crescimento linear dos valores mais elevados de  $Z(T_r)$ . Os ajustes realizados nos gráficos foram realizados considerando apenas os pontos circulados, nos quais se aproximam mais do ajuste linear obtido.

Os pontos circulados na figura 34, mesmo sendo pertencentes a diferentes tempestades, mostram que para os estágios com maiores valores de  $Z$ , os pontos  $(Z, T_r)$  estão melhor

<sup>28</sup>Essas informações climatológicas, temperatura e umidade relativa do ar para cada estação do ano, podem ser consultadas em INPE (2009).

ajustados com a equação de reta

$$Z = 8,891T_r - 1,04, \quad (35)$$

apresentada na figura 34 como uma curva, em função da escala logarítmica utilizada. Nota-se que o ajuste referente a curva  $8T_r^{1,024}$  (figura 34), não acompanha os pontos associados aos menores valores de  $Z$  e  $T_r$ .

As tempestades de Campo Grande – MS, não apresentaram correspondência entre o aumento de  $Z$  em função do percentual de relâmpagos nuvem-solo positivos conforme aponta Boccippio et al. (2001). Soriano e de Pablo (1995) e Souza (2006), também não identificaram essa relação em suas análises.

Quanto à figura 31, pode-se observar com base nos totais de eventos identificados pela BrasilDAT e Antena Lenta, um valor estimado de 10600 relâmpagos intranuvens, que são distribuídos principalmente em eventos com até 5 pulsos identificados pela Antena Lenta.

Medidas da forma de onda de descargas intranuvens em Heavner et al. (2006), mostram que essas descargas possuem diversos picos de campo elétrico, porém com intervalos de tempo na ordem de 1 ms. Como o funcionamento da Antena Lenta depende de um circuito RC para a identificação das descargas elétricas,<sup>29</sup> uma descarga intranuvem pode ter mais do que um pulso identificado<sup>30</sup>.

Os eventos intranuvens que estão distribuídos em grupos de 5 ou mais pulsos (figura 31), ou com tempo de duração superior a 250 ms conforme mostra a figura 32, provavelmente correspondem a agrupamentos de descargas intranuvens com descargas nuvem-solo distantes, classificadas como contaminações (ver seção 6.2).

---

<sup>29</sup>Conforme descrito em 4.2.1.

<sup>30</sup>Identificados conforme mostra a figura 22.

## 8 CONCLUSÕES

Os elevados valores da razão entre os relâmpagos intranuvens e nuvem-solo ( $Z$ ) obtidos para a cidade de Campo Grande – MS, estão estreitamente relacionados aos estágios iniciais e dissipativos das tempestades monitoradas, nos quais observam-se um crescimento desproporcional da taxa de relâmpagos intranuvens em relação ao desenvolvimento da taxa de relâmpagos nuvem-solo, sendo que os maiores valores de  $Z$ , encontram-se nos períodos mais secos do ano, indicando que as tempestades incidentes em Campo Grande – MS, possuem grande desenvolvimento vertical, favorecendo o processo de eletrificação das nuvens e gerando taxas de relâmpagos de até  $(29 \pm 5) \text{ min}^{-1}$ , valores que correspondem com as maiores taxas de relâmpagos registradas em tempestades severas com formação de tornados registradas por MacGorman et al. (1989, p. 236) em Oklahoma, Estados Unidos.

Esta pesquisa, além da equação  $Z = 5T_r^{0,95}$  (equação 33) que sintetiza o crescimento de  $Z$  em função da taxa de relâmpagos ( $T_r$ ), sugere que, nos estágios iniciais e dissipativos das tempestades em Campo Grande – MS, quando a taxa de relâmpagos intranuvens possui um crescimento acentuado, o crescimento de  $Z$  em função da taxa de relâmpagos ( $T_r$ ) pode ser expressado através da equação de reta  $Z = 8,891T_r - 1,04$  (equação 35).

### 8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido a extensa quantidade de informações contidas no monitoramento de  $Z$ , conforme mostra a figura 26, essa dissertação, apresenta uma contribuição para futuros trabalhos, como por exemplo na investigação da altura das nuvem ocorrentes em Campo Grande - MS, na produção de  $\text{NO}_x$  relacionada as descargas atmosféricas, no aperfeiçoamento de métodos de monitoramento de  $Z$  e em estudos de casos que podem detalhar ainda mais as análises realizadas nesta dissertação, como por exemplo em Anselmo et al. (2008), que analisa dados de três tempestades presentes nesta dissertação. Os resultados desta pesquisa promoveram um levantamento de informações meteorológicas para a região urbana

do município de Campo Grande – MS, o que poderá levar a uma melhor compreensão a respeito da climatologia dessa região do Brasil.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS FONTE DO PROCESSAMENTO DOS DADOS DA ANTENA LENTA

Os processamentos referentes a formatação dos arquivos de registro, identificação das descargas e tratamento de ruídos descritos na seção 5 foram sistematizados em um *software* desenvolvido em python conforme o código fonte 1

```

1 #
2 # / _ | _ _ / / _ _ _ _ _ _ _ _ / / _ _ _ _ / / _ _ _ _
3 # / _ | / _ \ / _ \ - _ ) _ \ / _ \ \ / / _ / - _ ) _ \ / _ \ \
# / / | / / / \ \ \ \ / / \ \ \ / / \ \ \ / / \ \ \ / / \ \ \ /
5 #
6 # / / / / _ _ / _ | _ _ _ / / / / / / / / / / / / / /
7 # / / / / / / _ | / / / / / / / / / / / / \ \
# / / \ \ / / | | \ \ / / / / / / / / / /
9 #
10 import datetime
11 import time
    entrada = raw_input("Digite o nome do arquivo .txt gerado pelo Pico
        Recorder:")
13 entrada = str(entrada)
    infile = open(entrada, "r")
15 outfile = open("resultado.csv", "w")
    linha1=infile.readline()
17 linha2=infile.readline()
    linha3=infile.readline()
19 linha4=infile.readline()
    fields = linha4.split('\t')
21 data, hora, pulso = fields
    ti = datetime.datetime(*time.strptime(str(data)+" "+str(hora), "%m/%d/%Y %H
        :%M:%S")[:6])
23 if pulso[0] == '-':
        outfile.write(str(ti)+";0.00\n")
25 else:
        outfile.write(str(ti)+";"+pulso)
27 #Reescreve o tempo em formato timestamp com fracao
    #de segundos eliminando virgulas e pulos negativos
29 for line in infile.readlines():
        fields = line.split('\t')
31 data, hora, pulso = fields
        timestamp = (ti + datetime.timedelta(microseconds=50000))
33 if pulso[0] == '-':
            outfile.write(str(timestamp)+";0.00\n")
35 else:

```

```

        outfile.write(str(timestamp)+";" + pulso)
37     ti = (ti + datetime.timedelta(microseconds=50000))
infile.close()
39 outfile.close()
#Inicio do filtro de ruídos dos dados e identificação dos pulsos
41 infile = open("resultado.csv", "r")
saidacsv = str(entrada[0:-4]) + '.csv'
43 outfile = open(saidacsv, "w")
#Leitura e escrita da primeira linha
45 linha=infile.readline()
campo = linha.split(';')
47 timestampz, pulso = campo
pulsol=pulso
49 outfile.write(timestampz+";" + pulsol)
#Leitura de todo o arquivo, linha a linha
51 for line in infile.readlines():
    fields = line.split(';')
53     timestampz, pulso = fields
#{identifica descargas
55     if float(pulso) == 0.00:
        pulsol=str(0.00)
57     if pulsol == pulso or float(pulso)==0.00:
        outfile.write(timestampz+";0.00\n")
59     pulsol=pulso
#{Elimina ruídos 0.16,0.17,0.18,0.19,0.20
61     elif (float(pulsol) in [0.16,0.17,0.18,0.19,0.20]) and (float(pulso) in
        [0.16,0.17,0.18,0.19,0.20]):
        outfile.write(timestampz+";0.00\n")
63     pulsol=pulso
#Elimina ruídos}
65     elif pulsol < pulso:
        outfile.write(timestampz+";" + pulso)
67     pulsol=pulso
        elif pulsol > pulso:
69         outfile.write(timestampz+";0.00\n")
        pulsol=pulso
71 #{Escreve pulsos reais de [0.16,0.17,0.18,0.19,0.20]
        elif pulsol < pulso and (float(pulso) in [0.16,0.17,0.18,0.19,0.20]):
73         outfile.write(timestampz+";" + pulso)
        pulsol=pulso
75 #identifica descargas}
print "=====*Finalizado com sucesso!====="
77 infile.close()
outfile.close()

```

Código fonte 1: Formatador das linhas de dados, corretor das informações temporais, identificador de pulsos e filtro de ruídos desenvolvido em linguagem de programação python.

Os códigos fontes 2 e 3 são responsáveis pela importação dos dados para o SGBDOR PostgreSQL.

```

import sys
2 entrada = raw_input("Digite o nome do arquivo:")
entrada = str(entrada)
4 infile = open(entrada, "r")
outfile = open("sem0.csv", "w")

```

```

6 for line in infile.readlines():
    fields = line.split(';')
8     timestampz, pulso = fields
    if (float(pulso) > 0.00):
10         outfile.write(timestampz+";"+pulso)
infile.close()
12 outfile.close()

```

Código fonte 2: Programa desenvolvido em linguagem de programação python, que gera um novo arquivo desconsiderando os pulsos de campo elétrico nulo.

```

1 entrada = raw_input("Digite o nome do arquivo de entrada:")
  entrada = str(entrada)
3 infile = open(entrada, "r")
  saidasql = str(entrada[0:-4])+'insert.sql'
5 outfile = open(saidasql, "w")
  n=0
7 outfile.write("PREPARE insertwhip (timestamp with time zone,float8) AS
  INSERT INTO whip (dataw, pulsos) VALUES ($1, $2);\n")
  outfile.write("BEGIN;\n")
9 for line in infile.readlines():
    fields = line.split(';')
11     timestampz, pulso = fields
    n=n+1
13     if n > 10000:
        outfile.write("COMMIT;\n")
15         outfile.write("BEGIN;\n")
        outfile.write("EXECUTE insertwhip ('"+timestampz+"', '"+pulso+"');\n")
17         n=0
    else:
19         outfile.write("EXECUTE insertwhip ('"+timestampz+"', '"+pulso+"');\n")
21 outfile.write("COMMIT;\n")
  outfile.write("DEALLOCATE insertwhip;\n")
23 infile.close()
  outfile.close()

```

Código fonte 3: Programa desenvolvido em linguagem de programação python, que escreve as informações referente aos raios totais em *tags* SQL para inserção no banco de dados.

A saída gerada pela execução do código fonte 3 prepara a inserção dos dados da Antena Lenta no SGDBOR, escrevendo o arquivo sql conforme o código fonte 4, que quando executado é capaz se inserir centenas de milhões de linhas de dados com alta performance de processamento.

```

PREPARE insertwhip (timestamp with time zone,float8) AS INSERT INTO whip (
    dataw, pulsos) VALUES ($1, $2);
2 BEGIN;
EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:02.850000','0.16');
4 EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:23.800000','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:29.750000','0.16');
6 EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:30.150000','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:30.250000','0.04');

```

```

8 EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:35','0.08');
EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:58:35.100000','0.08');
10 EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:59:37.500000','0.16');
EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:59:46.700000','0.04');
12 EXECUTE insertwhip('2007-10-23 19:59:46.750000','0.12');

14 /*...milhares de linhas */

16 EXECUTE insertwhip('2007-10-23 20:03:23.650000','0.12');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:16:50.900000','0.04');
18 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:16:53.800000','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:16:56.150000','0.04');
20 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:16:56.200000','0.08');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:02.650000','0.04');
22 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:02.850000','0.08');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:05.950000','0.04');
24 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:10.950000','0.08');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:11.100000','0.08');
26 COMMIT;
BEGIN;
28 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:11.300000','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:11.400000','0.08');
30 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:11.550000','0.16');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:12.350000','0.04');
32 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:13','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:13.050000','0.08');
34 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:14.250000','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:14.750000','0.08');
36 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:14.950000','0.04');
EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:15.150000','0.12');
38 EXECUTE insertwhip('2007-10-30 12:17:16.600000','0.12');

40 /*...assim continuando os blocos de milhares de linhas compreendidos entre
comandos BEGIN e COMMIT */

```

Código fonte 4: Referente ao arquivo SQL de inserção de milhões de linhas de dados no SGBDOR

O processamento dos dados registrados pela Antena Lenta é concluído após a execução da Função PL/PGSQL constituída conforme o código fonte 5, quando os eventos com pulsos subsequentes são identificados e agupados.

```

1 CREATE OR REPLACE FUNCTION agp200() RETURNS character AS
  $BODY$
3 --
  DECLARE
5 curswhip CURSOR FOR SELECT chave,dataw,pulsos FROM whip ORDER BY dataw ASC;
  cursagrupa CURSOR FOR SELECT * FROM whip200ms WHERE id IN (SELECT
      last_value from whip200ms_id_seq);
7 lwhip whip%ROWTYPE;
  lagp whip200ms%ROWTYPE;
9 lmwhip integer:=(SELECT last_value from whip_seq);
  --
11 BEGIN
  OPEN curswhip;
13 OPEN cursagrupa;

```



```

15  FETCH cursagrupa INTO lagp;
16  FETCH curswhip INTO lwhip;
17  WHILE FOUND LOOP
18  --
19  IF (lwhip.dataw-lagp.datatempo)>(interval '200 milliseconds') OR (lwhip
    .dataw-lagp.datatempo)+lagp.duracao>=interval '1 second ' THEN
20  INSERT INTO whip200ms (whip_chave,nraios,datatempo,pulso_maior,
    duracao) VALUES (lwhip.chave, '1', lwhip.dataw, lwhip.pulsos,
    interval '0 milliseconds');
21  ELSEIF (lwhip.dataw-lagp.datatempo)<=(interval '200 milliseconds') AND
    lwhip.pulsos>=lagp.pulso_maior THEN
22  UPDATE whip200ms SET whip_chave=lwhip.chave, nraios=nraios+1,
    datatempo=lwhip.dataw,pulso_maior=lwhip.pulsos,duracao=(lwhip.
    dataw-lagp.datatempo)+duracao
23  WHERE id = lagp.id;
24  ELSEIF (lwhip.dataw-lagp.datatempo)<=(interval '200 milliseconds') AND
    lwhip.pulsos<lagp.pulso_maior THEN
25  UPDATE whip200ms SET nraios=nraios+1,duracao=(lwhip.dataw-lagp.
    datatempo)+duracao
26  WHERE id = lagp.id;
27  END IF;
28  --
29  FETCH curswhip INTO lwhip;
30  CLOSE cursagrupa;
31  OPEN cursagrupa;
32  FETCH cursagrupa INTO lagp;
33  EXIT WHEN (lwhip.chave=lmwhip);
34  END LOOP;
35  --
36  CLOSE curswhip;
37  CLOSE cursagrupa;
38  RETURN 'Agrupamento de multiplos flashes (200ms) realizado com sucesso!';
39  END;
40  --
41  $BODY$
LANGUAGE 'plpgsql';

```

Código fonte 5: Função programada em PL/PGSQL para identificação da multiplicidade dos raios detectados pela Antena Lenta.

## APÊNDICE B - ESTRUTURA COMPUTACIONAL DO CÁLCULO DE Z

A metodologia do cálculo de  $Z$  conforme descrita na seção 6 foi toda estruturada em um função PL/PGSQL exibida no código fonte 6.

```

1 CREATE OR REPLACE FUNCTION z200 ()
  RETURNS character AS
3 $BODY$
  DECLARE
5 ti timestamp with time zone:='2007-10-01 00:00:00';
  tf timestamp with time zone:='2008-11-05 00:00:00';
7 databrdt brasildatms.data%TYPE;
  brdt double precision;
9 brdt1975min double precision;
  brdt1975max double precision;
11 brdt1975 double precision;
  brdt1975er double precision;
13 brdt2025min double precision;
  brdt2025max double precision;
15 brdt2025 double precision;
  brdt2025er double precision;
17 brdtm double precision;
  brdter double precision;
19 frbrdtns double precision;
  frbrdtnser double precision;
21 whip double precision;
  whipmax double precision;
23 whipmin double precision;
  whipm double precision;
25 whiper double precision;
  clmax double precision;
27 c1 double precision;
  c2 double precision;
29 c double precision;
  cer double precision;
31 brdtp1975min double precision;
  brdtp1975max double precision;
33 brdtp1975 double precision;
  brdtp1975er double precision;
35 brdtp2025min double precision;
  brdtp2025max double precision;
37 brdtp2025 double precision;
  brdtp2025er double precision;
39 brdtpm double precision;
  brdtpm double precision;

```

```

41 frbrdtp double precision;
   frbrdtper double precision;
43 perpos double precision;
   brdtn1975min double precision;
45 brdtn1975max double precision;
   brdtn1975 double precision;
47 brdtn1975er double precision;
   brdtn2025min double precision;
49 brdtn2025max double precision;
   brdtn2025 double precision;
51 brdtn2025er double precision;
   brdtnm double precision;
53 brdtner double precision;
   frbrdtn double precision;
55 frbrdtner double precision;
   perneg double precision;
57 intnuv double precision;
   intnuver double precision;
59 frintnuv double precision;
   frintnuver double precision;
61 frt double precision;
   frter double precision;
63 z double precision;
   zer double precision;
65 ext integer;
BEGIN
67 --Loop para identificacao das tempestades detectadas pela Antena Lenta e a
   BrasilDAT.
LOOP
69   brdt:=(SELECT count (*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(radians(-20.5100))
     *sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*cos(radians(latitude))*
     cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)))<=0.003175 AND (
     estimativa_pico > 10 OR estimativa_pico < 0) AND data>ti AND data<=(ti
     +interval '10 minutes'));
   whip:=(SELECT count (*) FROM whip200ms WHERE datatempo>=ti AND datatempo
     <=(ti + interval '10 minutes'));
71 IF brdt<>0 AND whip<>0 THEN
     SELECT min(data) INTO databrdt FROM brasildatms WHERE acos(sin(radians
       (-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*cos(
       radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)))
       <=0.003175 AND (estimativa_pico > 10 OR estimativa_pico < 0) AND
       data>ti AND data<=(ti+interval '10 minutes');
73   ti:=(databrdt-interval '10 minutes');
     LOOP
75 -- Selecao dos NS
     brdt1975min:=(SELECT count (*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(
       radians(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*
       *cos(radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)
       ))<=0.003097 AND (estimativa_pico>10 OR estimativa_pico<0) AND
       data>ti AND data<=(ti+interval '10 minutes'));
77   brdt1975max:=((brdt1975min*100)/80);
     brdt1975:=((brdt1975max+brdt1975min)/2);
79   brdt1975er:=((brdt1975max-brdt1975min)/2);
     brdt2025min:=(SELECT count (*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(
       radians(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*
       *cos(radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)
       ))<=0.003175 AND (estimativa_pico>10 OR estimativa_pico<0) AND
       data>ti AND data<=(ti+interval '10 minutes'));

```

```

81      brdt2025max:=((brdt2025min*100)/80);
      brdt2025:=((brdt2025max+brdt2025min)/2);
83      brdt2025er:=((brdt2025max-brdt2025min)/2);
      brdtm:=((brdt1975+brdt2025)/2);
85      brdter:=((brdt1975er+brdt2025er)/2);
      frbrdtms:=((brdtm/10);
87      frbrdtmser:=((brdter/10);
--      Selecao dos raios totais
89      whip:=(SELECT count(*) FROM whip200ms WHERE datatempo>ti AND
          datatempo<=(ti + interval '10 minutes'));
      whipmax:=((whip*100)/70);
91      whipm:=((whipmax+whip)/2);
      whiper:=((whipmax-whip)/2);
93 --      Selecao das possiveis contaminacoes
      c1:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(radians
          (-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*cos(
          radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude))) >
          0.003175 AND (10^8*abs(estimativa_pico)*10^3)
          /(2*3.14*8.854*10^(-12)*9*10^16*(acos(sin(radians(-20.5100))*sin
          (radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*(cos(radians(latitude)
          ))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude))))*6378.1)*10^3)
          >15.0 AND data>ti AND data<=(ti+interval '10 minutes'));
95      clmax:=((c1*100)/80);

97      c2:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(radians
          (-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*cos(
          radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude))) >
          0.003175 AND (10^8*abs(estimativa_pico)*10^3)
          /(2*3.14*8.854*10^(-12)*9*10^16*(acos(sin(radians(-20.5100))*sin
          (radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*(cos(radians(latitude)
          ))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude))))*6378.1)*10^3)
          >35.0 AND data>ti AND data<=(ti+interval '10 minutes'));
--      Estimativa da contaminacao
99      c:=((clmax+c2)/2);
      cer:=((clmax-c2)/2);
101 --      Selecao dos NS positivos + flash rate
      brdtp1975min:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(
          radians(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))
          *cos(radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)
          ))<=0.003097 AND (estimativa_pico>10) AND data>ti AND data<=(ti+
          interval '10 minutes'));
103      brdtp1975max:=((brdtp1975min*100)/80);
      brdtp1975:=((brdtp1975max+brdtp1975min)/2);
105      brdtp1975er:=((brdtp1975max-brdtp1975min)/2);
      brdtp2025min:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(
          radians(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))
          *cos(radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)
          ))<=0.003175 AND (estimativa_pico>10) AND data>ti AND data<=(ti+
          interval '10 minutes'));
107      brdtp2025max:=((brdtp2025min*100)/80);
      brdtp2025:=((brdtp2025max+brdtp2025min)/2);
109      brdtp2025er:=((brdtp2025max-brdtp2025min)/2);
      brdtpm:=((brdtp1975+brdtp2025)/2);
111      brdtpmser:=((brdtp1975er+brdtp2025er)/2);
      frbrdtpm:=((brdtpm/10);
113      frbrdtpmser:=((brdtpmser/10);
--      Selecao dos NS negativos + flash rate
115      brdtn1975min:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(

```

```

        radians(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))
        *cos(radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)
        ))<=0.003097 AND (estimativa_pico<0) AND data>ti AND data<=(ti+
        interval '10 minutes');
brdtn1975max:=((brdtn1975min*100)/80);
117 brdtn1975:=((brdtn1975max+brdtn1975min)/2);
brdtn1975er:=((brdtn1975max-brdtn1975min)/2);
119 brdtn2025min:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(
        radians(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))
        *cos(radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude)
        ))<=0.003175 AND (estimativa_pico<0) AND data>ti AND data<=(ti+
        interval '10 minutes'));
brdtn2025max:=((brdtn2025min*100)/80);
121 brdtn2025:=((brdtn2025max+brdtn2025min)/2);
brdtn2025er:=((brdtn2025max-brdtn2025min)/2);
123 brdtnm:=((brdtn1975+brdtn2025)/2);
brdtner:=((brdtn1975er+brdtn2025er)/2);
125 frbrdtn:=(brdtnm/10);
frbrdtner:=(brdtner/10);
127 -- Flash rate total
IF whipm>=(brdtm+c) THEN
129     frt:=(whipm-c)/10;
     frter:=(whiper+cer)/10;
131 ELSE
     whipmin:=(whip);
133     whipmax:=((brdtm+c)+(brdter+cer));
     whipm:=((whipmax+whipmin)/2);
135     whiper:=((whipmax-whipmin)/2);
--     whipm:=(((brdtm+c)+(brdter+cer))+((whipmax+whip)/2)-((whipmax
--whip)/2))/2);
137 --     whiper:=(((brdtm+c)+(brdter+cer))-((whipmax+whip)/2)-((
whipmax-whip)/2))/2);
--     whiper:=(((whipmax-whip)/2)+(brdter+cer))/2)+((brdtm+c)-((
whipmax+whip)/2))/2);
139     frt:=(whipm)/10;
     frter:=(whiper)/10;
141 END IF;
-- Determinacao dos intra-nuvs
143 intnuv:=(whipm-brdtm-c);
intnuver:=(whiper+brdter+cer);
145 frintnuv:=(intnuv/10);
frintnuver:=(intnuver/10);
147 -- Calculo da Razao
IF brdtm>=1 THEN
149     z:=(intnuv/brdtm);
     zer:=((1/brdtm^2)*((intnuver*brdtm)+(brdter*intnuv)));
151     perneg:=((100*brdtnm)/(brdtnm+brdtpm));
     perpos:=((100*brdtpm)/(brdtnm+brdtpm));
153 ELSE
     z:=null;
155     zer:=null;
     perneg:=0;
157     perpos:=0;
END IF;
159 INSERT INTO result200 (data,razao,razao_er,flash_rate_total,
        flash_rate_totaler,flash_rate_p,flash_rate_per,flash_rate_n,
        flash_rate_ner,flash_rate_i,flash_rate_ier,flash_rate_ns,
        flash_rate_nser,percentual_p,percentual_n,contaminacao,
```

```
contaminacaoer,brasildat,brasiltader,whipt,whipter) VALUES (ti+
interval '5 minutes', z, zer, frt, frter, frbrdtp, frbrdtper, frbrdtn,
frbrdtner, frintnuv, frintnuver, frbrdtns, frbrdtner, perpos, perneg,
c, cer, brdtm, brdter, whipm, whiper);
-- Analise para saida do LOOP
161 ti:=(ti+interval '10 minutes');
ext:=(SELECT count(*) FROM brasildatms WHERE acos(sin(radians
(-20.5100))*sin(radians(latitude))+cos(radians(-20.5100))*cos(
radians(latitude))*cos(radians(-54.6195)-radians(longitude))) <=
0.003175 AND data>ti AND data<=(ti+interval '1 hour'));
163 EXIT WHEN (ext=0);
END LOOP;
165
END IF;
167 ti:=(ti+interval '10 minutes');
EXIT WHEN (ti>tf);
169 END LOOP;
RETURN 'SIM';
171 END;
$BODY$
173 LANGUAGE 'plpgsql' VOLATILE;
ALTER FUNCTION z200() OWNER TO evandro;
```

Código fonte 6: Z.

## APÊNDICE C - CAMPO ELÉTRICO IRRADIADO POR UMA DESCARGA DE RETORNO

Conforme descrito em Mclain e Uman (1971), o campo elétrico associado à uma descarga de retorno pode ser estimado para uma situação idealizada, em que o canal da corrente elétrica seja retilíneo e o solo um condutor perfeito. Portanto, considerando a figura 35, é possível obter uma expressão para o campo elétrico de uma descarga de retorno a partir das equações de Maxwell (UMAN et al., 1975).

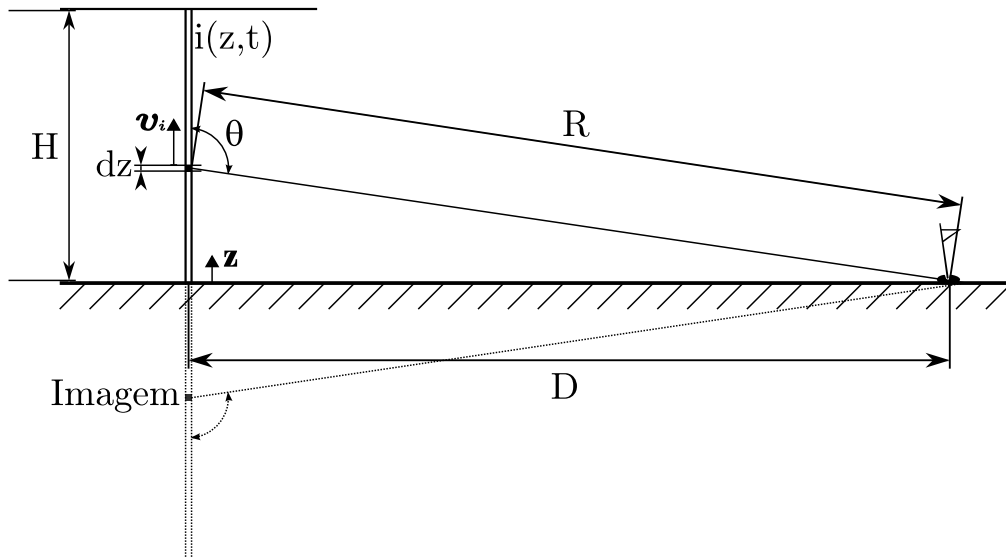


Figura 35: Representação de uma descarga de retorno idealizada, em que, considera-se uma corrente elétrica vertical retilínea ocorrendo em uma superfície condutora plana.

$$\begin{aligned}
 E(D, t) = & \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \left[ \int_0^H \frac{2 - 3 \sin^2(\theta)}{R^3} \left( \int_0^t i(z, \tau - R/c) d\tau \right) dz \right. \\
 & + \int_0^H \frac{2 - 3 \sin^2(\theta)}{cR^2} i(z, t - R/c) dz \\
 & \left. - \int_0^H \frac{\sin^2(\theta)}{c^2 R} \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \right] \quad (36)
 \end{aligned}$$

Para a equação 36, associa-se o seu primeiro termo com o campo eletrostático, o segundo com o campo elétrico induzido e o terceiro com o campo elétrico irradiado.

## C.1 ESTIMATIVA DA CORRENTE ELÉTRICA

Para uma estimativa da corrente no canal a partir da detecção do campo elétrico irradiado, é preciso que a detecção seja realizada por uma antena distante da descarga de retorno, onde os efeitos do campo eletrostático e campo elétrico induzido sejam desprezíveis. Para essa estimativa, utiliza-se apenas o terceiro termo da equação 36, pois esse corresponde ao campo elétrico irradiado ( $E_{ir}$ ) detectado por uma antena.

$$E_{ir}(D, t) = -\frac{1}{2\pi \epsilon_0} \int_0^H \frac{\sin^2(\theta)}{c^2 R} \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \quad (37)$$

Como considera-se que a corrente é vertical e retilínea, como em uma linha de transmissão, na direção  $z$ ,

$$i(z, t) = i(t - z/v_i), \quad (38)$$

sendo  $v_i$ , a velocidade da corrente no canal.

Substituindo 38 em 37,

$$E_{ir}(D, t) = -\frac{1}{2\pi \epsilon_0} \frac{\sin^2(\theta)}{c^2 R} \int_0^H \frac{\partial i(t - z/v_i - R/c)}{\partial t} dz. \quad (39)$$

Porém para a estimativa da corrente a partir do campo elétrico detectado, deve-se considerar a situação na qual  $D \gg H$ , então,  $\theta \simeq \pi/2$ , portanto realiza-se a seguinte aproximação, em que

$$\sin(\theta) \simeq 1 \quad (40)$$

$$R \simeq D. \quad (41)$$

Nesse caso, as equações 40 e 41 são substituídas em 39, obtendo,

$$E_{ir}(D, t) = -\frac{1}{2\pi \epsilon_0 c^2 D} \int_0^H \frac{\partial i(t - z/v_i - D/c)}{\partial t} dz. \quad (42)$$

Sabendo que,

$$\frac{\partial i(t - z/v_i)}{\partial t} = -v_i \frac{\partial i(t - z/v_i)}{\partial z} \quad (43)$$

e substituindo 43 em 42,



$$E_{ir}(D, t) = \frac{v_i}{2\pi \epsilon_0 c^2 D} \int_0^H \frac{\partial i(t - z/v_i - D/c)}{\partial z} dz, \quad (44)$$

então,

$$E_{ir}(D, t) = \frac{v_i}{2\pi \epsilon_0 c^2 D} [i(t - H/v_i - D/c) - i(t - D/c)]. \quad (45)$$

Como,

$$i(t - H/v_i - D/c) = i(0) \quad (46)$$

e  $i(t) = 0$  para  $t \leq 0$ , obtem-se

$$E_{ir}(D, t) = -\frac{v_i}{2\pi \epsilon_0 c^2 D} i(t - D/c). \quad (47)$$

Portanto ao considerar  $v_i$  como constante, por exemplo no momento do pico de  $E_{ir}$  detectado, a estimativa da corrente elétrica é determinada, evidenciando o  $i$  da equação 47.

$$i(t - D/c) = -\frac{2\pi c^2 \epsilon_0 D E_{ir}}{v_i}. \quad (48)$$

Desta forma a corrente elétrica da descarga de retorno é estimada em função das variáveis de distância  $D$  e radiação  $E_{ir}$  que podem ser determinadas por uma rede de sensores de detecção de relâmpagos.

## APÊNDICE D - MÉTODO DO TEMPO DE CHEGADA – TOA

Nesse sistema de localização de raios, a posição do evento é determinada pela estimativa da diferença entre os caminhos percorridos pela onda eletromagnética emitida por uma descarga de retorno até os sensores.

Suponha uma distribuição de sensores conforme a figura 36. Quando ocorre um raio, os três sensores detectam a radiação emitida pelo evento. Porém existe uma diferença de tempo de detecção para cada sensor associado a diferença de caminhos percorridos pela radiação. Considerando que o sensor 1 foi o primeiro a registrar o pulso de radiação, a diferença de caminho percorrido pela radiação entre os sensores 1 e 2 ( $d_{12}$ ) e os sensores 1 e 3 ( $d_{13}$ ) é estimada conforme

$$d_{12} = c(t_2 - t_1), \quad (49)$$

$$d_{13} = c(t_3 - t_1). \quad (50)$$

Porém como é possível conhecer a localização de instalação de cada sensor (ver figura 36), nota-se que, essa diferença de caminho corresponde à

$$d_{12} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \quad (51)$$

$$d_{13} = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}. \quad (52)$$

As equações 51 e 52 são equações de hipérbolas, portanto a localização da descarga é determinada pelo ponto de cruzamento entre as hipérbolas associadas as diferenças de caminho da radiação. Note que os focos das hipérbolas correspondem as posições dos sensores, assim cada dois sensores definem duas hipérbolas (ver figura 36).

O cruzamento das hipérbolas representam uma solução, em que, a diferença de caminho percorrido pela radiação corresponde ao tempo de detecção em cada sensor. Quando

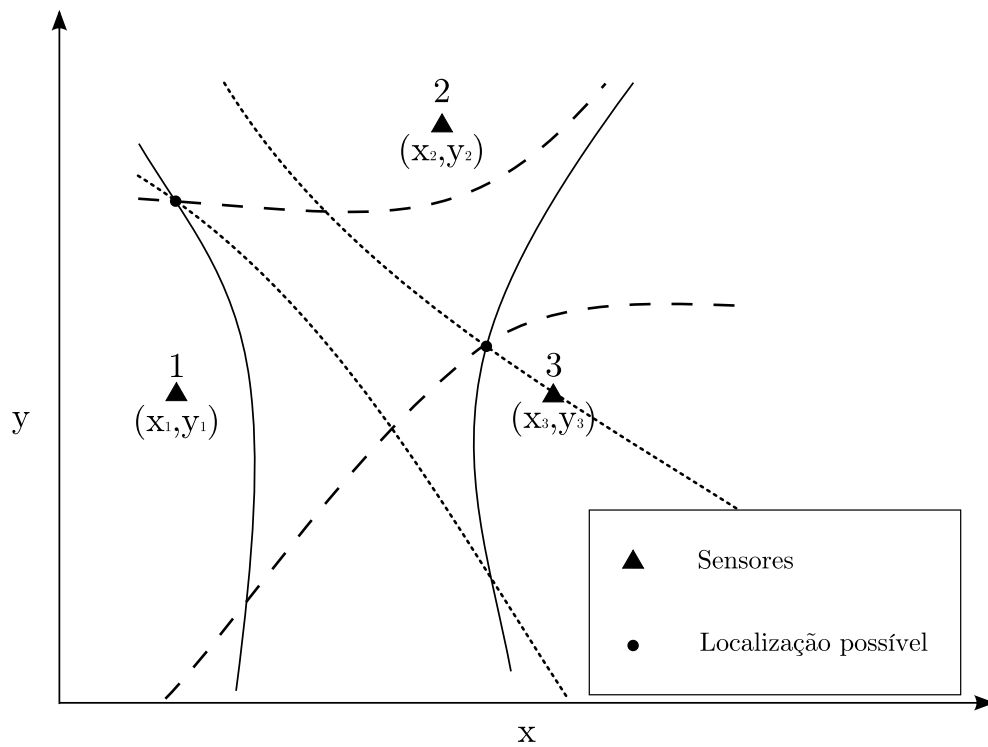


Figura 36: Representação da localização de raios pelo método do tempo de chegada - TOA, também denominado como método das hipérbolas. Nessa figura observa-se as hipérbolas determinadas com base nas diferenças de caminhos percorridos pela radiação entre o sensor com menor tempo de detecção e os demais sensores.

ocorre mais de um cruzamento entre as hipérbolas, nesses casos, é considerado o ponto de cruzamento mais próximo ao sensor que identificou a descarga com o menor tempo.

## REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R. I. **Eletrificação dos Sistemas Precipitantes na Região Amazônica**. 197 p. Tese (Doutorado apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo) — Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008.
- ANSELMO, E. M.; FERNANDES, W. A.; LACERDA, M.; FRITZEN, C. L.; PINTO JR, O.; RESENDE, L. M. A.; SOARES JR, J. R. Measures of ratio (ic/cg) for isolated convective systems in campo grande – ms between november and december 2007. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING - GROUND' 2008 & III INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS - 3<sup>rd</sup> LPE, 2008, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: SB-RAI, 2008. p. 522.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT - GEOSCIENCE AUSTRALIA. **Calculating Distances Between Two Points**. 2009. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/geodesy/datums/distance.jsp>>. Acesso em: 17 abr. 2009.
- BAKER, M. B.; DASH, J. D. Mechanism of charge transfer between colliding ice particles in thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D5, p. 10.621–10.626, jun. 1994.
- BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO JR, O. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D03101, p. 1–9, dez 2005. Doi:10.1029/2005GL023889.
- BARAL, K. N.; MACKERRAS, D. The cloud flash-to-ground flash ratio and other lightning occurrence. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D1, p. 931–938, jan 1992.
- BERGER, K. Lightning. In: GOLDE, R. H. (Ed.). **The Earth Flash**. [S.l.]: Academic Press, 1977. v. 1.
- BOCCIPPIO, D. J.; CUMMINS, K. L.; CHISTIAN, H. J.; GOODMAN, S. J. Combined satellite and surface-based estimation of the intracloud–cloud-to-ground lightning ratio over the continental united states. **Mon. Wea. Rev.**, v. 129, p. 108–122, 2001.
- COORAY, V.; JAYARATNE, R. What directs a lightning flash towards ground? **Sri Lankan Journal of Physics**, v. 1, p. 1–10, 2000.
- CUMMINS, K. L.; BURNETT, R. O.; HISCOX, W. L.; PIFER, A. E. Line reliability and fault analysis using the national lightning detection network. In: PRECISE MEASUREMENTS IN POWER CONFERENCE, 1993, Arlington, USA. **Preprint...** Arlington, USA: National Science Foundation and Center for Power Engineering at Virginia Tech, 1993.

- CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L.; PYLE, R. B.; PIFER, A. E. A combined toa/mdf technology upgrade of the u.s. national lightning detection network. **Journal of Geophysical Research**, n. 103, p. 9.035–9.044, abr. 1998.
- DEVENDRAA, S.; GOPALAKRISHNAN, V.; SINGH, R.; KAMRA, A.; SINGH, S.; PANT, V.; SINGH, R.; SINGH, A. The atmospheric global electric circuit: An overview. **Atmospheric Research**, v. 84, p. 91–110, 2007.
- DIENDORFER, G.; SCHULZ, W.; RAKOV, V. Lightning characteristics based on data from the austrian lightning locating system. **IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY**, v. 4, n. 4, p. 452–464, nov 1998.
- DWYER, J. R.; RASSOUL, H. K.; AL-DAYEH, M.; CARAWAY, L.; WRIGHT, B.; CHREST, A.; UMAN, M. A.; RAKOV, V. A.; RAMBO, K. J.; JORDAN, D. M.; JERAULD, J.; SMYTH, C. A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. **Geophys. Res. Lett.**, v. 31, n. L05119, 2004. Doi:10.1029/2003GL018771.
- FERNANDES, W. A. **Características dos relâmpagos gerados por nuvens de tempestades em ambientes sob a influência das queimadas em Rondônia**. 182 p. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.
- FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R.; SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics**. California: Oxnard Public Library, 1964.
- GOODMAN, S. J. **Predicting Thunderstorm Evolution Using Ground - Lightning Detection Networks**. Alabama, 1990. 193 p. NASA Technical Memorandum TM-103521.
- GOODMAN, S. J.; CHRISTIAN, R. H. Atlas of satellite observations related to global change. In: GURNEY, R. J.; FOSTER, J. L.; PARKINSON, C. L. (Ed.). **Thunderstorm Electrification**. San Diego: Published by Cambridge University Press, 1993. v. 1993, p. 470. ISBN 052143467X, 9780521434676.
- GOODY, R. M.; WALKER, J. C. G. **Atmosferas Planetárias**. Tradução: Antônio Chistofolletti. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1975. 139 p.
- GRENET, G. Essai d'explication de la charge électrique des nuages d'orages. **Ann. Geophys.** **3**, França, p. 306–307, 1947. Em inglês veja, *Atmos. Res.* **30** (1993), pp. 176–179.
- GUREVICH, A. V.; MILIKH, G. M.; ROUSSEL-DUPRE, R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. **Physics Letters A**, v. 165, p. 463– 468, 1992.
- HEAVNER, M. J.; SUSZCYNISKY, D.; WIENS, K.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. Lf/vlf intracloud waveform classification. **AGU Fall Meeting Abstracts**, p. A1002+, dec. 2006. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System.

- INPE. **Centro de previsão de tempo e estudos climáticos**. 2009. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacoes/>>. Acesso em: 06 mai. 2009.
- JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M.; SHOSTAK, V.; RUSAN, I.; LI, J. X.; CHANG, J. S. Statistics of lightning strikes to the toronto canadian national tower (1978-1995). **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 3, p. 1210–1221, jul 1997.
- JAYARATNE, E. R.; RAMACHANDRAN, V. A five-year study of lightning activity using a cgr3 flash counter in gaborone, botswana. **Meteorology and Atmospheric Physics**, n. 66, p. 235–241, 1998.
- JAYARATNE, E. R.; RAMACHANDRAN, V.; DEVAN, K. R. S. Observations of lightning flash rates and rain-gushes in gaborone, botswana. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, p. 325–331, mar. 1995. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System.
- KHAERDINOV, N.; LIDVANSKY, A.; PETKOV, V. Cosmic rays and the electric field of thunderclouds: Evidence for acceleration of particles (runaway electrons). **Atmospheric Research**, v. 76, p. 346–354, 2005.
- KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 2, p. 637–647, 1962.
- LACERDA, M. **Análise e modelagem de curvas de corrente de relâmpagos negativos descendentes entre 1985 e 1994, na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo-MG**. 214 p. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1998.
- MACGORMAN, D. R.; BURGESS, D. W.; MAZUR, V.; RUST, W. D.; TAYLOR, W. L.; JOHNSON, B. C. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 may 1981. **J. Atmos. Sci.**, v. 46, p. 221–250, 1989.
- MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The electrical nature of storms**. New York: Oxford University Press, 1998. 422 p.
- MACKERRAS, D. Automatic short-range measurement of the cloud flash to ground flash ratio in thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, n. 100, p. 5.037–5.050, 1985.
- MACKERRAS, D.; DARVENIZA, M. Latitudinal variation of lightning occurrence characteristics. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D5, p. 10813–10822, may 1994.
- MACKERRAS, D.; DARVENIZA, M.; ORVILLE, R. E.; WILLIAMS, E. R.; GOODMAN, S. J. Global lightning: total, cloud and ground flash estimates. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D16, p. 19791–19809, aug. 1998.
- MCLAIN, D. K.; UMAN, M. A. Extract expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 9, p. 2101–2105, mar. 1971.

MEDINA, R. L. R. **Construção de um Instrumento para a Medida e Estudo do Campo Elétrico da Atmosfera**. 158 p. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia — Universidade Federal de Pelotas, São José dos Campos, 2006.

MORALES, C. A.; SALES, F.; PINHEIRO, F. G.; CÂMARA, K. S.; BENETTI, C.; FERNANDES, W. A.; LACERDA, M. Sferics timing and ranging network – starnet: Two years of operation in brazil. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING - GROUND' 2008 & III INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS - 3<sup>rd</sup> LPE, 2008, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: SB-RAI, 2008. p. 522.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 362 p. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR, O.; MURPHY, M. Performance analysis of the brasildat network. In: VI INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING - GROUND' 2008 & III INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS - 3<sup>rd</sup> LPE, 2008, Florianópolis. **Proceedings...** Florianópolis: SB-RAI, 2008. p. 522.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **TRMM Instruments**. 2009. Disponível em: <[http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview\\_dir/lis.html](http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/lis.html)>. Acesso em: 02 mar. 2009.

OGAWA, T. Handbook of atmospheric electrodynamics. In: VOLLAND, H. (Ed.). **Lightning Currents**. [S.l.]: CRC Press, 1995. v. 1.

ORVILLE, R. E. Handbook of atmospheric electrodynamics. In: VOLLAND, H. (Ed.). **Lightning Detection from Ground and Space**. [S.l.]: CRC Press, 1995. v. 1.

PARKINSON, W.; TORRENSON, O. The diurnal variation the electrical potential of the atmosphere over oceans. **IUGG Sect. Terrest. Magn. Electr. Bull.**, v. 8, p. 340–345, 1931. *Compt. Rend de l'Assemblee de Stockholm*.

PHILLIPS, B. B. Convected charge in thunderstorms. **Monthly Weather Review**, v. 95, p. 863–870, 1967.

PINTO JR, O. The brazilian lightning detection network: A historical background and future perspectives. In: VII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION - VII SIPDA, 2003, Curitiba. **Proceedings...** Curitiba: Lene Gráfica & Editora, 2003. p. 607.

POSTGRESQL 8.1.16 DOCUMENTATION. **PL/pgSQL - SQL Procedural Language**. 2009. Disponível em: <<http://www.postgresql.org/docs/8.1/static/plpgsql.html>>. Acesso em: 07 mar. 2009.

POSTGRESQL GLOBAL DEVELOPMENT GROUP. **PostgreSQL 8.1.16 Documentation**. 2009. Disponível em: <<http://www.postgresql.org/docs/8.1/interactive/preface.html>>. Acesso em: 04 mar. 2009.

- PRENTICE, S. A.; MACKERRAS, D. The ratio of cloud to cloud-ground lightning flashes in thunderstorms. **J. Appl. Meteor.**, v. 16, p. 545–550, 1977.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. New York: Publicado por Cambridge University Press,, 2003. 687 p. ISBN 0521583276.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; THOTTAPPILLIL, R. Review of lightning properties from electric field and tv observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D5, p. 10745–10750, mai 1994.
- REYNOLDS, S. E.; BROOK, M.; GOURLEY, M. Thunderstorm charge separation. **Journal of Meteorology**, v. 14, p. 426–436, 1957.
- RUST, W. D.; MARSHALL, T. C. On abandoning the thunderstorm tripole -charge paradigm. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D18, p. 23499–23504, out. 1996.
- RUTLEDGE, S. A.; WILLIAMS, E.; KEENAN, T. The down under doppler and electricity experiment (dundee): Overview and preliminary results. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 1, p. 3–15, jan. 1992.
- SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO JR, O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D03101, p. 1–9, fev 2006a. Doi:10.1029/2005JD006415.
- SABA, M. M. F.; PINTO JR, O.; BALLAROTTI, M. G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Journal of Geophysical Research**, v. 33, n. L23807, p. 1–4, dez 2006b. Doi:10.1029/2006GL027455.
- SAUNDERS, C. Charge separation mechanisms in clouds. **Space Science Reviews**, v. 137, p. 335–353, jun. 2008.
- SAUNDERS, C.; AVILA, E.; PECK, S.; CASTELLANO, N.; VARELA, G. A. A laboratory study of the effects of rime ice accretion and heating on charge transfer during ice crystal/graupel collisions. **Atmospheric Research**, v. 51, p. 99–117, mar. 1999.
- SCHOENE, J.; UMAN, M. A.; RAKOV, V. A.; RAMBO, K. J.; JERAULD, J.; SCHNETZER, G. H. Test of the transmission line model and the traveling current source model with triggered lightning return strokes at very close range. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. d23, dez. 2003. 4737, doi:10.1029/2003JD003683.
- SECUNIA. **Vulnerability Report: Microsoft Windows XP Professional**. 2009. Disponível em: <<http://secunia.com/advisories/product/22/?task=statistics>>. Acesso em: 03 mar. 2009.
- SMITH, D. M.; LOPEZ, L. I.; LIN, R. P.; BARRINGTON-LEIGH, C. P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 mev. **Science**, v. 307, n. 5712, p. 1085–1088, fev. 2005. DOI: 10.1126/science.1107466. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/307/5712/1085>>. Acesso em: 03 abr. 2008.
- SORIANO, L. R.; DE PABLO, O. Total flash density and the intracloud/cloud-to-ground lightning ratio over the iberian peninsula. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. D13114, 1995. Doi:10.1029/2006JD007624.



- SOUZA, P. E. **Estudo da Razão de Relâmpagos Intranuven e Relâmpagos Nuvem-solo no Sudeste Brasileiro**. 115 p. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.
- STOLZENBURG, M.; RUST, W. D.; MARSHALL, T. C. Electrical structure in thunderstorm convective regions. 3 . synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D12, p. 14097–14108, 1998. DOI: 10.1029/97JD03545.
- TAKAHASHI, T. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms. **J. Atmos. Sci.**, v. 35, p. 1536–1548, 1978.
- TAKAHASHI, T. Rimming electrification as a charging generation mechanism in thunderstorms. **J. Atmos. Sci.**, v. 41, n. 17, p. 1536–1548, set. 1984.
- THORNWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, n. 38, p. 55–94, jan. 1948.
- UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K.; FISHER, R. J. Electric field intensity of the lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 18, p. 3523–3529, jun. 1973.
- UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K.; KRIDER, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 33–38, jan. 1975.
- UMAN, M. A.; SCHOENE, J.; RAKOV, V. A.; RAMBO, K. J.; SCHNETZER, G. H. Correlated time derivatives of current, electric field intensity, and magnetic flux density for triggered lightning at 15 m. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D13, p. 11, jul. 2002. 10.1029/2000JD000249.
- VONNEGUT, B. How the external currents flowing to a thundercloud influence its electrification. **Annales Geophysicae**, v. 9, n. 1, p. 34–36, jan. 1991.
- VONNEGUT, B.; LATHAM, D. J.; MORE, C. B.; HUNYADY, S. J. An explanation for anomalous lightning from forest fire clouds. **Journal of Geophysical Research**, n. 100, p. 5.037–5.050, mar. 1995.
- WAGNER, P. B.; TELFORD, J. W. Cloud dynamics and an electric charge separation mechanism in convective clouds. **J. Rech. Atmos.**, v. 15, p. 97–120, 1981.
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: An introductory survey**. San Diego: Academic Press, INC, 1977. 467 p. ISBN 0-12-732950-1.
- WHIPPLE, F. J. W.; SCRASE, F. J. Point discharge in the electric field of the earth. **Meteorological Office of Geophysical Memoirs**, Lond., v. 7, n. 68, p. 1–20, 1936.
- WILLETT, J. C.; BAILEY, J. C.; IDONE, V. P.; EYBERT-BERARD, A.; BARRET, L. Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13275–13286, set. 1989.
- WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, n. 94, p. 13.151–13.167, sep. 1989.

- WILLIAMS, T.; KELLEY, C. **Gnuplot**: An interactive plotting program. [S.l.], 2007. 205 p. Version 4.2 organized by: Hans-Bernhard Bröker, Ethan A Merritt, and others. Disponível em: <<http://www.gnuplot.info/documentation.html>>.
- WILSON, C. A theory of thundercloud electricity. In: R. METEOR. SOC., 1956, London. **Proceedings...** London: R. Meteor. Soc., 1956. p. 297–317. Ser. A 236.
- WORKMAN, E. J.; REYNOLDS, S. E. Electrical activity as related to thunderstorm cell growth. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 30, p. 142–144, 1949.
- YAIR, Y.; LEVIN, Z.; ALTARATZ, O. Lightning phenomenology in tel aviv area from 1989 to 1996. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 9015–9025, abr 1998.

## ÍNDICE REMISSIVO

- BrasilDAT, 34
- cálculo de  $Z$ , 55, 61
- Circuito Elétrico Atmosférico Global, 27
- Conclusões, 80
- contaminações, 58
- corrente corona, 27
- descargas de retorno, 30
  - subsequentes, 52
- eficiência
  - Antena Lenta, 50
  - BrasilDAT, 41
- evapotranspiração, 19
- líder
  - conectante, 31
  - contínuo, 31
  - escalonado, 30
- nuvens, 19
  - cirrus, 20
  - convectivas, 19
  - cumulonimbus, 20
  - cumulus, 20
  - stratus, 20
- PostgreSQL, 51
- Processo
  - colisional indutivo, 24
  - colisional não indutivo, 25
- Python, 48
- relâmpagos, 30
  - entre-nuvens, 30
  - intranuvens, 30
  - no ar, 30
  - nuvem-solo, 30
  - nuvem-solo negativo, 30
  - nuvem-solo positivo, 30
  - solo-nuvem, 30
- resultados, 63
  - análise dos, 76
- térmicas, 19
- Teoria
  - convectiva de eletrificação, 23
  - precipitativa de eletrificação, 24
- tripolo eletrostático, 21

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)