

**TESE DE DOUTORADO**

**NOVA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE  
LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**CLÁUDIA REJANE DE MESQUITA**

---

**TESE DE DOUTORADO**

**NOVA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE  
LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**CLÁUDIA REJANE DE MESQUITA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica  
Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE  
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG  
BELO HORIZONTE  
DEZEMBRO - 2006**

---

---

## AGRADECIMENTOS

Neste espaço procuro demonstrar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Sei que as palavras são insuficientes, mas quero que saibam que guardo comigo cada esforço, cada apoio, cada amizade e cada momento compartilhado durante todo esse tempo de convívio.

Agradeço especialmente ao Prof. Silvério Visacro por sua dedicação e confiança. Seu constante incentivo e entusiasmo propiciaram não apenas a realização desta investigação, mas também meu amadurecimento profissional e a inquietude em deixar uma contribuição no universo do “estar no mundo” dos homens.

A toda a equipe do LRC, Antônia, Fernando, Alberto, Fuad, Maria Aparecida, Renato Zica, Marcelo Almeida, Guilherme Murici, Rômulo, Marcus Vinícius, Leandro, Priscilla, Júlia, Luiz Mariano, Breno, Guilherme, Vanessa, Walmir, Alexis, e especialmente a amiga Rosilene por sua dedicação e constante companheirismo nesta longa caminhada profissional. A cada membro o meu sincero reconhecimento pela contribuição na realização deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer ao apoio técnico do professor José Luiz Silvino e dos colegas Werverson Rocha, Alisson Ladeira Senna Filho e José Luiz Cerqueira Lima.

A professora Maria Helena pelo incentivo, amizade e apoio. Aos professores Amilton e Peterson pelas contribuições.

Aos colegas da CEMIG, Armando Cazetta, Luiz Carlos Cherchiglia, Vander de Souza, Gustavo Enésio, Marcone Borges, Ricardo Martins, Marcelo Nogueira, Wesley e especialmente ao Maurício Meniconi, por toda dedicação, prontidão e apoio durante a execução deste trabalho.

Aos meus queridos pais, irmãos e familiares pelo carinho e incentivo. Pela reconhecida dedicação e paciência do meu marido Renato. A nossa filha Clara, que apesar de tão pequena já se tornou um ser valioso em minha vida.

---

---

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS DA TESE	2
1.3 REALIZAÇÕES FUNDAMENTAIS DESTE TRABALHO	3
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
<b>2. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>7</b>
2.1 FENÔMENO DESCARGA ATMOSFÉRICA	7
2.1.1 INTRODUÇÃO	7
2.1.2 DESCARGA NEGATIVA DESCENDENTE	9
2.1.3 OUTROS TIPOS DE DESCARGAS NUVEM-SOLO	10
2.2 PARÂMETROS TÍPICOS ASSOCIADOS ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: APLICADOS AOS LLS'S	11
2.2.1 INTRODUÇÃO	11
2.2.2 PARÂMETROS DISPONIBILIZADOS PELOS LLS'S	12
<b>3. CAMPOS IRRADIADOS PELAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>15</b>
3.1 INTRODUÇÃO	15
3.2 MODELOS DE CORRENTE DE RETORNO APLICADOS AOS LLS'S	16
3.2.1 MODELOS DE ENGENHARIA	17
3.2.2 MODELOS DE ENGENHARIA DO TIPO LINHA DE TRANSMISSÃO	18
3.2.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE ENGENHARIA	20
3.2.4 MODELO SIMPLIFICADO PARA O CÁLCULO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO ORIGINADO PELA DESCARGA	21
3.2.5 CÔMPUTO DO CAMPO EM IRRADIADO UTILIZANDO O MODELO TL	23
3.3 PADRÕES DE COMPORTAMENTO DOS CAMPOS (DISTANTES) ORIGINADOS PELOS DIVERSOS TIPOS DE DESCARGAS	26
3.3.1 DESCARGA NUVEM-SOLO NEGATIVA	28
3.3.2 DESCARGA NUVEM-SOLO POSITIVA	30
3.3.3 DESCARGAS INTRANUVENS	31

---

---

<b>3.4 AVALIAÇÕES PRELIMINARES DA INFLUÊNCIA DE FATORES DE NATUREZA FÍSICA NA PROPAGAÇÃO DOS CEM'S</b>	<b>32</b>
<b><u>4. IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS E CRITÉRIOS ADOTADOS PELOS LLS'S PARA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS</u></b>	<b><u>35</u></b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>35</b>
<b>4.2 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>37</b>
4.2.1 TÉCNICA DE INDICAÇÃO DE DIREÇÃO	37
4.2.2 TÉCNICA DO TEMPO DE CHEGADA	38
4.2.3 TÉCNICA DAS INTERSEÇÕES CIRCULARES	40
4.2.4 TÉCNICA INTERFEROMÉTRICA	41
4.2.5 CONSIDERAÇÕES - MEDIDAS DE QUALIDADE	43
<b>4.3 CRITÉRIOS ADOTADOS PELOS LLS'S PARA DISCRIMINAÇÃO DOS TIPOS DE DESCARGAS</b>	<b>46</b>
4.3.1 SENSOR DF	46
4.3.2 SENSOR LPATS	49
4.3.3 SENSOR IMPACT	50
4.3.4 SENSOR SAFIR	53
4.3.5 SENSORES GERAÇÃO LS	55
<b>4.4 MODELO ADOTADO PELOS LLS'S PARA ESTIMATIVA DO VALOR DE PICO DA CORRENTE DE RETORNO</b>	<b>55</b>
<b>4.5 CRITÉRIOS DE AGRUPAMENTO DE 'STROKES'</b>	<b>57</b>
<b><u>5. ANÁLISE CRÍTICA DOS MODELOS E CRITÉRIOS ADOTADOS PELOS LLS'S</u></b>	<b><u>59</u></b>
<b>5.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>59</b>
<b>5.2 MODELOS PARA CORRELAÇÃO ENTRE OS CAMPOS MEDIDOS E INTENSIDADE DA CORRENTE DE DESCARGA</b>	<b>60</b>
5.2.1 REVISÃO DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS PARA CALIBRAÇÃO DA INTENSIDADE DE CORRENTE DE LLS'S	61
5.2.2 REAVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE ESTIMATIVA DE CORRENTE DOS LLS'S	67
5.2.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS PROVIDOS POR MODELOS PUBLICADOS NA LITERATURA PARA FINS DE ANÁLISE APLICADA AO LLS-MG	71

---

---

<b>5.3 CRITÉRIOS DE DISCRIMINAÇÃO DO TIPO DE DESCARGA E ANÁLISE DA CONTAMINAÇÃO DE REGISTROS DE DESCARGAS NUVEM-SOLO POR DESCARGAS DE NUVENS</b>	<b>75</b>
<b>5.4 CRITÉRIOS DE AGRUPAMENTO DE "STROKES"</b>	<b>84</b>
5.4.1 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS CRITÉRIOS ESPACIAIS	84
5.4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS CRITÉRIOS TEMPORAIS	87
<b><u>6. ANÁLISE DAS FONTES POTENCIAIS DE ERROS NAS INDICAÇÕES DOS LLS'S</u></b>	<b>95</b>
<b>6.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>95</b>
<b>6.2 INDICAÇÃO E DETALHAMENTO DAS FONTES POTENCIAIS DE ERROS</b>	<b>96</b>
6.2.1 ERROS DECORRENTES DA PROPAGAÇÃO DO CAMPO	96
6.2.2 ERROS LOCAIS	98
6.2.3 OUTRAS LIMITAÇÕES DO SISTEMA	99
6.2.4 NÃO VERTICALIDADE DO CANAL DE DESCARGA	101
<b>6.3 LIMITAÇÕES NO DESEMPENHO DOS LLS'S E SUAS IMPLICAÇÕES NOS DADOS GERADOS</b>	<b>102</b>
<b>6.4 RELEVÂNCIA DA INFLUÊNCIA DE FATORES DE NATUREZA FÍSICA (SOLO E RELEVO) NAS INDICAÇÕES DOS SISTEMAS</b>	<b>106</b>
<b>6.5 CONCLUSÕES APLICÁVEIS ÀS CONDIÇÕES PARTICULARES DE MINAS GERAIS</b>	<b>106</b>
<b><u>7. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LLS</u></b>	<b>109</b>
<b>7.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>109</b>
<b>7.2 DIAGNÓSTICO DO LLS</b>	<b>110</b>
<b>7.3 FORMATO DE DADOS DO LLS</b>	<b>111</b>
<b>7.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE LLS</b>	<b>115</b>
7.4.1 ANÁLISE DA PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO DE LLS	115
7.4.1.1 CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO	116
7.4.1.2 MÉTODO ALTERNATIVO PARA QUANTIFICAR A PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO	118
7.4.1.3 PRECISÃO DE LOCALIZAÇÃO NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL	119
7.4.2 ANÁLISE DOS DEMAIS PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LLS	121
<b><u>8. IMPLEMENTAÇÃO DE UMA NOVA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DO LLS-MG</u></b>	<b>127</b>
<b>8.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>127</b>
<b>8.2 METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE LLS UTILIZANDO "DADOS LOCAIS"</b>	<b>128</b>

---

---

8.2.1 MEDIÇÃO INDIRETA DA CORRENTE DE DESCARGA	128
8.2.2 DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO E SEU PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	134
8.2.3 TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	136
<b>8.3 CONSTITUIÇÃO DA REDE DE REFERÊNCIA</b>	<b>142</b>
8.3.1 ESTUDO DE ESCOLHA DOS LOCAIS PARA INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS	143
8.3.2 SELEÇÃO INICIAL DOS LOCAIS DE INSTALAÇÃO DOS REGISTRADORES	150
8.3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS ESCOLHIDOS	152
<b>8.4 IMPLANTAÇÃO DA REDE DE REFERÊNCIA</b>	<b>156</b>
<b>8.5 ANÁLISES PRELIMINARES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DO LLS-MG</b>	<b>158</b>
8.5.1 ATRASOS DE PROPAGAÇÃO DO SINAL ELETROMAGNÉTICO	159
8.5.2 ATENUAÇÃO DO SINAL ELETROMAGNÉTICO	162
8.5.3 DISCUSSÃO PRELIMINAR SOBRE OS RESULTADOS ALCANÇADOS	164
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>167</b>
<hr/>	
9.1 INTRODUÇÃO	167
9.2 OBJETIVO DA TESE	168
9.3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E CONCLUSÕES PRELIMINARES	169
9.4 PROPOSTA DE CONTINUIDADE	171
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	

---

---

## RESUMO

Os Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas (LLS's) consistem numa das ferramentas mais evoluídas para análise de incidência de descargas atmosféricas. Tais sistemas utilizam a medição remota do campo eletromagnético irradiado pela corrente da descarga para determinar a localização do ponto de incidência, o instante de ocorrência e outros dados de grande relevância para aplicações na engenharia de proteção.

Como qualquer sistema físico, os LLS's são susceptíveis a erros em suas medições. Estes erros podem resultar de considerações assumidas na concepção do sistema e, principalmente, da influência do meio ambiente local na propagação do sinal eletromagnético, antes do mesmo ser detectado pelas estações remotas do LLS. O fabricante tenta compensar estes erros utilizando correções e ajustes implementados através de análises estatísticas dos dados indicados pelos sensores e redundâncias de informações. No entanto, eventuais erros sistemáticos, como os erros associados ao relevo e à condutividade do solo, podem não ser corrigidos por tais compensações.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia inovadora capaz de permitir a calibração efetiva do LLS. Esta metodologia se baseia na obtenção de dados de referência correspondentes a eventos de descargas reais para comparação com as indicações do LLS para a mesma ocorrência. Para gerar tais referências, foi necessário a concepção e o desenvolvimento de um dispositivo capaz de registrar o instante da incidência da descarga e a forma da onda de corrente obtida através de medição indireta (a partir do campo magnético associado à corrente). Utilizando-se os dados do LLS instalado em Minas Gerais, foi projetada a disposição geográfica de uma rede destes dispositivos no Estado para fins de calibração do sistema local. Preliminarmente, uma parcela desta rede foi instalada em locais de alta incidência de descargas para possibilitar a coleta de um volume significativo de dados de referência num curto intervalo de tempo.

---



## ABSTRACT

Lightning Location Systems (LLSs) are advanced tools to provide data related to lightning occurrence. They employ remote measurements of electromagnetic field that is irradiated by lightning current to provide relevant information for lightning protection application.

As any physical system, the LLSs are submitted to errors in their indications. Such errors may result from the hypothesis assumed on system conception and mainly from the influence of environment factors on the propagation of electromagnetic signal before it is detected at the system remote stations. The manufacturer tries to compensate the system errors by means of corrections and adjustments, which are implemented at LLS from statistical analysis of their indications and redundancy. Nevertheless, eventual systematic errors, such as those ones associated to the influence of relief and soil conductivity, may be not corrected by such compensation.

In this work an innovative methodology able to allow an effective calibration of LLS was developed. Its approach is based on the collection of reference data related to actual lightning events to be compared to LLS registers. In order to generate such references, a special electronic device was developed. It is able to register the instant of lightning occurrence and the current waveform, by means of non-direct measurement of the magnetic field associated to the lightning current. Using data from the LLS installed in Minas Gerais State, the geographic distribution of such electronic devices was designed to compose a local network intended to calibrate this system. As a first step, a parcel of the network was installed, placing the devices at sites of recognized high density, in order to collect a significant amount of data in a short period of time.

---

---

---

# 1 Introdução

## *1.1 Considerações Preliminares e Motivação*

As descargas atmosféricas constituem-se na principal fonte de danos e distúrbios em sistemas de energia elétrica e de telecomunicações. Sua ocorrência promove riscos a estruturas, sendo ainda uma relevante causa de mortes.

Os sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas (LLS's, do inglês *Lightning Location Systems*) consistem em ferramenta muito sofisticada, que utilizam medições remotas de pulsos eletromagnéticos associados aos campos emitidos pela corrente de descarga e detectados numa rede de estações fixas para computar a localização do ponto de incidência da descarga, o instante de ocorrência e alguns de seus parâmetros associados (polaridade, intensidade estimada da corrente de descarga e sua multiplicidade).

A partir do conhecimento científico sobre o fenômeno, estes sistemas assumem determinados critérios, definidos segundo padrões de comportamento do campo eletromagnético irradiado, que compõem uma "assinatura" para os diferentes tipos de descargas atmosféricas, para discriminar a origem dos pulsos medidos.

A despeito de toda a sofisticação desses sistemas, em função da complexidade do fenômeno, existem questionamentos com relação aos critérios adotados para discriminação dos eventos, até porque tais critérios não são reportados na literatura de forma nítida, possivelmente em função do interesse do fabricante no sigilo industrial de seus produtos.

---

Ademais, como todo sistema físico, os LLS's apresentam erros em suas indicações que resultam das aproximações dos modelos adotados para o cômputo da descarga e da influência de fatores de natureza física (como as características do solo e do relevo) no pulso eletromagnético irradiado pela descarga em seu caminho de propagação até as estações detectoras. O fabricante adota certos procedimentos para calibração do sistema, que objetivam reduzir os erros de suas indicações. Entretanto, estes procedimentos são baseados em redundância e experiências realizadas com o sistema em regiões particulares. Isto limita a eficácia desses procedimentos para aplicação generalizada aos sistemas dispostos nas diferentes partes do planeta. Avaliações apontam para a necessidade de estudos locais, que considerem as particularidades da região de cobertura de cada sistema para efetuar a sua calibração.

O quadro descrito suscita a necessidade de desenvolver investigações consistentes para se assegurar um grau satisfatório de confiabilidade às informações providas pelos LLS's, que tenham em conta as condições particulares de ambiente da região de cobertura do sistema.

Foi essa necessidade que motivou a realização no LRC<sup>1</sup> do projeto de pesquisa no qual se inserem as realizações da presente tese de doutorado. Em função do interesse da CEMIG<sup>2</sup> na melhoria do desempenho de seu sistema de detecção, instalado no Estado de Minas Gerais como LLS pioneiro da América Latina, a empresa deu suporte financeiro para o desenvolvimento da investigação que configura o projeto.

## ***1.2 Objetivos da Tese***

Neste contexto, este trabalho de tese tem por objetivo desenvolver contribuições para possibilitar a melhoria de desempenho do LLS.

Tais contribuições são organizadas segundo duas perspectivas. A primeira, de mais ampla abrangência, consiste na avaliação dos critérios adotados pelo sistema para

---

<sup>1</sup> LRC (Lightning Research Center) – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (Resultado da parceria CEMIG-UFMG)

<sup>2</sup> CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

---

discriminar os eventos e na identificação e avaliação dos modelos adotados para a estimação dos parâmetros. A outra perspectiva consiste no desenvolvimento de metodologia capaz de possibilitar a aferição do sistema, através da indicação das correções e ajustes necessários, tendo em conta as características particulares do ambiente da região de cobertura do sistema. Há indicações da possibilidade de determinação da influência destas características nos resultados indicados (regionalmente), a partir da obtenção de *dados locais* sobre as descargas, que constituam referências para comparação com os registros obtidos pelo LLS.

### ***1.3 Realizações Fundamentais deste Trabalho***

As realizações principais deste trabalho de doutorado consistem na exploração das duas perspectivas indicadas.

Inicialmente, apresentam-se avaliações para identificar as fontes potenciais de erros nas indicações do sistema e as críticas aos modelos e critérios adotados para estimativa dos parâmetros de descarga. São destacados de forma objetiva os aspectos relevantes do fenômeno descarga atmosférica que subsidiam as avaliações, dentre os quais a configuração, os modelos e os critérios assumidos pelos LLS, com ênfase no sistema híbrido constituído por sensores do tipo IMPACT e LPATS instalado no Estado de Minas Gerais.

A metodologia elaborada baseia-se na aplicação de um dispositivo especial desenvolvido no LRC, capaz de registrar os dados básicos de descargas coletados em locais definidos. Através de uma rede de dispositivos é possível a obtenção de dados para referência em vários pontos da região de cobertura do sistema. A partir da constituição de uma base de dados significativa para diversos locais pode-se identificar a faixa de erro associada às indicações do sistema para cada local, possibilitando-se efetuar a correção dos resultados indicados, com a minimização dos erros.

---

---

## 1.4 Organização do texto

A realização dos objetivos citados está expressa no presente texto, organizado em nove capítulos.

Após este primeiro capítulo introdutório, no *capítulo dois* são considerados os aspectos objetivos relativos ao fenômeno descarga atmosférica e os parâmetros disponibilizados pelos LLS's.

O *capítulo três* descreve resumidamente os modelos de corrente de retorno, com ênfase ao modelo do tipo linha de transmissão. Neste capítulo, são também considerados aspectos relativos às especificidades da irradiação dos campos eletromagnéticos gerados pelos diferentes tipos de descargas e à propagação dos campos para fins de avaliação dos modelos adotados pelos LLS's na determinação dos parâmetros de descarga.

No *capítulo quatro* estão descritas as técnicas mais usuais para a localização das descargas atmosféricas, os critérios adotados pelos LLS's para discriminação dos tipos de descargas, o modelo adotado para estimativa do valor de pico da corrente de retorno e, por último, os critérios de agrupamento de *strokes*.

As críticas aos modelos de propagação do campo eletromagnético adotados pelos LLS's para estimativa da intensidade da corrente de descarga são consideradas no *capítulo cinco*. Neste capítulo é considerada também uma análise crítica da influência dos critérios de agrupamento de *strokes* e de discriminação do tipo de descarga nos dados gerados pelo LLS.

O *capítulo seis* relaciona as principais fontes de erros nos dados gerados pelos LLS's, bem como uma análise da influência das condições locais de solo e relevo na obtenção de dados de descargas atmosféricas, sendo dado enfoque ao Estado de Minas Gerais. Ainda neste capítulo é discutida a influência do desempenho do LLS, no que diz respeito a sua eficiência de detecção, nos dados gerados pelo sistema.

---

No *capítulo sete* são propostos métodos alternativos para se avaliar o desempenho do LLS utilizando a própria base de dados gerada na central de processamento do sistema.

No *capítulo oito* é descrita a metodologia proposta para a calibração do sistema utilizando dados locais. São apresentados também alguns estudos e análises preliminares potenciais na implementação da metodologia proposta. As conclusões deste trabalho, que inclui um resumo das atividades desenvolvidas, bem como a indicação de propostas para continuidade da investigação, encontram-se no *capítulo nove*.

---

---

---



# 2 Descargas Atmosféricas

## *2.1 Fenômeno Descarga Atmosférica*

### *2.1.1 Introdução*

Neste capítulo são tecidos alguns comentários sucintos e objetivos sobre as descargas atmosféricas, tão somente com o objetivo de prover informações mínimas necessárias à compreensão dos diversos desenvolvimentos apresentados no texto da tese.

De forma simplificada, a descarga atmosférica pode ser descrita como uma descarga elétrica que ocorre na atmosfera. “Trata-se de um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra” [Visacro, 2005].

Usualmente, as descargas são produzidas por nuvens de tempestades (“*Thundercloud – cumulonimbus*”). A distribuição e movimento das cargas elétricas nas nuvens são complexos e mudam continuamente à medida que a tempestade evolui. Porém, de uma forma simplificada, a distribuição de cargas nas nuvens pode ser descrita como configurada por uma camada constituída por centros de cargas negativas na base da nuvem, por uma região de cargas positivas na porção superior da nuvem e por pequenos bolsões de cargas positivas,

---

que podem ocorrer na base negativa da nuvem, conforme é sugerido na figura 2.1 [Kridler, 1986] [Uman, 1984].

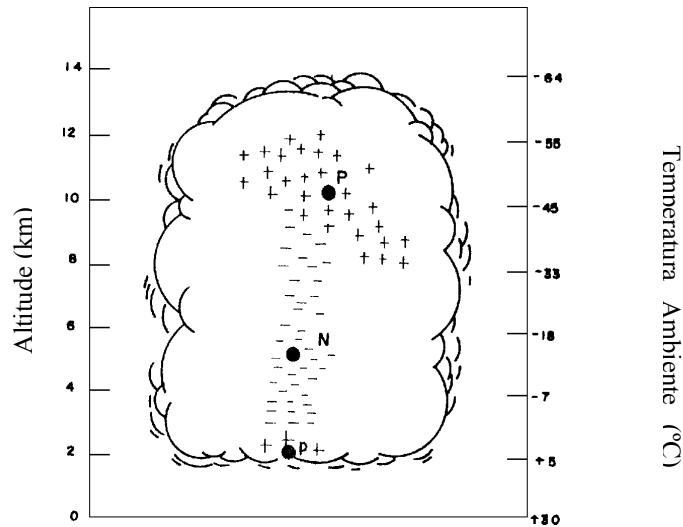


Fig 2.1 - Distribuição típica de cargas em uma nuvem de tempestade. Figura adaptada da referência [Uman, 1984].

As descargas atmosféricas podem ocorrer dentro das nuvens, entre nuvem e terra, entre nuvem e estratosfera e mesmo entre duas nuvens. A maior parte das descargas ocorre dentro das nuvens, sendo estas denominadas de descargas intranuvens. Apesar de não serem tão freqüentes, apenas da ordem de 20%, as descargas nuvem-solo têm sido mais estudadas, devido ao fato destas implicarem diretamente danos materiais e à vida terrestre.

As descargas atmosféricas entre nuvens e terra podem ser classificadas segundo a polaridade da carga que efetivamente é transferida para o solo (negativa ou positiva) e a direção da evolução do canal de descarga (descendente ou ascendente), como indicado na figura 2.2:

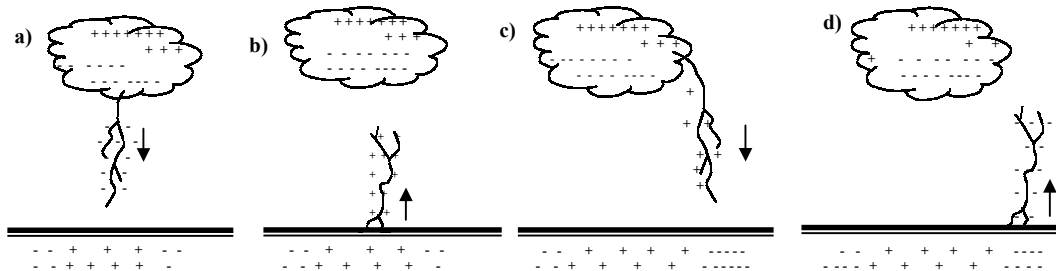


Fig 2.2 - Os quatro tipos de descargas nuvem-solo, definidos pela polaridade da carga da nuvem e a direção de propagação do canal. (a) negativa descendente; (b) negativa ascendente; (c) positiva descendente; (d) positiva ascendente. As setas indicam a direção de propagação do canal de descarga.

Dentre os quatro tipos de descarga, o mais comum é das descargas descendentes negativas (representam cerca de 90% das descargas nuvem-solo). O próximo item descreve sucintamente a evolução deste tipo de descarga.

### 2.1.2 Descarga Negativa Descendente

A descarga nuvem-solo normalmente se inicia com uma descarga dentro da nuvem (“*Preliminary breakdown*”) em regiões de alto campo elétrico (centros de carga da nuvem). Em seguida, têm início processos disruptivos, que através de rupturas sucessivas no ar formam o chamado canal precursor de descarga (“*stepped-leader*”), ilustrado na figura 2.3.

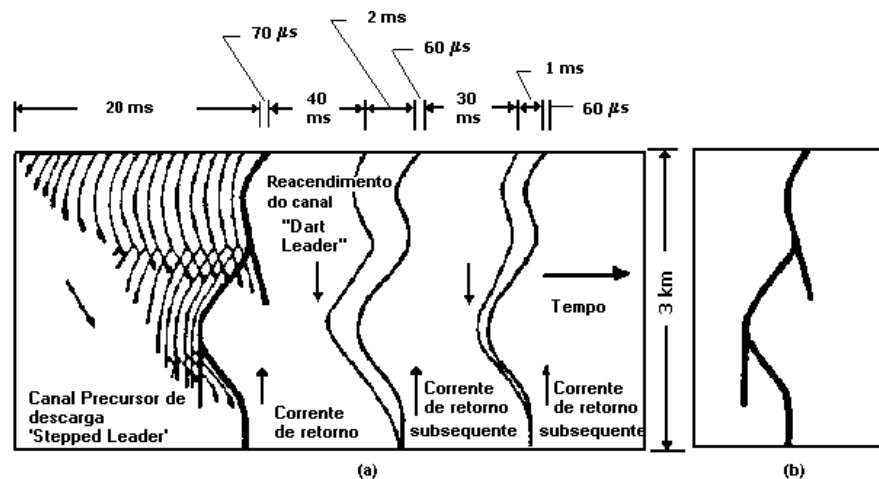


Fig 2.3 - (a) Canais e as correntes de retorno fotografados com um filme em movimento; (b) a mesma descarga fotografada com um filme estacionário. Figura adaptada da referência [Uman, 1989].

Quando o canal descendente aproxima-se do solo, o campo elétrico na superfície torna-se intenso o suficiente para causar a indução de um ou mais canais ascendentes “concorrentes” em estruturas ou mesmo no próprio solo. Os canais evoluem até um último salto, que promove a conexão efetiva entre o canal descendente e um dos canais ascendentes. Após a conexão ocorre a corrente de retorno (“*return stroke*”), que constitui-se simplesmente no descarregamento da carga acumulada no entorno do canal. Tal corrente se propaga rapidamente através do caminho ionizado que se formou pela propagação do canal descendente. A corrente de retorno neutraliza, assim, grande parte da carga depositada ao

longo do canal. O valor típico do pico da corrente de retorno é 30 kA, podendo alcançar valores até algumas centenas de quiloampères [Uman, 1989].

Após algumas dezenas de milissegundos pode ter início o recarregamento do canal de descarga (“*dart-leader*”), alimentado por outro centro de cargas da nuvem, levando a uma corrente de retorno subsequente (“*subsequent return stroke*”). O processo de recarregamento do canal é usualmente mais rápido que a formação do canal precursor de descarga. No processo de recarregamento, ocorre o depósito de cargas ao longo do canal, usualmente menor do que a carga depositada na formação do canal precursor. Conseqüentemente, também a corrente de retorno apresenta usualmente menor amplitude. Normalmente o canal é pouco ramificado, diferentemente do canal precursor de descarga.

Cerca de 14 a 20% dos casos a descarga atmosférica (“*flash*”) é constituída por apenas uma descarga de retorno (“*stroke*”). Nos casos restantes, uma boa parte das descargas negativas descendentes possuem de duas a quatro descargas [Rakov e Huffines, 2003].

As descargas subsequentes se configuram pelo recarregamento do canal de descarga. Uma parte destas utiliza integralmente o mesmo canal onde houve a primeira corrente de retorno, incidindo no mesmo ponto (50% no caso de torres instrumentadas, [Visacro et al, 2004] e [Berger et al, 1975]). Porém, em cerca de 50% das descargas múltiplas nuvem-solo o canal descendente utiliza apenas parte deste canal, tendo a sua parte inferior traçando um caminho diferente para terra. Isto resulta na incidência em pontos distintos [Rakov e Huffines, 2003].

### ***2.1.3 Outros Tipos de Descargas Nuvem-Solo***

Com relação às **descargas positivas**, a literatura técnica atribui um percentual inferior a 10% do total das ocorrências para terra [Uman e Krider, 1989]. Apesar desde pequeno percentual, elas merecem atenção, uma vez que a elas estão associados valores de pico de corrente e carga total transferida para terra, normalmente superiores àqueles associados às descargas negativas, indicando maior severidade da correspondente solicitação

---

[Rakov, 1998a]. As descargas positivas são normalmente compostas por uma única corrente de retorno.

As **descargas ascendentes** são raras, sendo a positiva ascendente (figura 2.2.d) a mais rara dos quatro tipos de descargas nuvem-solo [Uman,1989].

Maiores detalhes acerca da descrição da evolução do fenômeno, bem como da caracterização das descargas atmosféricas relativa aos intervalos de tempo, forma de onda das correntes, valores de amplitude etc., podem ser encontrados na referência [Visacro, 2005].

## ***2.2 Parâmetros Típicos Associados às Descargas Atmosféricas: Aplicados aos LLS's***

### ***2.2.1 Introdução***

Para a definição e dimensionamento das metodologias, procedimentos e práticas de proteção de sistemas contra os efeitos do fenômeno, é necessário conhecer as características da solicitação correspondente. Tal conhecimento é obtido através da caracterização dos parâmetros típicos associados às correntes de descargas e aos campos eletromagnéticos irradiados por estas. É também fundamental o conhecimento dos parâmetros geográficos e cronológicos de incidência (densidade de descargas locais, períodos críticos de ocorrência etc.), na perspectiva de identificação do grau de severidade local quanto ao fenômeno.

Para a caracterização da descarga atmosférica surgiram diversas propostas de medição de parâmetros de descargas. Tais medições podem ser realizadas de uma forma direta ou indireta. A medição direta inclui a aplicação das torres instrumentadas e do lançamento de foguetes para a indução de descargas. Neste tipo de medição, os parâmetros são obtidos diretamente da análise da forma de onda da corrente de retorno. A medição indireta consiste em utilizar um dos efeitos originados da descarga atmosférica (usualmente gerados pela corrente de descarga) para estimar os parâmetros da corrente associada. Tais

---

efeitos incluem o campo eletromagnético, a luminosidade, o som e a variação de temperatura. Sistemas como os LLS's, os Detectores Ópticos instalados em satélite para observação da atividade atmosférica, os Medidores de Campo Elétrico e/ou Magnético, os Contadores de Descargas são exemplos de sistemas de medição indireta. A descrição dos principais sistemas de medição é apresentada no capítulo 2 da referência [Mesquita, 2001] e também na referência [Visacro, 2005].

No que diz respeito ao desenvolvimento deste trabalho, são considerados somente os parâmetros de interesse aplicados aos LLS's. Informações mais detalhadas acerca dos parâmetros da corrente de retorno, obtidos através de medições diretas, foram publicadas em trabalhos como [Visacro, 2004], [Berger et al, 1975], [Anderson e Eriksson, 1980] referentes a torres instrumentadas e [Uman et al, 1996], [Uman et al, 1997] relativos a descargas induzidas por foguetes.

### ***2.2.2 Parâmetros Disponibilizados pelos LLS's***

Todos os parâmetros de descargas atmosféricas disponibilizados pelos LLS's são obtidos a partir do campo irradiado pela descarga. Tal campo se propaga sobre a superfície terrestre e é detectado e medido pelas estações remotas do sistema. O capítulo 4 deste trabalho é dedicado exclusivamente às descrições das técnicas de localização do ponto de incidência da descarga, critérios e algoritmos adotados pelos LLS's. Neste ponto do texto, são apenas definidos os principais parâmetros disponibilizados por este tipo de sistema, os quais são:

- Localização;
- Instante de ocorrência da descarga;
- O valor de pico da corrente de retorno;
- Multiplicidade da descarga;
- Tempo de Subida e Largura de Pulso do sinal eletromagnético irradiado pela descarga;

A **Localização** (Latitude e Longitude) do ponto de incidência da descarga atmosférica é calculada segundo as técnicas de indicação de direção, de tempo de chegada,

---

de interseções circulares e interferométrica, descritas nos itens 4.2.1 a 4.2.4 deste trabalho. A técnica aplicada depende de cada tipo de sistema. Associado à informação da localização são disponibilizados parâmetros como o “chi-quadrado” e os comprimentos dos semi-eixos da elipse de solução da descarga. Tais parâmetros permitem a análise da qualidade da informação de localização e estão descritos no item 4.2.5.

O **Instante de ocorrência** da descarga é calculado pela central do sistema, que considera os instantes de chegada do sinal eletromagnético (EM) relatados pelas estações remotas participantes da solução da descarga e a velocidade de propagação do campo EM sobre a superfície terrestre (assumida como a velocidade da luz). Usualmente os LLS's são sincronizados pelo uso do sistema GPS ("*Global Positioning System*").

O **valor de pico da corrente de retorno** é um parâmetro "estimado" a partir da informação das intensidades do sinal EM irradiado pela descarga medidas nas estações remotas, como detalhado no item 4.4.

O parâmetro **Multiplicidade da descarga** consiste no número de correntes de retorno (*strokes*) que compõem uma descarga atmosférica (*flash*). Os LLS's possuem a capacidade de agrupar os *strokes* segundo critérios de agrupamento preestabelecidos, considerados no item 4.5.

O **Tempo de Subida do pulso EM** é definido como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que a intensidade do sinal excede o limiar de sensibilização da estação (*threshold*) e o instante de pico do sinal. A **Largura de Pulso** é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante de pico do sinal e o instante em que o sinal retorna ao valor do limiar de sensibilização. Demais considerações acerca destes parâmetros são tratadas no item 4.3 deste trabalho.

---

---

---



# 3 Campos Irrradiados pelas Descargas Atmosféricas

## 3.1 *Introdução*

O fluxo de corrente transitória de variação muito rápida ao longo do canal de descarga dá origem à irradiação de um campo EM (eletromagnético), que se propaga a partir do percurso da corrente. O cálculo dos parâmetros da corrente de retorno a partir desse campo requer o conhecimento da geometria do canal de descarga e o modelamento do desenvolvimento no tempo e no espaço da distribuição de carga e da onda de corrente de retorno em todos os pontos do canal.

A literatura técnica apresenta os chamados Modelos de Corrente de Retorno os quais determinam a distribuição temporal e espacial da corrente no canal da descarga. Um modelo de corrente de retorno é definido no trabalho [Gomes e Cooray, 2000] como *"uma construção matemática, interpretada verbalmente, numericamente ou graficamente, que possa representar as propriedades observadas de uma corrente de retorno"*. Segundo Rakov

---

[Rakov e Uman, 1998], estes modelos são classificados em quatro grupos: modelos da dinâmica dos gases (“físico”), modelos eletromagnéticos, modelos de circuitos de parâmetros distribuídos e modelos de engenharia.

Os modelos da dinâmica dos gases e eletromagnéticos são modelos que apresentam maior complexidade. Porém, permitem a representação de qualquer que seja a geometria do canal. Já os modelos de parâmetros distribuídos e os de engenharia são modelos mais simplificados, onde o canal é considerado uma linha vertical e a velocidade de propagação da onda de corrente é usualmente considerada constante. Para determinadas aplicações práticas, os dois últimos modelos se mostram suficientemente representativos.

Um aspecto característico dos modelos de engenharia é a sua simplificação, uma vez que apresentam um número pequeno de parâmetros ajustáveis. Nestes modelos, a distribuição temporal e espacial da corrente no canal é determinada a partir de características de descargas atmosféricas obtidas através de dados coletados por torres instrumentadas ou em medições de descargas induzidas (valor de corrente na base do canal, velocidade de propagação da frente de onda da corrente de retorno etc.).

### ***3.2 Modelos de Corrente de Retorno Aplicados aos LLS's***

Devido à sua simplicidade e por apresentarem boa representatividade quando da relação entre as intensidades de campo e de corrente, os modelos de engenharia têm sido amplamente utilizados para fins de aplicação dos LLS's, especialmente os modelos do tipo linha de transmissão.

---

### 3.2.1 Modelos de Engenharia

Um modelo de Engenharia relaciona a corrente longitudinal do canal de descarga  $I(z',t)$  a uma determinada altura  $z'$  e tempo  $t$  à corrente na base do canal  $I(0,t)$ , a fim de se definir a distribuição de corrente ao longo do canal. As considerações adotadas por cada modelo buscam ajustar os campos eletromagnéticos gerados pela distribuição proposta aos resultados de campos observados ("medidos").

Estes modelos assumem uma série de simplificações, dentre elas:

- Canal de descarga vertical sem ramificações;
- Ausência de canais ascendentes;
- Velocidade da corrente de retorno constante;
- Solo considerado um plano condutor elétrico perfeito;
- Desconsideradas as reflexões da corrente no solo.

Os modelos de engenharia podem ser agrupados em duas categorias: os modelos do tipo linha de transmissão e os modelos do tipo fonte de corrente viajante. A diferença básica entre estas duas categorias é que, no tipo "**linha de transmissão**", a corrente injetada no canal de descarga é devida a uma fonte de corrente posicionada na base do canal, ao nível do solo, a partir de onde se propaga ascendentemente; no tipo "**fonte de corrente viajante**", a corrente injetada no canal de descarga é vista como aquela gerada por uma fonte de corrente que viaja junto à frente da corrente de retorno ascendente. Tal corrente injetada se propaga descendente. Apesar das direções de propagação da onda de corrente serem diferentes nas duas categorias de modelos, a direção da corrente é sempre a mesma (a carga de mesmo sinal é efetivamente transferida para o solo).

Como mencionado anteriormente, os modelos de maior interesse para os sistemas de localização de descargas atmosféricas existentes são os modelos do tipo linha de transmissão. Sendo assim, são considerados somente tais modelos.

---

### 3.2.2 Modelos de Engenharia do Tipo Linha de Transmissão

Nesta categoria de modelos, além do modelo original designado **Modelo de Linha de Transmissão (TL- "Transmission Line")**, incluem-se os modelos derivados deste: **Modelos Modificados de Linha de Transmissão (MTL- "Modified Transmission Line")** e ainda um modelo proposto por quatro pesquisadores (**MULS - "Master, Uman, Lin and Standler"**).

#### - Modelo TL

A onda de corrente introduzida na base do canal propaga-se para cima sem distorção e sem atenuação com velocidade constante  $v$ . Neste caso a corrente é a mesma em todos os pontos do canal, computando-se, entretanto, o tempo de trânsito desta até o ponto em consideração. Neste modelo, não é considerada a remoção de cargas depositadas ao longo do canal. A representação matemática deste modelo é:

$$\begin{aligned} i(z', t) &= i(0, t - \frac{z'}{v}) & z' \leq vt \\ i(z', t) &= 0 & z' > vt \end{aligned} \quad \text{Eq. 3.1}$$

onde  $i(z', t)$  é a corrente longitudinal do canal de descarga a uma determinada altura  $z'$  e instante  $t$  e  $i(0, t - \frac{z'}{v})$  é a corrente na base do canal retardada do tempo de  $z'/v$ .

#### - Modelos MTL's

Estes modelos diferem do modelo TL por considerar a atenuação da intensidade da corrente de retorno com a altura do canal. Porém consideram, ainda, a propagação da onda de corrente ascendente e sem distorção. A atenuação pode ser exponencial (**modelo MTLE** - desenvolvido por Nucci, [Nucci et al, 1990]) ou linear (**modelo MTLL** - desenvolvido por Rakov e Dulzon, [Rakov e Uman, 1998]).

A formulação matemática relativa ao **modelo MTLE** é:

$$\begin{aligned} i(z', t) &= i(0, t - \frac{z'}{v}) e^{-\frac{z'}{\lambda}} & z' \leq vt \\ i(z', t) &= 0 & z' > vt \end{aligned} \quad \text{Eq. 3.2}$$

A constante de decaimento  $\lambda$  é assumida por NUCCI como igual a 2 km [Rakov e Uman, 1998]. Esta constante não contempla as perdas existentes no canal.

O **modelo MTL** é representado pela seguinte formulação:

$$\begin{aligned} i(z', t) &= i(0, t - \frac{z'}{v}) \left(1 - \frac{z'}{H}\right) & z' \leq vt \\ i(z', t) &= 0 & z' > vt \end{aligned} \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde H é a altura total do canal de descarga

### - Modelo MULS

Este modelo, diferentemente dos anteriores, não é expresso simplesmente em termos da corrente na base do canal. Ele procura caracterizar melhor os processos associados ao fenômeno e, para tanto, a utilização de um maior número de parâmetros ajustáveis torna-se necessária.

Neste modelo consideram-se três tipos de corrente, cada uma associada a um determinado processo físico: corrente uniforme, corrente de disrupção e a corrente de corona.

A **corrente uniforme** é aquela considerada como a continuação da corrente do canal precursor de descarga. Esta corrente percorre o canal de descarga a partir de uma fonte na nuvem (a uma determinada altura). A **corrente de disrupção** é aquela relacionada à propagação ascendente da disrupção elétrica provocada pela frente de onda da descarga de retorno. Tal corrente apresenta curta duração. A onda de corrente de disrupção apresenta decaimento exponencial com a altura e a sua formulação matemática é a mesma apresentada no modelo MTLE, lembrando-se que neste caso  $\lambda$  é a constante de atenuação da corrente de disrupção. A **corrente de corona** é aquela resultante do deslocamento para dentro do canal e para baixo das cargas armazenadas no envelope de corona que envolve o canal. A contribuição dessa corrente é modelada através de fontes distribuídas ao longo do canal.

### 3.2.3 *Validação dos Modelos de Engenharia*

Qualquer modelo de corrente de retorno proposto é considerado aceitável se for capaz de descrever pelo menos alguns dados obtidos experimentalmente relativos ao fenômeno [Gomes e Cooray, 2000]. Os estudos de validação dos modelos de engenharia podem ser realizados segundo dois caminhos:

- Considerar uma forma de onda de corrente típica na base do canal e uma velocidade de propagação típica da corrente de retorno aplicando-as aos modelos. E então, comparar os campos obtidos pelos modelos e os campos típicos observados ("medidos").
- Considerar a forma de onda de corrente na base do canal e a velocidade de propagação medidas aplicando-as aos modelos. E então, comparar os campos obtidos pelos modelos e o campo observado (medido pelo sensor). A forma de onda e a velocidade de propagação utilizadas nos modelos, bem como os campos observados são referentes ao mesmo fenômeno físico.

Uma revisão de estudos de validação de diversos modelos de corrente de retorno é apresentada no trabalho [Rakov e Uman, 1998]. Tal estudo apresenta uma comparação dos resultados obtidos pelos modelos e medições de campos elétricos e magnéticos a algumas distâncias a partir do canal. Neste trabalho, pode-se verificar que, quando se trata da estimativa do pico inicial do campo associado ao pico inicial da corrente, o modelo TL a despeito de sua simplicidade apresenta resultados bastante satisfatórios. Tal simplicidade e representatividade, quando da relação entre intensidade de corrente e intensidade de campo (relação apresentada no item 3.2.5), justificam a adoção pelos LLS's de um modelo teórico-empírico para estimativa do parâmetro intensidade da corrente de retorno, descrito no item 4.4. Tal modelo caracteriza justamente o comportamento linear entre as intensidades de corrente e as de campo.

---

### 3.2.4 Modelo Simplificado para o Cálculo do Campo Eletromagnético Originado pela Descarga

A literatura apresenta um modelo simplificado para o cálculo do campo eletromagnético originado pela corrente de retorno, o qual é baseado na teoria de antenas [Uman et al, 1975]. Tal modelo permite uma análise do comportamento do campo a medida em que o observador se afasta da fonte de campo.

Na figura 3.1, é apresentada uma geometria simples para o canal de descarga. O qual é considerado como uma antena finita de altura  $H$  perpendicular a uma superfície perfeitamente condutora, que representa o solo.

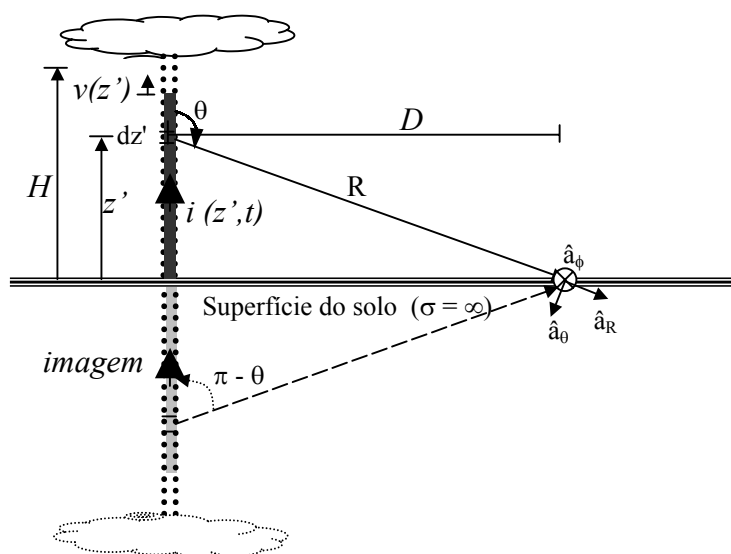


Fig. 3.1 – Frente de onda da corrente de retorno  $i(z',t)$  que flui, através do canal de descarga perfeitamente vertical, com velocidade  $v(z')$  para cima.

Nesta geometria, tem-se  $\mathbf{r}' = z'\hat{a}_z$  (vetor posição do elemento fonte). A fonte de corrente diferencial  $\mathbf{J}(\mathbf{r}',t-R/c)dV'$  torna-se  $i(z',t-R/c)dz'\hat{a}_z$ , (o símbolo linha utilizado nas formulações são referentes a fonte, os termos em negrito se refere a grandezas vetoriais e o

termo  $R/c$  representa o tempo de atraso para que um observador a uma distância  $R$  perceba o campo originado pela fonte). O Potencial vetor magnético numa posição  $\mathbf{r}$  e instante  $t$ ,  $\mathbf{A}(\mathbf{r},t)$ , pode ser calculado utilizando a equação:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}',t-R/c)}{R} dV' \quad \text{Eq. 3.4}$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m) e o vetor densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$  é:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad \text{Eq. 3.5}$$

O campo  $\mathbf{B}$  encontrado para um ponto de observação na superfície do solo a uma distância  $D$  da base do canal é dado por [Lin et al, 1979]:

$$B_\phi(D,t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^H \left[ \frac{\sin\theta}{R^2} i(z',t-R/c) + \frac{\sin\theta}{cR} \frac{\partial i(z',t-R/c)}{\partial t} \right] dz' \quad \text{Eq. 3.6}$$

Tal campo é resultado da sobreposição dos campos originados pelos elementos de corrente no canal e de suas respectivas imagens. A Primeira parcela se refere ao campo induzido que decai com o quadrado da distância e a última se refere ao campo irradiado (distante) que decai com a distância.

O campo elétrico pode ser encontrado a partir do potencial vetor  $\mathbf{A}$  e do potencial escalar elétrico  $\varphi$ , através da relação 3.7:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad \text{Eq. 3.7}$$

onde o potencial escalar  $\varphi$  é obtido a partir da Condição de Lorentz. Tal condição é expressa por:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial\varphi}{\partial t} = 0 \quad \text{Eq. 3.8}$$

e sua forma integral:

$$\varphi(R,t) = -c^2 \int_0^t \nabla \cdot \mathbf{A} d\tau \quad \text{Eq. 3.9}$$



O Campo Elétrico  $\mathbf{E}$  encontrado para um ponto de observação na superfície do solo a uma distância  $D$  da base do canal é dado por [Uman et al, 1975]:

$$E_z(D, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \left[ \frac{(2 - 3\sin^2 \theta)}{R^3} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{(2 - 3\sin^2 \theta)}{cR^2} i(z', t - R/c) - \frac{\sin^2 \theta}{c^2 R} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \right] dz'$$

Eq. 3.10

A primeira parcela se refere ao campo próximo que está relacionada à carga elétrica. A parcela intermediária refere-se ao campo induzido devido à variação da carga no tempo, ou seja, à corrente. E a última parcela se refere ao campo distante (irradiado) que está relacionada à variação da corrente no tempo.

A partir das formulações de  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{E}$  (equações 3.6 e 3.10), pode-se observar que o decaimento das primeiras parcelas com o aumento da distância ( $\alpha 1/D^3$  ou  $\alpha 1/D^2$ ) é muito superior àquele da parcela referente ao campo irradiado ( $\alpha 1/D$ ).

### 3.2.5 Cômputo do Campo EM Irradiado Utilizando o Modelo TL

Ao considerar o modelo TL para descrever a distribuição da corrente de retorno no canal de descarga, Martim A. Uman obtém uma formulação bastante simplificada que relaciona a corrente no canal de descarga ao seu campo elétrico e/ou magnético irradiado ("distante") [Uman et al, 1975].

O modelo TL, como discutido no item 3.2.2, assume a propagação da corrente ao longo do canal, considerando-o uma linha de transmissão [Rakov e Uman, 1998] [Thottappillil e Uman, 1993]. Este modelo admite que a onda de corrente se propaga a partir da superfície do solo em direção à nuvem, com velocidade constante, num percurso perfeitamente vertical e considera o solo um condutor elétrico perfeito. A formulação que descreve tal modelo é (equação 3.1):

$$\begin{aligned} i(z', t) &= i(0, t - \frac{z'}{v}) & z' \leq vt \\ i(z', t) &= 0 & z' > vt \end{aligned}$$

Quando a altura do canal de descarga é bem menor que a distância entre o ponto de observação e a base do canal de descarga ( $D \gg H$ ), os pontos do canal de descarga podem ser considerados equidistantes do observador  $R \cong D$  e  $\theta \cong \pi/2$ , conforme figura 3.1. Sendo assim, a parcela de campo irradiado domina sobre as demais parcelas e as formulações 3.6 e 3.10 se reduzem às equações 3.11 e 3.12:

$$B_\phi \cong B_{irrad}(D, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{cD} \int_0^H \frac{\partial i(0, t - z'/v - D/c)}{\partial t} dz' \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$E_z \cong E_{irrad}(D, t) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{c^2 D} \int_0^H \frac{\partial i(0, t - z'/v - D/c)}{\partial t} dz' \quad \text{Eq. 3.12}$$

Uma vez que a velocidade da corrente de retorno  $v$  é constante, tem-se:

$$\frac{\partial i(t - z'/v)}{\partial t} = -v \frac{\partial i(t - z'/v)}{\partial z'} \quad \text{Eq. 3.13}$$

Ao utilizar a equação 3.13, as equações 3.11 e 3.12 podem ser rescritas como:

$$B_{irrad}(D, t) = -\frac{\mu_0 v}{2\pi c D} \int_0^H \frac{\partial i(0, t - z'/v - D/c)}{\partial z'} dz' \quad \text{Eq. 3.14}$$

$$E_{irrad}(D, t) = +\frac{\mu_0 v}{2\pi D} \int_0^H \frac{\partial i(0, t - z'/v - D/c)}{\partial z'} dz' \quad \text{Eq. 3.15}$$

onde  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ .

Para solucionar as integrais das equações 3.14 e 3.15, deve-se levar em conta a condição que  $i(0, t - D/c - z'/v) = 0$  para  $z' > v.(t - D/c)$ , conforme equação 3.1. Sendo assim, ao

considerar os limites de integração  $z' = 0$  até  $v.(t-D/C)$  as expressões de campo se reduzem às equações:

$$B_{irrad}(D,t) = \frac{\mu_0 v}{2\pi c D} i(0,t - D/c) \quad \text{Eq. 3.16}$$

$$E_{irrad}(D,t) = -\frac{\mu_0 v}{2\pi D} i(0,t - D/c) \quad \text{Eq. 3.17}$$

Tais expressões são válidas para  $t \leq H/v + D/c$  (instante em que a frente da corrente de retorno atinge a base da nuvem ( $H/v$ ) e considerando ainda o tempo de atraso ( $D/c$ ) para a observação do campo relativo aquele determinado instante). Para instantes posteriores, deve-se contar com a reflexão na base da nuvem (descontinuidade dos meios canal-base da nuvem). Uman em seu trabalho [Uman et al, 1975] considera o canal de descarga uma linha de transmissão terminada com sua impedância característica na altura  $H$ , não permitindo a reflexão para baixo da onda de corrente ao atingir a base da nuvem.

Considerando a velocidade de propagação da onda de corrente igual a  $8 \times 10^7$  m/s, o tempo necessário para a mesma atingir o topo de um canal de descarga de extensão 4 km é 50  $\mu$ s. Usualmente neste instante uma onda impulsiva de descarga já completou o seu tempo de subida, bem como, transcorreu uma boa parcela do intervalo de decaimento da onda. Considerando as medições de descargas realizadas na Estação Morro do Cachimbo, o valor mediano de duração da descarga para a primeira corrente de retorno é 60  $\mu$ s (intervalo de tempo compreendido entre o instante que a corrente passa pelo limiar de medição 2 kA ao instante correspondente à metade do valor de pico) [Visacro et al, 2004]. No caso de se considerar a reprodução do pico de corrente a partir do pico do campo irradiado, o efeito da reflexão da corrente na base da nuvem, que se deve à descontinuidade do meio de propagação, não é percebido nos instantes iniciais da onda de corrente. Sendo assim, a simplificação assumida em [Uman et al 1975] e citada acima parece não comprometer a estimativa do valor de pico.

Diante destas considerações, os campos elétrico vertical e magnético horizontal irradiados podem ser considerados praticamente proporcionais à corrente na base do canal e

inversamente proporcionais à distância entre o ponto de observação e a base do canal de descarga. O sinal negativo da equação 3.17 refere-se ao fato de que o campo elétrico irradiado na equação 3.10 apresenta direção oposta a direção do fluxo de corrente. Outro aspecto a ser destacado é a verificação da relação esperada entre os campos distantes ( $E_z = cB_\phi$  ou  $E_z = \eta_0 H_\phi$ ).

O valor de pico da corrente de descarga atmosférica pode ser estimado a partir da medição do valor de pico da componente vertical do campo elétrico irradiado (distante) e ou do magnético horizontal irradiado, utilizando o modelo de linha de transmissão. Os LLS's utilizam a relação direta de intensidade de sinal de campo normalizada e intensidade de corrente para estimar o valor de pico da corrente de retorno. Tal estimativa é comentada no item 4.4.

### ***3.3 Padrões de Comportamento dos Campos (Distantes) Originados pelos Diversos Tipos de Descargas***

Um dos trabalhos mais citados na literatura relativo ao estudo do comportamento dos campos eletromagnéticos originados pela descarga atmosférica consoante a distância de observação foi apresentado pelo pesquisador Lin e co-autores em [Lin et al, 1979]. Neste trabalho, são apresentadas formas típicas de onda de campo elétrico vertical e de densidade de fluxo magnético horizontal referentes à primeira corrente de retorno e às correntes subsequentes, à distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50, e 200 km (figura 3.2).

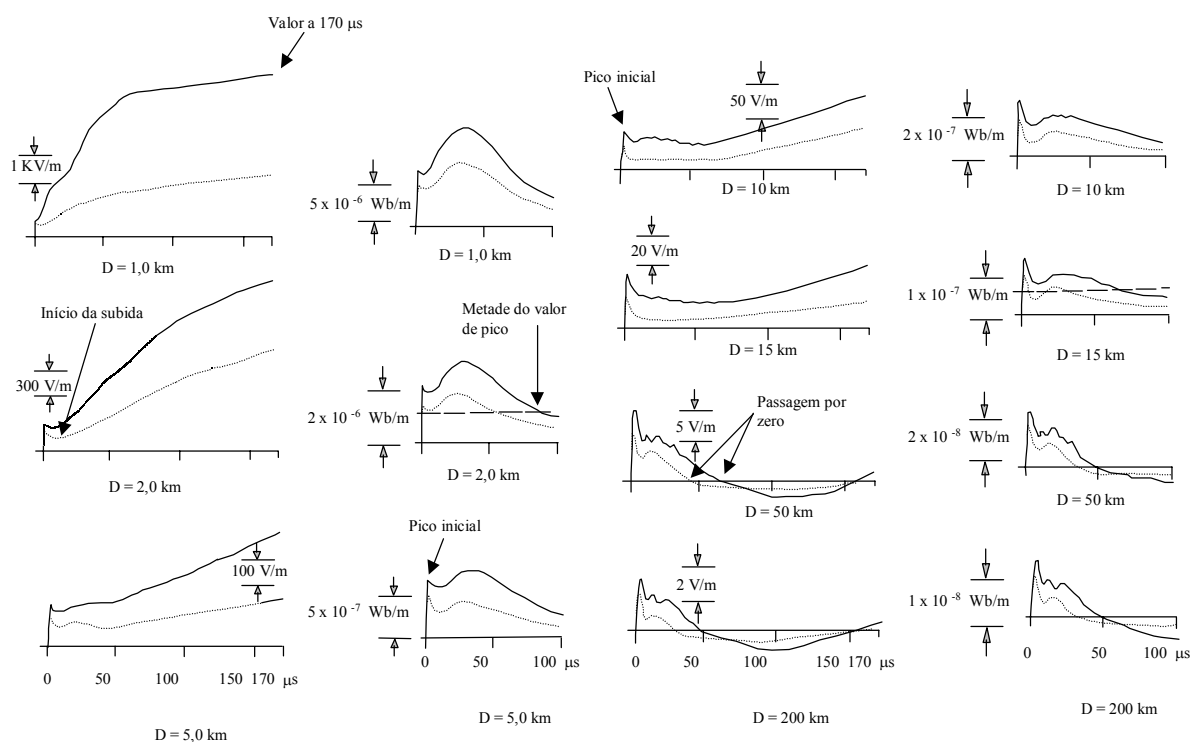


Fig. 3.2 – Formas de onda de campo elétrico vertical e de densidade de fluxo magnético horizontal apresentadas por Lin para a primeira (linha sólida) e subsequente (pontilhada) correntes de retorno, à distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50, e 200 km. Figura adaptada da referência [Lin et al, 1979].

Para pequenas distâncias (1, 2, 5, 10 e 15 km), as formas de onda do campo elétrico são bem distintas das formas de onda da densidade de fluxo magnético nas respectivas distâncias. Tais diferenças são acentuadas, principalmente, na cauda da onda, onde os efeitos de campos próximo e induzido podem ser visualizados. É significativo o efeito do campo próximo (devido à carga elétrica) na forma de onda do campo elétrico. Tal efeito pode ser notado ao comparar-se as formas de onda dos campos elétrico e magnético, visto que apenas a primeira recebe a contribuição do campo próximo (“eletrostático”).

Para distâncias maiores (50 e principalmente 200 km), as formas de onda se assemelham bastante, inclusive o instante de passagem por zero. Isto se explica pelo fato de que nestas distâncias a única parcela significativa é a parcela irradiada.

Pode-se dizer que o campo adquire padrões relativamente definidos, consoante o tipo de descarga, quando são consideradas distâncias elevadas em relação à extensão do canal de

descarga. Tais padrões de campo podem ser referidos nos sistemas de detecção e localização de descargas como alternativa para identificação do tipo de descarga que gera o sinal detectado.

Nos próximos subitens são considerados **padrões de comportamento do campo elétrico distante** (irradiado) associados aos diferentes tipos de descarga. Os mesmos padrões são válidos para campos magnéticos irradiados uma vez que, para campos distantes, tais campos diferem-se apenas pela impedância intrínseca do meio ( $E_z = \eta_0 H_\phi$  ou  $E_z = cB_\phi$ ).

### 3.3.1 Descarga Nuvem-solo Negativa

Para distâncias relativamente elevadas (superiores a 20 km), quando apenas a componente irradiada é significativa, a forma de campo eletromagnético originado por correntes de retorno nuvem-solo negativas apresenta um comportamento usualmente bipolar, ilustrado na figura 3.3. Esta figura foi elaborada na expectativa de se ilustrar um padrão de comportamento do campo elétrico distante associado [Mesquita, 2001].

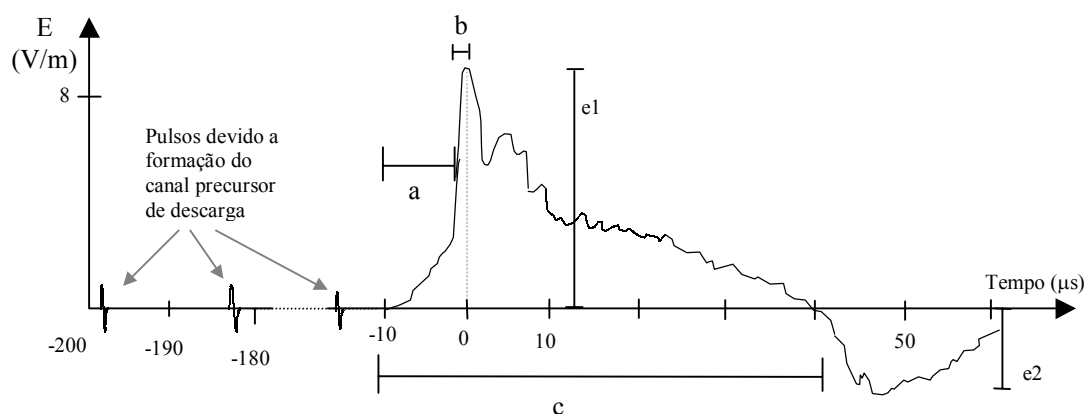


Fig. 3.3 – Forma de onda típica de campo elétrico originado a partir de uma descarga nuvem-solo negativa. O trecho pontilhado no eixo de tempo indica a interrupção de tempo, com o objetivo de representar os pulsos devido à formação do canal precursor de descargas [Mesquita, 2001].

Nota-se, usualmente, uma inversão na polaridade do campo a cerca de dezenas de microssegundos do pico inicial ( $e1$ ). Medições em solo tendem a registrar um pico invertido ( $e2$ ), em geral inferior ao pico inicial. O pesquisador Martin A. Uman [Uman et al, 1975]

simulou campos E e B gerados por uma determinada onda de corrente segundo modelo TL a longas distâncias, como 10 e 100 km, e verificou uma passagem por zero justamente no instante (50  $\mu$ s) em que a onda de corrente, que se propaga a uma velocidade de  $8 \times 10^7$  m/s, atinge o topo de um canal de 4 km de extensão. A onda “invertida” que ocorre após este instante é uma réplica da onda inicial. Este efeito foi denominado pelo autor como “imagem espelho” e foi utilizado para sustentar o modelo teórico de corrente de retorno. Com base em experimentos, Lin e co-autores [Lin et al, 1979] concluem que tal “imagem espelho” na realidade é causada pela reflexão ionosférica da onda de campo para longas distâncias de observação.

Para distâncias reduzidas, os campos observados apresentam um comportamento unipolar devido à predominância da componente eletrostática sobre a irradiada, como observado na figura 3.2. O pico inicial devido à corrente de retorno negativa apresenta polaridade positiva.

A frente de onda é usualmente caracterizada por uma transição mais lenta, que alcança a metade do pico em um período usual de 2 a 8 microssegundos (trecho a da figura 3.3), seguido por uma rápida transição (trecho b) até o pico do campo. O tempo médio de 10-90% do pico é cerca de 90 nanossegundos [Krider, 1986] [Uman, 1984]. A duração típica do pulso devido à corrente de retorno (tempo de passagem por zero – trecho c) é da ordem de algumas dezenas de microssegundos (30-90  $\mu$ s) [Rakov, 1999].

A figura 3.4 refere-se a exemplos de formas de onda de campos elétricos irradiados medidos. Nela estão indicadas as correntes de pico e as distâncias de observação estimadas. Na figura (a) é possível visualizar os pulsos que antecedem a primeira corrente de retorno. Na figura (b), os pulsos que antecedem a corrente de retorno subsequente já não podem ser visualizados facilmente.

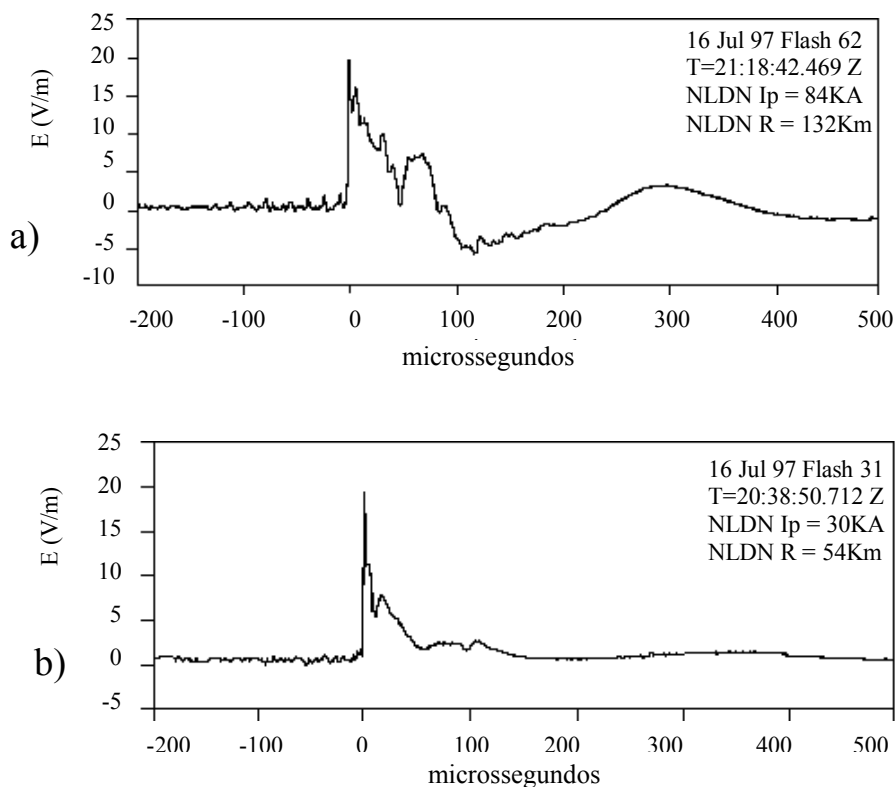


Fig. 3.4 - Exemplos de forma de onda de campos elétricos irradiados por correntes de retorno de descarga nuvem-solo negativa: (a) primeira corrente de retorno; (b) corrente de retorno subsequente. Estas formas de onda foram medidas pela Rede Norte Americana de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas e não se referem ao mesmo “flash”. Figura adaptada da referência [Rakov, 1999].

Usualmente, os campos associados às correntes subsequentes apresentam tempo de frente e de duração do pulso inferiores aos tempos relativos à primeira corrente de retorno.

### 3.3.2 *Descarga Nuvem-solo Positiva*

Pesquisadores relatam que as formas de onda de campo elétrico originadas por descargas positivas são similares às originadas por descargas negativas, exceto por sua polaridade inicial, que é negativa [Rakov, 1998] [Rakov, 1999]. A figura 3.5 mostra um exemplo de uma forma de onda do campo elétrico originada por uma corrente de retorno positiva, onde é possível verificar a relativa similaridade com as formas de onda apresentadas na figura 3.4.



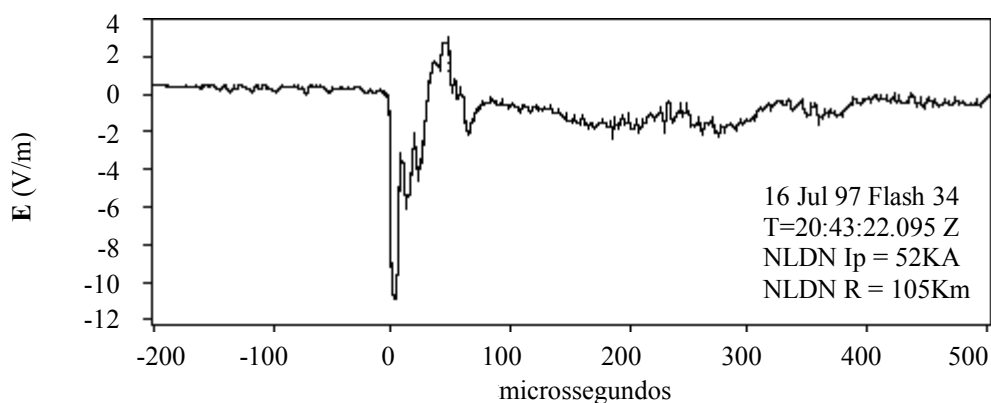


Fig. 3.5 – Exemplo de forma de onda do campo elétrico devido a uma descarga nuvem-solo positiva. Figura adaptada da referência [Rakov, 1999].

Apesar da similaridade quanto à forma de onda do campo observado para as descargas positivas e negativas, usualmente a intensidade e o tempo de frente da forma de onda associados às descargas positivas são maiores que aqueles correspondentes às correntes de retorno de descargas negativas. E as descargas positivas contêm usualmente uma única descarga de retorno.

### 3.3.3 Descargas Intranuvens

A descarga intranuvem pode apresentar uma forma de onda de campo irradiado tipicamente bipolar (figura 3.6), em que o pico inicial observado apresenta, com maior frequência, a mesma polaridade daquele gerado pela descarga positiva. Este comportamento justifica parte da dificuldade de distinção da descarga intranuvem em relação às descargas nuvem-solo positivas [Uman, 1984].

A figura 3.6 foi elaborada na expectativa de se ilustrar um padrão de comportamento do campo elétrico associado, eventualmente útil no processo de identificação da descarga.

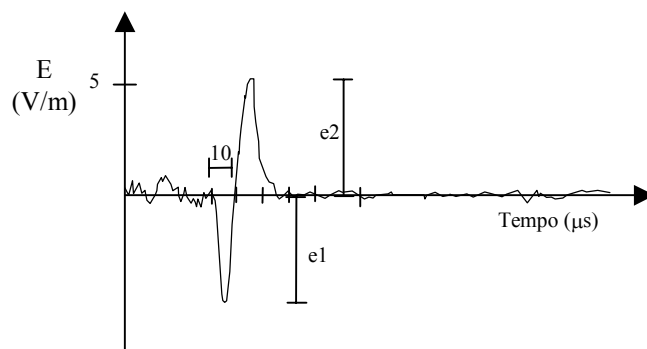


Fig. 3.6 – Forma de onda típica de campo elétrico bipolar originado por descarga intranuvem

A relação dos picos de polaridades invertidas ( $e_2/e_1$ ) tem sido utilizada como critério de discriminação entre as descargas bipolares originadas por descargas de nuvem e descargas nuvem-solo. Na descarga intranuvem o pico invertido apresenta amplitude comparável ao pico inicial, ao passo que em descargas nuvem-solo, o pico invertido mostra-se relativamente menor que o pico inicial (figuras 3.4 e 3.5). O tempo de decaimento do pulso (tempo decorrido entre o instante de pico e o retorno ao valor nulo) associado à descarga intranuvem é usualmente menor que daquele associado à descarga nuvem-solo.

Considerações mais detalhadas dos padrões de comportamento de campos eletromagnéticos (CEM's) originados pelos três diferentes tipos de descargas são encontrados na referência [Mesquita, 2001].

### ***3.4 Avaliações Preliminares da Influência de Fatores de Natureza Física na Propagação dos CEM's***

Em geral, a propagação da onda eletromagnética em um meio não ideal (com perdas), apresenta dois fenômenos associados: atenuação e a distorção da onda, que promovem a redução da amplitude da onda e a deformação da onda à medida que ela se propaga. A intensidade dos efeitos é tanto maior quanto mais elevadas forem as frequências componentes do sinal propagado.

Estes efeitos se manifestam para as ondas de campos elétrico e magnético originados a partir das descargas atmosféricas. A alteração da forma de onda depende de vários fatores tais como: a condutividade finita e não uniforme do solo, as características do caminho de propagação da onda (montanhas, lagos, construções etc.) e a distância entre a fonte (descarga) e o ponto de medição do campo (antena).

É notável a atenuação mais intensa das componentes de frequências mais elevadas no caminho de propagação da onda [Rakov e Uman, 1998]. Assim, os efeitos da propagação são mais significativos na frente da onda do campo, cujas componentes de frequência são mais elevadas.

As distorções das formas de onda são bem menores quando os campos se propagam sobre os oceanos, terrenos de alta condutividade e em caminhos relativamente planos.

Existem alguns trabalhos que tratam dos efeitos de propagação de campos originados por correntes de retorno, nos quais a atenuação e a deformação da forma de onda puderam ser verificadas [Diendorfer e Schulz, 1998b] [Jayaratne e Cooray, 1990]. O pesquisador Cooray no trabalho [Cooray, 1998] apresentou algumas análises dos efeitos de propagação no campo eletromagnético originado pela descarga:

- Uma de suas análises foi ilustrar a influência da condutividade finita do solo no comportamento do campo elétrico vertical originado por uma descarga de valor de pico de 13 kA a uma distância de observação de 5 km no nível do solo (figura 3.7). Nesta figura pode-se observar que quanto menor é a condutividade maior é o tempo de frente da forma de onda do campo na superfície. Quanto maior a condutividade maior é a intensidade do campo na superfície, ou seja, menor é a taxa de atenuação.
  - Outra análise de interesse foi ilustrar o comportamento do campo elétrico vertical no nível do solo para três diferentes distâncias de observação (figura 3.8). A mesma intensidade de pico da corrente (13 kA) e a condutividade do solo de 0,005 S/m foram consideradas nesta análise. A taxa de decaimento do campo e o tempo de frente aumentam com o aumento da distância. Observa-se também que a taxa de decaimento é superior àquela esperada quando o solo apresenta condutividade infinita ( $1/R$ ).
-

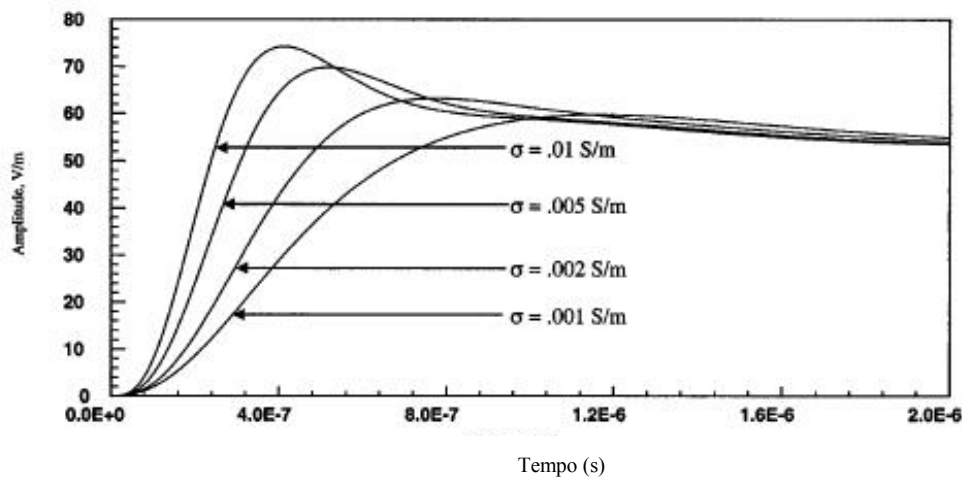


Fig. 3.7 – Campo Elétrico Vertical na superfície do solo para diferentes condutividades em Siemens/metro. A distância de observação é de 5 km da corrente de retorno cujo pico é 13 kA . Figura adaptada da referência [Cooray, 1998].

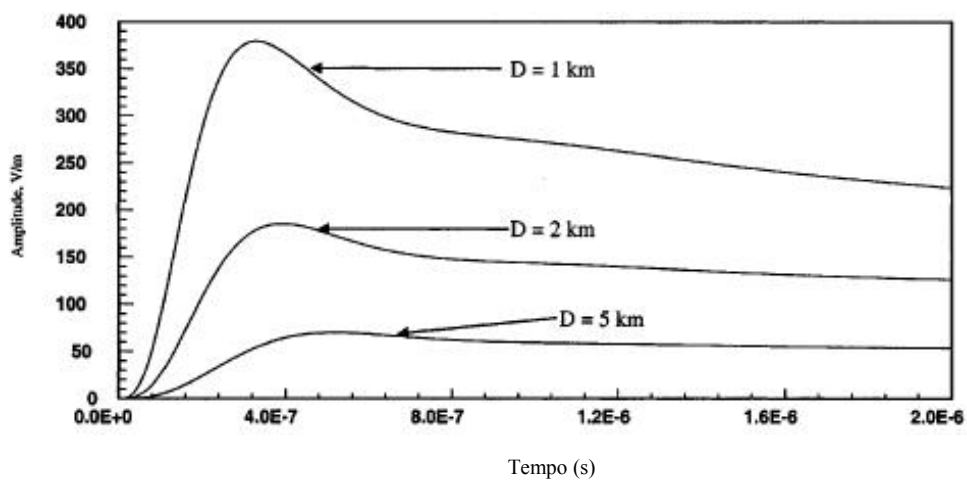


Fig. 3.8 – Campo Elétrico Vertical na superfície do solo para diferentes distâncias de observação. A condutividade do solo considerada foi de 0,005 Siemens/metro e a corrente de retorno de 13 kA de pico. Figura adaptada da referência [Cooray, 1998].

# **4 Identificação dos Modelos e Critérios Adotados pelos LLS's para Estimação de Parâmetros**

## ***4.1 Introdução***

Os Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (LLS ou SLT's) constituem-se em avançados sistemas de medição indireta dos parâmetros de descargas atmosféricas. São compostos, em geral, pela central de processamento e pelas estações detectoras remotas (sensores) dispostas estrategicamente, visando uma maior área de cobertura do sistema que apresente bom desempenho. Tais estações estão usualmente espaçadas entre si de distâncias entre 100 e 400 km. A central de processamento é responsável pelas tarefas de ordenação e seleção dos dados enviados pelas estações, pelos cálculos, pela estimativa de parâmetros, pela distribuição dos resultados ao usuário final, pelo gerenciamento do desempenho dos sensores entre outras funções.

---

Existem vários tipos de sistemas terrestres utilizados para detecção e localização de descargas atmosféricas, sendo os mais usuais o LLP (*“Lightning Location and Protection System”*), o LPATS (*“Lightning Position and Tracking System”*) e o IMPACT (*“Improved Accuracy from Combined Technology”*). Tais sistemas têm como objetivo detectar e localizar descargas nuvem-solo. Para tanto, realizam a detecção e a medição de pulsos eletromagnéticos nas faixas de frequências baixas e muito baixas (LF – *“Low Frequency”* e VLF – *“Very Low Frequency”*). A irradiação produzida por descargas nuvem-solo é significativa nestas faixas de frequências. Para possibilitar a detecção com boa eficiência de todos os tipos de descargas, deve-se utilizar faixas de frequências superiores, especialmente a VHF – *“Very High Frequency”* (a irradiação nesta faixa de frequência está associada tanto às descargas de nuvem quanto às descargas nuvem-solo). Um exemplo de sistema que utiliza tal faixa é o sistema SAFIR (*“Système d'Alerte Foudre par Interérométrie Radioélectrique”*).

Os LLS's também podem ser encontrado em configuração híbrida, sendo mais comum a utilização conjunta (simultânea) dos sensores do tipo IMPACT e LPATS. Em março do ano 2002 ocorreu a aquisição da *Global Atmospheric, Inc* (GAI), fabricante de tais sistemas, pela *VAISALA*, empresa responsável pelo sistema SAFIR. Desde então, trabalha-se a integração da tecnologia SAFIR a sistemas híbridos. O Sensor LS8000 atualmente comercializado pela VAISALA representa a fusão da tecnologia SAFIR e IMPACT, permitindo também a detecção de descargas de nuvens. Atualmente, a mais recente central de processamento CP8000 permite a utilização das diferentes tecnologias de sensores (LPATS, IMPACT, SAFIR, LS7000 e LS8000), possibilitando a expansão e melhoria das redes de detecção existentes, inclusive no que diz respeito ao monitoramento total de descargas nuvem-solo e descargas de nuvem.

---

## 4.2 Técnicas de Localização de Descargas Atmosféricas

Os diferentes LLS's podem utilizar diferentes técnicas de localização de descargas atmosféricas. As técnicas mais utilizadas pelos sistemas terrestres são a indicação de direção, tempo de chegada, interseções circulares e a técnica interferométrica, descritas nos itens a seguir. Maiores detalhes podem ser encontrados na referência [Mesquita, 2001].

### 4.2.1 Técnica de Indicação de Direção

A técnica de indicação de direção (MDF – “*Magnetic Direction Finder*”) emprega tipicamente duas antenas constituídas por espiras verticais e ortogonais entre si, cujas áreas internas são atravessadas pelo fluxo magnético gerado pela descarga atmosférica. Estas antenas têm a função de indicar a direção de chegada do pulso eletromagnético originado da descarga [Mesquita, 2001].

A relação entre as amplitudes dos sinais induzidos nas duas espiras possibilita a indicação da direção de chegada do campo da descarga em relação ao norte geográfico, conforme figura 4.1.

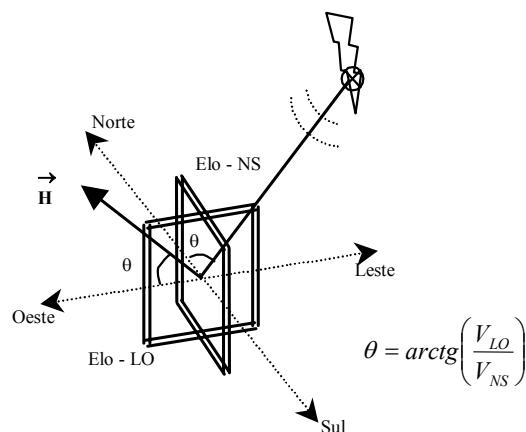


Fig. 4.1 – Técnica de indicação de direção.  $\theta$  é o ângulo indicado pela razão entre as tensões induzidas pelo campo magnético  $H$  nas bobinas leste-oeste ( $V_{LO}$ ) e norte-sul ( $V_{NS}$ ).

Utilizando-se três sensores (antenas detectoras de campo magnético), através da triangulação e aplicando-se um dos métodos de otimização, pode-se determinar o ponto de incidência da descarga, através da interseção das direções indicadas por cada sensor DF (“*Direction Finder*”), conforme figura 4.2. Nesta, são indicados três pontos  $P_{12}$ ,  $P_{13}$  e  $P_{23}$ , que são as localizações que seriam computadas se somente dois indicadores estivessem sendo utilizados para reportar a localização da descarga.  $P_0$  corresponde ao ponto estimado de incidência da descarga atmosférica, obtido a partir de técnicas de otimização [Global Atmospheric, 1997].

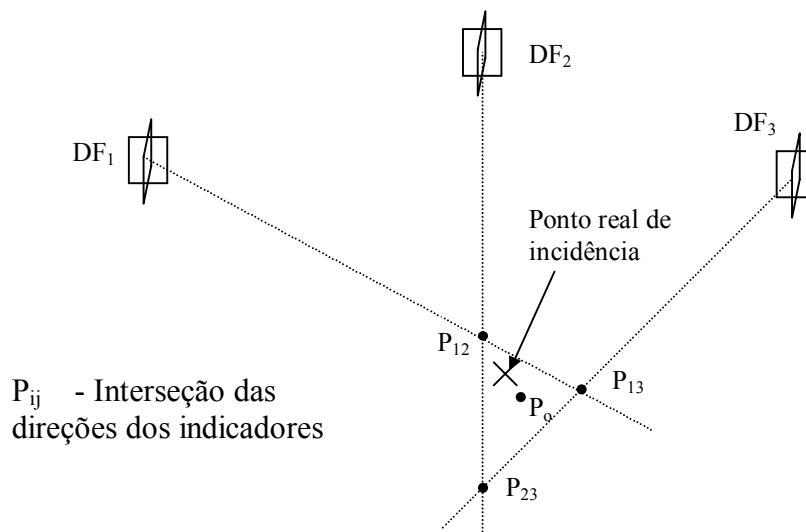


Fig. 4.2 – Localização ótima da descarga atmosférica ( $P_0$ ) utilizando as indicações de três sensores DF. Figura adaptada da referência [Global Atmospheric, 1997].

#### 4.2.2 Técnica do Tempo de Chegada

O método de tempo de chegada (ToA – “*Time of Arrival*”) determina a localização da descarga atmosférica através da diferença entre os tempos de chegada dos sinais eletromagnéticos gerados por um mesmo evento de incidência, detectados pelos sensores da rede.

A diferença de tempo de chegada entre duas estações receptoras remotas é utilizada para traçar o lugar geométrico das possíveis soluções de localização do ponto de incidência da descarga (curva hiperbólica). Duas equações hiperbólicas, que podem ser obtidas através



da existência de uma terceira estação detectora, possibilitam, através de interseção, a localização do ponto de incidência da descarga atmosférica, conforme figura 4.3.

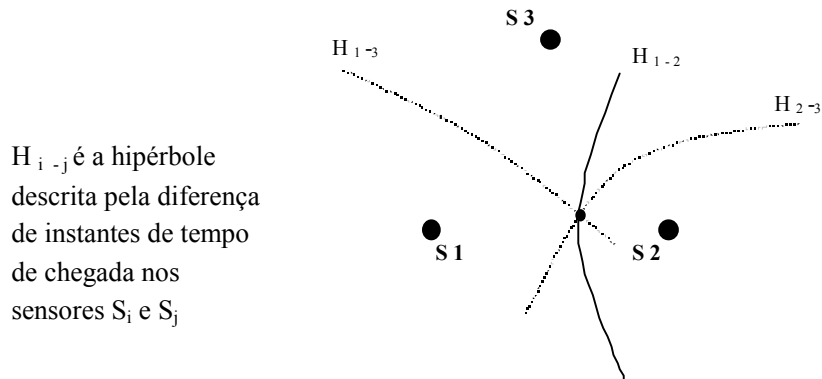


Fig. 4.3 - Técnica da Interseção Hiperbólica (ToA). As hipérbolas  $H_{1-2}$ ,  $H_{1-3}$  e  $H_{2-3}$  são geradas a partir das diferenças de tempo de chegada nas estações  $S_1$  e  $S_2$ ,  $S_1$  e  $S_3$  e  $S_2$  e  $S_3$ , respectivamente.

As estações detectoras devem estar em perfeita sincronia e seus relógios devem ter alto índice de exatidão, pois qualquer imprecisão (da ordem de microssegundos) pode implicar erros da ordem de quilômetros na localização da incidência da descarga.

Em algumas condições geométricas, dependendo do ponto de incidência em relação a rede de sensores, podem ocorrer soluções ambíguas. Neste caso, torna-se necessária a utilização de um quarto sensor (figura 4.4).

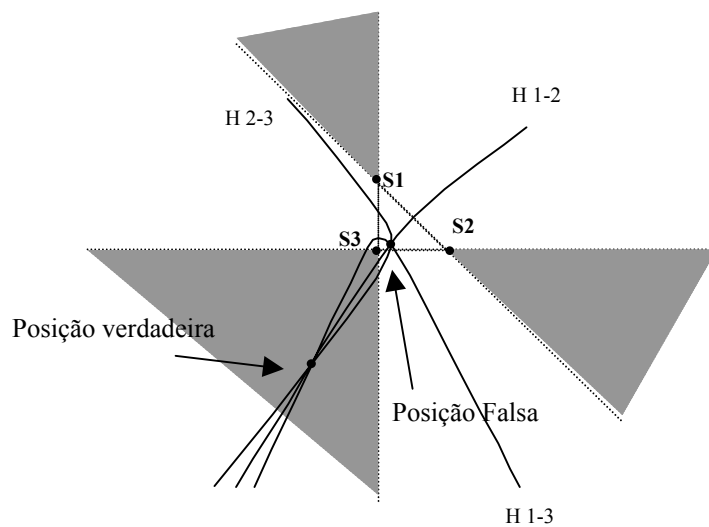


Fig. 4.4 – Localização ambígua dada pela interseção hiperbólica obtida a partir dos instantes de chegada do pulso eletromagnético em três sensores. As regiões destacadas são regiões de soluções ambíguas.

### 4.2.3 Técnica das Interseções Circulares

Esta técnica nada mais é que uma variação da técnica ToA que, quando aplicada em casos onde quatro ou mais sensores detectam o instante de chegada do sinal irradiado pela descarga, permite uma melhor otimização da solução (local e instante do *stroke*).

Utilizando-se o método das interseções hiperbólicas, que calcula a solução inicial do ponto  $P_0$  e o instante  $t^*$  de ocorrência da descarga, torna-se possível obter a distância efetiva de cada sensor ao ponto de incidência da descarga ( $P_0$ ).

A diferença entre o instante registrado por cada sensor sensibilizado ( $t_i$ ) e o instante de incidência do fenômeno estimado pela central do LLS ( $t^*$ ) descreve uma *circunferência* que define o *lugar geométrico de localização da descarga para cada sensor*.

O ponto de incidência da descarga atmosférica é determinado através de um processo de otimização que considera a interseção dos círculos geométricos referentes a cada sensor sensibilizado, como pode ser observado na figura 4.5.

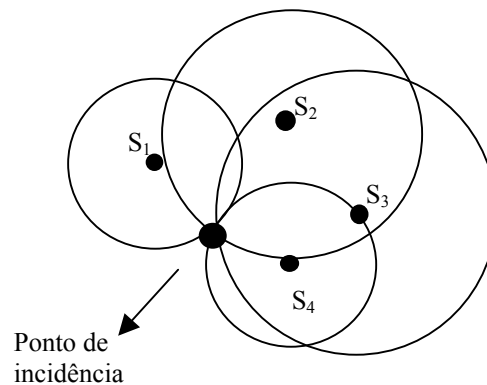


Fig. 4.5 – Técnica das interseções circulares. Figura adaptada da referência [Global Atmospheric, 1997].

Quando, no cálculo de localização da incidência da descarga, dispõe-se também das informações de indicação de direção fornecida pela técnica MDF (medidas de ângulo), o ponto de incidência da descarga é determinado pela interseção das circunferências e pelas

direções indicadas pelos sensores, como indicado na figura 4.6. Neste caso, somente duas estações detectoras que forneçam medidas de tempo e de ângulo são suficientes para calcular o ponto de incidência da descarga atmosférica [Global Atmospheric, 1997].

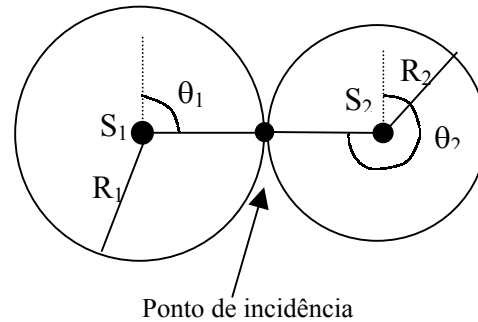


Fig. 4.6 – Técnica das interseções circulares. O ponto de incidência da descarga é obtido através de duas informações de tempo e duas de ângulo. Figura adaptada da referência [Global Atmospheric, 1997].

#### 4.2.4 Técnica Interferométrica

A técnica interferométrica é fundamentada nas medições das diferenças de fase da onda eletromagnética recebida pelas diferentes antenas de um arranjo (conjunto) de antenas (“*antenna array*”). Estas diferenças de fase são diretamente relacionadas com a direção de chegada da onda [Richard, 1998].

As antenas operam dentro de uma determinada faixa de frequência de interesse. O espaçamento das antenas apresenta dimensões relativas ao comprimento de onda associado à faixa de operação das antenas. Desta forma, cada antena do conjunto mede a onda em uma diferente fase. As diferenças de fase dependem da geometria do conjunto de antenas e da direção de chegada da onda eletromagnética. Sendo assim, conhecida a geometria do conjunto de antenas, é possível determinar a direção de chegada da onda eletromagnética em função das diferenças das fases medidas (figura 4.7).

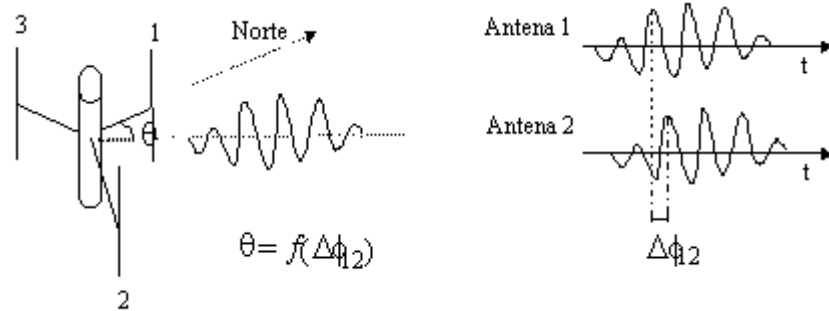


Fig. 4.7 – Técnica interferométrica. A indicação da direção de chegada do pulso no conjunto de antenas é uma função das diferenças de fases, medidas pelas antenas. Figura adaptada da referência [Vaisala Dimensions].

Utilizando a indicação de direção de pelo menos dois conjuntos de antenas, é possível localizar o ponto de incidência da descarga através do método de triangulação, conforme figura 4.8.

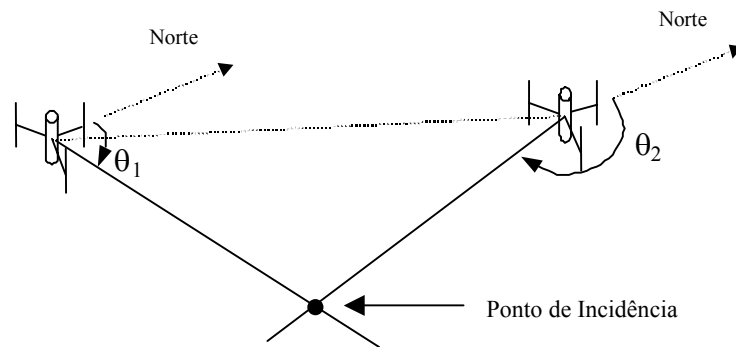


Fig. 4.8 – Triangulação das indicações de direção obtidas por duas antenas interferométricas.

Esta técnica é amplamente utilizada em radiolocalização e radioastronomia para localização e mapeamento de fontes de rádio.

### 4.2.5 Considerações - Medidas de Qualidade

As técnicas de detecção e localização descritas nos itens anteriores são utilizadas por diferentes sistemas de localização de descargas atmosféricas. Muitas vezes, tais sistemas fornecem, em sua central de processamento, além da localização do ponto de incidência e instante de ocorrência da descarga, informações que quantificam a qualidade destas medidas. Um exemplo é o parâmetro “*Chi-quadrado*” utilizado para quantificar o erro de medição.

A “função erro” consiste na somatória dos erros de medidas de tempo e de ângulo de cada sensor sensibilizado participante da solução da localização da descarga atmosférica. Quando normalizada pelos erros esperados de tempo e de ângulo e pelo grau de liberdade da descarga analisada, que é a diferença entre o número de medidas realizadas (tempo e ângulo que possuem desvios aceitáveis) e o número de parâmetros estimados (latitude, longitude e horário de ocorrência), recebe o nome de função “*Chi-quadrado*” **Normalizado** (Equação 4.1).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{(m_j - m_j^*)^2}{e_j^2} + \sum_{j=1}^n \frac{(t_j - t_j^*)^2}{\sigma_j^2}}{x} \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde:

$n$  = Número total de medidas (sensores sensibilizados)

$m_j$  = Ângulo medido pelo sensor  $j$

$m_j^*$  = Ângulo calculado para o sensor  $j$  (baseado na localização ótima da descarga)

$e_j$  = Erro teórico de ângulo do sensor  $j$  (desvio padrão do erro de direção do sensor  $j$ )

$t_j$  = Tempo medido pelo sensor  $j$

$t_j^*$  = Tempo calculado para o sensor  $j$  (baseado na localização ótima da descarga)

$\sigma_j$  = Erro teórico de tempo do sensor  $j$  (desvio padrão do erro de tempo do sensor  $j$ )

$x$  = Grau de liberdade da descarga.

O erro esperado para as medidas de ângulo pode ser mantido na faixa de  $\pm 1^\circ$  e para as medidas de tempo na faixa de  $\pm 1,5 \mu s$  [Global Atmospheric, 1997].

A **eficiência de detecção** dos sistemas é também um parâmetro de qualidade das informações de descargas obtidas e consiste na razão entre o número de descargas atmosféricas detectadas pelo LLS e o número de descargas realmente ocorridas numa determinada região. Usualmente a eficiência de detecção é um valor estimado, dado ao desconhecimento do número real de incidências no solo. Em alguns casos, se utiliza outro sistema de medição como referência (torres instrumentadas, imagens de vídeo etc.) para indicar de forma mais apurada o valor deste parâmetro para a região ou local em estudo.

A eficiência de detecção de um LLS é usualmente representada por linhas de contorno, que circunscrevem regiões com eficiência de detecção maior ou igual ao valor indicado em percentual. É de se esperar que, à medida que as linhas se afastam do centro da região de cobertura do sistema, o valor da eficiência se reduz. O fabricante utiliza um algoritmo para cálculo da eficiência de detecção de *flashes* da rede que leva em conta vários fatores, entre eles:

- Eficiência individual de cada sensor (capacidade de detecção);
- Sensores em operação contínua (sem interrupções de operação e/ou transmissão de dados à central);
- Tipos de sensores que compõem a rede de detecção (tecnologia dos sensores);
- Número médio de sensores sensibilizados que contribuem para a solução da descarga;
- Distribuição geográfica dos sensores (geometria da rede e região de cobertura);
- Distribuição estatística da amplitude de corrente.

Outro parâmetro de qualidade importante é a **precisão da localização** do sistema, que consiste na indicação das regiões que apresentam o mesmo valor esperado para o erro de localização em quilômetros. As regiões são delimitadas por curvas determinadas pelo valor mediano do comprimento do semi-eixo maior da *Elipse de Solução*. Tal parâmetro é utilizado pelos sistemas LPATS, IMPACT e híbridos (constituídos por estações LPATS e IMPACT), bem como pela nova geração de centrais de processamento (CP7000, CP8000).

A **Elipse de Solução** (“*Confidence Ellipse*”) circunscreve uma região (lugar geométrico) que apresenta um certo valor de probabilidade de localização do ponto de incidência da descarga atmosférica, considerando-se que os erros aleatórios de localização

apresentam distribuição gaussiana (distribuição normal). Geralmente, esta margem de segurança é de 50%. Isto significa que o ponto de incidência da descarga atmosférica tem 50% de possibilidade de encontrar-se na região descrita pela elipse que circunscribe o ponto ótimo indicado pelo LLS.

A figura 4.9 representa a distribuição gaussiana dos erros de localização, onde a elipse em destaque representa a probabilidade de 50% e o ponto central corresponde à localização mais provável do ponto de incidência da descarga [Cummins et al, 1998].

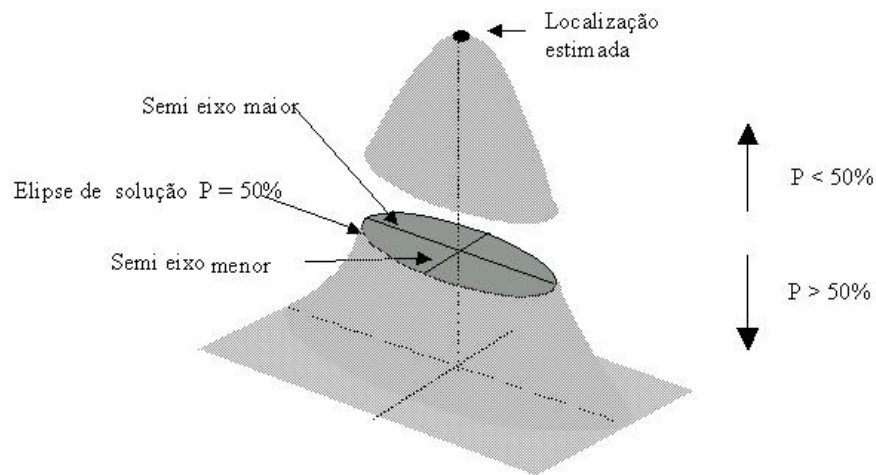


Fig.4.9 – Distribuição gaussiana de erro de localização. A elipse em destaque corresponde à região com probabilidade de 50% de ocorrência da descarga. Note que o aumento da probabilidade implica no aumento da área da elipse. O ponto mais provável para a incidência da descarga é o ponto central da distribuição.

Os parâmetros que descrevem a elipse de segurança são o semi-eixo maior, semi-eixo menor e a excentricidade, que é a relação entre os semi-eixos maior e menor. A excentricidade é o parâmetro que melhor qualifica a localização da descarga: quanto menor a excentricidade, maior a exatidão da localização.

Quanto maior o número de sensores sensibilizados (maior redundância de medidas), menor e mais circular é a elipse de segurança [Cummins et al, 1998] [Cummins et al, 1995].

A precisão de localização é tratada de forma mais aprofundada no item 7.4.1. Aspectos associados à eficiência de detecção e sua influência nos resultados gerados pelo LLS são tratados no item 6.3.

### ***4.3 Critérios Adotados pelos LLS's para Discriminação dos Tipos de Descargas***

Os LLS's utilizam alguns critérios para discriminar as descargas nuvem-solo (CG – do inglês “*Cloud to Ground*”) e descargas de nuvens<sup>1</sup> (CD – “*Cloud Discharges*”). Tais critérios são também utilizados para rejeitar sinais eletromagnéticos associados a ruídos, não os enviando à central de processamento. Nos itens a seguir são descritos os principais critérios de discriminação de descargas utilizados pelos principais tipos de sensores existentes.

#### ***4.3.1 Sensor DF***

O sensor DF (“*Direction Finder*”) é utilizado pelo sistema LLP<sup>2</sup>. Os DF's são constituídos por duas antenas de campo magnético (espiras verticais e ortogonais entre si), uma antena de campo elétrico e os circuitos eletrônicos para processamento dos sinais das antenas e transmissão de dados para central.

O sinal de campo magnético é utilizado para determinar o ângulo de chegada do pulso eletromagnético (item 4.2.1), para verificar se a forma de onda do campo é devido a uma descarga nuvem-solo e para determinar o valor de pico do sinal (utilizado para estimar a intensidade de corrente de retorno no canal de descarga).

O campo elétrico é utilizado para determinar a polaridade da descarga e prover informação adicional no processo de discriminação da forma de onda.

---

<sup>1</sup> Descargas de nuvens incluem as descargas intranuvens, que representam a grande maioria, e as descargas entre nuvens e entre nuvem e estratosfera.

<sup>2</sup> O sistema LLP (*Lightning Location and Protection Incorporation*) evoluiu para o sistema IMPACT através da incorporação da informação precisa de tempo. Apesar do sistema LLP não ser mais usual, os critérios de discriminação das estações DF's são aqui descritos visto que, no desenvolvimento desse sensor, foram despendidos os esforços iniciais para o adequado reconhecimento de sinais provenientes de descargas nuvem-solo.

---



A forma de onda digitalizada do pulso magnético é submetida a uma série de critérios de seleção, os quais devem ser atendidos para que o sinal seja considerado um sinal válido de descarga nuvem-solo.

O limiar do sinal de campo magnético (“*Threshold*”) “filtra” os sinais recebidos pelos sensores, uma vez que o sinal só é submetido ao critério de discriminação de forma de onda quando excede um valor pré-definido pelo usuário através de comando. O DF ignora qualquer sinal inferior a este valor.

Nem todos os detalhes sobre os critérios de forma de onda do sinal de campo magnético e suas modificações ao longo do tempo estão disponíveis na literatura científica, possivelmente devido ao sigilo industrial do fabricante do sistema. Alguns destes critérios adotados para discriminação apresentados pela literatura [Krider et al, 1980] [Jóhannstóttir, 1993] [Sorensen, 1995] são descritos a seguir. Vale ressaltar que os valores associados a tais critérios constituem apenas referências apresentadas pela literatura, não sendo necessariamente valores usualmente adotados em sistemas que evoluíram a partir de então.

- 1- Um *stroke* não é registrado se, dentro de um intervalo de tempo pré-determinado que o antecede (tipicamente de 100 - 300  $\mu$ s), ocorre um sinal inválido.
- 2- Se a amplitude dos pulsos chamados "*Pre-Trigger Kibosh*" (PTK) exceder algum percentual do primeiro pico dentro do intervalo de tempo pré-determinado (tipicamente de 100 a 300  $\mu$ s) antes de receber um outro sinal válido de descarga, a descarga não é aceita.
- 3- Dentro de um intervalo de tempo pré-determinado (tipicamente de 100 a 300  $\mu$ s), o segundo pico não pode ser superior a um percentual do primeiro pico. Por exemplo, nenhum pico posterior pode exceder o primeiro pico por mais de 15% [Krider et al, 1980].
- 4- O sinal principal não pode oscilar na direção oposta sobre um percentual ajustável do primeiro pico (Rejeição bipolar – BPR). Este critério objetiva

rejeitar descargas intranuvens, visto que o comportamento de seu campo pode apresentar pico de polaridade oposta com amplitude comparada à do pico inicial.

- 5- O tempo de frente do sinal deve ser menor que um valor pré-definido. Por exemplo, o tempo de frente deve ser menor que 20  $\mu\text{s}$  para que o sinal seja considerado proveniente de uma descarga nuvem-solo [Krider et al, 1980].
- 6- O tempo de decaimento do sinal (tempo decorrido entre o primeiro pico até a passagem pelo limiar de percepção) deve ser superior a um valor pré-definido para que seja considerado originado por uma descarga nuvem-solo. Segundo a referência [Krider et al, 1980], este tempo deve ser pelo menos 15  $\mu\text{s}$  para ser considerado proveniente de uma descarga nuvem-solo.
- 7- A relação “campo elétrico por densidade de campo magnético” (E/B) é constante para campos distantes onde a propagação ocorre no espaço livre sobre uma superfície perfeitamente condutora e com velocidade igual a da luz. Para distâncias pequenas do ponto de incidência, a relação não é constante, uma vez que as componentes eletrostáticas e induzidas não podem ser desprezadas. Para evitar inconvenientes que provavelmente influenciam no desempenho do sistema, os sensores são designados a responder apenas a sinais dentro de uma determinada faixa de relação E/B, por exemplo, de 0,25 -1,6 [Jóhannstóttir, 1993]. Este critério é utilizado como uma forma de filtrar ruídos de uma descarga real. Se este critério não for respeitado, o sinal é rejeitado e a contagem de ruído é incrementada.

A figura 4.10 mostra uma forma de onda típica de campo elétrico ou magnético irradiado a partir de uma corrente de retorno.

---

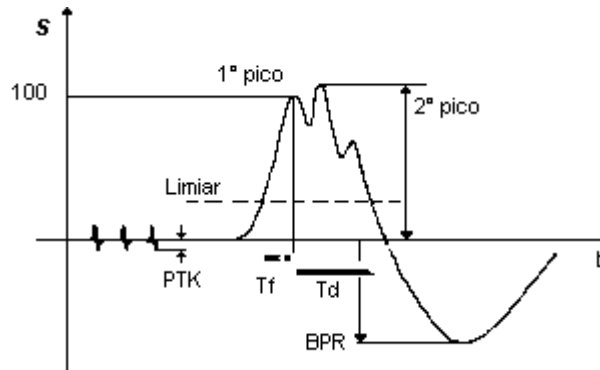


Fig. 4.10 – Critérios de Discriminação de forma de onda do campo devido a uma corrente de retorno (“stroke”): tempo de frente ( $T_f$ ), tempo de decaimento ( $T_d$ ), rejeição bipolar (BPR), critério “Pre-Trigger Kibosh” (PTK).

### 4.3.2 Sensor LPATS

O sistema LPATS registra descargas nuvem-solo e também as descargas de nuvens (“cloud discharges”) com intensidade suficiente para sensibilizar pelo menos três sensores. Porém, os sensores deste sistema são pouco eficientes para detecção de descargas de nuvens, uma vez que eles operam dentro das faixas de frequência LF e VLF (1,5 kHz-430 kHz) e a irradiação produzida por este tipo de descarga nestas faixas pode ser insuficiente para sensibilizar três ou mais sensores. Contudo, tais sinais podem ser suficientes para causar interferências no sistema [Cummins e Murphy, 2000].

O sensor LPATS contém duas antenas: Antena de Descarga (antena de campo elétrico) e Antena de Sincronização (GPS) e é constituído por três subsistemas [Global Atmospheric, 1995]:

- Subsistema de sincronização de tempo (“Timing and Synchronization Subsystem”);
- Subsistema receptor de descarga (“Stroke Receiver Subsystem”);
- Subsistema de comunicação e processamento (“Processing and Communication Subsystem”).

Destaca-se a dificuldade de se encontrar referências bibliográficas que tratam do processo de identificação do tipo de descarga atmosférica (nuvem-solo ou intranuvem) por

parte das estações LPATS. Segundo [Jóhannstóttir, 1993], um critério simplificado é adotado para tal classificação. Se a largura de pulso (período decorrido entre a crista da onda e passagem por zero) for igual ou inferior a  $10 \mu\text{s}$ , a descarga é classificada como CD; se for superior é classificada como CG. Para que uma descarga seja considerada como descarga CD é necessário que todos os relatos dos sensores LPATS sensibilizados a tenham identificado como descarga de nuvem. Se pelo menos um relato indicar CG, a descarga é considerada nuvem-solo [Global Atmospheric, 1995]. A central de processamento considera ou não os dados das descargas CD nos cálculos de localização de descargas atmosféricas, de acordo com a determinação do usuário.

Frente à dificuldade em se obter na literatura esclarecimento sobre o processo de identificação dos tipos de descarga, neste trabalho efetuou-se uma análise cuidadosa dos dados brutos encaminhados pelas estações detectoras para a central de processamento do LLS-MG, referentes a um conjunto de eventos. Nesta análise verificou-se que a estação LPATS série III não reporta a largura de pulso no registro que envia à central. No dado do sensor, o campo dedicado à informação da largura de pulso é sempre preenchido pelo valor  $51,2 \mu\text{s}$ . Já a estação série IV reporta diferenciados valores de largura de pulso. Ao se observar os relatos dos sensores, não se verifica a aplicação do critério de largura de pulso ( $10 \mu\text{s}$ ), citado na literatura técnica, na classificação do tipo de descarga (CG ou CD). Possivelmente, existem outras questões que não são elucidadas.

### ***4.3.3 Sensor IMPACT***

O sensor IMPACT nada mais é que uma evolução do sensor DF, que passou a incorporar a informação precisa de tempo pelo uso de GPS. Desta forma o sensor IMPACT ficou também habilitado a utilizar a técnica ToA além da técnica MDF. Ele detecta os sinais associados aos pulsos originados de descargas atmosféricas nuvem-solo e opera na faixa de frequência de 1 kHz-350 kHz. O sensor contém quatro antenas [Global Atmospheric, 1994]:

- Uma antena de campo elétrico (antena de descarga);
  - duas antenas de campo magnético (uma na direção leste-oeste e outra na direção norte-sul);
-

- uma antena receptora do sinal GPS.

O sensor grava o tempo de subida e a largura do pulso com uma resolução de 119 ns. O tempo de subida corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o sinal de campo magnético excede o limiar (“*threshold*”) e o instante onde o pico é detectado. A largura do pulso corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o instante de detecção do pico e o instante em que o sinal se torna menor que o limiar.

O sensor ignora qualquer pulso cuja amplitude seja menor que o limiar. Quando o valor do pulso ultrapassa o limiar, o sensor o considera como um possível pulso originado de uma corrente de retorno (“*stroke*”) e ativa a lógica de discriminação de pulso.

É possível configurar tais sensores para “filtrarem” os dados considerados como dados de descargas de nuvem, não os enviando à central de processamento. A tabela 4.1 apresenta os parâmetros de configuração dos sensores IMPACT cujos valores correspondem a valores padrão indicados pelo fabricante. Os parâmetros indicados são os critérios de seleção de dados deste tipo de sensor. Todos os critérios devem ser atendidos conjuntamente. Qualquer sinal detectado que apresenta valores fora das faixas indicadas é invalidado pelos sensores IMPACT, não sendo enviado à central [Global Atmospheric, 1994]. É possível também configurar tais sensores para enviarem todos os dados (CG e CD), deixando o processo de discriminação ser realizado pela central de processamento, através de critérios bastante simplificados que considera as larguras de pulso reportadas pelos sensores participantes da solução da descarga<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Os sensores do tipo IMPACT do LLS-CEMIG até a última atualização da central de processamento realizada em maio de 2005 estiveram configurados a filtrarem os sinais considerados provenientes de descargas CD, enviando à central apenas dados relativos aos sinais reconhecidos como CG. Os valores dos critérios de discriminação utilizados correspondem aos valores padrão indicados pelo fabricante. Após a atualização da central, o processo de discriminação passou ser realizado pela central de processamento.

Tab. 4.1- Configuração dos Sensores IMPACT. Valores obtidos através do acesso remoto à estação IMPACT e correspondem a valores padrão indicados pelo fabricante

Configuração para descargas Positivas e Negativas	<i>Sensores IMPACT</i>	
	Mínimo	Máximo
Razão E/B	0,2	10,0
Tempo de subida	0,0 $\mu$ s	24,0 $\mu$ s
Largura de pulso	11 $\mu$ s	31,0 $\mu$ s
Critério de ângulo	$\pm 2,5^\circ$	

O parâmetro **razão E/B** (razão entre o sinal de campo elétrico e intensidade do sinal de campo magnético detectados pelas antenas do sensor) funciona como filtro de ruídos de sinal, ou seja, sinais eletromagnéticos emitidos com razão E/B fora da faixa de valores indicada são desprezados pelo sensor. Diferentemente da medição do campo magnético, a medição do campo elétrico depende, de forma bem mais significativa, das condições do local de instalação do sensor. O campo elétrico incidente pode ser distorcido pelo efeito das condições de medição e resultar em valores diferentes do sinal “puramente” irradiado pela descarga [Cigré, 2005]. Uma razão E/B muito alta pode indicar que o sensor não foi devidamente aterrado ou que o plano de terra efetivo situa-se abaixo da base do mastro do sensor. Por outro lado, uma razão E/B com valor muito pequeno consiste num indicativo da possibilidade de “blindagem” do sensor por torre ou construção vizinha.

O **tempo de subida** e a **largura de pulso** são utilizados para descrever e discriminar a forma de onda do campo magnético associado à descarga atmosférica detectada. O sensor IMPACT considera como CG as descargas com largura de pulso com valores compreendidos na faixa definida (faixa padrão 11 a 31  $\mu$ s). Este sensor permite a definição diferenciada dos critérios de tempo (de frente e largura de pulso) em função da polaridade da descarga.

Outros sistemas podem apresentar critérios com valores diferentes dos valores padrão. Um exemplo é o sistema de detecção austríaco, que reduziu o valor mínimo de largura de pulso de 11  $\mu$ s para 6  $\mu$ s devido à observação freqüente de descargas nuvem-solo com largura de pulso menor que 11  $\mu$ s, particularmente durante tempestades de inverno [Diendorfer et al, 1998a].

O **critério de ângulo** corresponde ao desvio máximo permitido no agrupamento de *strokes*. Apenas os *strokes* ocorridos num espaço delimitado por  $\pm 2,5^\circ$  em relação à direção indicada pelo sensor são considerados por ele como possíveis eventos pertencentes a um mesmo *flash*. Os critérios que efetivamente agrupam os *strokes* são aplicados na central de processamento e encontram-se indicados no item 4.5.

Como os sensores IMPACT constituem uma evolução dos sensores DF, utilizando uma combinação das técnicas de detecção MDF e ToA (Item 4.2), acredita-se que eles utilizam alguns mesmos critérios de discriminação de forma de onda descritos no item 4.3.1 deste trabalho, embora tais informações não sejam apresentadas na literatura. Segundo fabricante do sistema, a última versão desse tipo de sensor (IMPACT ESP) apresenta melhoria na placa analógica, reduzindo o ruído e permitindo a detecção de descargas de baixa intensidade com uma melhor eficiência [Cramer et al, 2004].

#### **4.3.4 Sensor SAFIR**

O sistema SAFIR utiliza a técnica interferométrica VHF para a localização de todos os tipos de descargas atmosféricas e a discriminação LF/MF (do inglês “*Low Frequency/Medium Frequency*”) para fazer a caracterização das descargas nuvem-solo [Vaisala Dimensions]. O alcance de detecção deste tipo de sistema é menor que o dos demais sistemas. Sendo assim, as distâncias usuais entre os sensores são também menores.

Existem quatro tipos de estações detectoras:

- Estação de Detecção Básica SAFIR – Para a localização bidimensional de descargas CG;
  - Estação de Detecção Padrão SAFIR – Para a localização bidimensional da atividade total das descargas atmosféricas e previsão de tempestades;
  - Estação de Detecção de Alta Resolução SAFIR – Para a localização bidimensional com alta precisão da atividade total das descargas atmosféricas e previsão de tempestades;
-

- Estação de Detecção 3D SAFIR - Para o mapeamento tridimensional do processo total da descarga e previsão de tempestades.

A Estação Detectora SAFIR3000 inclui:

- Antena Interferométrica VHF (na faixa 110 MHz – 118 MHz) para localização da descarga atmosférica;
- Sensor LF/MF (antena capacitiva com pré-amplificador para a medição do campo elétrico. Banda de frequência: 300 Hz – 3 MHz) para discriminação da descarga atmosférica CG e para a estimativa do pico de corrente a partir da intensidade do campo medido;
- Antena e Receptor GPS;
- Processador de Detecção, responsável pelo processamento do sinal recebido e o envio das informações para o sistema de processamento central.

A função de discriminação foi projetada com o objetivo de obter informações das características das descargas CG a partir da análise da componente irradiada de campo elétrico originado por elas. A discriminação entre descargas CG e CD é obtida a partir de alguns critérios selecionados pelos usuários. Os critérios de discriminação têm seus valores típicos relacionados na tabela 4.2. Informações mais detalhadas sobre os critérios adotados pelo sistema não estão disponíveis na literatura técnica.

Tab 4.2– Valores Típicos dos Critérios de Discriminação. Tabela adaptada da referência [Vaisala Dimensions].

<b>Critérios de Discriminação Típicos dos Sensores</b>	
Limiar de sinal (“ <i>Signal Threshold</i> ”)	100 mVolts/metro
Tempo de frente	Mín 125 ns – Máx 15 $\mu$ s
Tempo de Decaimento	Mín 15 $\mu$ s – Máx 255 $\mu$ s



### 4.3.5 Sensores Geração LS

Os sensores LS's (*Lightning Sensor*) foram desenvolvidos a partir da fusão das empresas Vaisala e Global Atmospheric, ocorrida em março de 2002. Em dezembro de 2004, os sensores IMPACT, LPATS e Vaisala SAFIR deixaram de ser comercializados deixando o espaço para a nova geração LS.

Os principais sensores são LS7000 e o LS8000. O primeiro utiliza a combinação das tecnologias LF de indicação de direção e tempo de chegada, dedicado ao registro de descargas CG. Segundo o fabricante, o nível de detecção de descargas de nuvem é estimado entre 5% e 30%. O sensor LS8000 incorpora também a tecnologia interferométrica VHF, sendo caracterizado por apresentar boa eficiência de detecção tanto para eventos CG quanto eventos de nuvem. A faixa de operação em LF é 1 kHz-350 kHz e em VHF é 110 MHz-118 MHz.

## 4.4 Modelo Adotado pelos LLS's para Estimativa do Valor de Pico da Corrente de Retorno

Atualmente, as centrais de processamento dos sistemas de detecção do tipo IMPACT e do tipo híbrido realizam três etapas básicas para estimar o valor de pico da corrente de retorno da descarga atmosférica [Cummins, 1998]:

- a) Normalização do sinal detectado pela estação remota em função da distância:  
Através dos dados enviados, a central normaliza as distâncias efetivas através da equação 4.2, referentes a cada sensor sensibilizado.

$$S_{ref,i} = C.S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^P e^{\frac{D_i - D_{ref}}{A}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

sendo:

$S_{ref,i} \Rightarrow$  Sinal normalizado

$S_i \Rightarrow$  Dado bruto da intensidade do sinal medido pela  $i$ -ésima estação detectora

$i \Rightarrow$  Número do sensor sensibilizado

$D_i \Rightarrow$  distância percorrida pelo sinal (km) até alcançar a  $i$ -ésima estação

$D_{ref} \Rightarrow$  distância de normalização ( $D_{ref}=100$  km)

$P \Rightarrow$  expoente de atenuação ( $P=1,13$ )

$A \Rightarrow$  constante de espaço ( $A=10^5$  km)

$C \Rightarrow$  constante determinada experimentalmente.

Os parâmetros  $P$ ,  $A$ ,  $I$  e  $C$  acima referidos são valores obtidos a partir de estudos de calibração da rede dos Estados Unidos – NLDN (“*National Lightning Detection Network*”), realizados no Estado da Flórida, quando a mesma apresentava a configuração híbrida da rede de sensores (IMPACT e LPATS). O LLS-MG adota os mesmos valores acima citados.

- b) Cálculo da média dos valores  $S_{ref,i}$  de todos os sensores sensibilizados pela descarga atmosférica num raio de 625 km (este raio pode ser alterado pelo usuário no algoritmo de processamento).
- c) Regressão linear através da equação 4.3, sendo que as constantes  $k_0$  e  $k_1$  são obtidas experimentalmente e  $\bar{S}_{ref}$  é a média dos valores  $S_{ref,i}$ . Atualmente, assume-se  $k_0$  com valor nulo e  $k_1$  é igual a 0,185, constituindo-se o fator de conversão.

$$I_{pico} = k_0 + k_1 \cdot \bar{S}_{ref} \quad \text{Eq. 4.3}$$

O sistema austríaco de detecção de descargas ALDIS (“*Austrian Lightning Detection & Information System*”) utiliza outros valores para o modelo de estimativa do valor de pico da corrente, adequando-os às características da geometria da rede de sensores [Diendorfer e Schulz, 1998] [Diendorfer et al, 1998].

No final do ano 2003, a rede NLDN passou por atualizações, deixando de ser uma rede híbrida, onde as estações LPATS foram substituídas por sensores IMPACT. Nesta nova

configuração de rede de sensores, as constantes envolvidas na estimativa da corrente tiveram seus valores reavaliados a fim de se adequar o modelo para melhor representar as perdas devido à propagação do sinal eletromagnético [Cramer et al, 2004]. A determinação dos parâmetros do modelo para a estimativa de corrente é tratada de forma mais detalhada no item 5.2.

## 4.5 Critérios de Agrupamento de 'Strokes'

Os sistemas de detecção do tipo IMPACT e do tipo híbrido detectam cada *stroke* (evento correspondente a cada corrente de retorno) de uma descarga atmosférica (*flash*). O sistema também permite a constituição de uma base de dados de *flashes* a partir da aplicação de um algoritmo de agrupamento de *strokes*, calculando assim a multiplicidade de cada *flash* [Cummins et al, 1998].

O algoritmo matemático desenvolvido pelo fabricante descreve os critérios, que devem ser todos atendidos para o agrupamento de *strokes*. São eles:

- Janela de tempo: 1 s. As descargas subseqüentes são agrupadas em um único *flash* se ocorrerem até 1 segundo após a ocorrência da primeira descarga de retorno ("First stroke");
- Intervalo de tempo máximo entre os *strokes*: 500 ms. *Strokes* ocorridos após este período não são considerados como pertencentes ao mesmo *flash*;
- Abrangência espacial da descarga: 10 km. Compreende a distância máxima (raio de agrupamento) de 10 km do ponto de incidência do primeiro ponto de impacto;
- Raio máximo de agrupamento: 50 km. Se um *stroke* estiver a uma distância maior que 10 km e, ainda assim, dentro de um raio de 50 km, havendo sobreposição da sua elipse de segurança com o lugar geométrico da descarga (raio de 10 km) então o mesmo é considerado como pertencente a um mesmo *flash*.
- Número máximo de *strokes* por *flash*: 15. O algoritmo agrupa no máximo 15 *strokes* como pertencentes ao mesmo *flash*.

Apesar de existirem *flashes* cuja multiplicidade seja superior, acredita-se que a limitação em 15 não compromete os resultados gerados pelo LLS, uma vez que a eficiência de detecção dos *strokes* subseqüentes pode ser significativamente menor, especialmente para os de baixa intensidade. Além do mais, o número de eventos com multiplicidade elevada é pequeno, não interferindo na distribuição da multiplicidade dos *flashes* indicados pelo LLS.

Todos os critérios de agrupamento devem ser observados em conjunto para a indicação da multiplicidade da descarga analisada. O usuário do sistema pode definir se deseja que o registro de *flash* contenha as informações do primeiro *stroke* ou do *stroke* mais intenso.

A figura 4.11 apresenta um exemplo do critério de agrupamento das descargas atmosféricas. São consideradas como pertencentes ao mesmo *flash* os *strokes* 1,3,4 e 5. O *stroke* 7, apesar de estar dentro da região de agrupamento, não abrange a região espacial de 10 km e por isso é considerado como pertencente a outro *flash*. Já o *stroke* 6 encontra-se fora do raio máximo de agrupamento de 50 km, embora haja sobreposição da sua elipse de segurança com o lugar geométrico da descarga (raio de 10 km).

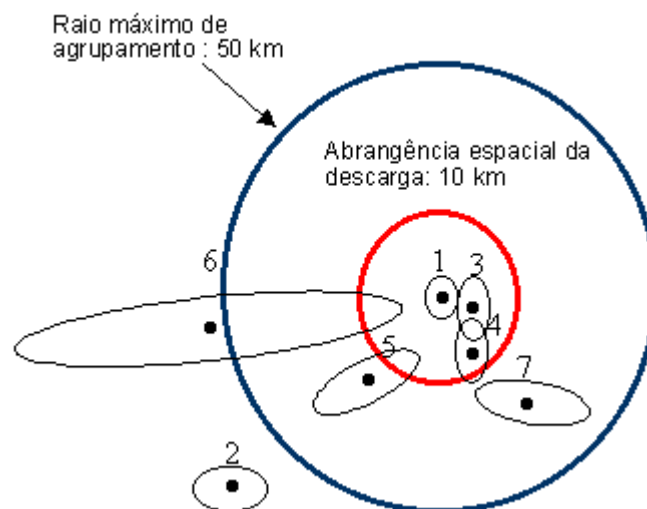


Fig. 4.11 - Algoritmo de agrupamento – São pertencentes a um mesmo *flash* os *strokes* 1,3,4 e 5. Figura adaptada da referência [Cummins et al, 1998].

# 5 Análise Crítica dos Modelos e Critérios Adotados pelos LLS's

## 5.1 *Introdução*

No capítulo anterior estão resumidos os critérios de discriminação de descargas aplicáveis a cada tipo de estação detectora, os critérios para o agrupamento de *strokes* pertencentes ao mesmo *flash* e o modelo utilizado pelos LLS's para a estimativa da intensidade de corrente.

Neste capítulo apresenta-se uma análise crítica dos modelos e critérios adotados pelos LLS's. Inicialmente consideram-se os modelos que relacionam a intensidade de corrente às intensidades de sinal EM medidas nas estações remotas dos sistemas. Em seguida, no item 5.3, considera-se a influência dos critérios adotados para a discriminação do tipo de descarga e, também, a influência de alguns parâmetros do algoritmo de processamento na contaminação dos registros de descargas nuvem-solo por descargas intranuvens.

---

Ainda neste capítulo é apresentada uma análise da influência dos critérios de agrupamento de *strokes* na obtenção da base de dados de *flashes*.

## 5.2 Modelos para Correlação entre os Campos Medidos e Intensidade da Corrente de Descarga

O processo para a estimativa da amplitude da corrente de descarga realizado pelos LLS's é dividido em três etapas. Primeiramente, é realizada a normalização das intensidades dos sinais medidos pelos sensores sensibilizados em função da distância envolvida entre os mesmos e o evento. Em seguida, calcula-se o valor médio dos sinais normalizados, o qual é utilizado para estimar a amplitude da corrente de retorno através de uma relação linear.

As versões mais antigas dos LLS's do tipo LLP e LPATS consideram o solo um condutor perfeito. O modelo empregado para estimativa da amplitude de corrente desconsidera as atenuações dos sinais eletromagnéticos devido à condutividade finita do solo real e a normalização dos sinais é realizada pela simples relação inversa:

$$S_{ref,i} = S_i \frac{D_i}{D_{ref}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

onde:

$D_i$ : distância entre a  $i$ -ésima estação detectora e o ponto de incidência da descarga;

$S_i$ : intensidade do sinal medido pela  $i$ -ésima estação detectora;

$S_{ref,i}$ : valor normalizado da intensidade de sinal da  $i$ -ésima estação em referência à distância  $D_{ref}$

$D_{ref}$ : distância de normalização (usualmente é utilizada a distância de 100 km).

Atualmente, o modelo empregado por sistemas de detecção dos tipos IMPACT e híbridos tenta compensar os efeitos da atenuação não linear dos campos distantes à medida que estes se propagam. Esta compensação é realizada durante a etapa de normalização dos sinais medidos. A formulação empregada para a normalização dos sinais corresponde a Eq. 4.2 repetida a seguir.

$$S_{ref,i} = C.S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^P e^{\frac{D_i - D_{ref}}{A}}$$

Os valores usualmente adotados para os parâmetros do modelo correspondem a valores *default* indicados pelo fabricante (expoente de atenuação  $P=1,13$ , e constante de espaço  $A=10^5$  km).

Com o objetivo de entender o processo de obtenção dos valores indicados pelo fabricante para os parâmetros do modelo de atenuação e da regressão linear utilizada para estimativa da amplitude da corrente, foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais estudos de calibração de LLS's. Uma síntese destes estudos é apresentada a seguir na perspectiva de esclarecer a evolução do desenvolvimento do modelo de estimativa de corrente para o modelo atualmente proposto.

### ***5.2.1 Revisão das Metodologias Empregadas para Calibração da Intensidade de Corrente de LLS's***

A calibração adequada de um determinado LLS requer referências reais de medições de descargas atmosféricas para fins de comparação com as indicações do LLS em estudo. Como resultado deste tipo de estudo, é possível a indicação de ajustes e de valores mais adequados para os parâmetros do modelo empregado pela central de processamento.

Usualmente, os estudos de calibração utilizam medições de correntes de descargas induzidas por foguetes. Os valores das amplitudes das correntes medidas são utilizados como referência e são correlacionados às intensidades de sinal médio normalizado indicadas pelo LLS referentes aos mesmos eventos.

O primeiro estudo de relevância para fins de calibração foi realizado por **Orville** [Orville, 1991]. O pesquisador utilizou 18 registros de correntes de retorno (*strokes* negativos) induzidas por foguetes no Centro Espacial Kennedy (NASA) na península da Flórida, coletados no período de 1985-88. Neste estudo foi considerada uma sub-rede da

---

NLDN (rede norte-americana de detecção de descargas atmosféricas) composta por 6 estações DF's localizadas na península.

As intensidades de correntes medidas no Centro Espacial foram correlacionadas com eventos registrados pela sub-rede. Primeiramente, as intensidades de sinais reportadas pelas estações<sup>1</sup> sensibilizadas por cada evento foram normalizadas a uma distância de 100 km, utilizando a simples relação inversa (Eq. 5.1). Posteriormente, calculou-se o valor médio dos sinais normalizados  $\overline{S}_{100}$  para cada um dos *strokes* correlatos. A correlação entre os 18 valores das correntes medidas e os respectivos valores de  $\overline{S}_{100}$  é mostrada na figura 5.1. A curva de regressão linear  $I_{pico} = 2,3 + 0,19 \cdot \overline{S}_{100}$  foi obtida através da maximização do coeficiente de correlação (R=0,89).

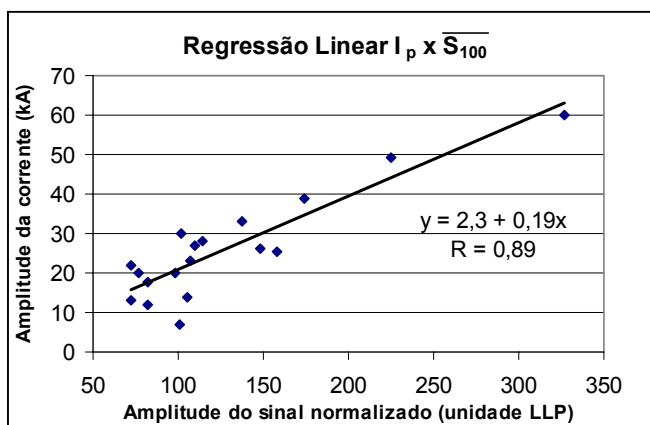


Fig 5.1 – Correlação entre os valores de correntes de descargas medidas e os valores médios dos sinais normalizados. Cada ponto corresponde aos valores associados a um *stroke*.

Em função dos dados utilizados para obter a regressão, esta foi considerada representativa para valores de corrente até 60 kA (máxima corrente encontrada). No universo de 18 medições apenas duas possuíam intensidade superior a 40 kA.

<sup>1</sup> Espera-se que a intensidade de sinal reportada pelo sensor seja proporcional à intensidade de fluxo magnético, originado pela corrente de retorno, no local de instalação do sensor. Esta intensidade é expressa em unidades LLP (unidade arbitrária de saída do sensor) que se relaciona à densidade de fluxo magnético (ou intensidade de campo magnético) a partir de um determinado fator de conversão, por exemplo, 15nT=100LLP. O fator de conversão pode diferir conforme o tempo de frente do sinal utilizado para calibração do sensor [Herodotou et al, 1993].



Numa segunda etapa, na perspectiva de avaliar a atenuação das intensidades de sinais EM em função da distância propagada, o pesquisador traçou curvas de atenuação utilizando os valores de intensidades dos sinais medidos pelos DF's. Para cada evento, o autor buscou uma curva do tipo:

$$S = a \cdot D^{\beta} \quad \text{Eq 5.2}$$

onde a intensidade  $S$  é descrita em função de um expoente de atenuação  $\beta$  aplicado à distancia propagada  $D$  e de uma constante empírica  $a$ .

Tal curva ajusta as intensidades de sinais brutos medidas por pelo menos 4 DF's às distâncias<sup>2</sup> entre cada sensor e o local de lançamento dos foguetes (figura 5.2). Foram utilizadas 7 descargas induzidas, obtendo 7 curvas de regressão. Os expoentes de atenuação  $\beta$  variaram de  $-0,96$  a  $-1,20$ , com um valor médio de  $-1,13$ . Os coeficientes de correlação variaram de  $0,93$  a  $0,99$ .

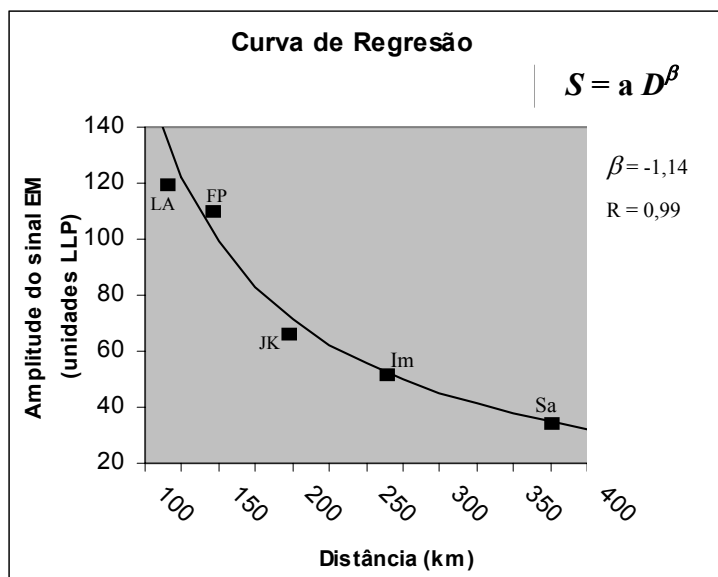


Fig 5.2 – Exemplo de uma curva  $S = a D^{\beta}$  na análise da atenuação da intensidade de sinal EM em função da distância. Cada ponto corresponde ao valor de intensidade medido por uma das estações participantes da solução da descarga, bem como sua distância à estação de lançamentos de foguetes. Essa descarga foi percebida por 5 estações. Figura adaptada da referência [Oville, 1991].

<sup>2</sup> Distâncias entre o local de lançamento dos foguetes e os 6 sensores DF's que compõem a sub-rede em estudo: 117,9 km, 145,1 km, 197,2 km, 259,1 km, 379,4 km, 426,8 km.

Posteriormente, ***Idone e co-autores*** [Idone et al, 1993] apresentaram uma reavaliação da calibração da NLDN (rede norte-americana de detecção de descargas atmosféricas) realizada por Orville, utilizando uma amostra mais significativa: 56 medições (*strokes* negativos) coletadas durante o período de 1985-1991. A mesma sub-rede de 6 estações DF's foi utilizada.

Nesta nova calibração, uma nova curva de regressão linear foi obtida  $I_{pico} = 4,2 + 0,171 \cdot \overline{S}_{100}$ , sendo o coeficiente de correlação 0,881.

Na avaliação da atenuação da intensidade de sinal com a distância foram utilizadas 5 novas medições de descargas induzidas. A média encontrada para os 12 casos foi  $\overline{\beta} = -1,09$ .

Uma análise adicional àquelas apresentadas por Orville foi realizada neste novo estudo. Os autores re-normalizaram os dados das estações DF's considerando diferentes valores do expoente de atenuação  $\beta$ :

$$S_{100,i} = S_i \left( \frac{D_i}{100} \right)^{-\beta} \quad \text{Eq. 5.3}$$

$\beta$  variando de  $-0,8$  a  $-1,4$  (incrementos de  $0,05$ )

Para cada valor de  $\beta$ , foi obtido um conjunto de  $\overline{S}_{100}$  (conjunto com 56 valores). Este procedimento foi adotado com o objetivo de verificar se qualquer valor de  $\beta$  maximizaria o coeficiente de correlação entre  $I_{pico}$  e  $\overline{S}_{100}$ . Na análise dos resultados, é verificado que o coeficiente varia muito pouco ( $0,875$  até o máximo de  $0,883$  encontrado quando  $\beta = -1,13$ ).

Um terceiro trabalho de relevância relativo à calibração de LLS's foi realizado por ***Herodotou e co-autores*** [Herodotou et al, 1993]. Diferentemente dos trabalhos já citados, neste estudo não foram utilizadas medições reais de descargas induzidas por foguetes. Com base nos dados brutos dos DF's do LLS em Ontário (Canadá), os autores avaliam o comportamento da atenuação dos sinais EM medidos e indicam um terceiro modelo de atenuação como mais adequado ao conjunto de dados. Neste modelo, a atenuação do sinal de campo é descrita pela relação 5.4:

$$S \propto \exp^{-\alpha D} \cdot D^{-1} \quad \text{Eq. 5.4}$$

Conforme o conjunto de *strokes* analisados, o valor da constante  $\alpha$  variou de (1/799)  $\text{km}^{-1}$  a (1/582)  $\text{km}^{-1}$ . Tais valores de  $\alpha$  implicam uma atenuação de sinal para um valor compreendido entre 50% e 60% do valor inicial para uma distância de propagação de 400 km.

Os autores também normalizaram as intensidades de sinal medidas considerando o modelo mais simplificado ( $S \propto D^{-1}$ ) e verificaram que o valor do desvio padrão em relação ao valor mediano das intensidades calculadas foi de 24%. Na normalização conforme o modelo “exponencial” proposto pelos autores o desvio padrão reduziu para 10%.

Nesse estudo ficou nítido que a definição do modelo a ser adotado deve ser realizada com muito cuidado. Em sua amostra de dados de descargas em Ontário (relativos ao ano de 1989), o autor encontrou o valor mediano da distribuição de corrente 44 kA ao utilizar o modelo exponencial, enquanto que, ao utilizar o modelo mais simples o valor encontrado foi 30 kA.

Com base nos estudos de Herodotou, ***Idone e co-autores*** re-normalizaram o conjunto de dados utilizando o modelo de propagação exponencial. Nesta análise, variou-se  $\alpha$  de (1/400)  $\text{km}^{-1}$  a (1/2000)  $\text{km}^{-1}$  (com incrementos de 50 km) e encontrou-se o coeficiente de correlação máximo de 0,884 quando  $\alpha=(1/1050)$   $\text{km}^{-1}$  ao traçar a curva de regressão  $I_{pico} \times \overline{S_{100}}$ .

Na tabela 5.1 estão sumarizadas as relações que descrevem a atenuação dos sinais EM distantes medidos em função da distância, conforme os estudos de calibração descritos anteriormente. As respectivas relações para normalização das intensidades dos sinais são também indicadas.

Tab 5.1 – Relações para a normalização das intensidades de sinais EM.

<b>Atenuação dos Sinais EM distantes</b>	<b>Normalização de Intensidades de sinais</b>
$S \propto D^{-1}$	$S_{ref, i} = S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)$
$S \propto D^{\beta}$	$S_{ref, i} = S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^{1,13}$ ( $\beta=-1,13$ )
$S \propto \exp^{-\alpha D} * D^{-1}$	$S_{ref, i} = S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right) \exp(\alpha(D_i - D_{ref}))$ ( $\beta=-1$ ) ( $1/799 \text{ km}^{-1} < \alpha < 1/582 \text{ km}^{-1}$ )

A tabela 5.2 apresenta um resumo dos resultados dos dois estudos de calibração da NLDN discutidos anteriormente.

Tab. 5.2 – Estudos de calibração da NLDN.

<b>Estudos</b>	<b>Local</b>	<b>Dados Referência Período</b>	<b>Função de regressão linear</b>	<b>Coef. correlação</b> Dados normalizados c/
Orville, 1991 [Orville, 1991]	Península da Flórida, Estados Unidos (rede de 6 DF's)	18 strokes (descargas induzidas negativas) 1985-1988	$I_{pico} = 2,3 + 0,19 \cdot \bar{S}_{100}$	0,89      1/D
			$I_{pico} = 8,6 + 0,11 \cdot \bar{S}_{100}$	0,78 (*2)      1/D <sup>1,13</sup>
Idone, 1993 [Idone et al, 1993]	Península da Flórida, Estados Unidos (rede de 6 DF's)	57 strokes (*1) (descargas induzidas negativas) 1985-1991	$I_{pico} = 4,2 + 0,171 \cdot \bar{S}_{100}$	0,881      1/D
			$I_{pico} = 5,2 + 0,148 \cdot \bar{S}_{100}$	0,883      1/D <sup>1,13</sup>
			$I_{pico} = 5,9 + 0,140 \cdot \bar{S}_{100}$	0,884      1/{D exp( $\alpha D$ )} (*3)

\*1 – Uma medição é desconsiderada nos estudos devido ao seu elevado desvio padrão.

\*2 – Neste caso não é verificada a melhoria da função de regressão ao utilizar os dados re-normalizados com 1/D<sup>1,13</sup>

\*3 – O coeficiente de correlação máximo 0,884 foi encontrado quando  $\alpha=(1/1050) \text{ km}^{-1}$ .

Nos estudos de Idone, a melhoria nos resultados ao re-normalizar as intensidades de sinais medidas nas estações DF's pode ser considerada praticamente desprezível (os coeficientes de correlação indicados na tabela 5.2 são similares). Se as distâncias envolvidas entre os eventos e as estações DF's fossem maiores (por exemplo, superiores a 400 km), provavelmente os efeitos de se utilizar os diferentes modelos seriam percebidos com maior evidência. No caso as 4 estações DF's mais próximas da base de lançamento de foguetes

apresentam relações entre suas distâncias relativamente pequenas, no máximo 2,2 (259 km/118 km).

Com relação aos estudos de Orville, ao contrário do que se esperava, a re-normalização implicou uma redução significativa do coeficiente de correlação. O autor atribui tal comportamento à reduzida amostra (18 registros).

Os valores encontrados para os coeficientes da função de regressão linear bem como para os parâmetros do modelo de atenuação podem caracterizar bem o sistema em calibração. Porém, a utilização destes mesmos valores encontrados em outros sistemas requer cautela. Condições de solo significativamente diferentes daquelas da Flórida, ou mesmo de Ontário, poderiam implicar erros significativos na estimativa das intensidades de correntes.

### 5.2.2 Reavaliação dos Parâmetros do Modelo de Estimativa de Corrente dos LLS's

O modelo utilizado pela maior parte dos LLS's instalados combinam elementos descritos por Herodotou e Idone ( $E \propto D^\beta \cdot e^{(-\alpha D)}$ ) [Murphy and Pifer,1998]. Como resultado dos estudos de calibração realizados na Flórida, os valores de referência para os parâmetros do modelo de cálculo da intensidade de sinal normalizado (equação 4.2, repetida abaixo) são:  $P = -\beta = 1,13$  e a constante de espaço  $A = 1/\alpha = 10^5$  km.

$$S_{ref,i} = C.S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^P e^{\frac{D_i - D_{ref}}{A}}$$

Estes valores de referência foram até então indicados para os LLS's que operam na condição de “alto ganho”<sup>3</sup>, quando é *relevante compensar o efeito de atenuação do campo* devido à sua propagação por longas distâncias sobre solo de condutividade finita. Nesses casos, os valores de referência adotados para as constante que relacionam a intensidade

---

<sup>3</sup> Condição de “alto ganho” corresponde a um dos modos de operação do LLS, que no caso é aplicável a rede de detecção cuja distância entre sensores é elevada (distância nominal 370 km)

média de sinal e a intensidade de corrente (equação 4.3, repetida abaixo) são  $k_0 = 0$  e  $k_1 = 0,185$  [Cummins et al, 1998].

$$I_{pico} = k_0 + k_1 \cdot \bar{S}_{ref}$$

Pode-se observar que estes valores de referência para os parâmetros  $k_0$  e  $k_1$  diferem de quaisquer valores indicados nos estudos de calibração descritos no item 5.2.1. Isto se deve ao fato de que os novos valores se aplicam a redes que incluem a estação IMPACT ao invés das “antigas estações DF’s”. A tecnologia IMPACT apresenta maior sensibilidade para a detecção de eventos menos intensos, implicando, portanto, outra curva de regressão, capaz de contemplar tal melhoria de sensibilidade. Conforme as curvas de regressão obtidas por Idone, os valores mínimos de  $I_{pico}$  correspondem aos valores  $k_0$  (valor de corrente para uma intensidade de sinal nula). A curva de regressão que intercepta o zero é capaz de contemplar eventos de baixa intensidade de corrente.

A equação 4.2 acima pode ser simplificada para expressar a condição de condutividade infinita do solo ao se adotar para  $P$  e  $A$  respectivamente os valores 1 e  $10^7$  km. Quanto à função de regressão, outros valores de referência que podem ser utilizados são  $k_0 = 0$  e  $k_1 = 0,23$ . O valor 0,23 é estimado teoricamente aplicando-se o modelo de corrente de retorno do tipo linha de transmissão, com a velocidade de corrente igual a 1/3 da velocidade da luz.

Estudos mais recentes [Crammer et al, 2004] [Cigré, 2005] reavaliam os modelos para estimativa da corrente e indicam que, para LLS's onde as distâncias entre os eventos e os sensores sejam grandes (podendo superar 400 km), os parâmetros que tradicionalmente eram utilizados ( $P = 1,13$  e  $A = 10^5$  km) podem não representar de forma adequada as perdas na propagação dos campos, subestimando a intensidade de corrente. Neste caso, a recomendação por parte do fabricante passa a ser a redução do valor da constante de espaço, mantendo o valor de  $P = 1$ .

Adotando-se essa recomendação ( $P=1$ ), sugere-se em [Cigré, 2005] um procedimento para a obtenção do “melhor” valor para a constante de espaço  $A$  de um determinado LLS, considerando-se dois tipos de sistema:

- Procedimento para *LLS's do tipo híbrido*:

- 1º) Definir um conjunto de dados representativo do LLS em análise (por exemplo: período de um mês de dados).
- 2º) Desabilitar a participação de todos os sensores do tipo LPATS no reprocessamento dos dados, evitando assim a inclusão de intensidades de sinal de sensores que possam não estar devidamente calibrados.
- 3º) Uma vez desabilitada a participação de todos os sensores do tipo LPATS, efetuar o reprocessamento dos dados fixando a constante de atenuação  $P=1$  e variando apenas a constante de espaço  $A$  (por exemplo: 800 km a 1300 km, com incremento de 100 km). Para cada condição de reprocessamento, calcula-se o ganho do sensor, através da relação entre a intensidade de sinal normalizado medido por ele,  $S_{100,i}$ , e o valor médio das intensidades normalizadas pelos sensores que participaram da solução do mesmo evento (*stroke*),  $\bar{S}_{100}$ .

$$\text{Ganho do Sensor}_i = \frac{S_{100,i}}{\bar{S}_{100}} \quad \text{Eq. 5.5}$$

- 4º) Calcular o ganho do sensor para cada *stroke* e para cada sensor individual que esteja a uma distância máxima de 500 km do local de incidência. Em seguida, calcular o valor médio do ganho do sensor e seu desvio padrão, para cada uma das condições de reprocessamento. O valor médio do ganho poderá ser maior ou menor que o valor unitário se a constante de espaço  $A$  não for adequada. O melhor valor para  $A$  é aquele onde o valor médio do ganho se aproxima do valor unitário e minimiza o desvio padrão da estatística. A figura 5.3 ilustra um exemplo de resultado obtido no trabalho [Cigré, 2005].

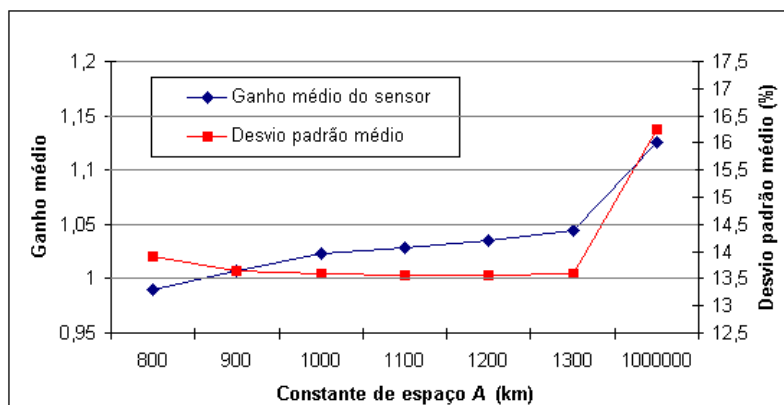


Fig 5.3 – Valor médio do ganho de um dado sensor e valor médio do desvio padrão em função da constante de espaço  $A$ . Figura adaptada da referência [Cigré, 2005]

Pode-se observar que o valor de ganho mais próximo do unitário foi para  $A=900$  km e o desvio padrão foi mínimo para a faixa de 1000 a 1300 km. Nesta figura está representado também o caso da constante de espaço grande ( $A=10^6$  km) para fins de comparação. A diferença entre  $A=900$  km e  $A=1000$  km é pequena e nos dois casos o desvio padrão reduziu de aproximadamente 16% para 13,5%.

- 5°) Após selecionar o valor de  $A$  desejado (por exemplo,  $A=1000$  km), obter a partir dos dados reprocessados em tal configuração os valores adequados de correção de ganho das estações LPATS<sup>4</sup>. Em seguida, aplicar os valores obtidos na configuração dos sensores na central de processamento LP2000.
- 6°) Finalmente, efetuar o reprocessamento dos dados com a configuração dos sensores ajustados, permitindo a participação das intensidades de sinal das estações LPATS para inferir a intensidade de corrente. Este processo deve então confirmar a validade das correções de ganho aplicadas às estações LPATS.

Com relação ao procedimento descrito acima, especialmente o segundo passo, torna-se oportuno esclarecer o motivo de se desconsiderar a priori a participação das estações LPATS. Tais estações medem a intensidade de sinal de campo elétrico em uma antena vertical. O campo elétrico resultante na antena pode diferir do campo puramente originado pela descarga atmosférica. Isto pode ocorrer, por exemplo, devido a alteração do campo

<sup>4</sup> Para cada modificação do modelo de atenuação, os valores de correção de ganho das estações LPATS devem ser recalculados.



resultante pela influência do local de instalação do sensor. As antenas localizadas em diferentes alturas podem reportar diferentes valores absolutos de campo. Diferentemente das estações IMPACT, só é possível realizar a calibração das LPATS quando estas já estão instaladas em campo. Em sistemas híbridos é possível calibrar os sensores LPATS a partir dos sinais de campo magnético das estações IMPACT que são devidamente calibradas em laboratório. Esta calibração consiste basicamente em ajustar as intensidades de sinal normalizado das estações LPATS àquelas intensidades normalizadas das estações IMPACT referentes aos mesmos *strokes*.

- Procedimento para LLS's que possuem apenas estações LPATS:

Nesse caso não é possível realizar a calibração dos sinais em termos de valores absolutos de campo elétrico. Conforme [Cigré, 2005], é indicado:

- 1º) Ajustar a intensidade de sinal normalizado de cada estação ao valor médio das intensidades de sinal normalizado de todas as estações que participaram do mesmo evento.
- 2º) Em seguida, considerando uma massa de dados de *strokes*, obter a expressão que relaciona o valor mediano da intensidade de sinal normalizado ao valor mediano de intensidade de corrente de *flashes* negativos (valor típico 30 kA).

### ***5.2.3 Análise Comparativa de Resultados Providos por Modelos Publicados na Literatura para Fins de Análise Aplicada ao LLS-MG***

Como discutido no item 5.2.1, a literatura técnica da área apresenta algumas aproximações que tentam compensar os efeitos da atenuação não linear dos campos distantes originados pelas descargas atmosféricas [Mair et al, 1998]. Tal compensação é efetuada na normalização das intensidades de sinais EM medidas nas estações dos sistemas.

---

Neste item compararam-se resultados de tais aproximações com aquele relativo ao modelo atualmente aplicado ao LLS-MG. A tabela 5.3 mostra as formulações para o cálculo da intensidade de sinal normalizada.

O modelo utilizado pela NLDN (na configuração híbrida LPATS / IMPACT) e LLS-MG combinam elementos descritos por Herodotou e Idone ( $E \propto (1/D)^\beta \cdot e^{(-\alpha D)}$ ).

Tab 5.3 – Diferentes aproximações para a normalização das intensidades de sinais. Tabela adaptada da referência [Mair et al, 1998].

Orville e Idone	$S_{ref,i} = S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^{1,09}$
Herodotou	$S_{ref,i} = S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right) e^{\alpha(D_i - D_{ref})}$ $\alpha$ é uma constante empírica ( $1/582 \text{ km}^{-1} < \alpha < 1/1050 \text{ km}^{-1}$ )
Cooray et. al.	$S_{ref} = S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^{1,064}$
LLS-MG e NLDN (na configuração híbrida)	$S_{ref,i} = C \cdot S \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^{1,13} e^{\frac{D_i - D_{ref}}{10^5}}$ $C$ apresenta o valor 1

Para comparação dos modelos de atenuação do sinal é traçado um gráfico, onde se determina a intensidade do sinal propagado a uma distância de 1 km (considerada como referência), utilizando-se as diferentes aproximações (figura 5.4).

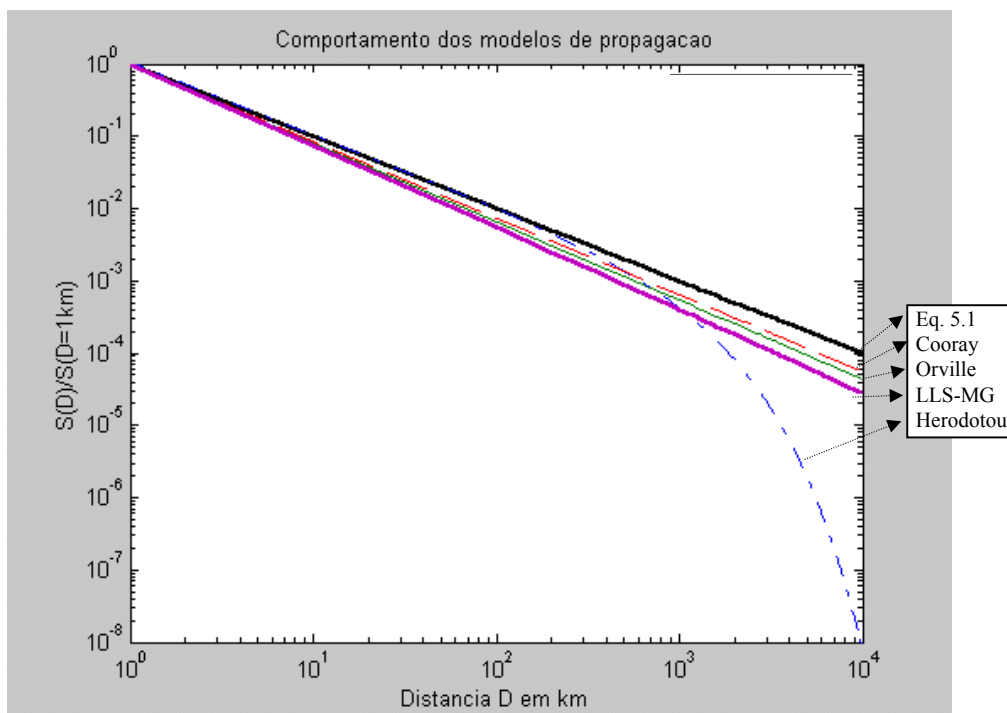


Fig. 5.4 – Comparação dos resultados gerados pelos diferentes modelos de atenuação do sinal. A intensidade do sinal à distância de 1 km é utilizada como referência. A curva de Herodotou foi traçada utilizando a constante  $\alpha=(1/1050) \text{ km}^{-1}$ .

Os resultados obtidos pelos diferentes modelos são aparentemente bastante similares, principalmente dentro da faixa operacional do LLS, que considera a distância máxima usual de 625 km entre o sensor e o evento. Os sinais provenientes de sensores sensibilizados com distâncias superiores a este limite não são utilizados no processo de estimativa do valor de corrente. Dentre estes modelos, o modelo aplicável ao LLS-MG é o que apresenta maiores níveis de atenuação.

Uma análise comparativa entre dois modelos de atenuação foi apresentada por Chisholm e Cummins [Chisholm and Cummins, 2006]. Nesta análise foram consideradas duas expressões para atenuação do sinal medido, uma delas com  $P=1,13$  e constante  $A$  considerada “infinita” e a outra expressão com a redução do valor de  $A$  para 1000 km com  $P=1$ . O valor médio encontrado para a amplitude de corrente de *strokes*, referente a uma amostra de mais de 110 mil registros da NLDN, foi de 12,35 kA aplicando a primeira expressão e 13,16 kA aplicando a segunda expressão (7% maior). Tal diferença pode ser considerada pouco significativa. Porém tem-se a expectativa de que as diferenças sejam um pouco maiores para sistemas que apresentam distâncias entre sensores relativamente grandes, como é o caso do LLS-MG.

Nenhum destes modelos considera de forma explícita os valores da condutividade efetiva do solo no caminho de propagação do campo. Como descrito nos itens anteriores, os valores dos parâmetros do modelo de atenuação dos sinais de campo são obtidos de forma empírica. O modelo é aplicado como se o solo fosse homogêneo nos diferentes caminhos de propagação do campo até as estações do sistema.

Um estudo dos resultados do sistema austríaco mostrou diferenças significativas na redução da intensidade de sinal causada pelas diferentes características orográficas no caminho de propagação do sinal até as estações participantes das soluções das descargas [Mair et al, 1998]. Tal estudo indica a adequação de se utilizar um modelo de propagação mais sofisticado que dependa do ângulo de chegada do sinal em cada uma das estações detectoras do sistema.

Destaca-se a necessidade da realização de estudos detalhados das condições de solo e relevo específicas da região de cobertura de cada LLS em particular bem como estudos de calibração local, que se destinam a garantir maior confiabilidade dos resultados gerados.

No caso específico do LLS-MG ou mesmo se tratando da RINDAT, análises de desempenho<sup>5</sup> dos sensores da rede de detecção foram efetuadas pelo fabricante que apontaram correções necessárias para os sensores da rede. Porém, a partir de então, algumas novas estações foram integradas à RINDAT, visualizando-se a necessidade de se efetuar um novo estudo para eventual indicação da necessidade de correções adicionais. Os esforços despendidos na determinação do valor adequado da constante de espaço  $A$  e na indicação dos valores adequados de ganho das estações LPATS só são justificados se estes processos forem independentes das correções indicadas pelo fabricante durante a análise de desempenho da rede de sensores.

---

<sup>5</sup> A análise de desempenho dos sensores de um LLS é usualmente realizada pelo fabricante do sistema. O resultado desta análise compreende a indicação de correções de erros sistemáticos e aleatórios de medidas de ângulo e tempo, indicação de ajustes para correção de alinhamento de direção das antenas magnéticas das estações IMPACT, correção de ganho das estações LPATS e outros ajustes.

### ***5.3 Critérios de Discriminação do Tipo de Descarga e Análise da Contaminação de Registros de Descargas Nuvem-solo por Descargas de Nuvens***

Os LLS's, em sua maioria, foram concebidos com a finalidade de detectar e registrar descargas nuvem-solo (CG) e, para tanto, operam em uma faixa de frequência LF/VLF, apropriada para a detecção deste tipo de descarga. Sistemas até então pouco difundidos como os sistemas SAFIR, LDAR e a nova geração de sensores LS8000 (atualmente comercializado pela VAISALA) detectam tanto eventos CG quanto descargas de nuvens (CD). Para a detecção de eventos CD com boa eficiência, tais sistemas trabalham também em uma outra faixa de frequência VHF, item 4.3.4. Esses sistemas permitem cálculos de localização de descargas CG e CD com boa confiabilidade. No caso de LLS's de tipo LPATS ou híbridos (LPATS & IMPACT), é possível configurar o sistema de forma a permitir reportar as descargas intranuvens<sup>6</sup> que *eventualmente* são detectadas por suas estações. Porém, tais registros de descargas possuem baixo grau de qualidade (localização e demais parâmetros apresentam baixa confiabilidade).

As estações IMPACT apresentam critérios elaborados para a discriminação do tipo de descargas. Conforme interesse do usuário, é possível configurar tais estações para enviar à central somente os dados de sinais considerados provenientes de descargas CG. As IMPACTs versões CT, ES e ESP apresentam melhor eficiência para detecção de descargas CD, porém a eficiência de detecção destes eventos é bem inferior à eficiência das estações do tipo SAFIR e LS8000.

Os critérios de discriminação das estações IMPACT consideram a largura de pulso (11 - 31 $\mu$ s), tempo de subida (0 - 24 $\mu$ s) e razão E/B (0,2 - 10). Os valores entre parênteses são os valores sugeridos pelo fabricante e podem ser alterados pelo usuário do sistema a fim de adequar às particularidades das formas de onda de campo associado às descargas usualmente observadas na região de instalação do sistema [Global Atmospheric, 1994].

---

<sup>6</sup> Demais tipos de descargas de nuvens (entre-nuvens e nuvem-estratosfera) são bem menos frequentes que as intranuvens. Elas são pouco conhecidas, mas acredita-se que suas características sejam similares às das descargas intranuvens e, possivelmente, os campos associados sejam também similares.

A estação LPATS, especialmente a série III, é a maior responsável pela contaminação da base de dados de descargas CG por descargas de nuvem. Isto se deve ao fato dela não possuir critérios elaborados para a discriminação do tipo de evento (item 4.3). Os critérios assumidos na classificação do tipo de descargas CG e de nuvem não são divulgados de forma clara pelo fabricante.

A identificação final do tipo de evento (CG ou CD) é realizada na central de processamento. O usuário pode configurar o algoritmo de processamento adotando um valor para o parâmetro (critério) dedicado à identificação do tipo de descarga. Tal parâmetro pode diferir conforme a versão da central.

Nas versões anteriores da central de processamento de um sistema híbrido, o parâmetro utilizado para tal identificação é designado *Allow*. Através da alteração do valor deste parâmetro, o usuário pode permitir ou não a utilização dos relatos classificados pelas estações LPATS como descargas CD nas soluções das descargas [Global Atmospheric, 1997].

Nos casos onde o algoritmo de processamento está configurado para permitir registros CD (parâmetro *Allow* definido como "yes"), a descarga somente é reportada como CD se todas as estações participantes da solução da descarga classificarem o sinal como proveniente de uma descarga de nuvem. Caso contrário, se pelo menos uma estação LPATS identificar o evento como CG ou se tiver a participação de pelo menos uma estação IMPACT na solução da descarga, a mesma é considerada como nuvem-solo. A definição do parâmetro como "Yes" garante ao sistema um maior número de registros, uma vez que é exigido um número mínimo de estações sensibilizadas para o cômputo da solução da descarga. Por outro lado, configura-se um cenário mais vulnerável à contaminação, podendo comprometer a qualidade dos dados gerados.

Caso o parâmetro esteja configurado no modo "não permitir" os relatos CD no cômputo da descarga (parâmetro *Allow* definido como "no"), constitui-se um cenário (situação) mais exigente, onde somente os relatos classificados como CG são considerados no processamento da informação da descarga. Conseqüentemente, um número menor de registros e uma maior precisão nas informações são obtidos. Mesmo que o sistema esteja

---

configurado neste modo, *eventuais sinais* de campo originados por descargas intranuvens e identificados erroneamente como CG pelas estações LPATS podem contaminar os registros de descargas CG.

No entanto, na versão mais atual da central de processamento é possível configurá-la de forma a desconsiderar a classificação do tipo de evento identificada pelo sensor, classificando-o na própria central durante o processamento. Esta classificação é realizada através da adoção de um valor para o parâmetro designado ***PTZ threshold*** (*PTZ* - do inglês *peak-to-zero*). O valor indicado pelo fabricante é de 10  $\mu$ s para eventos negativos e 15  $\mu$ s para eventos positivos. Se a largura de pulso (tempo decorrido entre o instante de pico e o instante de passagem pelo limiar) for menor ou igual ao valor definido, o relato é identificado como CD. Ainda na configuração de processamento da central, são definidos critérios como o número de relatos CD exigido para que a descarga seja classificada como descarga de nuvem [VAISALA, 2003].

Uma forma de se reduzir a contaminação dos registros de descargas CG por descargas de nuvem é exigir a participação de pelo menos uma estação do tipo IMPACT na solução da descarga. Isto se deve ao fato deste sensor apresentar critérios mais elaborados para discriminação do tipo de descarga. Porém, deve-se ressaltar que a exigência de estação IMPACT, como forma de se aumentar o grau de confiabilidade nas soluções geradas, pode implicar a redução significativa de eventos CG válidos. A figura a seguir mostra o grau de participação de estação do tipo IMPACT na solução de descargas ocorridas durante o ano 2003, [Mesquita et al, 2005a]. Mapas muito semelhantes foram obtidos para massa de dados referentes a outros anos de estudo.

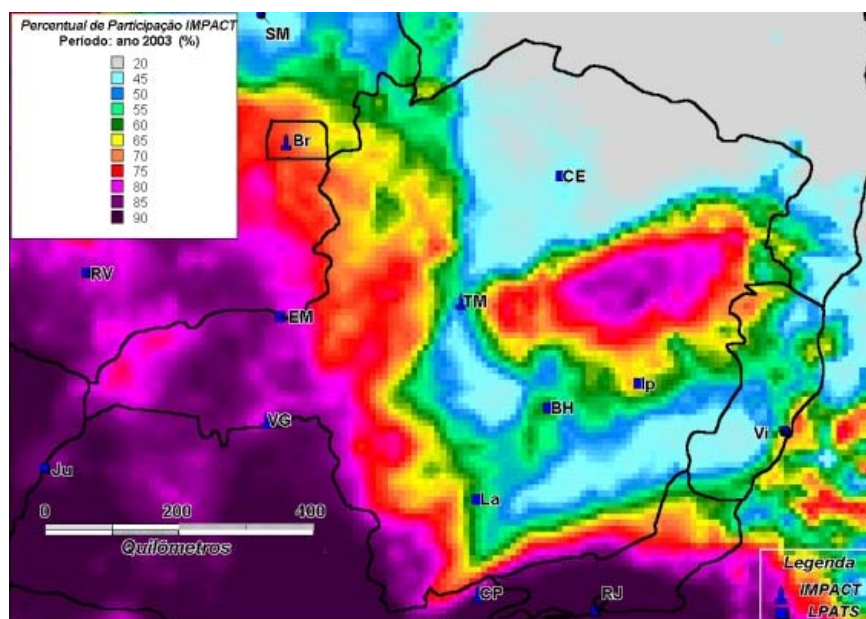


Fig 5.5 – Percentual de participação de pelo menos uma estação IMPACT nas soluções de *strokes* durante o ano de 2003.

No caso específico do Estado de Minas Gerais, verifica-se que em algumas regiões a participação é bastante reduzida, chegando a níveis inferiores a 20%. A exigência da participação de estação do tipo IMPACT só é justificada em LLS que possua um número e distribuição espacial destes sensores suficientes para garantir um nível razoável de participação em toda a região de cobertura do respectivo sistema.

A relativa similaridade de algumas formas de onda de campo originadas por descargas intranuvens com aquelas originadas por descargas CG, principalmente as positivas de baixa intensidade, se constitui na principal fonte de contaminação dos registros de descargas CG por descargas CD (itens 3.3.2 e 3.3.3). Tal similaridade dificulta a correta discriminação do tipo de evento por parte das estações do LLS.

Alguns trabalhos na literatura técnica da área consideram um nível mínimo de intensidade de correntes positivas de 10 kA<sup>7</sup>, desconsiderando todos os registros positivos que apresentam níveis menores de intensidade. Tal prática é adotada como forma de se minimizar a contaminação dos registros de descargas CG por descargas de nuvens. Para uma análise adequada deste procedimento usualmente adotado, foi realizado um levantamento do

<sup>7</sup> O fabricante do sistema recomenda desconsiderar eventos positivos inferiores a 10 kA, como forma de se reduzir o nível de contaminação dos registros CG por descargas de nuvens.



número de registros de descargas positivas no banco de dados reprocessados<sup>8</sup> do LLS-MG – no período de 5 anos (1999-2003), (tabela 5.4). Para o Estado de Minas Gerais, cerca de 13,5% dos *strokes* positivos possuem  $I_{pico}$  menores que 10 kA e representam cerca de 2,3% do número total de *strokes*. Os percentuais de *flashes* positivos com amplitudes menores que 10 kA representam cerca de 13,5 % do número de *flashes* positivos e 3,7% do número total de *flashes*.

Tab 5.4 – Número de registros de *strokes* e *flashes* no Estado de Minas Gerais referente ao período de 1999 a 2003.

<b>Base de dados em MG</b> Período: 1999 a 2003	<b>Nº de registros</b>	<b>Percentual relativo ao número total de <i>strokes</i></b>	<b>Percentual relativo ao número total de <i>flashes</i></b>
Nº total de <i>strokes</i>	6.582.787	-	-
Nº total de <i>flashes</i>	3.782.630		
Nº <i>strokes</i> positivos	1.108.400	16,84%	
Nº <i>flashes</i> positivos	1.034.111		27,34%
Nº <i>strokes</i> positivos - $I_{pico} \geq 10$ kA	958.686	14,56%	
Nº <i>flashes</i> positivos - $I_{pico} \geq 10$ kA	894.586		23,65%
Nº <i>strokes</i> positivos - $0 < I_{pico} < 10$ kA	149.714	2,28%	
Nº <i>flashes</i> positivos - $0 < I_{pico} < 10$ kA	139.525		3,69%

É importante destacar que os níveis encontrados para o percentual de *strokes* positivos ao longo do Estado apresentam grande variabilidade (figura 5.6a). Em algumas regiões, os percentuais chegam a valores elevados (40%) em relação ao valor de referência da literatura (10%). Foi elaborado também um mapa de percentual de *strokes* com valores de intensidade de corrente positiva compreendidos entre 0 e 10 kA a fim de se avaliar o grau de exposição à contaminação dos registros de descargas CG por descargas de nuvens (figuras 5.6b e 5.6c). O nível de contaminação esperado chega a ser representativo na região sul do Estado (18% da base de dados de *strokes* totais e 61% da base de dados de *strokes* positivos).

<sup>8</sup> Configuração para reprocessamento dos dados: 16 estações detectoras, distancia máxima para participação de sensor é 625km, número mínimo de 4 informações (tempo e/ou ângulo) para o cômputo da descarga, razão máxima entre sinais normalizados de estações IMPACT é 1,3 e o parâmetro *Allow Cloud* está definido para não permitir a participação de relatos classificados como CD [Dias, 2002].

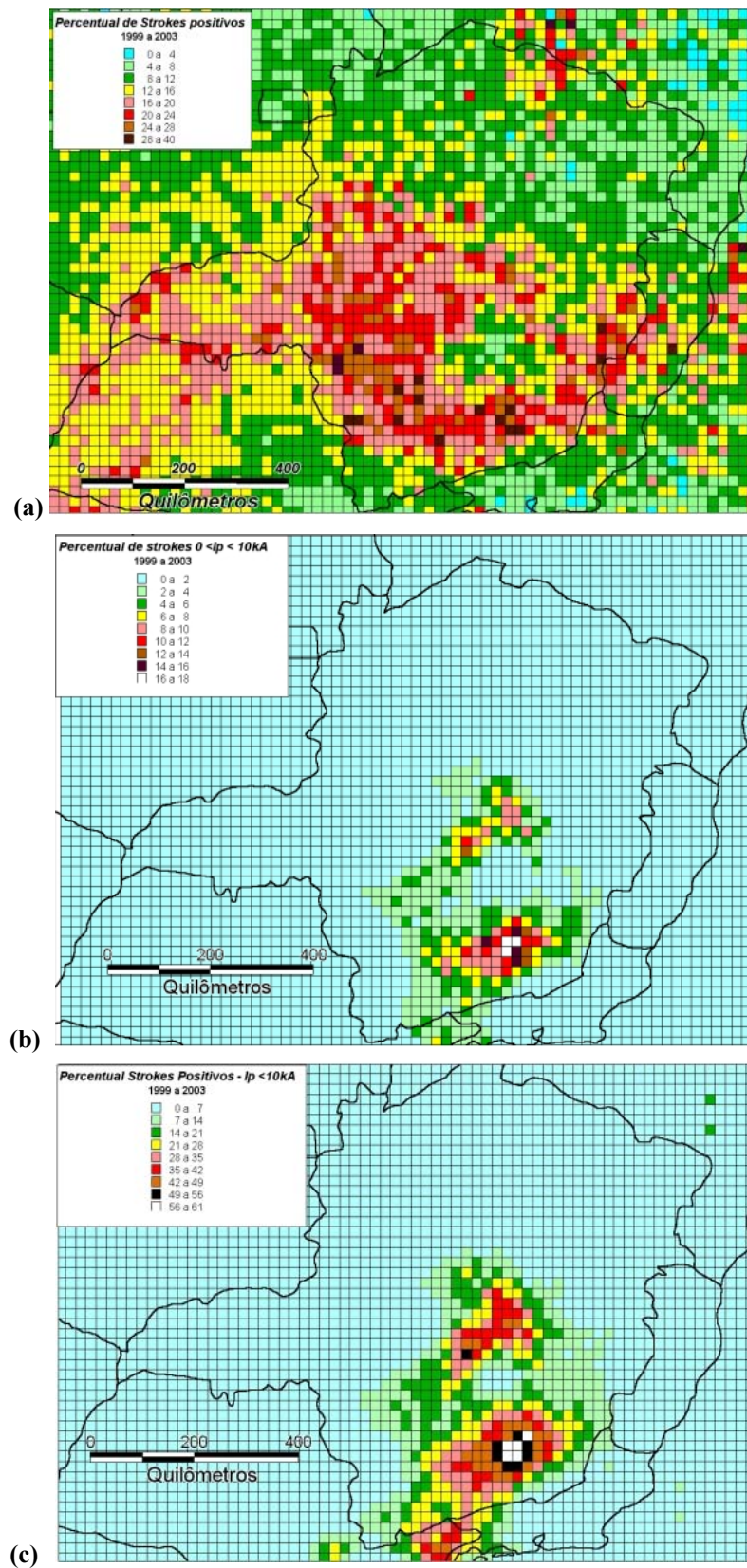


Figura 5.6: a) Percentual de *strokes* positivos no Estado de Minas Gerais.  
b) Percentual de *strokes* positivos –  $0 < I_{\text{pico}} < 10 \text{ kA}$  (em relação ao n° total de *strokes*)  
c) Percentual de *strokes* positivos –  $0 < I_{\text{pico}} < 10 \text{ kA}$  (em relação ao n° de *strokes* positivos)

Nem todos eventos positivos inferiores a 10 kA representam descargas de nuvem. Também podem existir eventos de nuvens com níveis superiores a 10 kA que podem ser identificados erroneamente pelo LLS como evento CG. Uma forma mais apurada de se estimar o nível de contaminação seria excluir aqueles eventos positivos de baixa intensidade, que tiveram a participação de pelo menos uma estação IMPACT, do número total de eventos positivos inferiores a 10 kA. Este tratamento dos dados é aplicável, visto que a identificação do tipo de evento pelas estações IMPACT ocorre de maneira mais precisa.

Ressalta-se novamente que a exigência de participação de estação IMPACT não deve ser aplicada durante o processamento da base de dados de uma forma geral e sim durante o tratamento apenas dos dados de *strokes* positivos de baixa intensidade. A tabela 5.5 mostra os novos números e percentuais que melhor representam o nível de contaminação de *strokes*. O nível de contaminação antes deste tratamento representava 2,3% da base total de *strokes* e 13,5% dos *strokes* positivos. Após o tratamento o mesmo passou a representar 2,1% da base total de *strokes* e 12,7% dos *strokes* positivos. A diferença é quase desprezível ao se tratar dos números totais para o Estado. Porém, ao considerar os níveis ao longo da área de cobertura, as diferenças podem ser significativas em alguns locais.

Tab 5.5 – Número de registros de *strokes* positivos no Estado de Minas Gerais. Nível de participação de IMPACT nos registros positivos de baixa intensidade.

<i>Base de dados em MG</i> Período: 1999 a 2003	Nº de <i>registros</i>	Percentual relativo ao número total de <i>strokes</i>	Percentual relativo ao número de <i>strokes positivos</i>
Nº total de <i>strokes</i>	6.582.787	-	-
Nº <i>strokes</i> positivos	1.108.400	16,84%	-
Nº <i>strokes</i> positivos - $0 < I_{pico} < 10$ kA	149.714	2,28%	13,51%
Nº <i>strokes</i> positivos - $0 < I_{pico} < 10$ kA Com participação IMPACT	9143	0,14%	0,82%
Nº <i>strokes</i> positivos - $0 < I_{pico} < 10$ kA Desconsiderando eventos com participação IMPACT	<b>140.571</b>	<b>2,14%</b>	<b>12,68%</b>

A figura 5.7 ilustra a reavaliação dos percentuais de contaminação da base de dados de *strokes* totais e de *strokes* positivos por eventos de nuvem. Os mapas 5.7a e 5.7b são bastante semelhantes aos mapas da análise preliminar, figuras 5.6b e 5.6c, exceto na região destacada em pontilhado, local onde o nível de contaminação fica em torno de 7 a 20% da base de dados de *strokes* positivos, ao invés da faixa observada anteriormente (14 a 40%).

Nesta região o nível de participação de estações IMPACT é elevado, superior a 80%. Verifica-se também que a região onde o percentual de contaminação é mais elevado apresenta baixa participação de estações IMPACT.

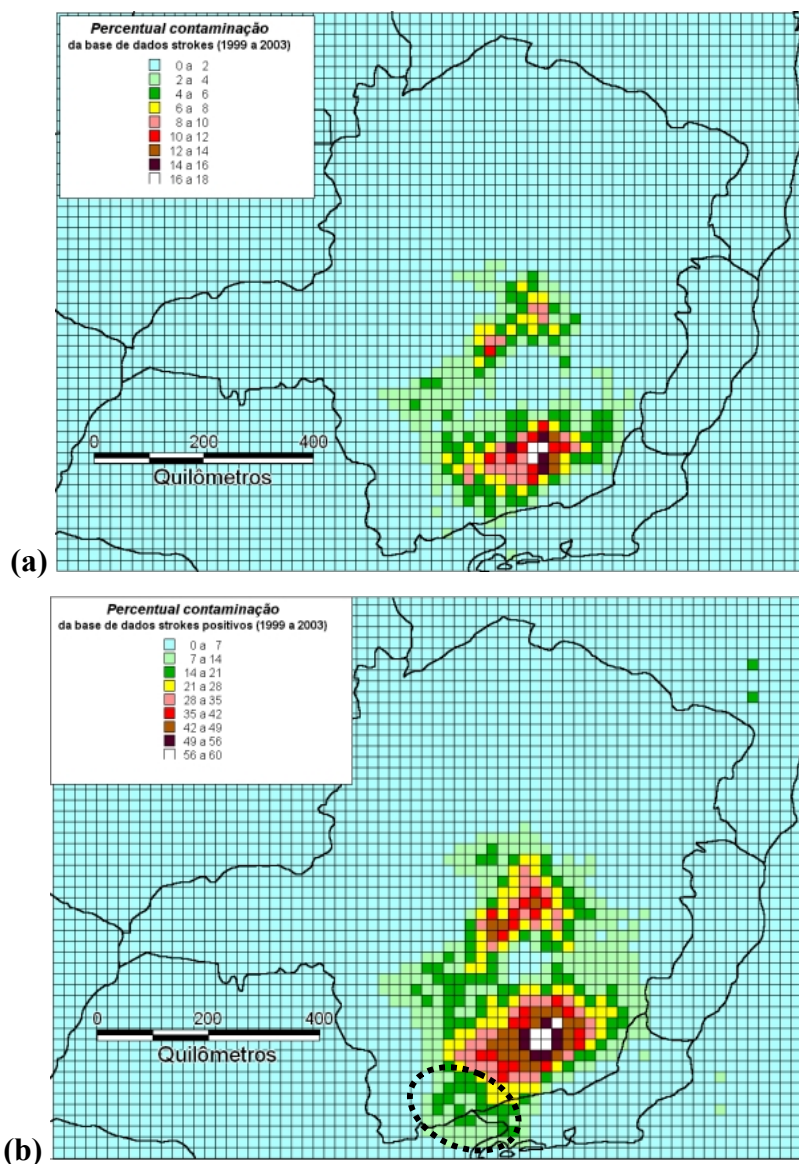


Figura 5.7: a) Percentual de contaminação na base de dados de *strokes* totais  
b) Percentual de contaminação na base de dados de *strokes* positivos

Em análises de distribuição das intensidades das correntes de descargas positivas, a elevada contaminação por descargas CD pode deslocar a distribuição da intensidade de corrente para valores menores. Em outras regiões de baixo nível de contaminação, este efeito pode ser praticamente desprezível. Quanto à construção de mapas de densidade de *strokes*, a contaminação por registros positivos com intensidades menores que 10 kA não afeta de

forma significativa os níveis de densidade de descargas encontrados, exceto nas regiões onde o percentual relativo ao número total de *strokes* é elevado, por exemplo, na região sul de Minas Gerais. Ali os eventos positivos de baixa intensidade representam 16% da base de dados de *strokes* totais e 60% dos *strokes* positivos. As referências [Mesquita et al, 2004] e [Dias, 2006] apresentam mapas de densidades de descargas positivas, que mostram claramente as diferenças observadas nas regiões onde os níveis de contaminação são maiores. Em tais referências, fica nítida também a influência da contaminação na distribuição da intensidade média de correntes de *strokes* positivos.

Segundo referências mais recentes [Crammer et al, 2004] [Cigré, 2005], a tendência nos LLS's mais atuais é a utilização de critérios de discriminação de forma de onda para excluir a maior parte dos eventos que não sejam descargas atmosféricas. Porém, aqueles critérios utilizados para excluir eventos de nuvens têm sido “relaxados” e até mesmo excluídos com o objetivo de melhorar a detecção de *strokes* de baixa intensidade, a detecção de *strokes* não usuais e permitir a detecção de algumas descargas de nuvem. Este procedimento foi adotado pela NLDN e as descargas são atualmente classificadas como nuvem-solo ou descarga de nuvem na central de processamento através do critério de duração *PTZ* descrito anteriormente. Contudo, o aumento da eficiência de detecção de *strokes* de baixa intensidade vem acompanhado do aumento significativo do nível de contaminação de eventos de nuvem classificados erroneamente como CG. Uma avaliação desta contaminação tem sido realizada através da utilização de câmeras de vídeo sincronizadas por GPS utilizando dados da NLDN de 2003-2004 [Kridler et al, 2006]. Esta avaliação indica que a maioria dos eventos classificados como *strokes* positivos de baixa intensidade (menor que 10 kA) são eventos de nuvem e que a maioria dos *strokes* positivos com intensidade superior a 20 kA se refere a reais descargas nuvem-solo.

## 5.4 Critérios de Agrupamento de “Strokes”

No item 4.5 estão descritos os critérios de agrupamento de descargas. Os valores de tais critérios podem ser definidos pelo usuário através da alteração de arquivos de configuração (“*flashcalc.cfg*” ou, nas centrais mais recentes, “*fcalcd.cfg*”).

Como referência, para fins de análise são considerados os critérios espaciais e temporais sugeridos pelo fabricante, indicados na tabela 5.6.

Tab 5.6 – Critérios de agrupamento de *strokes* estabelecidos pelo fabricante do LLS [cummins et al, 1998].

Critérios de Agrupamento de <i>Strokes</i>		Valor
Critérios espaciais	Abrangência Espacial da Descarga ( <i>strokes</i> cuja elipse de erro intercepta a região descrita pelo raio de 10 km em relação ao ponto de ocorrência do primeiro evento)	10 km
	Raio máximo de agrupamento (considera os pontos de incidência dos <i>strokes</i> em relação ao ponto do primeiro evento indicados pelo LLS).	50 km
Critérios temporais	Intervalo máximo entre os <i>strokes</i>	500 ms
	Tempo de ocorrência após a primeira descarga de retorno (duração máxima do <i>flash</i> )	1 segundo

Foram desenvolvidas avaliações relativas à influência nas estatísticas de *flashes* dos critérios espaciais. Também os critérios temporais foram avaliados, no caso apenas em termos do intervalo máximo entre os *strokes*.

### 5.4.1 Avaliação da Influência dos Critérios Espaciais

A realização desta análise foi motivada pelo questionamento da consistência dos critérios espaciais sugeridos pelo fabricante.

O critério de abrangência espacial igual a 10 km, sugerido pelo fabricante, parece ser definido levando-se em conta casos extremos de distâncias observadas entre pontos de impactos de *strokes* que compõem o mesmo *flash*. Apesar de se ter a garantia do correto agrupamento destes eventuais casos extremos, configura-se um cenário mais vulnerável ao agrupamento errôneo de *strokes* pertencentes a *flashes* distintos, que pode ocorrer quando os

pontos de incidência e os instantes de ocorrência dos *strokes* são próximos. Esta condição pode ser comum em tempestades muito intensas, quando podem ocorrer diferentes *flashes* quase que simultaneamente.

Segundo a referência [Uman and Krider, 1989] a distância média entre os pontos de incidências dos *strokes* subseqüentes e o ponto relativo ao primeiro *stroke* é de 3,5 km e a probabilidade de se exceder 8 km é pequena. Segundo referência [Rakov et al, 1992], as distâncias observadas para os pontos de impacto dos *strokes* em um dado *flash* variaram de 300 m a 7,3 km e a média geométrica de 1,7 km. Nesta última estatística foram consideradas as distâncias entre todos os possíveis pares de pontos de impacto (por exemplo: para *flashes* com três pontos de impacto, foram consideradas as distâncias entre o primeiro e o segundo, entre o segundo e o terceiro e entre o primeiro e o terceiro ponto).

A referência [Rakov e Ruffines, 2003] sumariza as estatísticas relativas a 76 *flashes* ocorridos nos Estados Unidos (Estado da Flórida), registrados através de uma rede de câmeras de vídeo e medições correlatas de campo elétrico. Cerca de 49% dos eventos (37) apresentaram um único ponto de incidência. Cerca de 51% dos *flashes* apresentaram múltiplos pontos de incidência (sendo 29 *flashes* com dois pontos de incidência, 8 com três pontos e 2 com quatro pontos).

Com o objetivo de se avaliar a sensibilidade dos critérios espaciais na determinação da base de dados de *flashes*, foram escolhidas algumas diferentes configurações para o agrupamento de *strokes*. A base de dados de *strokes* submetida aos diferentes critérios de agrupamento se refere a um período de chuvas (outubro 2002 a março de 2003) e compreende os eventos ocorridos em toda a região de cobertura do LLS.

Foi realizada a análise da redução percentual do número de *flashes* para as diferentes configurações (casos-estudo de 1 a 9) em relação ao número de *flashes* obtido ao se aplicar os critérios sugeridos pelo fabricante (caso estudo Ref), que está sumarizada na tabela 5.7. Nesta análise são considerados também os valores médios da multiplicidade dos *flashes*. Os resultados são apresentados considerando o banco de dados de *flashes totais* (que inclui os *flashes* únicos) e o banco de dados de *flashes múltiplos*.

---

Tab 5.7 – Diferença percentual do número de *flashes* e Multiplicidade média dos *flashes* ao se aplicar diferentes critérios espaciais de agrupamento de *strokes* [Dias e Mesquita et al, 2005].

Caso estudo (DM-RM)*	Multiplicidade média		Diferença percentual em relação aos critérios do fabricante	
	<i>Flashes</i> totais	<i>Flashes</i> múltiplos	<i>Flashes</i> totais	<i>Flashes</i> múltiplos
<b>1</b> (2 km– 50 km)	1,30	2,59	+17,25%	+10,90%
<b>2</b> (5 km– 50 km)	1,47	2,82	+5,87%	+ 2,90%
<b>Ref</b> (10 km–50 km)	<b>1,57</b>	<b>2,91</b>	<i>Referência</i>	
<b>3</b> (2 km– 30 km)	1,30	2,59	+17,26%	+10,90%
<b>4</b> (5 km– 30 km)	1,47	2,82	+5,88%	+2,90%
<b>5</b> (10 km–30km)	1,57	2,91	0,00%	0,00%
<b>6</b> (2 km– 15 km)	1,30	2,59	+17,29%	+10,90%
<b>7</b> (5 km– 15 km)	1,47	2,82	+5,91%	+2,89%
<b>8</b> (10 km– 15km)	1,57	2,91	+0,04%	+0,01%
<b>9</b> (2 km– 10 km)	1,29	2,59	+17,35%	+10,90%

\* Abrangência Espacial da Descarga (DM) e Raio máximo de agrupamento (RM).

Ao se analisar os resultados, fica constatado que o critério que implica na variação das bases de dados de *flashes* é apenas o critério de abrangência espacial (DM). O critério do raio máximo de agrupamento (RM) interfere muito pouco nas diferenças entre os números de *flashes* encontrados nos diferentes processos de agrupamento. Como era esperado, quanto menor a abrangência espacial da descarga, menores são os valores de multiplicidade média e maiores os números de *flashes*, configurando situações mais restritivas para o agrupamento de *strokes*.

O objetivo da avaliação até então apresentada neste item consistiu em se efetuar uma análise de sensibilidade dos critérios espaciais na constituição de base de dados de *flashes*, onde ficou evidente que apenas a abrangência espacial (DM) é responsável pelas diferenças encontradas.



### 5.4.2 Avaliação da Influência dos Critérios Temporais

O intervalo de tempo entre *strokes* sugerido pelo fabricante do sistema (500 ms) é, em princípio, considerado também excessivo. O valor típico encontrado na literatura é cerca de 60 ms [Cigré, 2005]. Porém, deve se ressaltar que, em se tratando de LLS, este critério não pode ser muito restritivo devido à limitação da eficiência de detecção de *strokes*, especialmente os eventos subseqüentes de baixa intensidade.

Tendo o conhecimento da possível não detecção de *strokes* subseqüentes de intensidades menores por parte dos LLS, admitiu-se nessa análise o valor 240 ms para o intervalo de tempo máximo entre *strokes* como um valor razoável para possibilitar a inclusão de eventuais *strokes* subseqüentes mais intensos de ordem superior (por exemplo, terceiro ou quarto *strokes*) em casos onde não é detectado o(s) *stroke(s)* que o antecede(m).

Nesta análise é avaliada a influência dos critérios de agrupamento de *strokes* inclusive em termos da constituição de mapas de densidade de descargas (*flashes*/km<sup>2</sup>/ano). Para tanto, foi necessário considerar um período significativo de dados do LLS, que nesta análise compreendeu cinco anos (1999 a 2003).

Das configurações de agrupamento de *strokes* apresentadas no item 5.4.1, foram selecionadas duas configurações: a correspondente aos critérios sugeridos pelo fabricante e a configuração mais restritiva (caso-estudo 9). E, para propiciar a análise do efeito dos critérios temporais, a terceira configuração foi estabelecida restringindo ainda mais os critérios de agrupamento. O intervalo máximo entre *strokes* permitido foi reduzido para compor os dados de *flashes*. A tabela 5.8 sumariza os critérios utilizados para as três configurações de agrupamento.

Tab 5.8 – Valores dos critérios de agrupamento para três configurações em estudo. Tabela adaptada da referência [Dias e Mesquita et al, 2006].

<b>Crítérios de Agrupamento*</b>	<b>Configuração sugerida pelo fabricante</b>	<b>Configuração A</b>	<b>Configuração B (mais restritiva)</b>
Abrangência espacial da descarga	10 km	2 km	2 km
Raio máximo de agrupamento	50 km	10 km	10 km
Intervalo de tempo entre <i>strokes</i>	500 ms	500 ms	240 ms

\* Demais critérios de agrupamento de *strokes* correspondem aos mesmos critérios sugeridos pelo fabricante, relacionados no item 4.5.

A tabela 5.9 indica o número médio de incidência de *flashes* por ano no Estado de Minas Gerais, bem como o valor médio da multiplicidade dos *flashes* considerando os três critérios em análise.

Tab 5.9 – Resultados do número de incidências e multiplicidades dos *flashes* obtidos para as três configurações em estudo, considerando o Estado de Minas Gerais.

<b>Crítérios de Agrupamento</b>	<b>Nº médio de <i>flashes</i>/ano</b>	<b>Nº médio de <i>flashes</i> negativos /ano</b>	<b>Percentual de <i>flashes</i> múltiplos</b>	<b>Multiplicidade média*</b>	
				<b><i>Flashes</i> totais</b>	<b><i>Flashes</i> múltiplos</b>
Configuração sugerida pelo fabricante	756.526	549.704	45,8%	1,93	3,15
Configuração A	952.772 (+26%)	737.517 (+34%)	27,7%	1,48 (-23,3%)	2,74 (-13%)
Configuração B	991.631 (+31%)	777.513 (+41%)	24%	1,38 (-28,5%)	2,66 (-15,5%)

\* No caso da multiplicidade média e percentual de *flashes* múltiplos foram considerados apenas os *flashes* negativos, uma vez os *flashes* positivos se caracterizam por apresentar, na maioria das vezes, um único *stroke*. A base de dados *Flashes* totais inclui os *flashes* negativos únicos.

Nos resultados fica nítida a influência significativa dos critérios nos números e na multiplicidade dos registros de *flashes*. Na construção de mapas de densidade de *flashes*, as diferenças se mostram mais evidentes nas áreas de maior densidade. A figura 5.8 apresenta os mapas de densidade de *flashes* confeccionados para os três critérios em análise. O nível máximo de densidade foi encontrado na região sul do Estado, correspondendo a 5 *flashes*/km<sup>2</sup>/ano ao utilizar o critério de agrupamento sugerido pelo fabricante e 7 *flashes*/km<sup>2</sup>/ano na configuração mais restritiva.

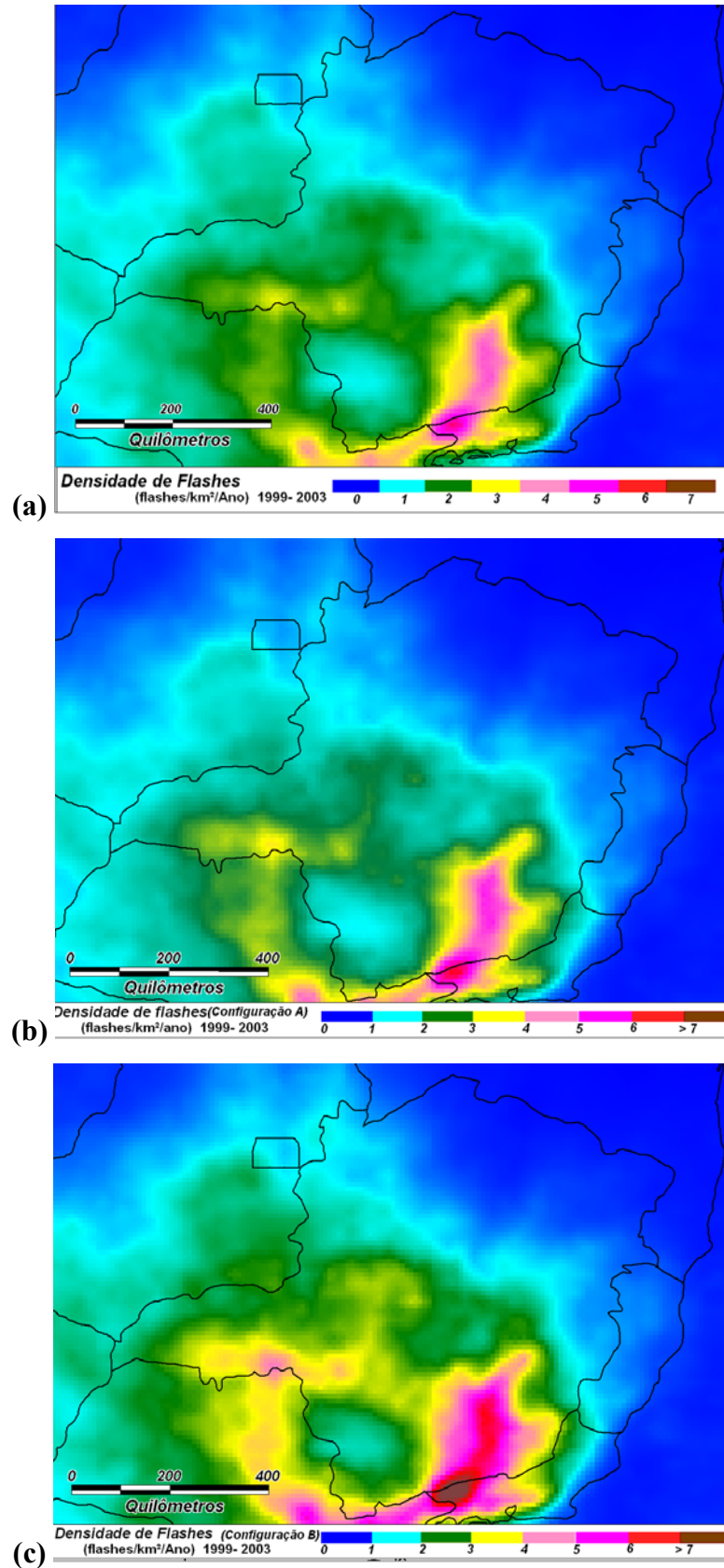


Fig. 5.8 – Mapas de densidade de *flashes* constituídos a partir de diferentes critérios de agrupamento (gradeado 20x20 km<sup>2</sup>). (a) critérios sugeridos pelo fabricante; (b) Configuração A; (c) Configuração B (mais restritiva).

Com o objetivo de explorar ainda mais a análise de influência dos critérios considerados, foi efetuada uma análise adicional considerando uma micro-região (160 x 120 km<sup>2</sup> - figura 5.9) onde se observou maior variação da densidade.



Fig. 5.9 – Micro região em análise

Os resultados encontrados para as três configurações estão apresentados na tabela 5.10. Os mapas de densidade para esta região, elaborados considerando um gradeado de 2 x 2 km<sup>2</sup>, estão apresentados na figura 5.10.

Tab 5.10 – Resultados do número de incidências e densidade dos *flashes* obtidos para as três configurações em estudo, considerando a micro-região em análise [Dias e Mesquita et al, 2006].

Critérios de Agrupamento	Nº médio de <i>flashes</i> /ano	Densidade <i>flashes</i> /km <sup>2</sup> /ano		
		Valor médio	Valor mín.	Valor máx.
Configuração sugerida pelo fabricante	55.663	2,78	0,5	7,05
Configuração A	71.123 (+28%)	3,63	0,75	9,5
Configuração B	74.694 (+34%)	3,8	0,8	10,05

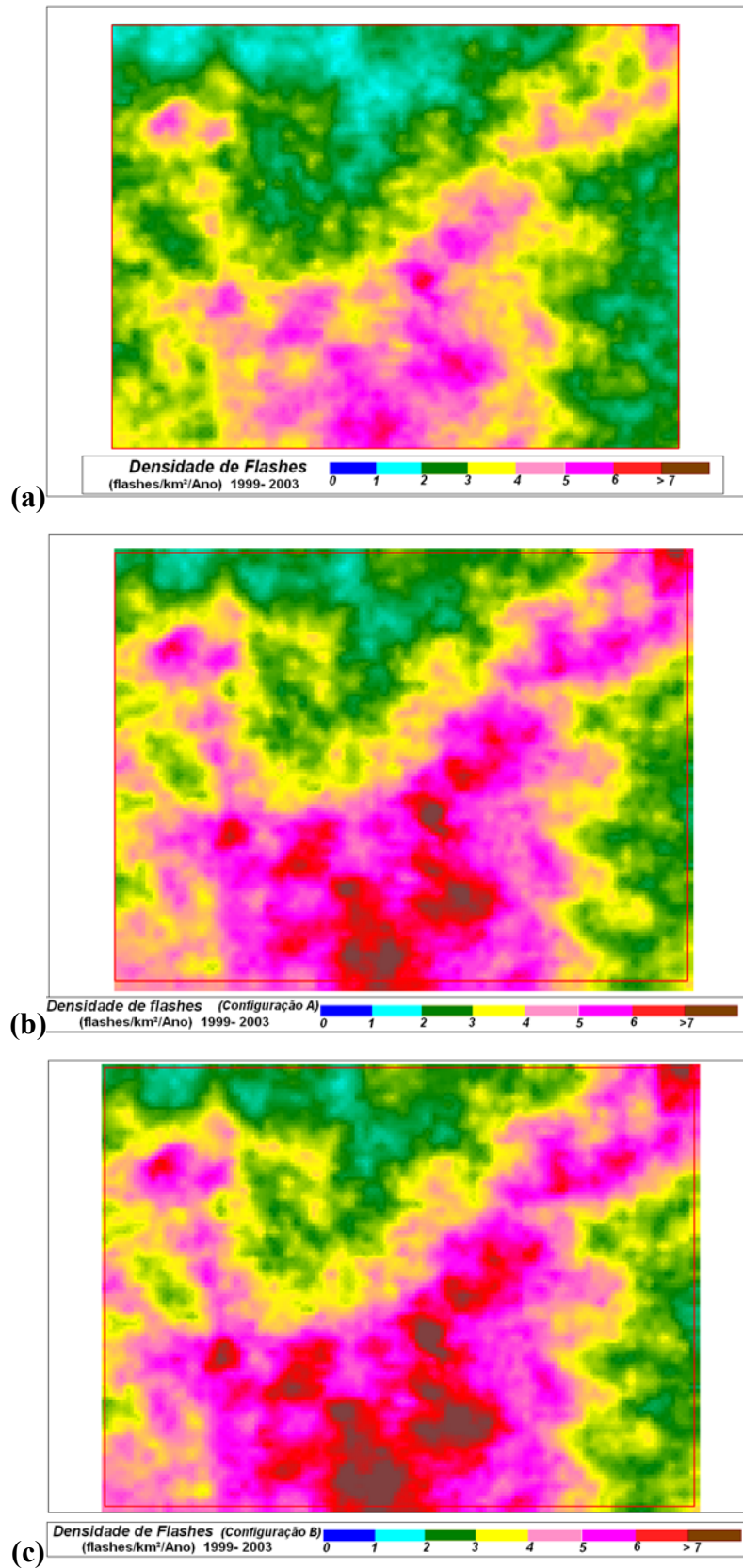


Fig. 5.10 – Mapas de densidade de *flashes* constituídos a partir de diferentes critérios de agrupamento (gradeado 2x2 km<sup>2</sup>). (a) critérios sugeridos pelo fabricante; (b) Configuração A; (c) Configuração B (mais restritiva).

Na análise dos níveis de densidades na micro-região, observa-se que as diferenças são mais evidentes que aquelas observadas nos mapas obtidos para o Estado de Minas Gerais. A densidade aumentou razoavelmente quando se considerou o critério espacial mais restritivo e tornou-se ainda maior quando se considerou também o critério temporal (Configuração B).

Os valores médios de multiplicidade observados são bem menores que os valores usuais de referência<sup>9</sup>. Tal comportamento está muito mais associado à limitação da eficiência de detecção do LLS, especialmente da eficiência em detectar eventos subsequentes, do que propriamente associados aos critérios adotados para agrupar os *strokes*.

A eficiência de detecção dos LLS é reduzida para *strokes* de baixa intensidade, principalmente em locais que distanciam do centro da rede de sensores. Sendo assim, a multiplicidade das descargas fornecida usualmente pelos LLS pode ser significativamente menor que os valores usuais de referência, visto que as subsequentes usualmente apresentam valores menores de intensidade. Em todos os critérios analisados, o percentual de descargas atmosféricas múltiplas foi inferior a 45%<sup>10</sup>, ao passo que a literatura indica o percentual de 80% [Rakov e Ruffines, 2003]. A multiplicidade média dos *flashes* negativos encontrada para o Estado de Minas Gerais foi de 1,93 *strokes/flashes* (critério sugerido pelo fabricante) e 1,38 *strokes/flashes* (critério mais restritivo).

A referência [Dias, 2006] apresenta uma comparação entre os mapas de densidade de *flashes* construídos com dados do LLS e o mapa obtido pela rede de contadores de descargas para o Estado de Minas Gerais. Os níveis de densidade obtidos são menores que os níveis relativos ao mapa de contadores (em torno de 50%).

Assim como a multiplicidade, a obtenção de níveis de densidade de *flashes* notoriamente inferiores aos valores esperados é devida principalmente à limitação da eficiência de detecção das descargas atmosféricas, especialmente, quando se afasta do centro

---

<sup>9</sup> Os valores de referência para multiplicidade de *flashes* negativos é 3 *strokes/flashes* (considerando inclusive as descargas únicas) e 5 *strokes/flash* (considerando apenas as descargas negativas múltiplas), segundo medições diretas de descargas realizadas na estação Morro do Cachimbo [Visacro et al, 2004].

<sup>10</sup> Considerando-se ainda outros LLS, os percentuais de *flashes* múltiplos reportados são também reduzidos (na Flórida- EUA representam cerca de 56%, no Novo México-EUA 49% e na Áustria 60%).

do LLS, onde a eficiência se torna mais reduzida.

Valores mais adequados de densidade de *flashes* podem ser obtidos dividindo os valores de densidade obtidos com dados de LLS por valores estimados da eficiência de detecção dos *flashes*. Os fatores de correção podem ser obtidos através de modelos que consideram uma distribuição de intensidades de corrente<sup>11</sup> relativa aos primeiros *strokes* [Cummins e Bardo, 2004]. Existem na literatura alguns trabalhos que recorrem à eficiência de detecção relativa dos sensores do LLS para se estimar a eficiência de detecção da rede, baseando-se na própria base de dados do LLS. Porém, destaca-se a ineficiência destes métodos de correção especialmente nas bordas da área de cobertura do LLS.

Maiores detalhes sobre a análise da influência dos critérios de agrupamento no número de registros e na multiplicidade de *flashes* são apresentados nas referências [Dias e Mesquita et al, 2004], [Dias e Mesquita et al, 2005] e [Dias, 2006].

---

<sup>11</sup> A eficiência de detecção das descargas depende da intensidade de corrente associada. Quanto menor o valor de corrente menor é a eficiência do LLS em detectar o evento.

---

---

---



# **6 Análise das Fontes Potenciais de Erros nas Indicações dos LLS's**

## ***6.1 Introdução***

Apesar do avanço tecnológico dos LLS's e do potencial de aplicação de suas informações, como todo sistema físico, os LLS's apresentam erros e limitações que comprometem a sua Eficiência de Detecção e a Precisão das informações originadas pelos mesmos. Além dos erros inerentes aos sistemas, admitidos pelos fabricantes, existe uma variedade de fontes externas de erros decorrentes das hipóteses assumidas na concepção do sistema e da influência de fatores ambientais no local de implantação dos sistemas. Por outro lado, as limitações de eficiência de detecção, responsável pela não detecção de descargas ocorridas dentro da área de cobertura do sistema, podem comprometer as avaliações estatísticas das descargas atmosféricas. Para uma avaliação adequada dos resultados dos LLS's é relevante conhecer as possíveis fontes de erro, bem como as limitações dos sistemas.

---

## 6.2 *Indicação e Detalhamento das Fontes Potenciais de Erros*

A seguir são consideradas as principais fontes de erros nas indicações dos LLS's. Tais erros são causados pelas limitações dos sistemas e, principalmente, pela influência do meio na propagação dos campos eletromagnéticos do local de incidência até as estações remotas que participam da solução da descarga.

### 6.2.1 *Erros Decorrentes da Propagação do Campo*

Como mencionado no item 3.4, a propagação do campo sobre uma superfície de condutividade finita implica atenuação e distorção de sua forma de onda.

Os efeitos de atenuação são mais significativos na frente da onda de campo, uma vez que a ela estão associados componentes de frequências mais elevadas. Assim, as distorções da forma de onda, como o atraso da frente de onda e a atenuação da intensidade do sinal, afetam diretamente a precisão das estimativas de localização da descarga e, principalmente, a intensidade da corrente associada [Diendorfer and Shulz, 1998b] [Mair et al, 1998].

Usualmente, os LLS's empregam um modelo de propagação que visa compensar tal efeito de atenuação. O modelo é aplicado na normalização das intensidades dos sinais que chegam às estações remotas do sistema. Porém, deve-se destacar que **o modelo não considera as descontinuidades presentes no solo**, uma vez que um mesmo modelo (com os mesmos parâmetros, item 4.4 deste texto) é aplicado em toda a região de cobertura do sistema [Cummins et al, 1998]. Sempre que houver uma mudança das características do meio (descontinuidade) no caminho de propagação do sinal de campo, haverá refração e reflexão parcial deste sinal, o que pode comprometer a precisão das indicações dos sistemas.

Os algoritmos de localização de descargas atmosféricas consideram a terra uma superfície elipsoidal perfeita, desprezando o alongamento do caminho real de propagação do campo que ocorre, por exemplo, em regiões montanhosas. Os alongamentos podem gerar

---

desvios de ângulo e de tempo nas indicações das estações remotas do sistema, uma vez que o campo eletromagnético percorre uma distância maior que aquela estimada pelos algoritmos. Em um estudo realizado na Áustria [Schulz and Diendorfer, 2000], os autores avaliam um algoritmo de localização de descargas utilizando um modelo de elevação da superfície terrestre e verificam que a utilização desse algoritmo reduz os desvios de ângulo e de tempo nas indicações do sistema.

No item 8.5.1 deste texto, é efetuada uma análise cuidadosa de percursos do campo eletromagnético, onde é computado o acréscimo no caminho percorrido devido às variações do relevo até o alcance das estações detectoras da RINDAT. É avaliada de forma preliminar a influência desses acréscimos nos desvios de tempo indicado pelas estações remotas do sistema.

Além dos efeitos do solo e relevo, o sinal pode ficar sujeito ao fenômeno da reflexão ionosférica, podendo comprometer o desempenho dos sistemas [Montandon and Rubinstein, 1996]. A ionosfera terrestre, em sua constituição física, pode ser considerada uma "camada" condutora (intensa ionização de gases ou alta concentração de elétrons livres). Em virtude desta característica, reflexões podem ocorrer, podendo levar à inversão da polaridade da descarga registrada pelos sensores. Tal fenômeno não é tão relevante, uma vez que ele está relacionado a sinais muito distantes (acima de 500 km) e os sistemas permitem limitar distâncias entre o ponto do evento e as estações remotas, utilizando relatos apenas daquelas que apresentam distâncias inferiores a um limite preestabelecido<sup>1</sup> [Global Atmospheric, 1997].

---

<sup>1</sup> O limite de distância para participação do sensor na solução de descarga atmosférica recomendado pelo fabricante é 625km.

---

### 6.2.2 *Erros Locais*

Os erros locais, conhecidos na literatura técnica como "*Site Errors*", são aqueles associados à absorção e re-radiação do campo eletromagnético por objetos metálicos, tais como linhas de transmissão, tubulações enterradas, cercas, estrutura de construções e ainda pela presença de campo de fundo nas proximidades do local de instalação da estação [Global Atmospheric, 1994]. Normalmente, tais erros apresentam caráter sistemático.

Estes erros são mais significativos em sistemas que utilizam as informações de indicação de direção, uma vez que eles são refletidos na medição do ângulo de chegada do sinal na estação. Uma situação típica seria a mistura do sinal do pulso da descarga com sinais locais gerados, por exemplo, por estações de rádio próximas às antenas ou pela existência de campos re-radiados.

O fabricante dos sistemas fornece procedimentos de escolha do local para a instalação das estações, onde se procura obter condições que garantam a minimização deste tipo de erro [Global Atmospheric, 1994] [Global Atmospheric, 1995]. Nem sempre todos os critérios para escolha ideal do local de instalação são atendidos. No entanto, o sistema permite utilizar fatores de correção de erros locais ao processar as informações de descargas. Vale destacar que para a adequada correção é necessário um criterioso diagnóstico da estimativa deste erro.

O fabricante fornece um serviço de análise de desempenho da rede de sensores que considera uma massa significativa de dados de descargas atmosféricas. No relatório dessa análise é proposta a correção de erros locais para as estações do tipo IMPACT, a fim de garantir melhor qualidade à solução gerada. Uma vez corrigidos os erros locais das estações IMPACT são avaliados os fatores de ganho para as estações LPATS (item 5.2.2). As estações IMPACT saem de fábrica calibradas para a adequada medição do campo magnético. Os sinais de campo magnético destas estações são utilizados como referência para o cálculo dos ganhos de sinal das estações LPATS. Como dito anteriormente, as estações LPATS possuem apenas medição de campo elétrico, o qual é mais susceptível aos diversos fatores locais de "blindagem".

---

Resultados apresentados nos trabalhos [Schulz and Diendorfer, 1996] e [Schulz and Diendorfer, 2002] evidenciam a influência dos erros locais nas indicações de direção e amplitude do sinal reportadas pela estação, comprometendo não só a indicação da localização da descarga mas também a estimativa da intensidade de corrente.

### **6.2.3 Outras Limitações do Sistema**

Neste item são tratados outros fatores associados às limitações dos sistemas que também influenciam na eficiência de detecção e precisão das indicações dos sistemas, como a geometria da rede, os valores preestabelecidos dos parâmetros de cálculo, o tipo de nuvem envolvida no processo da descarga atmosférica, a severidade de tempestades etc.

A **geometria da rede** (quantidade e tipo de estações, área de cobertura, distância entre estações e a disposição geográfica destas) constitui-se um importante fator que influencia a eficiência e a precisão dos sistemas. Nos trabalhos [Dias, 2002] [Naccarato, 2001], foi possível verificar o quão sensível são a eficiência e a precisão do sistema para qualquer alteração da configuração física da rede.

O **Limiar de sensibilização**, os **valores de ganho** dos sensores e os **valores preestabelecidos dos critérios de discriminação** influenciam não somente na eficiência de detecção do sistema, mas também no grau de contaminação de descargas intranuvens nos registros de descargas nuvem-solo. Os valores do limiar e de ganho adotados "regulam" a sensibilidade dos sensores. É importante a escolha cuidadosa de tais valores, bem como dos parâmetros adotados na discriminação de forma de onda para adequar-se às particularidades locais de cada sistema.

Um outro fator que pode comprometer a eficiência de detecção do LLS é o **Tempo morto dos sensores** gasto para medir e processar a informação do sinal de campo. As gerações mais antigas de sensores possuem tempo morto da ordem de 3ms, reduzindo para 1ms nas versões IMPACT ES e posteriores. Este fator pode se tornar mais limitador em situações de tempestades severas. Foi realizada uma análise em uma amostra da base de dados do LLS-MG, correspondente a um horário de tempestade numa área específica. Nesta

---

análise foi verificado que algumas estações que, a princípio, deveriam participar da solução de alguns *strokes*, não o fizeram. No correspondente momento, tais estações estavam ocupadas processando informações referentes a sinais provenientes de descargas de nuvens. Sendo assim, a não participação do sensor no cômputo da solução do *stroke* pode reduzir a qualidade do dado e causar a perda de registro naqueles casos onde não se alcança o número mínimo de sensores requeridos para o cálculo da descarga.

Os *critérios* adotados para o *agrupamento de strokes* influenciam nitidamente no número de registros de *flashes* e multiplicidade dos mesmos. No item 5.4 deste texto são avaliadas tais influências e maiores detalhes de sensibilidade dos critérios são encontrados nas referências [Dias e Mesquita et al, 2004] e [Dias e Mesquita et al, 2005]. No trabalho [Dias e Mesquita et al, 2006] é possível visualizar a influência dos critérios na obtenção de mapas de densidade de *flashes*. Ali é também apresentada uma discussão acerca da representatividade de utilização de dados de *flashes* ou *strokes* na engenharia de proteção.

A eficiência e precisão das indicações dos sistemas também dependem dos *parâmetros de configuração* adotados no *algoritmo de processamento* da informação da descarga. São exemplos destes parâmetros: o número mínimo de informações de tempo e/ou ângulo para o cômputo da localização do *stroke*, o tempo de espera para início do processamento da informação do *stroke* (este tempo influencia nos registros gerados pelo processamento em tempo real), a distância máxima permitida entre sensor e evento para que o mesmo participe da solução, o erro máximo admissível para a localização da descarga, o valor máximo para a medida “chi-quadrado”. Os critérios podem ser estabelecidos conforme a necessidade de aplicação, podendo ser mais ou menos restritivos. Quando se utilizam critérios mais restritivos, garante-se maior confiabilidade nos registros de localização; entretanto, o número de registros pode vir a ser significativamente reduzido. O trabalho [Naccarato, 2001] evidencia a influência de alguns desses parâmetros na base de dados de *strokes* gerada.

As formas de onda associadas às descargas originadas por nuvens de diferentes características podem apresentar diferenças que sejam suficientes para falhar nos critérios de discriminação de forma de onda. Em alguns casos, como no Japão, verificou-se a adequação de se utilizar valores distintos daqueles sugeridos pelo fabricante do sistema para os critérios

de discriminação de forma de onda (tempo de frente e largura de pulso), adequando-se melhor às formas de onda usualmente observadas durante a estação de inverno [Ishii et al, 2000]. As alturas das nuvens de inverno no Japão são bem menores que das nuvens de verão típicas. É conveniente avaliar cuidadosamente os valores adotados pelos critérios de discriminação diante das diferenças observadas nas formas de onda de campo dependendo da sazonalidade [Ishii et al, 2000] [Diendorfer et al, 1998a].

Os valores assumidos para os *fatores de correção de erros locais*, para os *fatores de atenuação* e para os *fatores de ganho das estações* podem afetar significativamente a precisão da localização e estimativa da intensidade de corrente. Tais valores devem ser adequados às condições específicas da região de cobertura do sistema. Porém, para a indicação adequada destes fatores são necessárias, além das práticas já adotadas pelo fabricante durante a avaliação de desempenho da rede, medidas de referências para a devida quantificação dos erros associados. As medidas de referência atuam como forma de validar e apurar as correções já aplicadas, atuando principalmente naqueles erros em que a mera utilização dos dados do LLS não resulta na identificação e, muito menos, na quantificação adequada dos mesmos.

#### ***6.2.4 Não Verticalidade do Canal de Descarga***

Os algoritmos dos LLS's assumem o canal de descarga perfeitamente vertical, considerando que apenas as componentes de campo elétrico vertical e de campo magnético horizontal sejam significativas. Porém, em casos reais, onde o canal apresenta também componentes horizontais em seu percurso, as demais componentes de campo (elétrico horizontal e magnético vertical) podem ser significativas o suficiente para interferir nas medições dos sistemas.

Segundo o fabricante dos sistemas, a medição da intensidade do campo é realizada dentro dos primeiros microssegundos da forma de onda, de modo que a frente da corrente de retorno encontra-se ainda próxima à superfície do solo (distância menor que 100 m do solo, trecho assumido pela predominância vertical), reduzindo assim os erros devido à inclinação não vertical do canal de descarga [Global Atmospheric, 1994]. Uma justificativa

---

possivelmente mais plausível é a elevada distância de observação (canal-estação detectora) em relação à extensão do canal de descarga.

Segundo alguns pesquisadores como Herodotou e Sorensen [Sorensen, 1995], a tortuosidade do canal não afeta significativamente a relação entre intensidade de corrente e intensidade de campo *distante*, visto que os picos das formas de onda do campo distante percebidos pelos DF's são irradiados pela parcela inferior do canal de descargas (poucas centenas de metros do solo). Segundo técnicas fotográficas, tal parcela inferior do canal tem se mostrado predominantemente vertical, não afetando, ou mesmo afetando de forma pouco significativa, a indicação da intensidade do sinal de campo.

Outro fator, a ***velocidade da corrente de retorno***, que não está diretamente associada à condição de verticalidade do canal, mas sim à dinâmica da distribuição de corrente de retorno, pode representar também fontes de erros, principalmente na estimativa da amplitude de corrente. O modelo utilizado para estimativa da amplitude de corrente não leva em conta as possíveis diferenças no valor da velocidade da corrente de retorno.

### ***6.3 Limitações no Desempenho dos LLS's e suas Implicações nos Dados Gerados***

As análises estatísticas obtidas a partir dos dados providos pelo LLS podem depender fortemente da **Eficiência de Detecção (ED)** dos *strokes* e dos *flashes*. No entanto, o outro parâmetro de desempenho, Precisão de Localização, não apresenta efeito significativo nas estatísticas.

A eficiência de detecção de descargas de uma determinada rede está condicionada à eficiência de detecção individual dos sensores, que por sua vez está condicionada ao limiar de sensibilização, ao valor de ganho da estação, ao nível de ruído no local de instalação da estação e, ainda, à eficiência dos critérios de discriminação do sinal.

---



Para que uma descarga atmosférica seja registrada pelo LLS, o sinal eletromagnético gerado, atenuado ao se propagar sobre uma superfície de condutividade finita, deve apresentar intensidade superior ao valor do limiar de sensibilização, considerando-se o número mínimo de sensores requeridos para o cômputo da solução de descarga.

A figura 6.1 visa ilustrar o comportamento da eficiência de detecção de um sensor em função da distância de observação em duas formas: idealizada e a outra estilizada mais próxima da ED real do sensor. O valor máximo de eficiência de detecção para um determinado valor de corrente é inferior a 100% devido a fatores como ruído local, tempo morto do sensor, processo de discriminação etc. O sinal gerado pela corrente de descarga a pequenas distâncias pode ser intenso o suficiente para saturar a eletrônica do sensor. No caso de distâncias elevadas, o sinal pode não ultrapassar o valor do limiar do sensor. Sendo assim, os limites de distância para uma determinada corrente,  $D_1$  e  $D_2$ , estão condicionados, respectivamente, ao limite de saturação e ao limiar de sensibilização. Uma representação da ED mais próxima da real é mostrada na figura 6.1b, onde os limites são suavizados através da inclinação da curva. Para cada valor de corrente obtém-se uma diferente curva  $ED_{\text{sensor}} \times$  Distância.

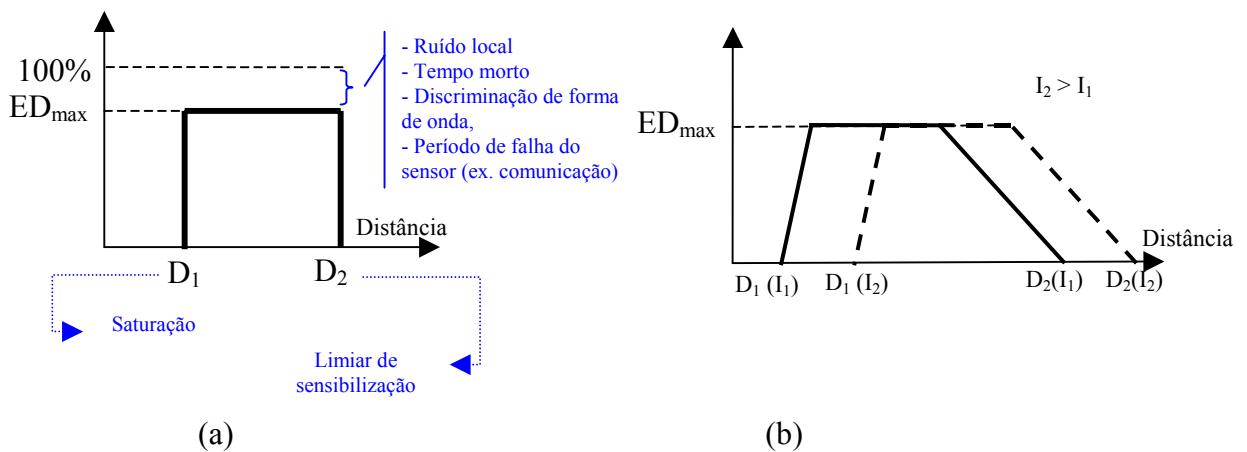


Fig 6.1 – (a) Eficiência de detecção idealizada do sensor para um determinado valor de corrente. (b) Representação esquemática mais próxima da eficiência de detecção real do sensor para dois valores de corrente. Figura adaptada da referência [Cigré, 2005].

Determinar a função  $ED_{\text{sensor}} \times \text{Distância}$  para cada valor de corrente é quase “impraticável”, demandando um volume grande de dados. O trabalho [Cigré, 2005] ilustra o comportamento da eficiência de detecção relativa de diferentes tipos de sensores para uma determinada faixa de corrente (19kA a 21kA). Nele fica evidente a diferença que, às vezes, chega a ser significativa de uma estação para outra.

Uma outra análise mais viável consiste em encontrar a função  $ED_{\text{sensor}} \times \text{Intensidade do sinal}$ . Neste caso, o primeiro limite é associado à função do limiar de sensibilização do sensor e o segundo limite é associado à saturação (figura 6.2).

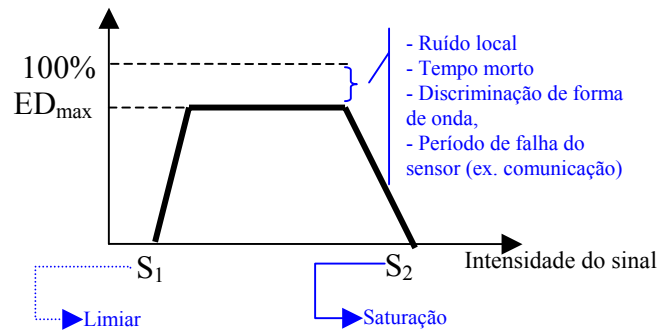


Fig 6.2 – Eficiência de detecção do sensor em função da intensidade de sinal de campo.

A eficiência de detecção de uma rede pode afetar significativamente a densidade de descargas, a distribuição de corrente e a multiplicidade dos *flashes*. Mapas de **densidade de flashes** podem ser corrigidos quando se tem uma estimativa do valor da eficiência ao longo da área de cobertura. Porém, ressalta-se que tal estimativa pode não ser representativa. Ela pode ser obtida através da aplicação do modelo teórico desenvolvido pelo fabricante ou a partir da análise dos próprios dados, utilizando a eficiência relativa dos sensores. Deve-se tomar cuidado principalmente nas bordas da área coberta pelo LLS, local onde a eficácia de qualquer método que utilize a eficiência relativa dos sensores torna-se reduzida. A estimativa pode ser obtida também utilizando outra rede de detecção como referência. Isto é possível em locais que são cobertos por mais de um LLS. Porém, ainda assim, a correção estaria limitada à eficiência do LLS usado como referência. Trabalhos recentes verificam a eficiência de detecção utilizando imagens de vídeo em conjunto com medições de campo

elétrico [Kehoe and Krider, 2004] [Cramer et al, 2004] [Cigré, 2005]. Tal método é mais eficaz, porém se restringe a um ou poucos locais de monitoramento.

Outro elemento que influencia na densidade de *flashes* é a “contaminação” da base de dados por descargas de nuvens. Na possibilidade do grau de contaminação ser significativo, o mesmo deve ser compensado para se ter maior confiabilidade na informação gerada.

A **multiplicidade dos *flashes*** é extremamente influenciada pela eficiência de detecção dos *strokes*. Usualmente os valores de corrente dos *strokes* subsequentes são menores que dos primeiros. Consequentemente a eficiência do LLS em detectar tais eventos é também menor, especialmente para os *strokes* subsequentes de maior ordem de ocorrência. Avaliar mapas de multiplicidade obtidos a partir de dados do LLS requer muita cautela, pois a eficiência de detecção reduz à medida que se afasta do centro da rede. Com isso, a multiplicidade se torna ainda mais reduzida nas bordas da região de cobertura da rede. O que se observa na construção de mapas de multiplicidade é que o valor médio que predomina nas bordas da área de abrangência de um LLS (por exemplo, a RINDAT) é próximo de um [Dias, 2006].

A **distribuição da intensidade de corrente** é pode ser fortemente influenciada pela eficiência de detecção das descargas. Dependendo do seu ponto de incidência em relação à rede de sensores, eventos de baixa intensidade podem não ser percebidos pelo número mínimo de sensores requeridos para a solução da descarga. Mapas de valores médios de corrente apresentam também o efeito das bordas da rede, regiões onde os valores tornam-se significativamente maiores [Dias, 2006]. A análise dos valores absolutos de corrente depende também da representatividade do modelo de estimativa adotado pelo sistema. Sendo assim, recomenda-se a análise relacional, evitando análises em termos de valores absolutos até que se efetue a adequada calibração do LLS. Nos trabalhos [Cigré, 2005] e [Mesquita et al, 2006] é ilustrada a influência do desempenho do LLS na distribuição de corrente, onde são avaliadas diferentes condições de eficiência de detecção. Tais condições foram obtidas através do reprocessamento dos dados, excluindo-se a participação de alguns sensores.

---

## ***6.4 Relevância da Influência de Fatores de Natureza Física (Solo e Relevo) nas Indicações dos Sistemas***

Entre as diversas fontes potenciais de erros, detalhadas nos itens anteriores, as que aparentemente mais afetam a confiabilidade das informações providas pelos LLS's são os fatores de natureza física, uma vez que as tecnologias de localização de descargas atmosféricas utilizadas pelos sistemas LLP, LPATS e IMPACT baseiam-se em informações de forma de onda digitalizada do campo eletromagnético detectado pelas estações. Uma quantificação segura da faixa de erro associado a tais fatores não é uma tarefa fácil, principalmente quando se trata de regiões caracterizadas por uma significativa diversidade de solo e relevo [Mesquita et al, 2001a] [Mesquita et al, 2001b].

Os diferentes tipos de solo e relevo existentes em todo mundo impossibilitam a aplicação de estudos de calibração de um LLS específico em outros sistemas. Para se obter uma adequada calibração do sistema tornam-se necessários estudos locais, que consideram as particularidades da região de cobertura de cada sistema.

## ***6.5 Conclusões Aplicáveis às Condições Particulares de Minas Gerais***

Dos erros discutidos anteriormente, aqueles que aparentemente podem ter maior impacto no *caso específico do sistema instalado em Minas Gerais* referem-se à influência do relevo e do tipo de solo na propagação do sinal irradiado pela descarga e detectado nas estações.

O sistema instalado no Estado de Minas Gerais emprega um mesmo modelo de propagação em toda a sua região de cobertura (item 4.4 deste texto). Os parâmetros utilizados no modelo apresentam os mesmos valores ditados a partir de estudos de calibração da Rede de Detecção e Localização de Descargas Atmosférica dos Estados Unidos, realizados no Estado da Flórida [Orville et al, 1991] [Idone et al, 1993].

---

Solos de alta resistividade, como o de Minas Gerais, podem atenuar e distorcer significativamente as formas de onda, talvez de maneira muito mais crítica que em outras regiões no mundo. Assim, os vários fatores de ajuste e correção desenvolvidos ao longo dos anos pelos fabricantes podem não ser adequados às condições de Minas Gerais e do Brasil, uma vez que as características de solo e relevo diferem significativamente daquelas do Estado da Flórida.

Além das particularidades de solo e relevo, também existem evidências de que as características das descargas atmosféricas variam de região para região, o que pode agravar ainda mais esta condição de “regionalidade”.

A aplicação de algoritmos na central de processamento dos LLS's para estimativa de parâmetros de descargas que considera as particularidades locais de toda a região de cobertura do sistema, em princípio, parece ser inviável. Tal consideração pode implicar em um longo tempo de processamento prejudicando o desempenho da operação do sistema. Além disso, destaca-se a impossibilidade de se propor modificações significativas no algoritmo de processamento destes sistemas devido ao sigilo industrial dos produtos. Sendo assim, a atuação de qualquer correção estaria limitada aos parâmetros ajustáveis do algoritmo.

A possível correção através de modificações dos parâmetros de configuração efetuadas nos algoritmos de localização e estimativa da intensidade da corrente, por exemplo, possui caráter generalizado, refletindo nos dados de descargas em toda a região de cobertura do LLS.

Outra forma de alcançar o objetivo de maior confiabilidade dos dados do LLS seria propor medidas de *correção nos resultados* gerados pelo sistema, a fim de considerar as particularidades de cada local em separado (medida pós-processamento).

Atualmente, a RINDAT carece de uma nova valiação de desempenho da rede por parte do fabricante, considerando especialmente os sensores instalados após as atualizações mais importantes da rede. Tal análise deve contemplar todos os sensores interligados à Central de Processamento da RINDAT. Esta avaliação é de extrema importância para as

---

correções de operação dos sensores (correção dos erros locais, estimativa dos fatores de ganho etc.), que propiciam a homogeneização dos relatos para toda a rede. Estas correções são obtidas a partir da avaliação de desempenho da rede de sensores, com base nas estatísticas de uma massa significativa de dados de descargas atmosféricas.

É importante relatar que alguns erros só podem ser identificados e devidamente quantificados a partir da comparação entre os dados gerados pelo LLS e medições reais de descargas atmosféricas (referências). Alguns erros podem ser sistemáticos e, no entanto, não identificados através da mera redundância de dados gerados pelo LLS.

---

# 7 Métodos Alternativos para Avaliação de Desempenho de LLS

## 7.1 *Introdução*

Este capítulo é dedicado a apresentar análises alternativas que visam diagnosticar o desempenho do LLS baseando-se essencialmente na própria base de dados gerada na central do LLS-MG. Em alguns casos, as bases de dados relativas a estas análises correspondem informações cruas providas pelas estações detectoras do sistema, além das informações das descargas.

O objetivo fundamental desse capítulo vai além do diagnóstico do LLS. Ele também visa explorar possibilidades de análises dedicadas à quantificação dos efeitos de erros nas indicações do sistema.

---

## 7.2 *Diagnóstico do LLS*

Atualmente, a Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas – RINDAT totaliza 25 estações remotas (IMPACT e LPATS), cobrindo toda a Região Sudeste, grande parte da Região Sul e ainda os Estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e sul da Bahia. A rede nacional apresenta 4 centrais de processamento localizadas nas empresas CEMIG<sup>1</sup>, FURNAS<sup>2</sup>, SIMEPAR<sup>3</sup> e INPE<sup>4</sup>.

A figura 7.1a apresenta as curvas teóricas de eficiência de detecção para descargas atmosféricas com intensidade de corrente superiores a 5 kA na atual configuração da RINDAT. A figura 7.1b apresenta as curvas teóricas de precisão de localização (quantificação dos erros através dos valores medianos do comprimento do semi-eixo maior das elipses de solução das descargas – item 4.2.5). Os valores estimados foram obtidos aplicando-se o modelo de propagação do fabricante (item 4.4), considerando todos os sensores em perfeito funcionamento [Global Atmospheric, 1996]. No caso da figura 7.1b, apesar do fabricante do sistema não recomendar a geração da curva de precisão de 300 m para sistemas desse porte, ela é apresentada aqui apenas para visualizar a região onde o sistema apresenta melhores soluções de localização de descargas atmosféricas.

---

<sup>1</sup> Os históricos do LLS-MG e da RINDAT podem ser encontrados nas referências [Mesquita, 2001] [Dias, 2002], bem como em relatórios internos do LRC.

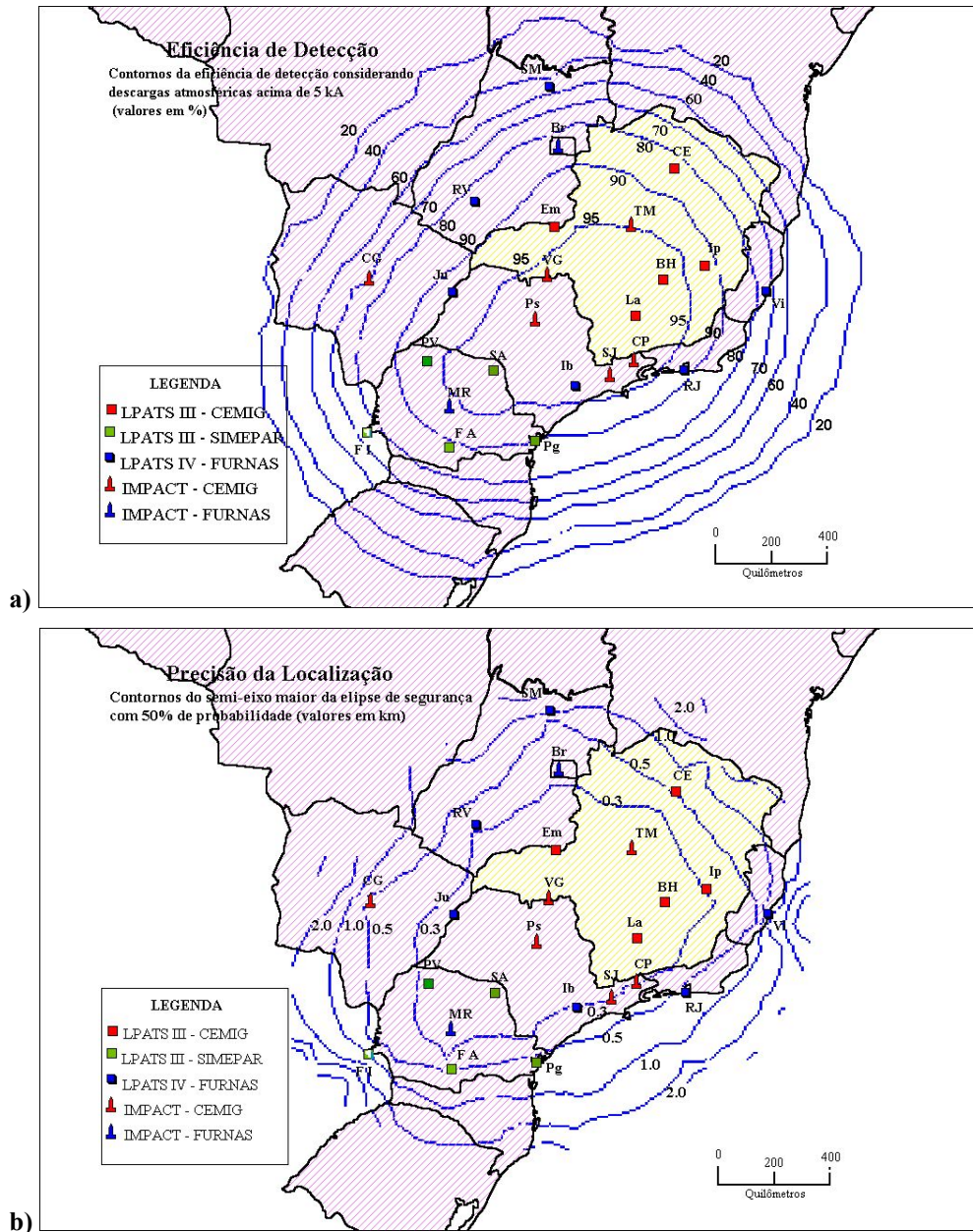
<sup>2</sup> FURNAS – Furnas Centrais Elétricas S.A.

<sup>3</sup> SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná

<sup>4</sup> INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

---





### 7.3 Formato de Dados do LLS

Neste item está descrito o formato de dados de descargas atmosféricas disponibilizados pelo LLS. Para tanto, foi utilizado um exemplo da solução de uma descarga atmosférica processada na central do LLS CEMIG.

### **Formato de dados de *strokes* – exemplo de uma solução**

Na tabela 7.1 é apresentado o formato de dados referentes à solução de um *stroke*, bem como a descrição de cada um dos campos. Tal solução foi obtida ao aplicar o algoritmo de processamento de localização de descargas atmosféricas (*locate.cfg*) a um conjunto de registros das estações remotas sensibilizadas durante um determinado intervalo de tempo.

Na tabela 7.2 são apresentados os registros dos sensores que foram utilizados na solução deste “*stroke* exemplo” e a descrição dos respectivos campos.

Tab 7.1 - Formato de dados de *strokes* obtidos na central de processamento do LLS-CEMIG.

0	1998	10	23	19	5	21	953709774	-18.3317	-44.6273	-30	0	2	
		1	92.50	7.20	1.10	6.90	8.0	30.2	-0.0	0	1	0	1

*Campo 1:* Número da versão do UALF – positivo inteiro.

*Campos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8:* ano, mês, dia, hora, minutos, segundos, nanosegundos.

*Campo 9:* latitude da localização do ponto de incidência, calculada em graus decimais.

*Campo 10:* longitude da localização do ponto de incidência, calculada em graus decimais.

*Campo 11:* Intensidade estimada da corrente da descarga (em kA).

*Campo 12:* Multiplicidade do *flash*. Neste caso, como é uma solução de *stroke* o valor deste campo é zero.

*Campo 13:* Número de sensores que participaram da solução da descarga.

*Campo 14:* Grau de liberdade no processo de otimização da localização. Este parâmetro corresponde à diferença entre o número de medidas (tempo e ângulo) utilizadas na solução e o número de parâmetros estimados (latitude, longitude e instante de ocorrência).

*Campo 15:* Ângulo da elipse de solução em relação ao norte geográfico (item 4.2.5), calculada em graus decimais.

*Campo 16:* Semi-eixo maior da elipse de solução em km.

*Campo 17:* Semi-eixo menor da elipse de solução em km.

*Campo 18:* Valor do Chi-quadrado normalizado (item 4.2.5).

*Campo 19:* *Tempo de frente\** da onda do sinal EM, em microssegundos.

*Campo 20:* *Tempo de decaimento\** da onda do sinal EM, em microssegundos.

*Campo 21:* Máxima taxa de crescimento da forma de onda do sinal EM.

*Campo 22:* Indica se a descarga foi classificada como nuvem-solo=0 ou descarga de nuvem=1.

*Campo 23:* Indica se a informação de ângulo foi utilizada no cômputo da descarga atmosférica.

*Campo 24:* Indica se as informações de intensidades de sinal medidas pelos sensores são utilizadas na solução da descarga. Usualmente a intensidade de sinal não é utilizada, evitando mais uma fonte de erro na estimativa da localização da descarga atmosférica, uma vez que a informação de intensidade não é muito precisa.

*Campo 25:* Indica se a informação de tempo foi utilizada no cômputo da descarga atmosférica.

\* *Tais valores referem-se aos valores reportados pela estação participante da solução da descarga que reportou mais cedo o instante de chegada do sinal EM ( a estação participante mais próxima do local do evento).*

Tab 7.2 – Formato de registros dos sensores do LLS CEMIG.

01	10/23/1998	19:05:21.953930974	3	114.6	-234.4	<u>8.0</u>	<u>30.2</u>	IMPCT
04	10/23/1998	19:05:21.955116152	1	65.1	-26.4	4.0	13.2	IMPCT

*Campo 1:* Identifica a estação remota (01- Três Marias e 04- Volta Grande).

*Campo 2:* mês/dia/ano do registro.

*Campo 3:* Hora:minutos:segundos:nanosegundos..

*Campo 4:* Multiplicidade do evento, percebida pelo sensor.

*Campo 5:* Indicação do ângulo de chegada do sinal EM na estação do tipo IMPACT em relação ao norte geográfico, medido em graus decimais.

*Campo 6:* Intensidade de sinal bruto em unidades LLP. Esta unidade é denominada LLP em função do nome da empresa *Lightning Location and Protection Incorporation*.

*Campo 7:* *Tempo de frente\** da onda do sinal EM, em microssegundos.

*Campo 8:* *Tempo de decaimento\** da onda do sinal EM, em microssegundos.

*Campo 9:* Indica o tipo de estação (IMPACT ou LPATS)

\* *Os valores sublinhados ( $T_{frente}=8\mu s$  e  $T_{decaimento}=30,2\mu s$ ) são os valores reportados para a solução da descarga atmosférica (tabela 7.1). Tais valores referem-se aos valores reportados pela estação participante da solução da descarga mais próxima do local do evento.*

Com objetivo de facilitar a compreensão dos parâmetros disponibilizados pelo LLS, bem como, de identificar as possibilidades de recursos e análises que podem ser implementadas, um mapa ilustrando a solução do “*stroke* exemplo” é apresentado na figura 7.2. Nesta figura estão indicadas: a localização da descarga atmosférica, as localizações das estações participantes desta solução e suas respectivas distâncias ao local do evento<sup>5</sup> e, ainda, a indicação do ângulo de chegada do sinal EM nas estações consideradas.

<sup>5</sup> As distâncias indicadas na figura correspondem àquelas calculadas pelo software de geoprocessamento utilizado considerando as coordenadas das estações e do ponto ótimo de localização da descarga. Levando em conta as diferenças entre os instantes de chegada do sinal EM nas estações em relação ao instante estimado do evento e a velocidade de propagação do sinal EM igual a da luz, as distâncias calculadas são 66,36 km e 421,91 km.

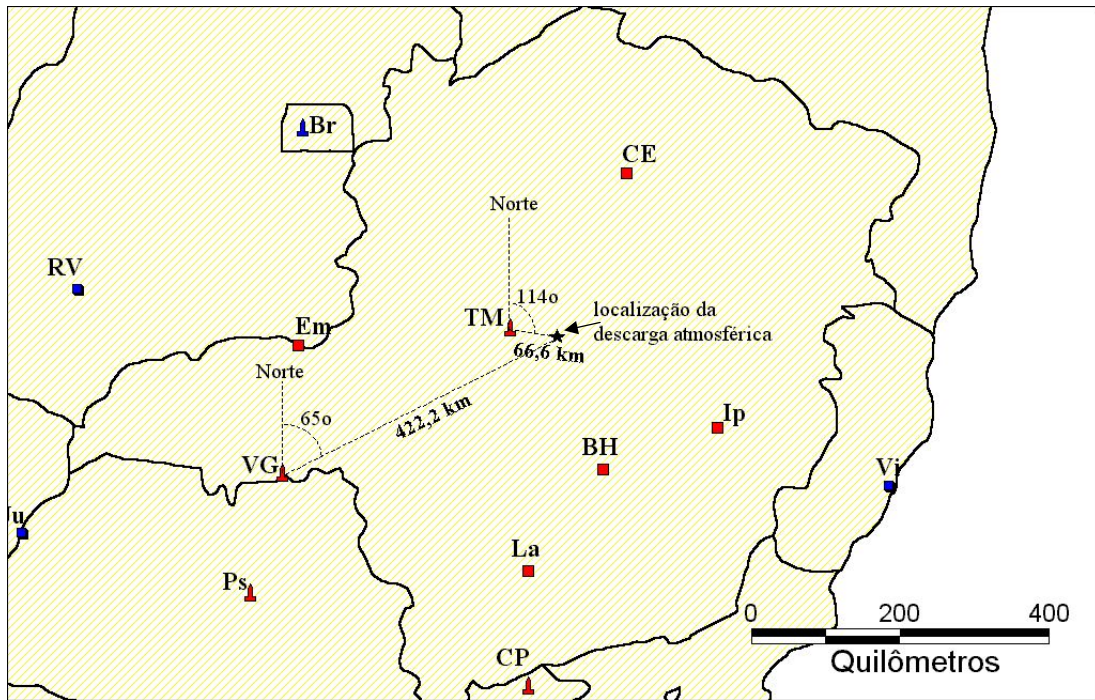


Fig 7.2 – Solução de localização do “stroke” utilizado como exemplo.

Considerando o modelo de propagação aplicável ao LLS em questão, dado pela equação 4.2, que está repetida abaixo:

$$S_{ref,i} = C.S_i \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^P e^{-\frac{D_i - D_{ref}}{A}}$$

onde as constantes  $C$ ,  $P$  e  $A$  valem, respectivamente, 1, 1,13 e  $10^5$ , as intensidades de sinais normalizados em 100 km encontrados para as duas estações são:  $S_{100,1} = -148,026$  e  $S_{100,4} = -134,846$ .

As estações do LLS apresentam fatores de ganho para correção das intensidades do sinal medido. Segundo arquivo de configuração de processamento das informações de descargas atmosféricas (*realtime*) extraído na central de processamento, o fator de ganho da estação Três Marias (IMPACT) é 1,29 e da estação Volta Grande (IMPACT) é 1. O valor médio dos sinais normalizados é então  $\bar{S}_{100} = -162,9$  RNSS (“Range Normalized Value of Signal Strength”). A estimativa do valor de pico da corrente 30 kA é obtida através da função de regressão aplicável, equação 4.3 repetida abaixo:

$$I_{pico} = k_0 + k_1 \cdot \bar{S}_{100}, \text{ onde } k_0 \text{ é assumido com valor nulo e } k_1 \text{ igual a } 0,185.$$

## **7.4 Métodos Alternativos para Avaliação de Desempenho de LLS**

### **7.4.1 Análise da Precisão de Localização de LLS**

Até então, a única informação disponível com relação à precisão da localização das descargas na região de cobertura da rede nacional é aquela estimada a partir da aplicação do Modelo de Precisão de Localização (*Location Accuracy Model*) desenvolvido pelo fabricante do LLS. A saída do programa é um mapa de isocurvas como ilustrado na Figura 7.1b. Não existiam estudos que utilizassem a própria base de dados do LLS para verificar a precisão de localização dos dados providos pelo sistema.

Como citado no item 4.2.5, os LLS's disponibilizam, além do ponto mais provável de ocorrência, dados de qualidade associados a cada registro de descarga individual (*stroke*), tais como: elipse de confiança, número e tipo de sensores participantes na solução, valor “chi-quadrado”, grau de liberdade. A faixa, ou melhor, a região de erro na localização do ponto de ocorrência do *stroke* é representada pela elipse de confiança, mais especificamente pelo comprimento (em km) do semi-eixo maior.

Neste tópico é analisada a precisão de localização dos registros providos pelo LLS, utilizando um conjunto de dados de descargas relativos à região sudeste do Brasil, mais especificamente os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. A metodologia proposta consiste fundamentalmente na obtenção das estatísticas do semi-eixo maior da elipse de confiança, tendo como resultado a elaboração de mapas de isocurvas da precisão da localização do LLS.

Trata-se de um trabalho original, mesmo no contexto internacional, uma vez que a precisão de localização não tem sido ainda analisada considerando a própria base de dados, pelo menos no que se refere a resultados apresentados em forma gráfica. A aplicação da metodologia desenvolvida pode ser estendida a sistemas em outras regiões, incluindo a área coberta pela RINDAT, ou mesmo em outros LLS's. Os resultados obtidos permitem a realização de análises de confiabilidade dos dados providos pelo sistema (determinação do tipo de utilização dos dados aplicável: macro ou micro análise), a identificação de locais

---

onde o erro de localização pode superar os valores esperados etc. Os resultados são apresentados também nas referências [Mesquita et al, 2004] e [Mesquita et al, 2005].

#### 7.4.1.1 Considerações Básicas sobre Precisão de Localização

O erro associado à localização da descarga (*stroke*) é representado por uma distribuição Gaussiana (normal) bidimensional. Esta aproximação é considerada representativa, pois se assume que os erros nas medições do ângulo e tempo informados pelos sensores apresentam natureza Gaussiana. A chamada elipse de erro ou região de confiança é obtida a partir da seção transversal da distribuição [Cummins et al, 1998].

Para cada ponto de incidência reportado pelo LLS, todos os parâmetros que definem a respectiva elipse de erro estão contidos no registro de *stroke* (campos 15,16 e 17 da tabela 7.1).

É possível definir uma elipse de erro para cada nível de probabilidade desejado como ilustrado na figura 7.3. Entretanto, o nível de referência usual para caracterização da precisão de localização é 50%.

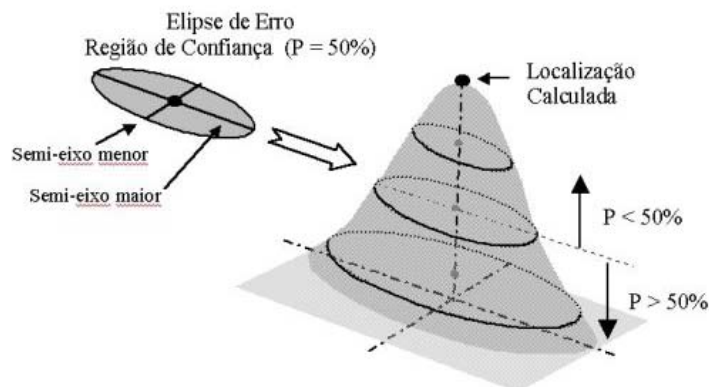


Fig 7.3 – A região de confiança é definida pelos semi-eixos maior e menor e a probabilidade desejada de encontrar o ponto de incidência. A faixa de erro é representada pela distribuição bidimensional normal.

A área delimitada pela elipse é a região de confiança. Neste caso, a elipse em destaque corresponde à região que apresenta uma probabilidade de 50% de se encontrar o verdadeiro ponto de incidência da descarga. A localização ótima do *stroke* corresponde ao centro da elipse (pico da distribuição de erro).

A referência [Stansfield, 1947] apresenta de forma mais detalhada todos os aspectos matemáticos que determinam a forma da elipse de erro, caracterizada pelos semi-eixos maior e menor e seu posicionamento relativo à localização dos sensores envolvidos na solução da descarga. Os *strokes* incidentes em pontos mais centrais da rede do LLS tendem a apresentar elipses de erro mais circulares e menores. Os *strokes* incidentes em pontos mais afastados do centro da rede tendem a apresentar elipses mais alongadas e alinhadas conforme direção do conjunto de sensores participantes. A figura 7.4 ilustra o comportamento das elipses para uma rede simples composta por 3 estações indicadoras de direção.

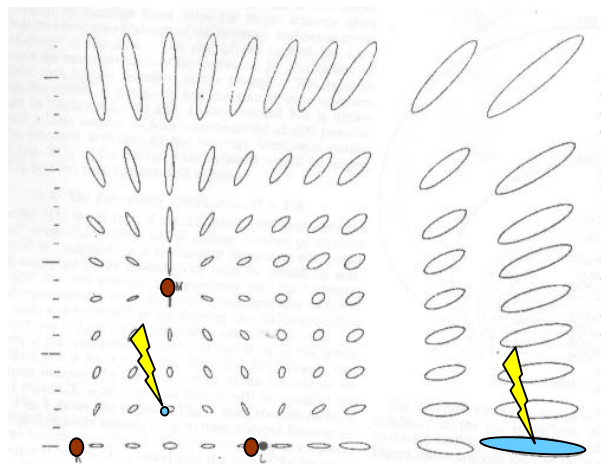


Fig. 7.4 – Elipses de erro das descargas atmosféricas em função do ponto de ocorrência relativo à geometria da rede, que neste exemplo é composta por 3 sensores indicadores de direção. Figura adaptada da referência [Stansfield, 1947].

Os parâmetros da elipse dependem principalmente da posição do ponto de incidência em relação aos sensores sensibilizados pelo evento e dos valores de desvios nas medições de ângulo e tempo de chegada dos respectivos sensores.

Um modelo teórico foi desenvolvido pelo fabricante do LLS com o objetivo de se estimar a precisão de localização de uma dada rede de sensores. O emprego de tal modelo é muito importante principalmente nas fases de projeto e ampliação da rede de sensores dos LLS's.

O modelo, denominado *Location Accuracy Model*, assume certas considerações como o perfeito desempenho dos sensores, a localização do *stroke* em relação ao posicionamento dos sensores, o tipo de sensores envolvidos e os valores médios

especificados dos desvios padrão (de ângulo e de tempo). Tais valores são os mesmos para quaisquer sensores da rede.

Este modelo calcula o comprimento do semi-eixo maior da região de confiança para cada célula de um gradeado 50 x 50 km<sup>2</sup>. O resultado da aplicação desse modelo é um mapa de contornos, cujas isocurvas representam os valores medianos (P=50%) constantes de precisão de localização. Maiores detalhes acerca do modelo podem ser encontrados na referência [Cummins, 1998].

No entanto, o desempenho do LLS não é perfeito e os valores de precisão de localização de descargas atmosféricas podem diferenciar dos valores teóricos estimados a partir da aplicação do modelo.

O próximo tópico apresenta um método alternativo para quantificar a Precisão de Localização, utilizando uma análise estatística da base de dados de *strokes*.

#### **7.4.1.2 Método Alternativo para Quantificar a Precisão de Localização**

Este método consiste em mapear a precisão de localização em uma determinada região de interesse, utilizando um período significativo de dados do LLS em estudo. O mapeamento é representativo para aquela específica massa de dados. A vantagem desse método é que ele contempla inclusive os problemas operacionais do LLS em estudo, por exemplo, eventuais períodos de falha de comunicação entre os sensores e a central de processamento, representando melhor a base de dados disponível.

Primeiramente, define-se um gradeado de acordo com a resolução desejada. Em seguida, o valor mediano do comprimento do semi-eixo maior das elipses de erro referente aos *strokes* ocorridos em cada célula do gradeado é extraído. Posteriormente, utilizando tais valores, é elaborado um mapa temático a fim de visualizar a faixa de erro para a região de estudo.

---



### 7.4.1.3 Precisão de Localização na Região Sudeste do Brasil

A base de dados considerada nesta análise corresponde a um período de um ano de registros de *strokes* (2003). Este conjunto de dados foi obtido para uma configuração específica da rede de sensores (16 estações remotas, sendo 5 sensores IMPACT e 11 sensores LPATS participantes das soluções dos *strokes*).

Os mapas foram elaborados considerando um gradeado de 10 x 10 km<sup>2</sup> abrangendo os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. O Estado de São Paulo não faz parte dessa análise, pois novas estações detectoras, que não fazem parte da configuração de reprocessamento dos dados, foram adicionadas à rede durante os últimos anos. No caso específico de São Paulo, a qualidade dos dados de *strokes* é bastante sensível à inserção dessas novas estações.

A distribuição estatística do valor do semi-eixo maior da elipse de solução foi utilizada na confecção do mapa apresentado na figura 7.5a. A faixa de erro é dada pelo valor mediano do semi-eixo maior.

A figura 7.5b mostra as isocurvas resultantes da aplicação do modelo desenvolvido pelo fabricante. Tais curvas indicam a precisão teórica de localização. Em casos onde os LLS's abrangem áreas extensas como é o caso do sistema brasileiro, os fabricantes recomendam a geração de curvas a partir de valores de 500 m. Nesta figura, a curva de 300 m de precisão é apresentada apenas em caráter ilustrativo, indicando que na região mais central da rede são esperados os melhores valores de precisão.

---

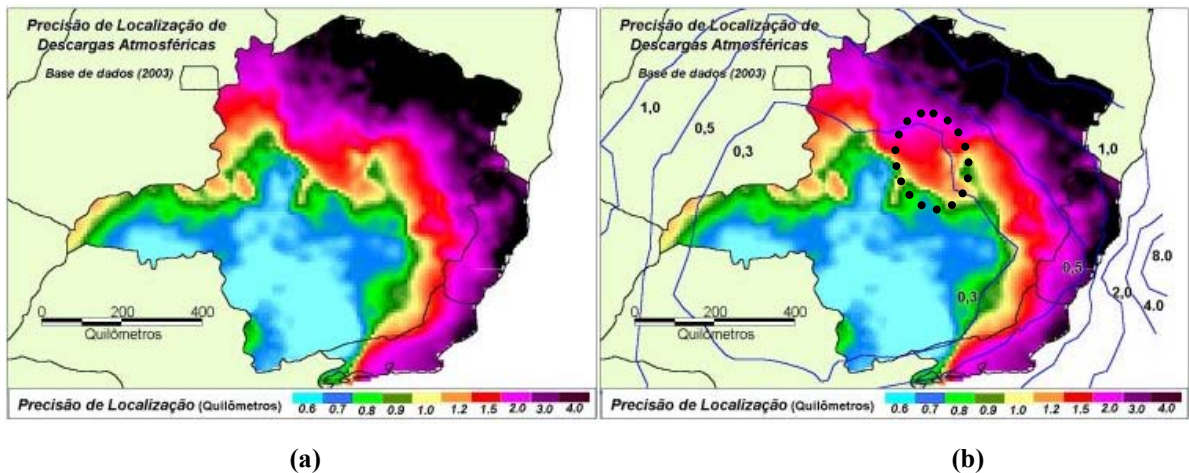


Fig 7.5 – (a) Precisão da Localização de descargas atmosféricas nos Estados MG, RJ e ES. (b) Isocurvas que correspondem às precisões estimadas ao aplicar o modelo teórico desenvolvido pelo fabricante (linhas contínuas).

Ao comparar a precisão de localização obtida através do método alternativo proposto com aquela obtida pela aplicação do Modelo (*Location Accuracy Model*), é possível verificar que as faixas de erro encontradas são significativamente maiores que os valores teóricos. Tal fato pode ser constatado ao se analisar a figura 7.5b, onde grande parte da área interna à curva de 500 m apresenta valores que variam de 600 m a 2 km. As diferenças tornam-se maiores à medida que se afasta do centro da rede, como indicado na região em torno da curva teórica de 1 km (os valores variam de 3 a 4 km). As regiões norte e nordeste de Minas Gerais apresentam valores que excedem 1,5 km.

A faixa de erro encontrada para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo é mais elevada. Tal comportamento era esperado, em virtude da própria limitação de cobertura do LLS (as bordas da rede de sensores sobrepõem-se as áreas destes Estados). Apenas uma pequena região ao sul do Rio de Janeiro apresenta menores valores de erro.

Parte da discordância entre os valores teóricos do Modelo e aqueles indicados pelos dados do LLS pode ser atribuída a não-participação nas soluções de descargas de todos os sensores considerados pelo Modelo. Algumas estações da rede podem não perceber o sinal irradiado por eventos, mesmo que teoricamente a intensidade da corrente de descarga fosse capaz de gerar sinais suficientes para serem detectados pelas estações. Em casos reais, existem os diferenciados efeitos de propagação, o qual é função das características físicas do caminho propagado (relevo e solo).

Quanto maior o número de informações (número de sensores) no cômputo do *stroke*, maior é a redundância e, conseqüentemente, melhor é a qualidade do dado gerado.

Parte das diferenças entre valores teóricos e medidos pode ser também atribuída ao fato do Modelo considerar *um valor médio dos desvios padrão* (de tempo e de ângulo) para todos os sensores. Eventuais períodos de falhas de sensores podem também reforçar as diferenças entre os valores encontrados.

A despeito das diferenças nos valores absolutos, a distribuição geográfica da precisão de localização tem apresentado uma tendência de acompanhar as formas das curvas teóricas, exceto em algumas regiões como a área em vermelho (1,5 km) delimitada pela linha pontilhada na figura 7.5b.

#### **7.4.2 *Análise dos Demais Parâmetros de Qualidade de LLS***

Outras análises foram realizadas com objetivo de melhor quantificar o desempenho do LLS na região de interesse. Tais análises consideram o número médio de sensores participantes da solução da descarga, o percentual de registros que possuem a participação de pelo menos uma estação do tipo IMPACT em suas soluções, o valor médio do grau de liberdade das soluções e o valor médio do chi-quadrado<sup>6</sup>. Estas análises apresentam caráter complementar, que visam elucidar (diagnosticar) o desempenho do sistema em particular. A mesma base de dados de *strokes* (ano 2003) e o mesmo gradeado 10 x 10 km<sup>2</sup> foram considerados nessa análise.

A figura 7.6 mostra o mapa do **número médio de sensores participantes** nas soluções dos *strokes*. Este resultado permite a realização de análises comparativas ao se avaliar a relevância do número de sensores na qualidade dos dados gerados pelo LLS.

---

<sup>6</sup> Os parâmetros de qualidade qui-quadrado e grau de liberdade estão definidos no item 4.2.5 deste texto.

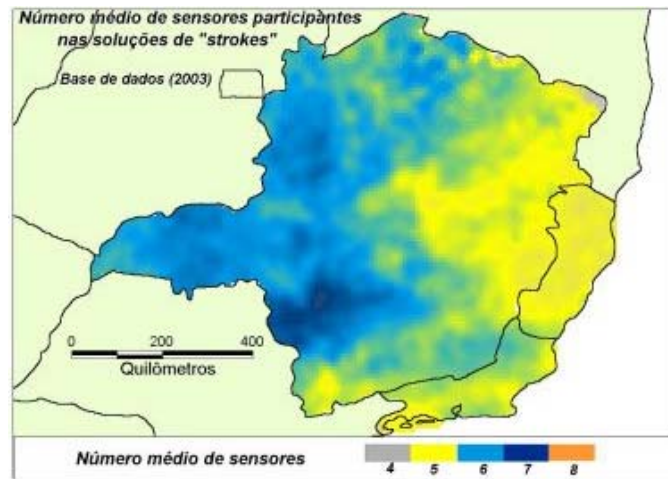


Fig. 7.6 – Número médio de sensores participantes na solução dos *Strokes* nos Estados MG, RJ e ES.

Como esperado, ao comparar os mapas das figuras 7.5 e 7.6, é verificado que a região de maior número de sensores coincide com a região de melhor precisão de localização de descargas atmosféricas. Por exemplo, a região mais escura na figura 7.6 (7-8 sensores) apresenta o melhor nível encontrado para a precisão (600 m). A região delimitada pela linha pontilhada (figura 7.5b) apresenta um número médio de sensores compreendido entre 5 e 6.

Quanto maior o número de informações de tempo e ângulo utilizadas no cômputo da informação da descarga, maior é a qualidade do dado gerado. O registro de *stroke* contém o campo “grau de liberdade” que representa justamente o número de informações adicionais (além das necessárias para calcular as coordenadas, latitude e longitude, do *stroke* e o instante estimado de sua ocorrência). A figura 7.7 mostra o **valor médio do grau de liberdade**.

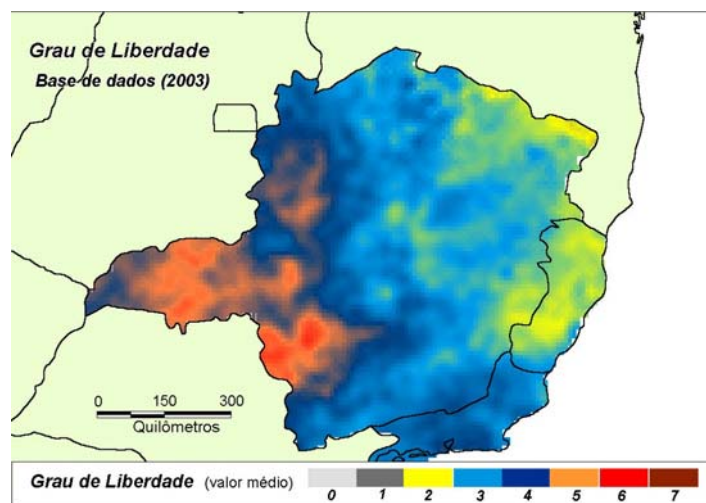


Fig. 7.7 – Número médio do grau de liberdade dos registros de *Strokes* nos Estados MG, RJ e ES.

Um outro parâmetro que possibilita a quantificação da qualidade dos registros de *strokes* gerados pelo LLS é o chamado “*Chi-quadrado*” *normalizado*. Que corresponde à “função erro” normalizada pelos erros esperados de tempo e ângulo e pelo grau de liberdade (item 4.2.5). A figura 7.8 apresenta o **valor médio do chi-quadrado normalizado** para os Estados MG, RJ e ES. Quanto maior o valor do chi-quadrado, maiores são os desvios encontrados nas medições de tempo e ângulo. Segundo fabricante do LLS, valores compreendidos entre 0 e 3 são considerados bons e entre 3 e 10 são considerados valores aceitáveis. Quanto menor o valor, maior a qualidade do registro. Ao utilizar estimativas adequadas de erro de tempo e ângulo, o valor chi-quadrado deve ser próximo de 1. Na NLDN, atualmente, é definido um valor máximo aceitável de 3,5. Valor elevado de chi-quadrado pode indicar a inexistência de correção adequada de erros locais, níveis não usuais de ruído etc. [Vaisala, 2003].

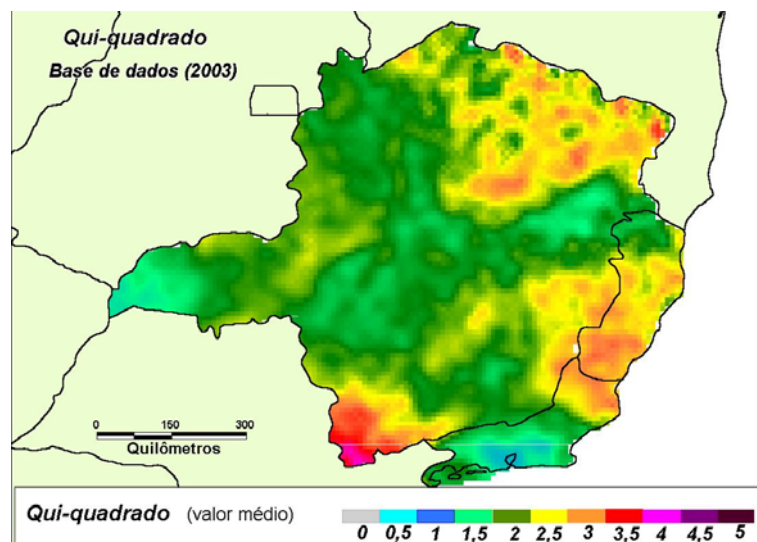


Fig. 7.8 – Valor médio do “chi-quadrado” dos registros de *Strokes* nos Estados MG, RJ e ES.

As regiões norte, extremo leste e extremo sul do Estado MG, bem como, o Estado ES apresentam os maiores valores de chi-quadrado (em torno de 2,5 e 3). Porém se enquadram no nível aceitável de qualidade. Pode-se dizer que o valor chi-quadrado mede o grau de concordância entre os relatos de tempo e ângulo dos sensores e a solução ótima gerada no processamento da informação do *stroke*.

É sabido que o desempenho das estações IMPACT é melhor que o das estações LPATS, uma vez que ela combina as duas tecnologias de localização de descargas atmosféricas (ToA e MDF). A fim de se avaliar a possível relação entre a precisão de

localização e a taxa de participação de estações IMPACT, é mostrado na figura 7.9 um mapa indicando o **percentual de participação de IMPACT's** nas soluções dos *strokes* que compõem o conjunto de dados analisados. Este mapa foi apresentado anteriormente no capítulo 5, na análise de contaminação dos registros nuvem-solo por eventos de nuvens.

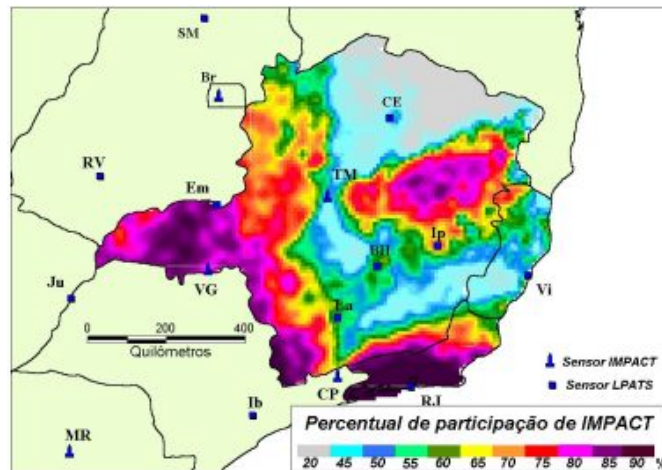


Fig. 7.9 – Percentual de registros de *strokes* cujas soluções têm a participação de pelo menos um sensor IMPACT.

A região de maior percentual de participação de sensores IMPACT no Estado de Minas Gerais (cor roxa) apresenta o melhor nível de precisão encontrado, 600 m. Entretanto a região sul do Rio de Janeiro, onde o percentual de participação é elevado (quase 100%), apresenta níveis de precisão que variam desde 600 m a 3 km, reforçando o caráter complementar deste tipo de análise. Neste caso, o que melhor explica tal comportamento é a influência da disposição física dos sensores, visto que a precisão é reduzida em direção às bordas da região de cobertura do sistema.

Alguns resultados interessantes referentes ao desempenho da rede foram obtidos nesta análise. A capacidade da estação TM (Três Marias) em detectar sinais eletromagnéticos originados na direção sul e, mais notoriamente, na direção nordeste é menor que a detecção de sinais provenientes das demais direções. Uma análise complementar foi realizada considerando-se um outro período de dados (2002) e, no entanto, o mapa obtido foi praticamente o mesmo deste obtido para o ano 2003. Tal comportamento pode estar associado a algum eventual erro local ou mesmo às características do relevo ao longo do caminho de propagação dos campos gerados.

A concessionária de energia local para fins operacionais dividiu a área do Estado de Minas Gerais em sete regionais de transmissão (TR's) de energia elétrica (figura 7.10). As análises foram realizadas para cada uma das regionais e os resultados relativos a cada uma destas áreas são apresentados separadamente.

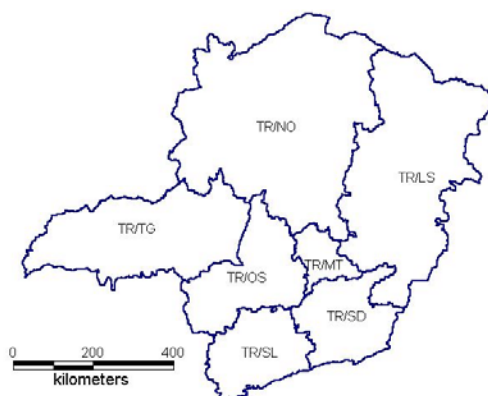


Fig 7.10 – Regiões de análises: sete regionais de transmissão de energia elétrica (TR's).

A tabela 7.3 resume os valores medianos encontrados para os semi-eixos maiores, valores médios do número de sensores participantes da solução dos *strokes* e o percentual médio de registros que tiveram a participação de pelo menos uma estação do tipo IMPACT. Os valores entre parênteses correspondem à faixa encontrada para região em estudo.

Tab. 7.3 – Resumo dos resultados para cada regional de transmissão.

TR	Valor mediano do semi-eixo maior (km)	Faixa do número médio de sensores	Percentual médio de participação de estações IMPACT
TR / OS	0,61 (0,4 – 1,2)	5 – 8	61% (23 – 92%)
TR / SL	0,61 (0,4 – 1,2)	4 – 7	72% (35 – 97%)
TR / MT	0,70 (0,6 – 0,9)	5 – 7	53% (14 – 80%)
TR / TG	0,77 (0,5 – 1,75)	5 – 7	77% (46 – 97%)
TR / SD	0,81 (0,5 – 1,6)	5 – 7	55% (31 – 90%)
TR / NO	1,9 (0,5 – 6,0)	4 – 7	55% (0 – 91%)
TR / LS	2,3 (0,6 – 8,4)	4 – 6	59% (0 – 93%)

A distribuição do semi-eixo maior do conjunto de *strokes* ocorridos na região TR / MT (Transmissão Metropolitana) é apresentada na figura 7.11. Verifica-se que o número de registros cujo erro supera 1 km é pequeno, representando apenas 9% do conjunto de dados na região.

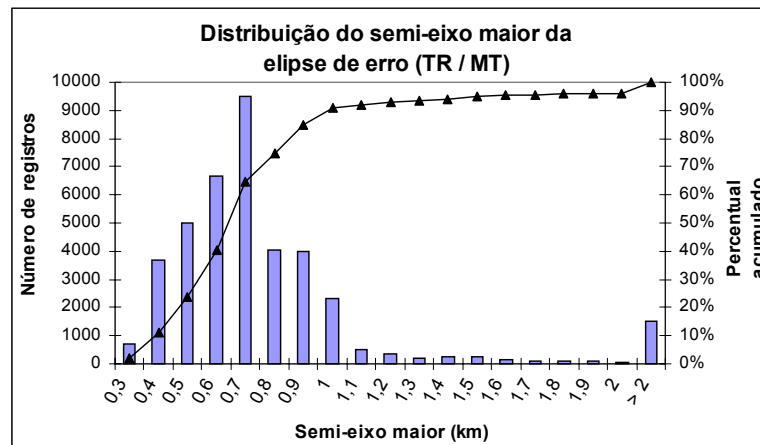


Fig. 7.11 – Distribuição do semi-eixo maior do conjunto de dados de *strokes* na região TR/MT.

O objetivo destas análises apresentadas neste item e em 7.4.1.3 é retratar (diagnosticar) uma base de dados específica referente a um período de interesse.

Mesmo que seja definida outra configuração de reprocessamento na central do LLS, ou novos ajustes nos valores de desvios de tempo e ângulo referentes a cada sensor da rede, a metodologia aplicada (análise estatística dos dados gerados pelo LLS) continua sendo válida para a avaliação da precisão de localização. Neste caso, uma nova base de dados seria constituída a partir do reprocessamento dos mesmos e, possivelmente, novos valores medianos do semi-eixo maior poderiam ser obtidos.

A principal contribuição deste trabalho é que as análises que utilizam a base de dados do LLS na região em estudo podem ser realizadas mais cuidadosamente, considerando os novos valores esperados para a faixa de erro de localização.

A aplicação dessa metodologia propicia um melhor entendimento do desempenho do LLS na área de estudo e permite, por exemplo, a identificação de desempenhos diferenciados de estações do tipo IMPACT em determinadas faixas de direção.

A aplicação do método proposto pode ser estendida para outras regiões, incluindo toda a área de cobertura da RINDAT. O método permite executar análises tanto em nível macro quanto em micro, consoante o gradeado escolhido (10 x 10 km<sup>2</sup>).



# 8 Implementação de uma Nova Metodologia para Calibração do LLS-MG

## 8.1 *Introdução*

Os diversos aspectos abordados nos capítulos anteriores evidenciaram a relevância da obtenção de *referências locais* de dados de descargas atmosféricas para a adequada quantificação dos erros nas indicações do LLS-MG.

Neste capítulo é proposta uma nova metodologia baseada na constituição de uma base de dados de referência de descargas atmosféricas. Diferentemente das abordagens tradicionais que utilizam foguetes ou torres instrumentadas, a nova metodologia permite o estudo em diferentes pontos da área de cobertura do sistema, sendo possível considerar as particularidades das condições físicas de solo e relevo locais do Estado.

---

Os itens seguintes apresentam as etapas desenvolvidas relativas à implementação da metodologia proposta para a calibração do LLS.

## ***8.2 Metodologia para Calibração de LLS Utilizando “Dados Locais”***

A metodologia proposta se fundamenta basicamente em utilizar *referências* de medições *locais* dos parâmetros de descarga atmosférica para comparação com os resultados obtidos pelo LLS-MG. O termo *referência*, utilizado neste trabalho, consiste no conhecimento do ponto e do instante exato de incidência da descarga atmosférica e também da onda de corrente associada.

Para tanto, o projeto de calibração do LLS-MG incluiu a concepção e o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico pela equipe do LRC. Tal dispositivo, através de medição indireta, é capaz de medir e registrar a onda da corrente de descarga bem como o instante de ocorrência da mesma. As características de baixo custo e dimensões reduzidas viabilizam a constituição de uma rede de registradores distribuídos numa área de interesse.

### ***8.2.1 Medição Indireta da Corrente de Descarga***

O campo magnético gerado pela corrente de descarga atmosférica pode ser estimado a partir da força eletromotriz induzida nos terminais de uma espira e, conhecida toda a geometria envolvida, é possível a reconstrução da onda de corrente que o originou.

O princípio de medição da onda de corrente é descrito a seguir, considerando uma corrente  $i(t)$  fluindo através de um canal condutor vertical acima do solo condutor perfeito, figura 8.1. O desenvolvimento é realizado ignorando-se os tempos de propagação e atenuação da onda no canal, assumindo-se a distância  $r$  pequena (inferior a 20 metros) em relação ao comprimento do canal ( $l = 60$  m, por exemplo).

---

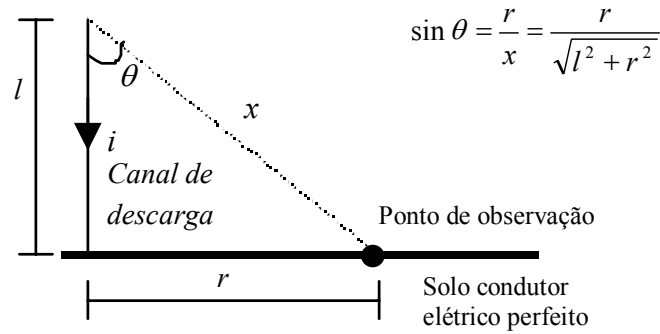


Fig 8.1 – Representação simplificada do canal de descarga.

Empregando-se a lei de Biot-Savart, tem-se o elemento densidade de fluxo magnético  $d\vec{B}$  no ponto de observação, dado por:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{J} \times \vec{x}}{x^2} dV \quad \text{Eq. 8.1}$$

onde,  $\vec{J} = J\vec{dl}$  é a densidade de corrente e  $dV=ds.dl$  é o elemento de volume.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i(t)}{x^2} dl \sin\theta = \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} \frac{r.dl}{(l^2 + r^2)^{3/2}} \quad \text{Eq. 8.2}$$

Aplicando-se o método das imagens, tem-se a densidade de fluxo magnético no ponto de observação, dado por:

$$B = \int_{-l}^l \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} \frac{r.dl}{(l^2 + r^2)^{1.5}} = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \frac{1}{r} \frac{l}{\sqrt{l^2 + r^2}} \quad \text{Eq. 8.3}$$

A força eletromotriz induzida numa espira vertical no ponto de observação é obtida aplicando-se a lei de Faraday e considerando a densidade de fluxo magnético uniforme na área da espira:

$$fem = -N \frac{d\phi_m}{dt} = -N \frac{d(Ba \cos \Phi)}{dt} \quad \text{Eq. 8.4}$$

onde  $a$  corresponde à área da espira,  $\Phi$  é o ângulo formado entre o plano da espira e a linha  $r$  e  $N$  é o número de espiras. Considerando uma corrente invariante ao longo do canal de descarga e a área da espira constante, a expressão 8.4 pode ser simplificada. Assim, o valor

instantâneo da tensão induzida ( $fem$ ) numa espira vertical posicionada no ponto de observação é dado por:

$$fem = -\frac{\mu_0}{2\pi r} Na \cos \Phi \frac{l}{\sqrt{l^2 + r^2}} \frac{di(t)}{dt} \quad \text{Eq. 8.5}$$

onde,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

Se todos os parâmetros e distâncias envolvidas são conhecidos, a onda de corrente pode ser obtida através da integração de  $fem$ .

A corrente de retorno de uma descarga atmosférica pode ser melhor representada pela distribuição de diferentes elementos de corrente ao longo do canal de descarga,  $i(z', t)$ , para ter em conta a sua variação com a altura  $z'$ . Na literatura técnica da área são apresentados diferentes modelos que descrevem a distribuição da corrente ao longo do canal de descarga [Rakov and Uman, 1998b]. Como resultado da aplicação desses modelos no cômputo do campo magnético nas proximidades do canal junto à sua base, é verificado que as distribuições típicas de corrente  $i(z', t)$  não trazem diferenças significativas entre os respectivos valores dos campos magnéticos gerados [Nucci et al, 1990], por apresentarem variação muito discreta com a altura.

A despeito das simplificações realizadas na dedução acima, na qual se assume a onda de corrente idêntica àquela da base do canal, sem qualquer atenuação de sua amplitude ou defasamento devido ao tempo de propagação, acredita-se que, em função do ponto de observação estar próximo do canal, tais simplificações não implicam erros significativos.

Contudo, por uma questão de segurança, foi efetuada uma simulação para o cálculo dos campos magnéticos gerados por distribuições mais “representativas” da corrente de descarga, permitindo a comparação destes ao campo originado pela distribuição “simplificada”, conforme indicado a seguir.

### Casos simulados

O cálculo da densidade de campo magnético azimutal foi realizado utilizando a formulação dada pela equação 3.6, repetida abaixo:

$$B_{\phi}(D,t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^H \left[ \frac{\sin \theta}{R^2} i(z', t - R/c) + \frac{\sin \theta}{cR} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \right] dz',$$

onde  $D=r$ ,  $R=x$ ,  $H=l$  e o ângulo  $\theta$  desta formulação corresponde ao complementar do ângulo  $\theta$  da figura 8.1. Essas igualdades podem ser verificadas comparando as figuras 8.1 e 3.1.

A distância de observação é de 15 m (no nível do solo perfeito), ordem de grandeza típica da distância do dispositivo para medição indireta da corrente de descarga em relação ao percurso desta. Foram utilizadas na simulação ondas de corrente de tempos 4/70  $\mu\text{s}$  e 1/50  $\mu\text{s}$ , ambas triangulares com amplitude 1 kA. O comprimento dos segmentos nos quais o canal foi particionado valia 0,1 m e foram consideradas duas velocidades de propagação da onda ( $v=c$  e  $v=0,6c$ ). Os casos simulados bem como seus respectivos resultados do cálculo das densidades de campo magnético estão indicados na tabela 8.1.

Tab 8.1 – Casos simulados para cálculo da densidade de campo magnético gerado pela corrente de retorno no ponto de observação na base, a 15 m do canal de descarga.

	Altura do Canal de descarga	Modelo da Corrente de retorno	Onda de Corrente injetada	Intensidade B ( $\mu\text{T}$ )	
				$v = c$	$v = 0,6c$
Casos Simulados	60 m	TL	4 / 70 $\mu\text{s}$	12,98	12,94
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,14	12,98
		MTLE	4 / 70 $\mu\text{s}$	12,99	13,01
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,49	13,57
		BG	4 / 70 $\mu\text{s}$	13,03	13,03
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,45	13,45
		Distribuição uniforme	4 / 70 $\mu\text{s}$	13,03 (v infinita)	
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,45 (v infinita)	
	300m	TL	4 / 70 $\mu\text{s}$	13,34	13,28
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,41	13,24
		MTLE	4 / 70 $\mu\text{s}$	13,33	13,33
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,74	13,74
		BG	4 / 70 $\mu\text{s}$	13,42	13,42
			1 / 50 $\mu\text{s}$	13,86	13,84
Distribuição uniforme		4 / 70 $\mu\text{s}$	13,42 (v infinita)		
		1 / 50 $\mu\text{s}$	13,85 (v infinita)		

c – Velocidade da Luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

Continua ....

TL – Modelo de linha de transmissão:	$\begin{cases} i(z', t) = i(0, t - \frac{z'}{v}) & z' \leq vt \\ i(z', t) = 0 & z' > vt \end{cases}$
MTLE – Modelo de linha de transmissão modificado com atenuação exponencial: ( $\lambda = 2000\text{m}$ )	$\begin{cases} i(z', t) = i(0, t - \frac{z'}{v})e^{-\frac{z'}{\lambda}} & z' \leq vt \\ i(z', t) = 0 & z' > vt \end{cases}$
BG – Modelo Bruce e Golde:	$\begin{cases} i(z', t) = i(0, t) & z' \leq vt \\ i(z', t) = 0 & z' > vt \end{cases}$
Distribuição uniforme: (neste caso a $v = 1 \times 10^{15} \text{ m/s}$ )	$\begin{cases} i(z', t) = i(0, t) & z' \leq vt \\ i(z', t) = 0 & z' > vt \end{cases}$

As figuras 8.2 e 8.3 mostram as formas de onda da densidade de campo magnético, respectivamente, nas escalas 20  $\mu\text{s}$  e 5  $\mu\text{s}$ .

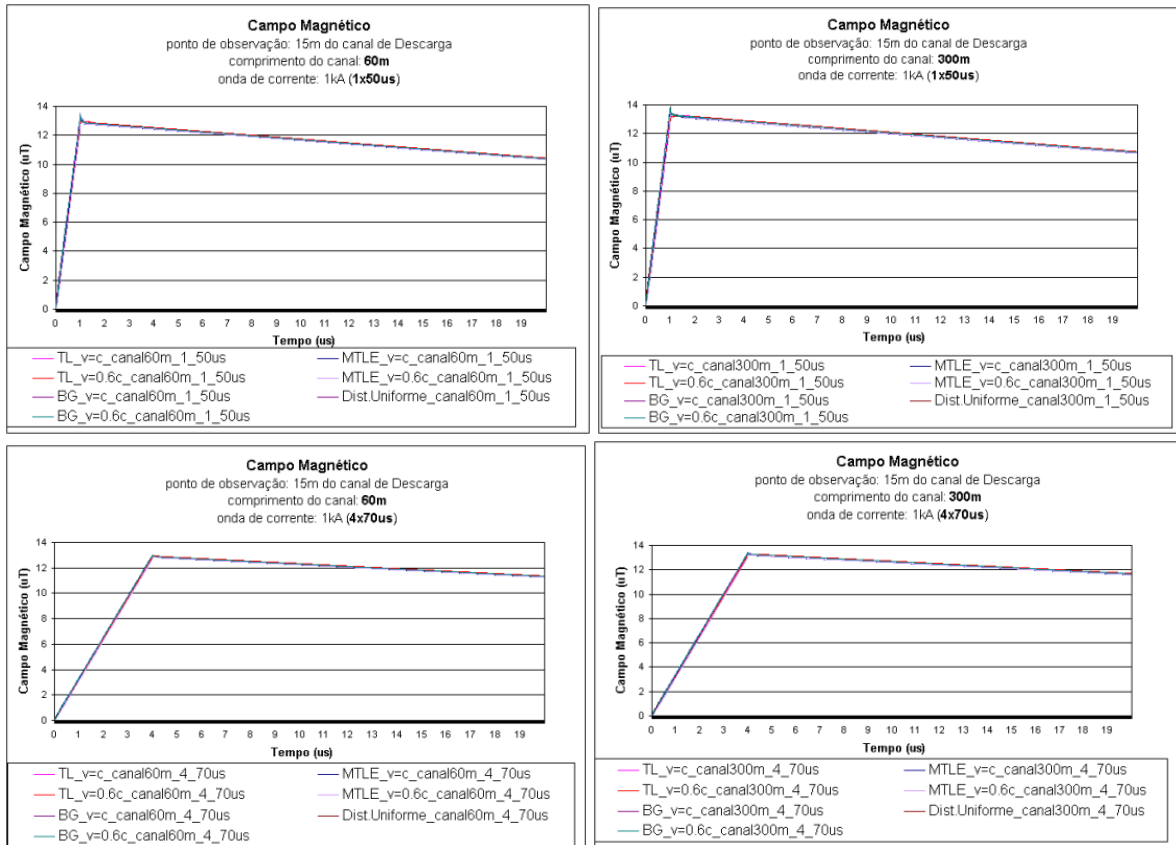


Fig. 8.2 – Resultado do cálculo da densidade de campo magnético horizontal para todos os casos simulados na escala de 20  $\mu\text{s}$ .

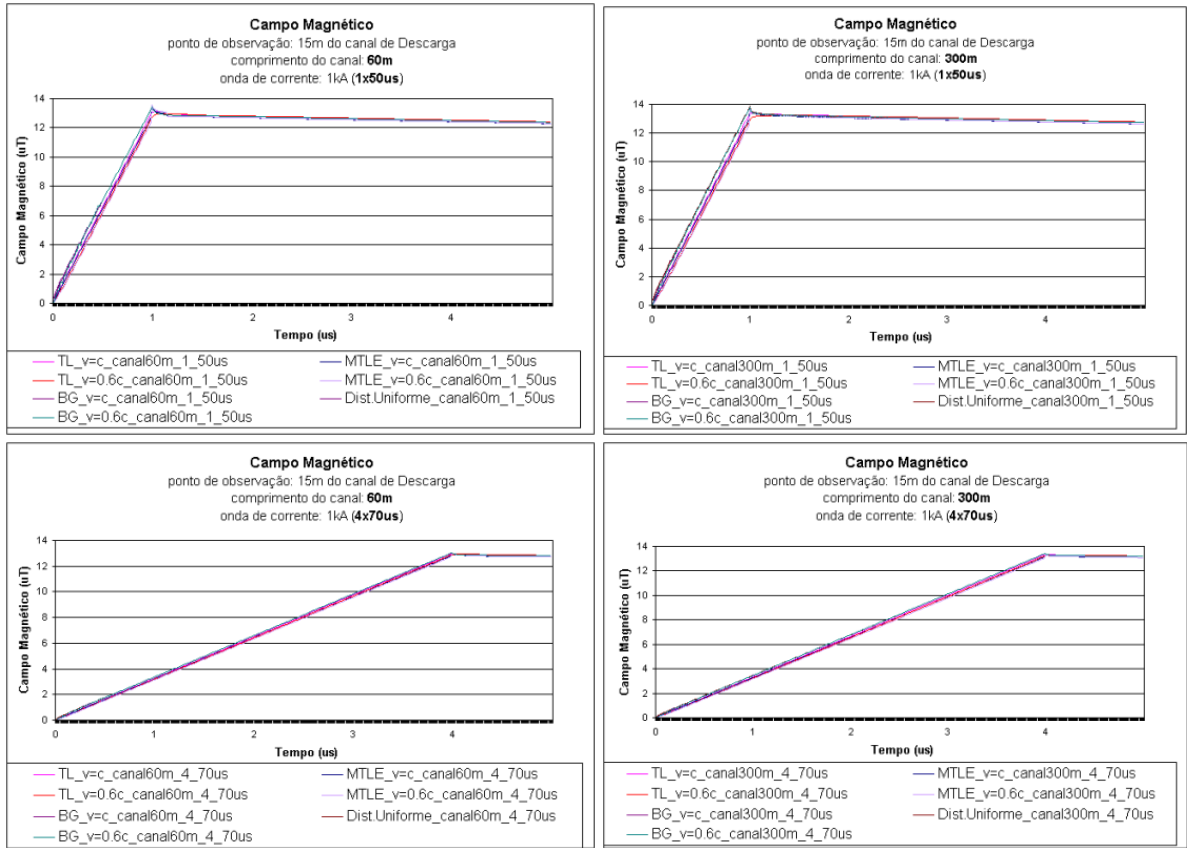


Fig. 8.3 – Resultado do cálculo da densidade de campo magnético horizontal para todos os casos simulados na escala de 5 µs.

Os resultados obtidos foram bastante similares, tanto com relação à forma de onda do campo gerado no ponto de observação, quanto no valor de intensidade (12,94 a 13,86 µT). Isto mostra, nessa condição particular do campo magnético próximo, a validade da aproximação de distribuição uniforme da onda de corrente ao longo do canal de descarga para fins de cálculo do campo magnético.

### 8.2.2 Descrição do Dispositivo Desenvolvido e seu Princípio de Funcionamento

O dispositivo foi desenvolvido para ficar posicionado nas proximidades de um objeto vertical monitorado (por exemplo, uma torre), no qual se tem expectativa de incidência freqüente de descargas atmosféricas.

O dispositivo contém duas antenas ortogonais, *d*-antena (antena direta) e *q*-antena (antena em quadratura). Cada antena foi construída com um cabo coaxial (75Ω) formando um anel que apresenta em seu topo uma interrupção da blindagem. A *d*-antena é orientada em relação ao canal de descarga de modo que a mesma receba indução máxima e a *q*-antena receba indução mínima, figura 8.4.

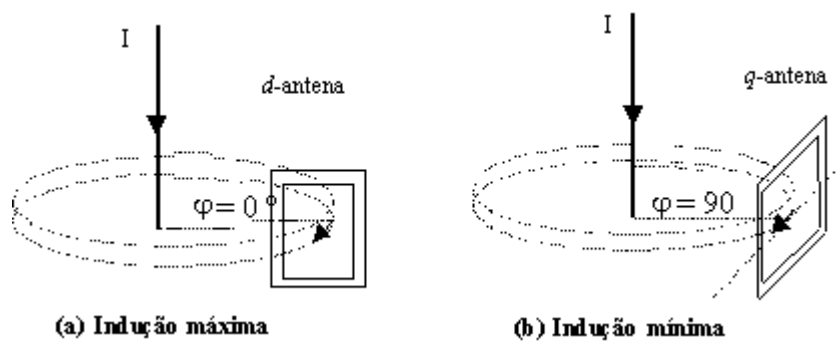


Fig. 8.4 – Orientação das antenas do dispositivo: (a) *d*-antena orientada para receber indução máxima; (b) *q*-antena orientada para receber indução mínima. Figuras adaptadas da referência [Silvino et al, 2002].

Esta orientação atua como um fator seletivo para assegurar que somente os sinais associados a descargas que incidirem no ponto de interesse sejam registrados pelo dispositivo. Caso o sinal na *q*-antena ultrapasse um limiar pré-selecionado, constitui-se um indicativo de que o sinal gerado se refere a eventos que muito provavelmente não incidiram no ponto de interesse. Neste caso, o sinal induzido na *d*-antena é desconsiderado.

As antenas foram dimensionadas considerando a distância de observação e os valores máximo e mínimo esperados para a amplitude da corrente de descarga. Tem-se a expectativa de que as correntes positivas e negativas estejam compreendidas na faixa de 5 a 200 kA.



O diagrama de blocos do dispositivo é apresentado na figura 8.5. O diagrama é dividido nas partes analógica e digital, além de apresentar a parte de energização do circuito que inclui a alimentação por fonte de energia solar e o controlador de carga da bateria [Silvino et al, 2003].

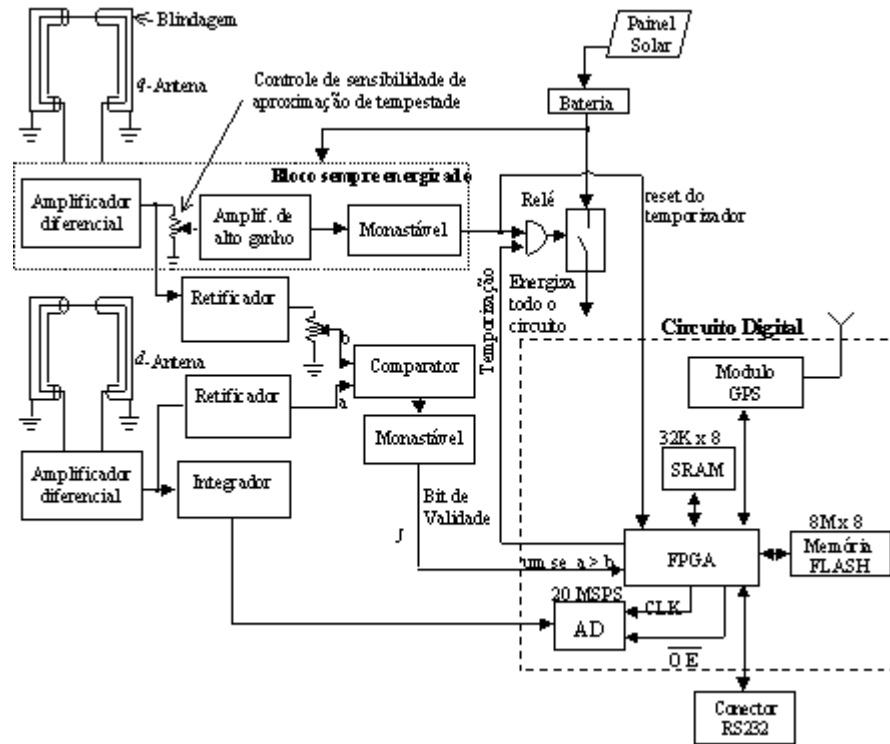


Fig. 8.5 – Diagrama de blocos do dispositivo. Figura adaptada da referência [Silvino et al, 2003].

Apenas uma parte do circuito analógico é mantida continuamente energizada (Bloco pontilhado), permitindo que a *q*-antena possa detectar e indicar a aproximação de uma tempestade, consumindo para isso apenas alguns miliampéres. A sensibilidade do circuito para detecção da ocorrência de descargas atmosféricas nas proximidades é ajustável através de um potenciômetro. A detecção da “aproximação” de uma tempestade causa a atuação de um relé, que comanda a alimentação de todo o circuito analógico e o circuito digital pela bateria. Assim, o sistema fica preparado para registrar eventos de incidência que venham a ocorrer no objeto monitorado.

O sinal da *d*-antena é amplificado, integrado e enviado a um conversor analógico-digital de 10 bits. O sinal digitalizado é então armazenado continuamente em uma memória

RAM estática (SRAM<sup>1</sup>). Além das funções de amplificação e integração, a placa analógica é capaz de retificar e comparar os sinais das duas antenas num período da ordem de 1 microssegundo.

Quando o dispositivo é sensibilizado pela presença de corrente no canal monitorado (bit de validade alterna do estado 0 para 1), a FPGA<sup>2</sup> lê imediatamente o instante de ocorrência, obtido do módulo GPS do dispositivo, e armazena o sinal correspondente da SRAM juntamente com a informação do tempo em uma memória FLASH<sup>3</sup>. Quando necessário, é possível extrair os dados armazenados pelo dispositivo através de um conector RS232 conectado a um *notebook*.

### 8.2.3 Testes e Resultados Experimentais

Neste item estão resumidos os principais testes realizados desde a concepção do dispositivo até os testes realizados no momento da instalação do equipamento em campo.

- **Primeira etapa de testes** – Avaliação do comportamento do sinal induzido na antena devido à injeção de corrente impulsiva em um canal vertical próximo à antena

O trabalho [Naime, 2001] apresenta detalhadamente testes preliminares efetuados na antena proposta a fim de obter informações pertinentes que viessem a auxiliar no processo de construção do sistema de medição. O circuito de teste compreendeu o gerador de impulso do laboratório de alta tensão – LEAT (UFMG), uma cordoalha para simular o canal de descarga atmosférica e uma chapa metálica sobre o solo para simular o solo condutor perfeito. A figura 8.6 ilustra a disposição dos elementos envolvidos.

---

<sup>1</sup> SRAM (*Static Random Access Memory*) – Memória estática de acesso aleatório. É um tipo de RAM que mantém armazenada a informação apenas quando é mantida a sua alimentação.

<sup>2</sup> FPGA (*Field Programmable Gate Array*) – Conjunto de portas programáveis. É um tipo de circuito integrado programável.

<sup>3</sup> Memória Flash – É uma memória não-volátil (que mantém os dados mesmo sem estar alimentada). Ela é caracterizada por permitir acesso rápido, baixo consumo de energia e apresentar pequenas dimensões.

---

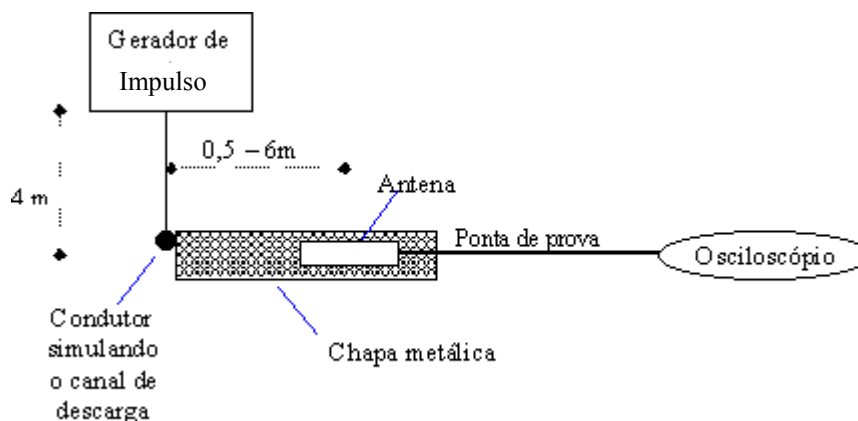


Fig. 8.6 – Vista de cima dos elementos envolvidos nos testes preliminares da antena. Figura adaptada da referência [Naime, 2001].

Estes testes foram realizados a fim de se avaliar as seguintes relações:

- (a) a relação inversa entre a tensão induzida e a distância horizontal entre o canal e a antena;
- (b) a relação direta entre o pico da corrente injetada no canal e o pico da tensão induzida na antena;
- (c) a relação esperada entre o valor de pico da tensão induzida e o ângulo  $\varphi$  (ângulo formado entre o plano da  $d$ -antena e a reta que une o canal ao ponto de observação) .

Nos resultados alcançados [Naime, 2001], verificou-se que a diferença média entre os valores da intensidade de corrente reconstituída a partir do sinal medido na antena e da corrente medida diretamente no canal de descarga foi próxima de 9%.

- **Segunda etapa de testes** – Comparação dos resultados obtidos com o *protótipo do dispositivo* em aplicações em escala reduzida

Esta segunda etapa refere-se a testes realizados no protótipo, que incluiu além da antena o circuito analógico.

Testes preliminares foram realizados em laboratório para a medição de correntes impulsivas. Um modelo em escala reduzida foi utilizado a fim de se obter a mesma amplitude do sinal esperado em casos de incidências reais. Tal modelo considera baixa

amplitude de corrente e distâncias envolvidas menores. Nos experimentos, a corrente foi gerada por descarga do gerador de impulso, o canal de descarga foi representado por um condutor vertical longo e o solo condutor perfeito por uma placa de alumínio.

A figura 8.7 mostra a onda de corrente medida diretamente no canal experimental e a correspondente onda obtida diretamente do sinal analógico do dispositivo. A distância de observação foi de 0,5 m, enquanto em casos reais são esperadas distâncias de 15 a 30 m.

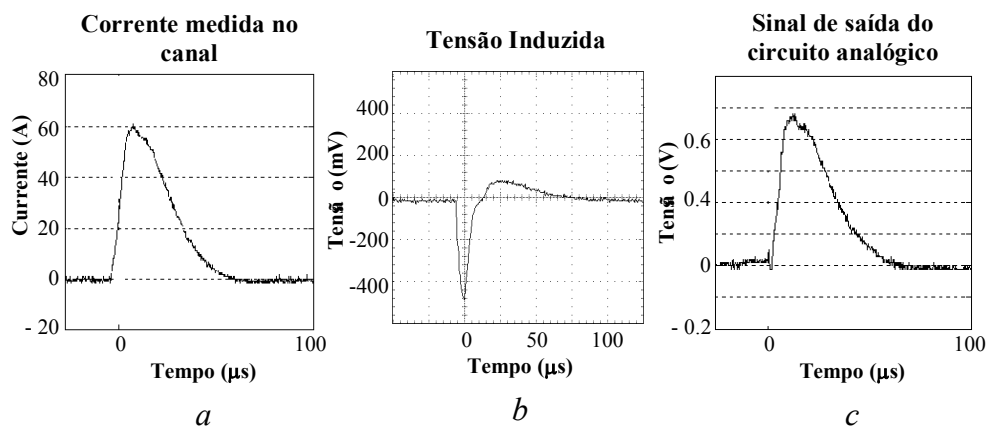


Fig. 8.7 (a) Onda de Corrente medida no canal experimental, (b) Tensão Induzida na *d*-antena; (c) Onda de corrente reconstituída. Figura obtida da referência [Silvino et al, 2003].

A onda apresenta um tempo de frente de aproximadamente  $5 \mu\text{s}$  (usualmente ela pode variar de  $0,5$  a  $10 \mu\text{s}$  em correntes de descargas atmosféricas reais). Os resultados obtidos indicam que informações de frente de onda, valor de pico e tempo de cauda podem ser extraídas do sinal reconstituído com precisão satisfatória para fins de comparação aos valores indicados pelo LLS.

- **Terceira etapa de testes** – Comparação dos resultados obtidos com o *dispositivo* na sua *versão atual* em aplicações em escala reduzida

Com base nas análises dos resultados de testes efetuados no equipamento, diversas implementações e melhorias foram sendo efetuadas, conferindo assim maior robustez ao funcionamento do equipamento. Antes de uma unidade ser instalada em campo, a mesma é submetida a uma rotina de testes de medição de correntes impulsivas, novamente em aplicações em escala reduzida, utilizando o Laboratório de Alta Tensão (LEAT).

Neste ciclo, são efetuados testes onde se observa a resposta do dispositivo para diferentes níveis de amplitude de correntes injetadas no canal e diferentes distâncias de observação.

A seguir é mostrado um exemplo de resultado do teste efetuado no equipamento. O esquema do circuito para a injeção de corrente impulsiva está apresentada na figura 8.8. A medição direta foi realizada através da queda de tensão sobre um shunt de valor 0,05 ohms.

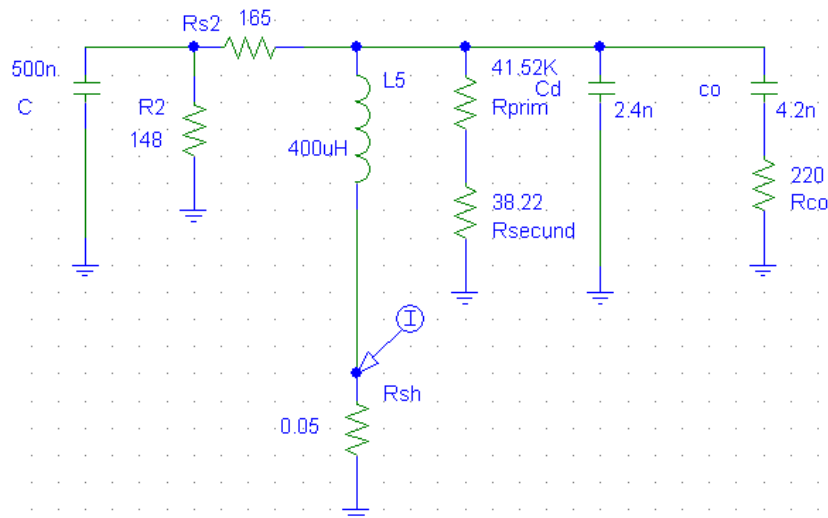


Fig. 8.8 Circuito utilizado para a injeção de corrente impulsiva. Medição realizada através de um resistor shunt de valor 0,05 ohms.

A figura 8.9 mostra a onda de corrente medida diretamente no canal de descarga e o sinal medido pelo dispositivo, que no caso específico estava posicionado a uma distância de 30 cm do canal experimental.

O sinal do dispositivo passou por um filtro não-causal de sexta ordem, com o objetivo de limpar a onda eliminando o excesso de oscilações presentes no sinal original. Este tipo de filtro considera os instantes anteriores e posteriores para a obtenção de um valor dado pela média simples ou pela média ponderada dos valores relativos aos instantes considerados, sem causar defasamento da onda. No caso específico de tratamento desse sinal, foram considerados seis instantes anteriores e posteriores (intervalo entre as amostras é de  $0,1 \mu\text{s}$ , totalizando  $1,2 \mu\text{s}$ ) e utilizou-se a média simples dos correspondentes valores de tensão.

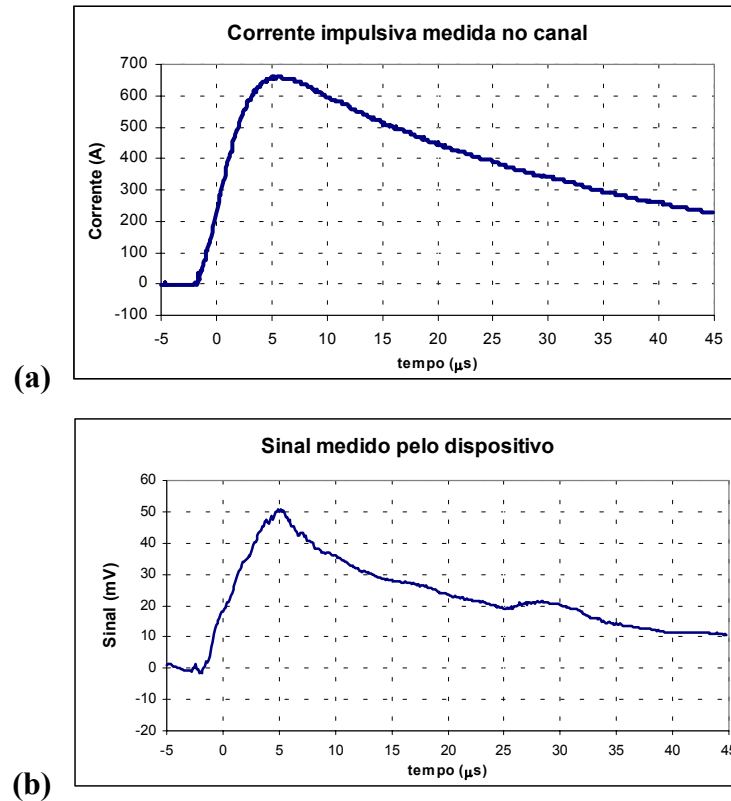


Fig. 8.9 (a) Onda de corrente medida no canal de descarga (condutor vertical), (b) Sinal medido pelo dispositivo.

É importante denotar que a utilização deste filtro não é aplicável em casos onde o tempo de frente da onda de corrente é pequeno, por exemplo,  $1,2 \mu\text{s}$ . No caso em análise, o intervalo de tempo compreendido entre o instante em que a onda inicia a sua subida e o instante de valor máximo é de  $7,5 \mu\text{s}$ .

- **Quarta etapa de testes** – Testes complementares para ajustes finos e verificação da operação do dispositivo.
  - 1) O *Ajuste de sensibilidade* da *q*-antena para identificar a aproximação de tempestade é realizado através da atuação em um potenciômetro específico do circuito analógico. O ajuste adequado foi verificado inclusive em campo quando, ao se visualizar tempestade nas proximidades do local de teste, observou-se o acionamento do equipamento, ficando assim preparado para registrar eventuais correntes incidentes no alvo monitorado.

- 2) *A verificação da sincronia do receptor GPS* é efetuada em campo aberto, local onde se espera que a recepção do sinal dos satélites não seja “blindada”. Neste teste são gerados campos magnéticos variantes no tempo na área da *d*-antena (por exemplo, gerado a partir da descarga de um capacitor). Em seguida, são verificados as datas e horários dos registros das correntes associadas. Em alguns casos, verificou-se diferença no tempo necessário para que o receptor entrasse em sincronia após o acionamento do equipamento. Porém, acredita-se que tais tempos sejam mais que suficiente para o correto registro da data e hora dos eventos que venham a ocorrer no objeto monitorado. Pode haver perda de registro nos eventuais casos em que a tempestade se forme diretamente no local e a incidência da primeira descarga ocorra diretamente sobre o objeto monitorado. Nesses casos, o circuito não estaria pronto para efetuar a medição.
  
- 3) O *ajuste da seletividade do ângulo* de direcionamento da *d*-antena para *validação* de sinais medidos é também realizado através da atuação em um potenciômetro específico do circuito analógico. O teste consiste em submeter o equipamento a uma seqüência de disparos, na qual se varia o ângulo  $\varphi$  e verifica-se iterativamente a validação ou não daquele sinal medido. É definida uma faixa aceitável para o ângulo  $\varphi$ , como, por exemplo,  $\varphi = 0^\circ \pm 10^\circ$ . Se o equipamento registrar sinais provenientes de direções cujo ângulo supera a faixa aceitável, são realizados ajustes no potenciômetro até que o sinal “indesejado” não seja mais registrado pelo equipamento. Em outras palavras, o equipamento está ajustado para somente registrar sinais provenientes da faixa de direção aceitável. Não é desejável restringir muito a faixa aceitável, pois em casos reais pode haver componentes horizontais do canal de descarga que podem contribuir para o aumento do sinal na *q*-antena. Assim, o sinal induzido na *d*-antena pode não ser validado e, conseqüentemente, não ser registrado. Ao mesmo tempo, a faixa deve ser tal que se possa assegurar a filtragem de eventos que não incidam no objeto monitorado.

Alguns comentários finais acerca do atual estágio de desenvolvimento do dispositivo se fazem necessários. Como foi verificado na figura 8.9, o valor de pico e o tempo de frente da onda de corrente registrada podem ser recuperados com boa precisão. Entretanto, a forma

de onda apresenta distorção superior às expectativas do projeto. Os trabalhos para aprimoramento do dispositivo encontram-se em curso para melhorar também o registro da onda.

### 8.3 *Constituição da Rede de Referência*

O protótipo do dispositivo esteve instalado próximo à torre instrumentada (mastro, canal monitorado) da Estação Morro do Cachimbo durante alguns períodos no decorrer do ano de 2002, figura 8.10. Durante essa etapa foram efetuados o monitoramento do seu funcionamento e eventuais ajustes e melhorias para sua adequada operação.



Fig. 8.10: (a) Foto do protótipo do dispositivo instalado próximo a torre da Estação Morro do Cachimbo. (b) Protótipo na sua segunda versão.

Em paralelo, adequações e melhorias do projeto de construção do dispositivo foram sendo implementadas e, através de testes laboratoriais, a robustez do equipamento foi sendo verificada. A figura 8.11 mostra o dispositivo no seu atual estágio de desenvolvimento.

Outras unidades do dispositivo foram confeccionadas para a implantação da Rede Inicial de Referência.





Fig. 8.11: (a) Versão atual do dispositivo (b) Foto do dispositivo instalado próximo a torre da Estação Morro do Cachimbo

### 8.3.1 *Estudo de Escolha dos Locais para Instalação dos Dispositivos*

O dispositivo de medição indireta da onda de corrente de descarga foi projetado para ser instalado próximo a torres de telecomunicações da CEMIG. Tais torres geralmente encontram-se no topo de montanhas ou em extensas áreas planas, constituindo-se assim pontos mais propensos à incidência de descargas.

Inicialmente, foram elaborados **critérios** que permitissem uma “pré-seleção” das torres mais adequadas entre as quase 900 estações de telecomunicações de propriedade da CEMIG, distribuídas por todo o território do Estado de Minas Gerais.

Objetivando a escolha de “*sites*” que em princípio apresentariam maior incidência de descargas, optou-se por agrupar as torres de telecomunicações que obedecessem aos seguintes critérios de altura e altitude:

1. Torres com altura superior a 60m (25 torres);
2. Torres instaladas em altitude superior a 1200m (40 torres);
3. Torres com altura compreendida entre 40 e 60m (40 torres).

O cruzamento das informações acima e uma análise da distribuição espacial das torres que apresentassem tais características permitiu uma pré-seleção de 29 torres (figura

8.12). Nesta pré-seleção procurou-se enfatizar a região centro-sul do Estado, região de maior densidade de descargas atmosféricas. Posteriormente, as 29 estações foram analisadas detalhadamente nos aspectos de relevo e incidência de descargas atmosféricas. Tais análises são descritas a seguir.

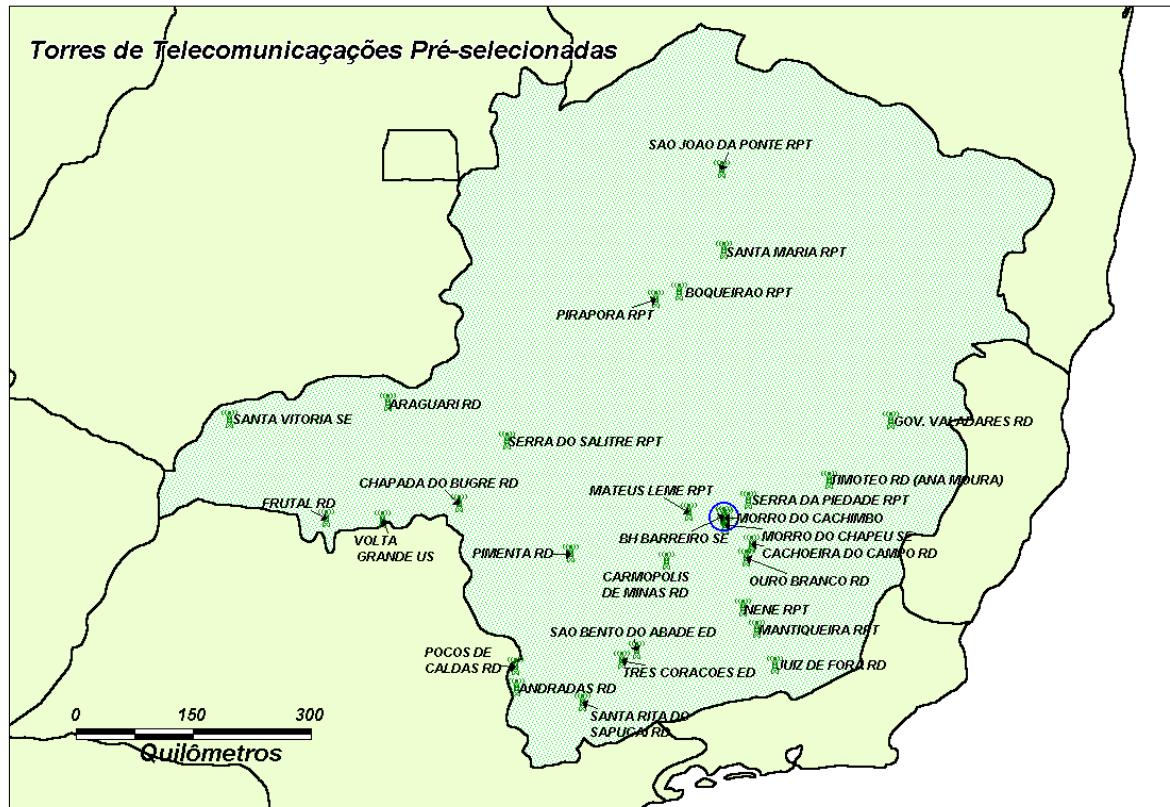
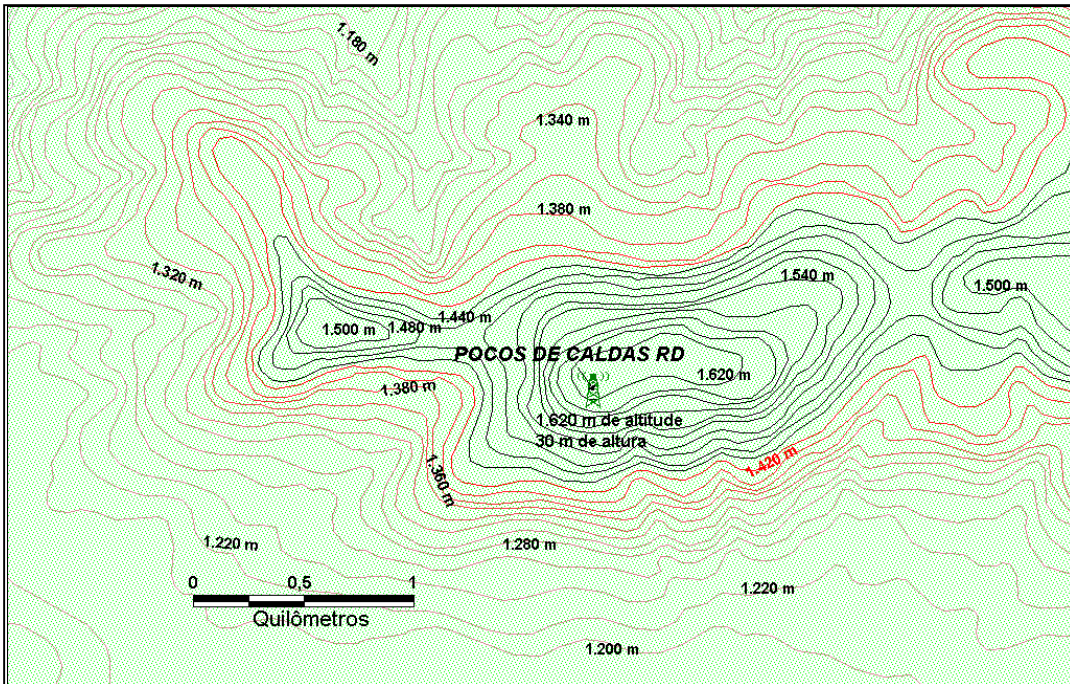


Fig 8.12 –Torres de telecomunicações da CEMIG pré-selecionadas pelos critérios de altura e altitude. Em destaque, a Estação Morro do Cachimbo, site inicial da instalação do dispositivo.

Após a realização da pré-seleção das torres, foi efetuada análise criteriosa do **relevo** da região onde se situa a torre de telecomunicação em questão, utilizando-se *softwares* de geoprocessamento e cartas topográficas do Estado de Minas Gerais. Um exemplo de tal análise pode ser verificado na figura 8.13, considerando-se a torre de telecomunicações Poços de Caldas RD.

a)



A Estação Poços de Caldas RD está situada no topo de uma montanha de 1620 m de altitude, que se constitui na parte mais alta da região. Não existe região com altitude superior a 1620 m dentro do raio de 10 km da torre.

b)

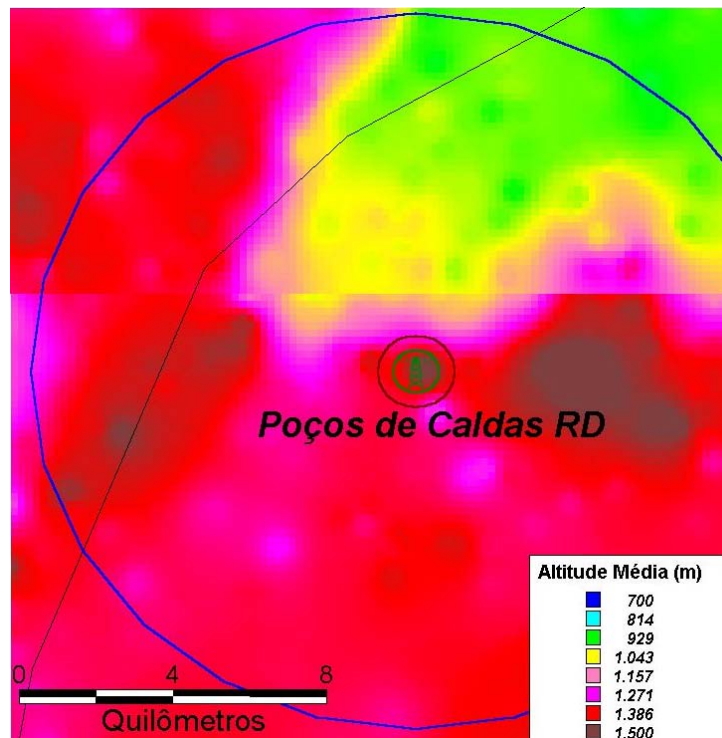


Fig 8.13 (a) Exemplo de análise de relevo realizada em todas as torres pré-selecionadas e opcionais, utilizando-se softwares de geoprocessamento e cartas topográficas fornecidas pela CEMIG.

(b) Exemplo da análise de relevo circunvizinho. Altitude média no raio de 10 km da torre. Figura elaborada com a finalidade de melhor ilustrar o relevo da região.

Durante a análise de relevo, foram selecionadas novas torres de telecomunicações que não foram filtradas pelos critérios iniciais de seleção de altura e altitude, mas que poderiam apresentar alto índice de incidência de descargas, devido ao seu posicionamento topográfico (situadas em topos de montanha ou em extensa região plana). A figura 8.14 apresenta as 25 novas torres selecionadas, que foram denominadas “torres opcionais”. Desta forma, totalizaram-se 54 torres de telecomunicações para posterior análise de incidência de descargas atmosféricas.

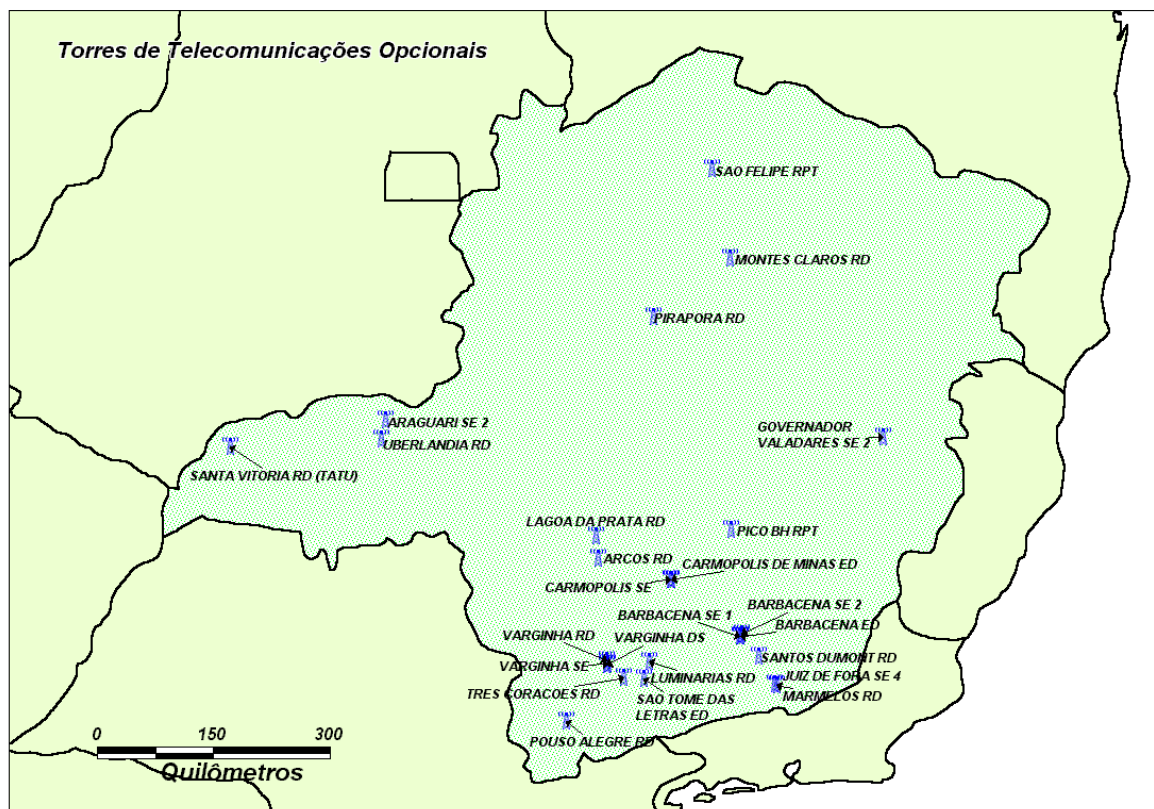


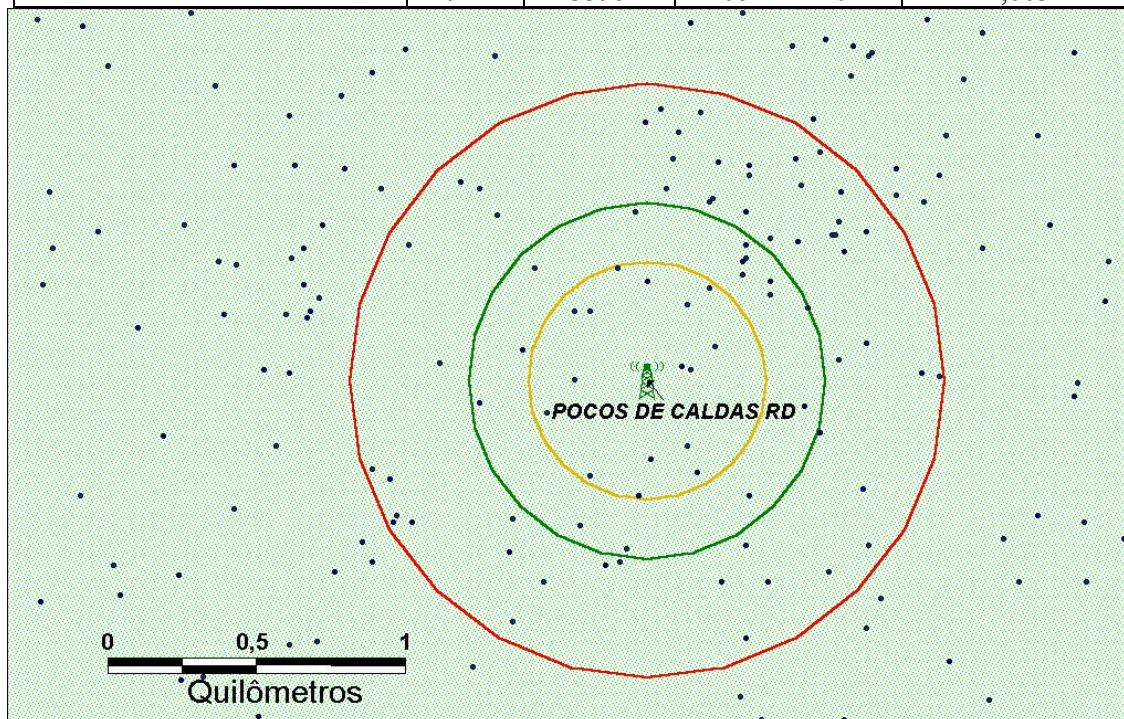
Fig 8.14 –Torres de telecomunicações da CEMIG selecionadas pela análise do relevo.

A **análise de incidência** foi efetuada utilizando-se um banco de dados de *strokes*<sup>4</sup> de quatro anos (1999-2002), considerando-se áreas distintas: raios de 400 m, 600 m, 1 km e 10 km em torno da torre. Foram calculados os índices de densidade (*strokes*/km<sup>2</sup>/ano) em cada micro-região e os mesmos foram comparados aos índices de densidades da “macro-região”

<sup>4</sup> Banco de dados de *strokes* foi obtido a partir do reprocessamento de dados na central do LLS-MG (CEMIG). A configuração de reprocessamento adotada foi 16 estações detectoras participantes das soluções de descargas. Maiores detalhes acerca da configuração adotada podem ser encontrados na referência [Dias, 2002]

(arco 1-10km). Como exemplo de análise de incidência, a figura 8.15 mostra a análise realizada para a estação Poços de Caldas RD.

Estação Poços de Caldas RD	Raio	Incidência	Área	Densidade ( <i>strokes</i> /km <sup>2</sup> /ano)
Período de dados – 4 anos 1999-2002	400m	16	Raio 400m	7,958
	600m	31	Raio 600m	6,853
	1 km	82	Arco 600m-1km	6,341
	10 km	3395	Arco 1km-10km	2,663



A incidência de descargas se concentra próxima à torre (área delimitada pelo raio de 400 m). Observa-se certa concentração dos *strokes* a nordeste da estação – principalmente na área delimitada pelo raio de 1 km.

A estação Poços de Caldas RD situa-se numa região de densidade de descargas - 2,6 *strokes*/km<sup>2</sup>/ano (caracterizada pela densidade no arco 1-10 km referente ao período de 4 anos). Pode-se observar que nas regiões próximas à torre (raios de 400 m e 1000 m) a densidade de descargas é bem superior ( $\approx 3$  e 2,5 vezes) ao nível de densidade no arco 1-10km, indicando a influência do relevo na incidência.

Fig 8.15 –Exemplo de análise de incidência realizada em todas as torres pré-selecionadas e opcionais, utilizando-se softwares de geoprocessamento e banco de dados de *strokes* de quatro anos.

A partir da análise das densidades e das características dos relevos locais das 54 torres, 18 estações foram selecionadas (11 pré-selecionadas e 7 opcionais) como candidatas para compor os locais de instalação dos registradores no Estado. Tal seleção foi realizada priorizando aquelas que apresentam maiores níveis de densidade e condições favoráveis de relevo. A tabela 8.2 apresenta os resultados obtidos para 4 das 18 estações escolhidas.

Tab. 8.2 – Resultados da análise de incidência e relevo de 4 torres de telecomunicações analisadas.

ID	Nome da Torre de Telecomunicações	Densidade Local (Strokes/km <sup>2</sup> /Ano)				Razão 600m / 1-10km	Altura e altitude da Torre  <u>Altitude média no Raio 10km</u>	Terreno mais alto próximo? (R= 1 km)		Observações
		Raio 400m	Raio 600m	Arco 600m-1km	Arco 1km-10km			Sim	Não	
19	Juiz de Fora RD	14,921	10,389	8,331	8,554	1,215	(40m; 917m) <u>813m</u>		X	Alta concentração de descargas no raio de 400m. Relevo local é bastante acidentado. Situada em um dos picos da região.
24	Mateus Leme RPT	4,974	3,537	2,611	2,651	1,334	(60m; 1260m) <u>920m</u>		X	Região de baixa densidade de <i>strokes</i> . Situa-se num pico de uma região bastante acidentada.
34	Poços de Caldas RD	7,958	6,853	6,341	2,663	2,573	(30m; 1620m) <u>1254m</u>		X	Situa-se no topo de uma montanha.
47	Timóteo RD (Ana Moura)	7,958	8,179	5,347	4,525	1,807	(50m; 920m) <u>600m</u>		X	O ponto mais alto encontra-se a 6 km da estação (altitude 950m)

**Nota:** Informações mais detalhadas do relevo local das estações encontram-se em relatórios internos do LRC.

As 18 torres selecionadas são insuficientes para compor uma rede completa que venha a cobrir razoavelmente bem todas as regiões do Estado. Por exemplo, as regiões leste, noroeste e sudoeste do Estado ficariam “descobertas”. Uma nova análise de densidade de *strokes* para escolha de *sites* nestas regiões foi realizada em novas 30 estações, denominadas “torres complementares” (figura 8.16).

Destas 30 estações, buscou-se selecionar aquelas que apresentam uma concentração maior de descargas nos menores raios (400 e 600m) e, principalmente, uma disposição geográfica estratégica a fim de compor uma rede de registradores com boa cobertura do Estado. Destas estações, 15 foram selecionadas por apresentaram melhores resultados e nelas foram realizadas cuidadosas avaliações do relevo. A tabela 8.3 apresenta resultados de 3 torres.

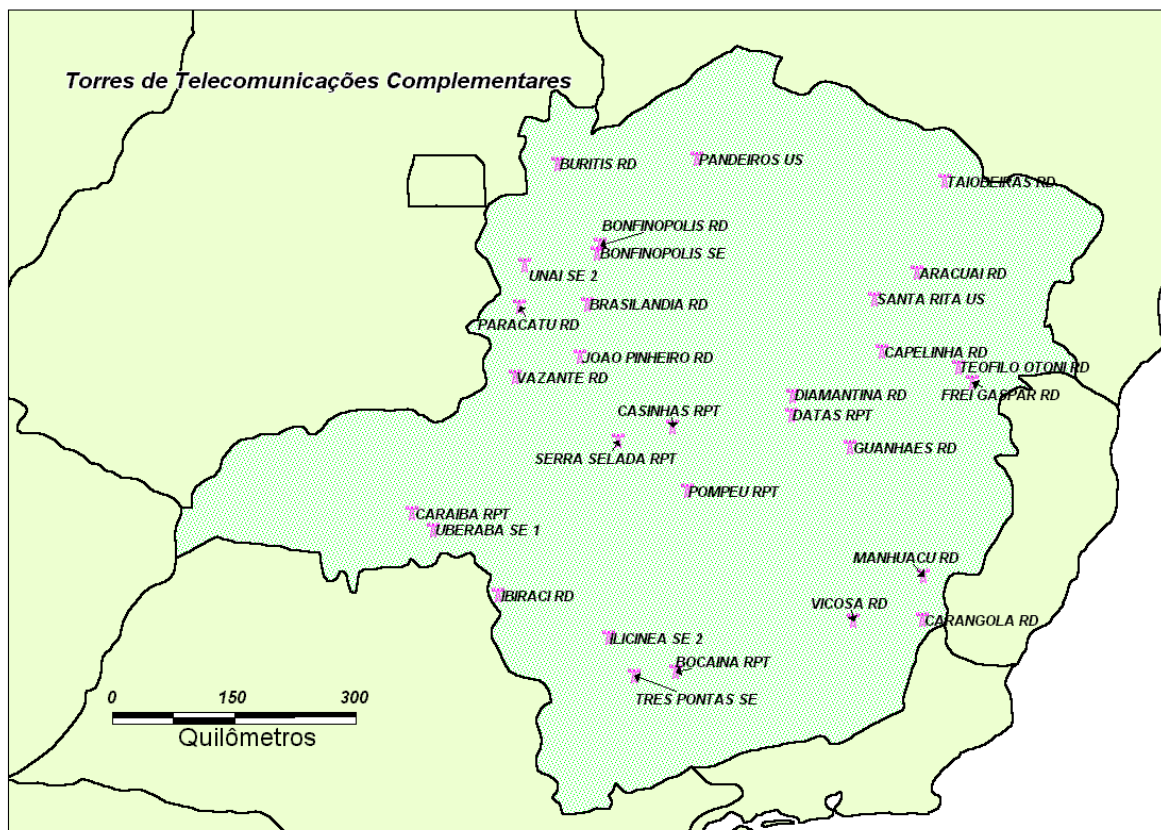


Fig. 8.16 – Torres de Telecomunicações da CEMIG complementares. Estas foram selecionadas a fim de cobrir melhor as regiões leste, noroeste e sudoeste do Estado. Tais regiões não são cobertas pelas 18 torres selecionadas na etapa anterior.

Tab. 8.3 – Resultados da análise de incidência e relevo de 3 torres de telecomunicações complementares.

	Nome da Torre de Telecomunicações	Densidade Local (Strokes/km <sup>2</sup> /Ano)				Razão de densidade 600m / 1-10km	Altura e altitude da Torre  Altitude média no Raio 10km	Observações
		Raio 400m	Raio 600m	Arco 600m-1km	Arco 1km-10km			
2	Bocaina RPT	10,942	7,958	4,228	4,085	1,948	(80m,1260m) <u>993m</u>	Situa-se em um dos picos da elevação de maior destaque da região.
12	Diamantina RD	1,989	2,874	1,741	1,443	1,992	(25m, 1450m) <u>1270m</u>	Situa-se numa elevação de maior altitude na região.
27	Uberaba SE1	6,466	5,968	4,725	5,273	1,132	(80m, 807m) <u>790m</u>	Situa-se num platô, região mais alta no raio de 6 km

**Nota:** Informações mais detalhadas do relevo local das estações encontram-se em relatórios internos do LRC.

A figura 8.17 indica a seleção inicial de 33 estações: 18 estações selecionadas a partir da análise de incidência, relevo e disposição geográfica e mais as 15 torres selecionadas na última avaliação descrita anteriormente, que considera principalmente o aspecto de disposição geográfica a fim de compor a rede de registradores no Estado.



Fig. 8.17 – Seleção de Torres de Telecomunicações candidatas a composição da rede para calibração do LLS-MG.

### 8.3.2 Seleção Inicial dos Locais de Instalação dos Registradores

Inicialmente, a tendência foi a escolha das torres que obtiveram maiores índices de densidade de *strokes* como os primeiros locais para instalação do dispositivo. Posteriormente, buscou-se uma boa distribuição dos locais de referência pelo território de Minas Gerais, objetivando a formação de uma “rede” de medição. A constituição da rede visa a obtenção de registros de descargas, considerando as particularidades do relevo de cada região. Diferentemente da etapa de seleção inicial, esta foi realizada considerando inclusive estações situadas em regiões de baixa densidade de descargas.



A escolha inicial foi realizada em conjunto com as equipes de projeto e manutenção das estações de telecomunicações da CEMIG. Tais equipes disponibilizaram informações a respeito de facilidades de acesso e da garantia de que as estações a serem escolhidas não fossem desativadas dentro do período necessário para a coleta de dados de referência para a calibração do LLS-MG. Foram apontadas também, pela equipe de manutenção, mais algumas opções de torres candidatas à composição da Rede de Referência, em função da experiência relativa à incidência de descargas atmosféricas.

Dentro do universo de torres analisadas para a escolha dos *Sites de Referência*, foram definidos seis locais, além da Estação Morro do Cachimbo, para a constituição da Rede em sua primeira etapa de operação, figura 8.18.



Fig. 8.18 – Rede de Referência para calibração do LLS-MG em sua 1ª etapa de operação.

### 8.3.3 Caracterização dos Locais Escolhidos

- **Incidência de Descargas Atmosféricas**

Uma base de dados de *strokes* (uniforme) referente a um período de 7 anos (1999 a 2005) do LLS-MG foi utilizada para caracterizar a incidência de descargas atmosféricas nos locais escolhidos. A tabela 8.4 mostra o número de incidências considerando raios de 2km e 600m em torno das torres, bem como o número de registros (que ocorreram no raio de 2km da torre) cujas elipses de erro interceptam a torre.

Tab. 8.4 – Incidência de *Strokes* nos locais de referência no período 1999 a 2005.

Anos	Morro do Cachimbo			Ouro Branco			Juiz de Fora			Bocaina			Poços de Caldas			Araxá			Serra do Salitre		
	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.	Incidência 2km	Incidência 600m	Elipses Coinc.
1999	78	8	7	30	3	3	72	13	13	56	11	2	35	5	2	40	1	4	29	2	2
2000	105	9	9	73	5	3	45	5	4	26	3	2	111	14	11	25	3	2	41	8	5
2001	74	5	4	113	19	16	134	18	18	64	5	3	54	8	6	70	10	8	90	6	8
2002	134	13	12	280	28	21	162	11	10	109	13	6	42	4	4	79	8	7	40	5	4
2003	38	3	0	77	6	8	103	7	6	10	2	1	30	4	3	22	3	1	30	4	3
2004	85	6	4	66	2	4	91	3	5	19	0	2	31	7	9	10	0	0	30	0	0
2005	110	9	5	68	7	8	93	5	15	31	4	3	24	3	0	32	3	3	19	0	0
<b>Total em 7 anos</b>	<b>624</b>	<b>53</b>	<b>41</b>	<b>707</b>	<b>70</b>	<b>63</b>	<b>700</b>	<b>62</b>	<b>71</b>	<b>315</b>	<b>38</b>	<b>19</b>	<b>327</b>	<b>45</b>	<b>35</b>	<b>278</b>	<b>28</b>	<b>25</b>	<b>279</b>	<b>25</b>	<b>22</b>
<b>elipses/ano</b>			<b>5,86</b>			<b>9,00</b>			<b>10,14</b>			<b>2,71</b>			<b>5,00</b>			<b>3,57</b>			<b>3,14</b>
<b>Densidade (st/km<sup>2</sup>/ano)</b>		<b>6,69</b>			<b>8,84</b>			<b>7,83</b>			<b>4,80</b>			<b>5,68</b>			<b>3,54</b>			<b>3,16</b>	

É possível observar uma variação significativa de incidência ao longo dos anos nos locais analisados. Nos últimos três anos do período considerado o número de registros foi relativamente baixo em relação à estatística dos anos anteriores. Com relação ao número de registros em Minas de Gerais<sup>5</sup> verifica-se comportamento similar [Dias, 2006].

<sup>5</sup> Número aproximado de *strokes* em MG: 1999 (1 milhão); 2000 (0,98 milhões); 2001 (1,3 milhões); 2002 (1,4 milhões); 2003 (0,8 milhões); 2004 (1 milhão); 2005 (0,9 milhões).

A distribuição mensal de *strokes* ao longo dos meses é indicada para cada um dos locais de referência na figura 8.19.

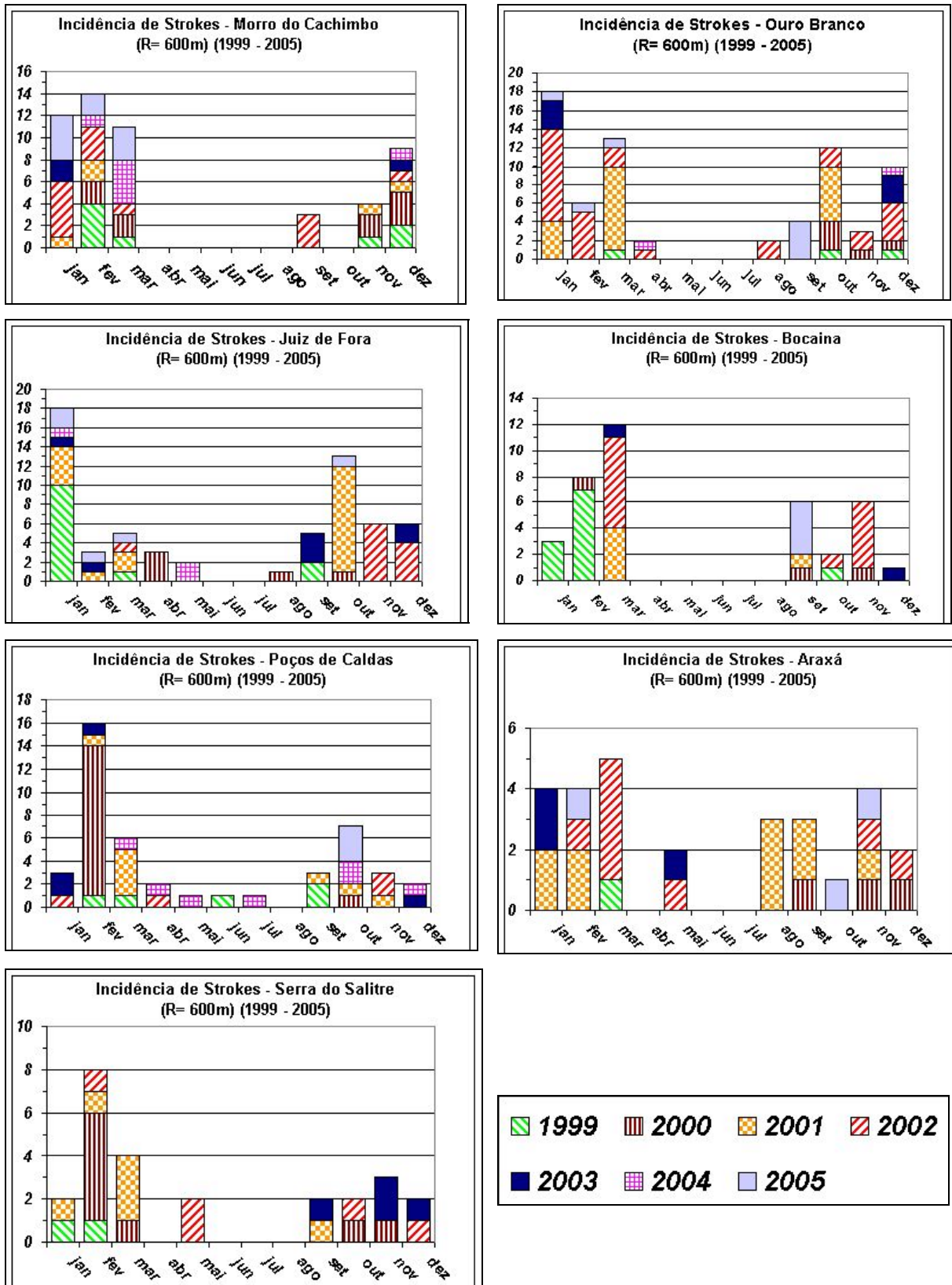


Fig. 8.19 – Incidência de *strokes* ao longo dos meses no período de 1999 a 2005.

### • Caracterização do Relevo Local

O relevo local foi caracterizado utilizando informações de altitudes obtidas através do Modelo de Elevação Digital (SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*). Com a utilização do software de geoprocessamento *MapInfo* foram confeccionados mapas temáticos com os valores médios de altitude<sup>6</sup>. Para descrição mais detalhada do relevo local, recorreu-se também às curvas de nível fornecidas pela CEMIG.

A tabela 8.5 descreve as principais características do relevo de cada um dos locais de referência. Em todos os casos observa-se que a diferença de altitude da torre em relação à circunvizinhança supera 214 m, exceto a estação Juiz de Fora RD que está situada em um relevo bastante acidentado e a diferença é cerca de 100 m.

Tab. 8.5 – Descrição do relevo local da Rede de Referência.

Local de Referência	Altitude (altura torre)	Altitude Média (R=10km)	Distância do terreno próximo mais alto	Descrição do Relevo Local
Morro do Cachimbo	1430m (60m)	1094m	Aproximadamente 3,7km a sudoeste da estação (1520m)	A estação está situada no topo de um morro, cuja altitude é bastante elevada em relação à região circunvizinha. Existe a presença de outro pico com altitude similar dentro do raio de 1km.
Ouro Branco RD	1557m (20m)	1173m	Não existem pontos mais elevados no raio de 10km.	Situa-se no topo de um morro de inclinação bastante acentuada.
Juiz de Fora RD	917m (40m)	813m	Aproximadamente 600m a sudoeste da estação (960m).	Relevo local bastante acidentado. A estação situa em um dos picos da região.
Bocaina RPT	1260m (80m)	993m	Não existem pontos mais elevados no raio de 10km.	A estação encontra-se em um dos picos de uma elevação de maior destaque na região. Os demais picos apresentam altitudes similares.
Poços de Caldas RD	1620m (80m)*	1254m	Não existem pontos mais elevados no raio de 10km.	Situa-se no topo de um morro que se constitui na parte mais alta da região.
Araxá RD	1350m (40m)	1110m	Aproximadamente 3km a leste da estação (1375m).	A estação Araxá está situada em um dos topos de uma elevação de maior destaque na região.
Serra do Salitre RPT	1254m (50m)	1040m	Não existem pontos mais elevados no raio de 10km.	Situa-se em um platô, que se constitui o ponto mais alto da região circunvizinha. Somente a 1,6km a norte da estação encontra-se uma elevação de igual altitude.

\* A altura da torre da CEMIG é 30 m, porém o registrador foi orientado para a torre vizinha, cuja altura é 80 m.

<sup>6</sup> Mapas temáticos similares aos da figura 8.13 de todos os locais de referência encontram-se em relatórios internos do LRC.

- **Caminhos de Propagação dos Campos Eletromagnéticos**

Como as soluções das descargas atmosféricas são obtidas a partir dos sinais de campos que se propagam por longas distâncias (ordem de centenas de km) até alcançarem as estações remotas do LLS, tornou-se relevante a obtenção dos dados de altitude referentes à região de cobertura da RINDAT.

A figura 8.20 mostra o mapa de relevo, onde estão indicados os locais da Rede de Referência, bem como as estações detectoras da RINDAT. Através dessa figura, é possível verificar a variação do relevo nos diferentes caminhos de propagação, principalmente em Minas Gerais.

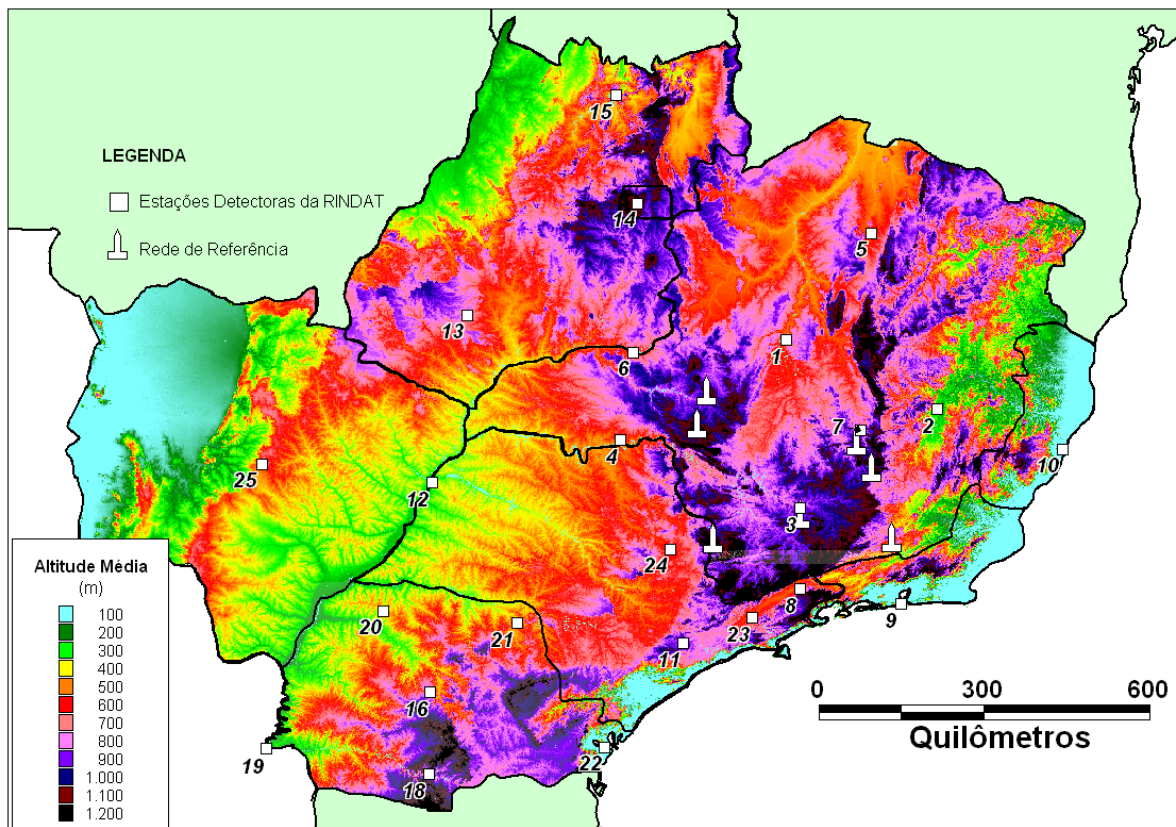


Fig. 8.20 – Mapa de Relevo na região de cobertura da RINDAT, confeccionado a partir de dados de altitudes SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

## 8.4 Implantação da Rede de Referência

A implantação da rede foi iniciada em novembro de 2005 e finalizada no início de janeiro de 2006. Neste processo, aqueles locais com maiores níveis de densidade de descargas foram priorizados. A figura 8.21 mostra a instalação do dispositivo em seis locais.

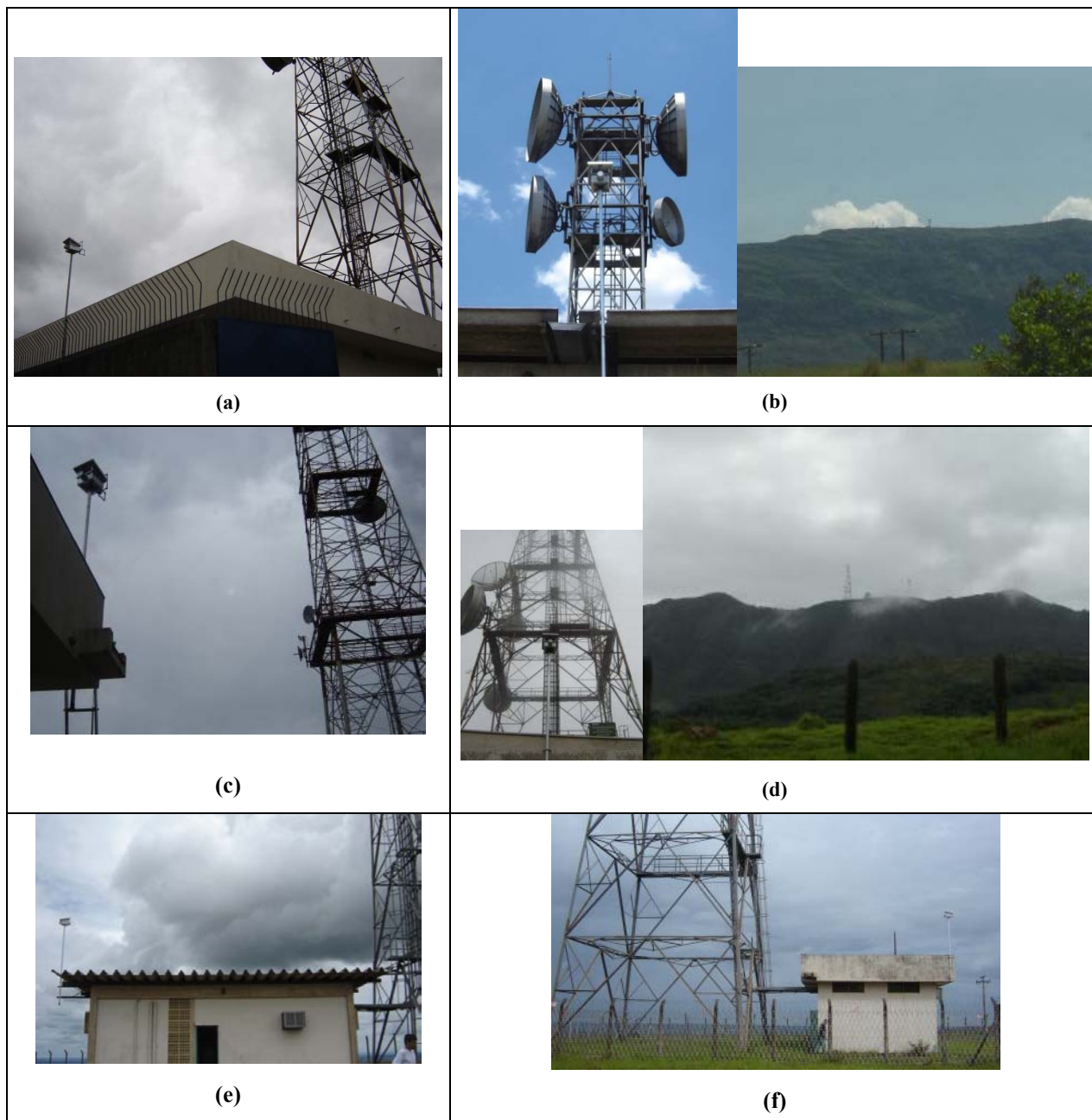


Fig. 8.21 – Instalação do dispositivo de medição indireta de corrente de descarga atmosférica: (a) Estação Juiz de Fora RD – 09 nov 2005. (b) Estação Ouro Branco RD - 03 nov 2005. (c) Estação Poços de Caldas RD – 19 dez 2005. (d) Estação Bocaina RPT – 30 nov 2005. (e) Estação Araxá RD – 04 jan 2006. (f) Estação Serra do Salitre RPT – 03 jan 2006.

Durante a instalação dos equipamentos, as coordenadas exatas de cada torre foram verificadas através da utilização de aparelho GPS. Este dado é fundamental na constituição dos registros de referência.

Após a instalação dos seis medidores, iniciou-se a etapa de coleta de dados em campo. Durante esta etapa, foi realizado o monitoramento de “tempestades” (registros de *strokes* pelo LLS-MG) ocorridas na região de cada um dos *sites* desde a data das respectivas instalações. Desta forma, foi possível otimizar a coleta de dados em campo, minimizando assim esforços desnecessários de locomoção.

Durante o monitoramento do funcionamento da rede, foram sendo visualizados problemas operacionais do equipamento, os quais não puderam ser identificados durante a etapa de realização dos testes laboratoriais. Acredita-se que alguns dos problemas tenham ocorrido durante atividade elétrica muito intensa no local de referência. Em campo, também se visualizou a necessidade de reavaliar a condição de sensibilidade do equipamento em detectar tempestades próximas a fim de garantir sua energização para registro de eventos incidentes nas torres.

À medida que os problemas foram sendo detectados, medidas corretivas e ajustes foram sendo efetuados, quando possível em campo se não nos laboratórios do Centro de Pesquisa. Foi necessária a existência de tempestades no seu local de instalação para o adequado monitoramento das condições de operação dos equipamentos, os quais apresentaram algum problema em campo e tiveram que passar por reparos e ajustes. O tempo disponível para manutenção e substituição dos equipamentos em campo foi se tornando cada vez mais escasso, enquanto a temporada de chuvas se esvaía.

Desde o final do período de chuvas investigam-se meios para conferir maior robustez no funcionamento do equipamento e mudanças de estratégias como, por exemplo, priorizar o monitoramento daqueles equipamentos que se encontram em locais de mais rápido acesso. Coincidentemente, estes locais são os que apresentam maiores índices de densidade de descargas.

---

Os ajustes e reparos dos equipamentos foram implementados, bem como a troca ou a reinstalação dos mesmos em campo, ficando a rede preparada para a nova temporada de chuvas.

## ***8.5 Análises Preliminares para a Implementação da Metodologia para Calibração do LLS-MG***

Para a realização da calibração do LLS-MG é necessária a obtenção de referências que correspondem a eventos reais ocorridos nos locais monitorados. O número dessas referências deve ser significativo para que seja possível o adequado processo de identificação da faixa de erro nas indicações do LLS-MG.

Durante esta primeira etapa de operação da Rede, ainda não foi possível a obtenção de dados de referência. Sendo assim, este tópico foi elaborado a fim de apresentar algumas análises alternativas para identificar elementos que possam contribuir, no futuro, para a implementação e aprimoramento da metodologia proposta para calibração.

Estas análises são realizadas considerando a própria base de dados do LLS-MG, principalmente os *relatos individuais dos sensores* participantes da solução da descarga atmosférica. Através destas análises, visualiza-se a possibilidade de se verificar o comportamento do sinal eletromagnético gerado pela descarga atmosférica nos diferentes caminhos de propagação (local do evento até as estações detectoras da rede).

A referência [Mesquita et al, 2005] mostra resultados desse tipo de análise obtidos para três locais, sendo dois deles “integrantes” da Rede de Referência. Foram analisados o atraso nos tempos de propagação do sinal eletromagnético e a atenuação da intensidade do sinal em função da distância. Na análise, foram consideradas amostras de *strokes* ocorridos durante uma temporada de chuva num raio de 2 km de cada uma das torres.

---



### 8.5.1 Atrasos de Propagação do Sinal Eletromagnético

Nesta análise são considerados os instantes de chegada do sinal eletromagnético em cada uma das estações detectoras participantes da solução dos *strokes*. A localização e o instante do *stroke* foram assumidos como aqueles fornecidos pela solução ótima do LLS. Esta suposição se deve à ausência de referência real do ponto de incidência.

Com o intuito de se avaliar a possível influência do relevo nos atrasos de propagação dos campos, utilizou-se o acréscimo dos caminhos de propagação devido à oscilação do perfil de relevo. O acréscimo foi calculado utilizando dados de altitude SRTM ao longo dos percursos que partem dos locais de referência até as estações detectoras do LLS.

O atraso da propagação  $AP_i$ , que na realidade constitui a diferença entre o tempo de propagação e o tempo de propagação na velocidade da luz, é calculado através da equação 8.6:

$$AP_i = (TS_i - T_{stroke}) - \left( \frac{\text{Distância}_{stroke\_Sensor\ i}}{c} \right) \quad \text{Eq. 8.6}$$

O primeiro termo corresponde ao intervalo de tempo despendido para o sinal eletromagnético propagar do ponto de incidência até cada uma das estações detectoras que tenham captado o sinal.  $TS_i$  é o instante reportado pela estação  $i$  e  $T_{stroke}$  corresponde ao instante ótimo de ocorrência da descarga indicado pelo LLS. O segundo termo corresponde ao intervalo de tempo teórico, que é calculado assumindo a velocidade de propagação do campo igual à velocidade da luz e a distância em linha reta entre o ponto ótimo de localização do *stroke* e a estação detectora  $i$ .

Como exemplo da análise, é apresentado neste texto o resultado para apenas um dos locais de referência (Morro do Cachimbo). A figura 8.21 mostra os percursos dos sinais de campos provenientes de descargas atmosféricas ocorridas na região considerada até aquelas estações que usualmente participam das soluções dos *strokes*. A distância máxima permitida

considerada nesta análise foi 625 km (valor padrão indicado pelo fabricante para a solução da descarga).

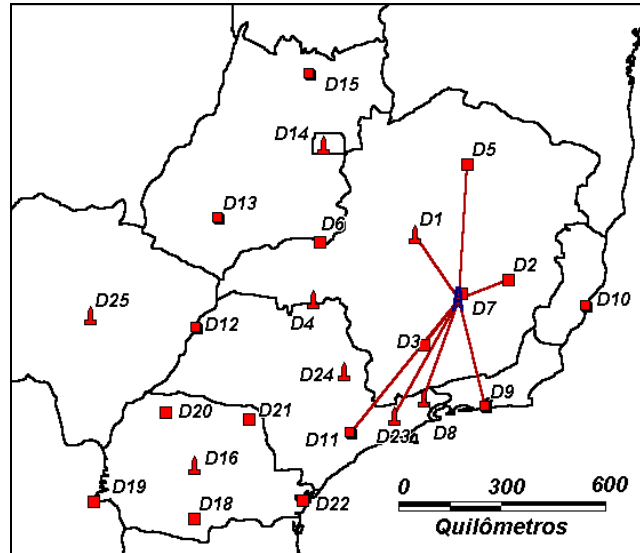


Fig. 8.22 – Caminhos de propagação dos sinais de campos originados a partir de *strokes* incidentes dentro do raio de 2 km do local de referência Morro do Cachimbo.

Para cada *stroke*, observam-se tanto valores positivos quanto valores negativos para os atrasos  $AP_i$ . Esse comportamento é esperado devido ao próprio processo de otimização para o cálculo do ponto de incidência, o qual é obtido através da minimização dos desvios de tempo e ângulo das indicações dos sensores. Nesta análise, adiciona-se o maior valor médio negativo de atraso encontrado aos demais valores médios de atraso de propagação relativos a cada uma das estações, para evitar atrasos negativos. No caso específico do local analisado, o maior valor negativo foi  $-2,761\mu\text{s}$ , referente à estação D5. A tabela 8.6 mostra os resultados encontrados para os atrasos de propagação, as distâncias entre o local de referência e as estações detectoras e os correspondentes acréscimos dos caminhos devido ao relevo (em km e em percentual).

O resultado também é apresentado em forma gráfica através de uma regressão linear, figura 8.23. Apesar da dispersão ser significativa, algumas tendências puderam ser observadas como, por exemplo: quanto maiores os acréscimos do caminho devido ao relevo, maiores são os atrasos observados. A figura 8.24 mostra o perfil do relevo para os casos extremos. A estação que apresentou maior atraso, D2, apresenta o maior valor do acréscimo

do caminho em percentual, enquanto que a estação com menor atraso, D5, apresenta um dos menores valores de acréscimo observados.

Tab. 8.6 – Atrasos de propagação dos campos referentes a amostra em análise e os acréscimos dos caminhos devido ao relevo.

Tamanho da amostra	Estação Detectora *	Distância (km)	Acréscimo do caminho (km)	Acréscimo do caminho (%)	Atraso de propagação ( $\mu$ s)**
31 strokes	D10 (3)	385,84	7,97	2,07%	----
	D2 (26)	163,05	3,35	2,05%	5,277
	D9 (27)	337,20	5,55	1,65%	2,258
	D8 (8)	315,34	4,02	1,28%	1,312
	D23 (9)	405,53	4,29	1,06%	2,443
	<del>D7 (3)</del>	<del>19,53</del>	<del>0,16</del>	<del>0,82%</del>	<del>----</del>
	D11 (16)	517,93	4,22	0,81%	2,300
	D3 (26)	173,81	1,17	0,67%	1,513
	<del>D24 (6)</del>	<del>411,32</del>	<del>2,69</del>	<del>0,65%</del>	<del>----</del>
	D5 (25)	411,90	2,04	0,50%	0,000
	<del>D4 (2)</del>	<del>442,91</del>	<del>2,09</del>	<del>0,47%</del>	<del>----</del>
	<del>D6 (4)</del>	<del>456,40</del>	<del>1,97</del>	<del>0,43%</del>	<del>----</del>
	D1 (24)	239,24	0,64	0,27%	0,874

Notas:

\* O número entre parênteses corresponde ao número de strokes cuja estação tenha participado da solução.

\*\* O atraso de propagação foi adicionado pelo maior valor negativo obtido (valor de referência foi  $AP_5 = -2,761 \mu$ s).

As estações tachadas apresentaram uma participação inferior a 20% da amostra de strokes, não sendo consideradas na análise.

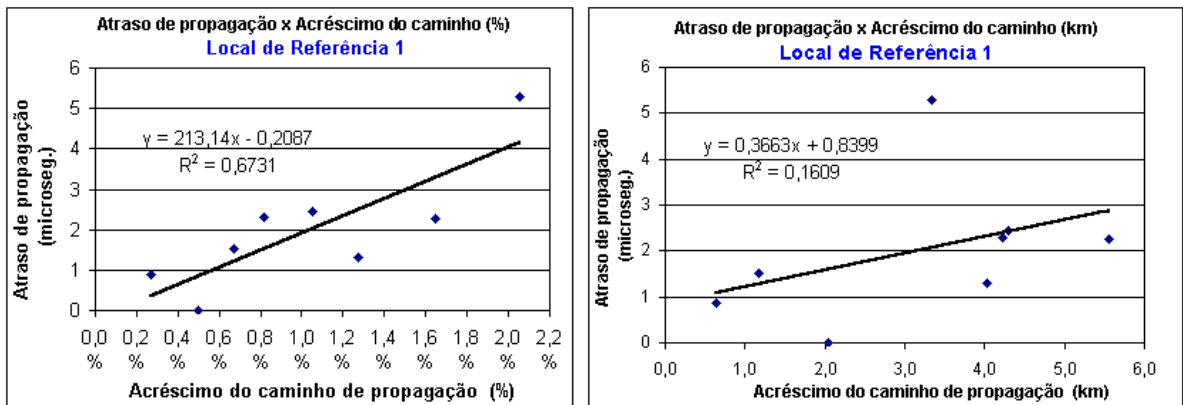


Fig. 8.23 – Relação entre os atrasos de propagação e os acréscimos do caminho devido ao relevo em % e em km. Os coeficientes de correlação foram respectivamente 0,83 e 0,4.

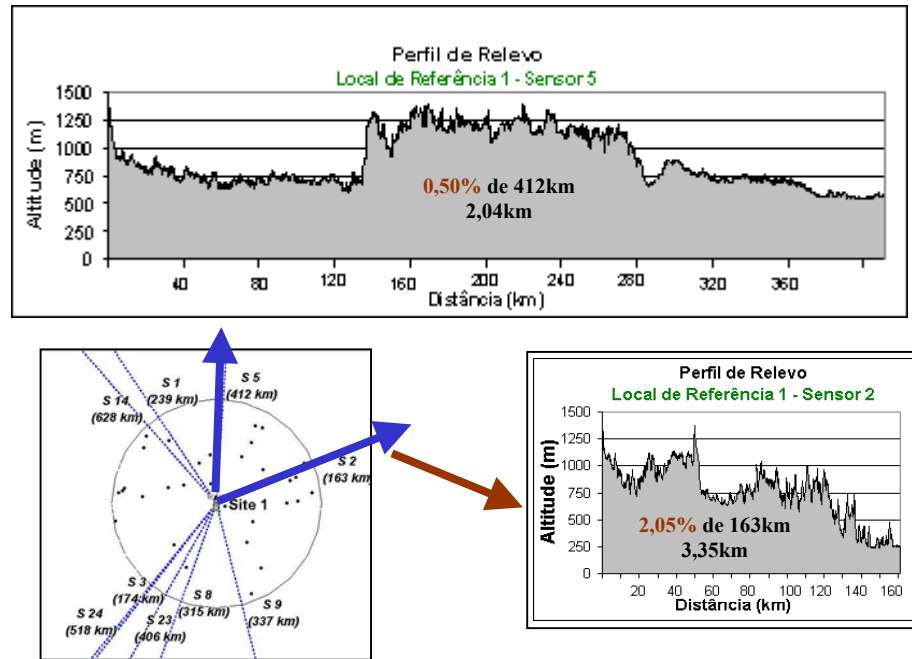


Fig. 8.24 – Perfis de relevo ao longo do caminho de propagação para duas estações detectoras.

### 8.5.2 Atenuação do Sinal Eletromagnético

Como descrito no item 4.4, o LLS emprega uma função para normalizar as intensidades dos sinais eletromagnéticos reportadas pelas estações detectoras participantes da solução do *stroke*. Tal função apresenta um expoente para tentar compensar o efeito da atenuação do sinal com a distância propagada. Em seguida, o valor médio dos sinais normalizados é empregado para estimar o valor de pico da corrente de descarga. O item 5.2 apresenta uma revisão de trabalhos [Orville, 1991] e [Idone et al, 1993] que indicam as funções para normalizar o sinal e também apresentam curvas de regressão linear que correlacionam  $I_{pico}$  ao sinal normalizado médio. Atualmente, o valor adotado para o expoente de atenuação na RINDAT é  $-1,13$ . Tal valor foi obtido através de estudos de calibração efetuados na Flórida, USA [Orville, 1991].

Na análise realizada, foi possível avaliar apenas o primeiro passo. Neste caso foi avaliado um fator de atenuação mais adequado ao caso específico da região em estudo, tendo em conta as intensidades de sinais medidos pelas estações detectoras da rede. No entanto, a determinação da regressão linear (segundo passo) requer valores de referência da intensidade de corrente medidas, não sendo, portanto, aqui realizada.

Nesta análise são considerados apenas os *strokes* que tenham sido reportados por pelo menos 4 estações detectoras. Para cada *stroke*, são indicados os valores de amplitude de sinal medidos pelos sensores participantes e as correspondentes distâncias do ponto de incidência. Em seguida, uma curva de regressão do tipo  $S=aD^b$  é traçada para cada evento, figura 8.25.

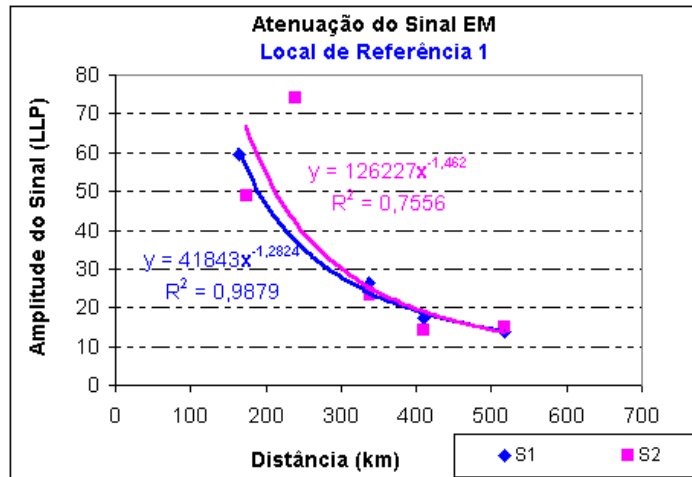


Fig. 8.25 – Curvas de regressão de potência, representando o comportamento da atenuação do sinal eletromagnético para 2 *strokes* da amostra.

A tabela 8.7 indica o expoente  $b$  e o correspondente coeficiente de correlação  $R$  para cada *stroke* da amostra. Tais valores são também indicados em forma gráfica na figura 8.26.

Tab. 8.7 – Expoente de atenuação e coeficiente de correlação para os *strokes* da amostra referente ao Local de Referência 1.

<i>Evento</i>	$b$	$R$	<i>Evento</i>	$b$	$R$
S1	-1,28	0,99	S17	-0,93	0,90
S2	-1,46	0,87	S18	-1,02	0,69
S3	-1,57	0,89	S19	-1,39	0,89
S4	-0,99	0,73	S20	-1,19	0,87
S5	-1,16	1,00	S21	-1,86	0,93
S6	-1,80	0,95	S22	-2,36	0,94
S7	-1,42	0,90	S23	-1,36	0,86
S8	-1,61	0,91	S24	-1,23	0,82
S9	-1,14	0,97	S25	-1,40	0,88
S10	-1,49	0,86	S26	-1,45	0,87
S11	-1,52	0,89	S27	-0,87	0,56
S12	-1,53	0,87	S28	-1,52	0,92
S13	-1,55	0,89	S29	-1,16	0,97
S14	-1,47	0,86	S30	-1,13	0,98
S15	-1,20	0,89	S31	-1,38	0,99
S16	-1,30	0,91			
	Valor médio			-1,38	0,89
	Valor máximo				1,00
	Valor mínimo				0,56

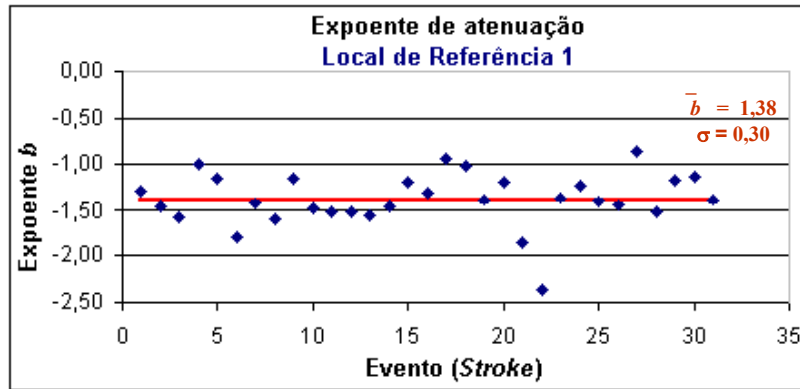


Fig. 8.26 – Expoente de atenuação relativos aos registros de *strokes* da amostra.

A referência [Mesquita et al, 2005] indica valores médios de  $b$  diferenciados para os três diferentes locais analisados (-1,38, -1,05 e -1,10).

### 8.5.3 *Discussão Preliminar sobre os Resultados Alcançados*

A análise relativa à atenuação do sinal eletromagnético é fortemente influenciada pela correção dos valores de ganho dos sensores do LLS. A atenuação seria melhor quantificada após uma adequada análise de desempenho da rede do LLS. Sabe-se que, a cada inserção de uma nova estação detectora no LLS, é desejável uma reavaliação do desempenho da rede por parte do fabricante, a fim de se verificar a necessidade de eventuais correções nos valores de ganho dos sensores. Porém, tais análises não são realizadas de forma sistemática. Além disso, a avaliação de desempenho é realizada a partir da própria base de dados do LLS, considerando uma amostra cujo número de *strokes* é considerado pelo fabricante como significativo. De uma forma geral, pode-se dizer que os valores de ganho das estações são calculados de forma a “ajustar a concordância” entre os sinais normalizados.

Portanto, qualquer interpretação dos resultados obtidos através da análise da atenuação deve ser realizada com muito cuidado. Supondo-se que as condições de calibração da rede de sensores do LLS fossem adequadas, os diferentes resultados

encontrados para o coeficiente de atenuação médio poderiam ser atribuídos às características locais (diferentes caminhos de propagação: relevos e valores de condutividade do solo).

Para cada condição de calibração dos sensores do LLS, a metodologia pode ser reaplicada e, possivelmente, novos valores de coeficientes de atenuação seriam indicados.

Tanto a análise de atenuação quanto a análise do atraso do tempo de propagação seriam muito mais consistentes se, ao invés de se utilizar uma amostra de dados aleatória, fossem utilizados os *strokes* correlatos aos dados locais obtidos pela Rede de Referência. A utilização dos instantes e locais exatos dos eventos registrados pela rede de Referência propiciaria análises bem mais consistentes, que possivelmente pudessem indicar tendências como a existência de erros sistemáticos para cada local de referência.

---

---

---



# 9 Considerações Finais

## 9.1 Introdução

A despeito do avanço tecnológico dos LLSs, é necessário cautela para se realizar uma correta interpretação dos dados providos por eles, seja um simples dado de *stroke* utilizado em análises de correlação ou um conjunto de dados para análise estatística dos parâmetros de descargas e para elaboração de mapas temáticos (densidade de descargas, valores médios de intensidade de corrente etc.).

O desempenho de um LLS pode ser mensurado através de sua eficiência em detectar *strokes/ashes*, sua eficácia em discriminar corretamente o tipo de descarga, sua precisão em localizar as descargas e estimar a intensidade da corrente associada. Todos estes elementos influenciam nos resultados gerados a partir dos dados providos pelo LLS.

Os esforços despendidos por operadores e usuários destes sistemas na verificação de seu desempenho têm se intensificado nos últimos anos. Alguns trabalhos, recentemente publicados, demonstram o interesse na quantificação da qualidade dos dados providos pelos sistemas. Porém, ainda assim, continua evidente a carência de trabalhos que tratam de análises de erros nas indicações dos LLS, bem como de propostas de calibração efetiva destes sistemas.

---

A maneira mais adequada de se avaliar o desempenho dos LLS's consiste em recorrer a referências reais de incidência de descargas atmosféricas, para fins de comparação com as indicações do LLS. Porém, os métodos que têm sido adotados em outros países para obtenção dessas referências possuem *limitações*, aí incluídos a medição direta da corrente de descargas em torres instrumentadas, a medição de descargas artificiais induzidas por foguetes e o registro simultâneo de campo elétrico e imagens de vídeo. Os dois primeiros métodos se limitam à obtenção de medições em apenas um local, o que restringe a validação da comparação a uma pequena parcela da região coberta pelo sistema. Ademais, a maior parte das descargas atmosféricas medidas através de torres elevadas nas regiões temperadas é iniciada por canal ascendente e as descargas induzidas têm características diferentes das descargas naturais. O terceiro método está limitado ao tempo de resolução da câmera de vídeo (em câmeras tradicionais a resolução está compreendida entre 5 a 20 ms definida pela taxa de amostragem). Nos casos onde o intervalo entre *strokes* é pequeno, pode haver dificuldades em distinguir os *strokes* subsequentes. Como solução, algumas pesquisas incluem medições simultâneas de campo elétrico, a fim de facilitar a identificação do fenômeno.

## 9.2 *Objetivo da Tese*

Tendo em vista o cenário descrito acima, até mesmo antes do assunto “avaliação de desempenho de LLS's” estar em voga no meio científico, o tema despertou o interesse da equipe do LRC, traduzido neste trabalho de doutorado através da proposição de uma metodologia original capaz de propiciar a calibração efetiva do LLS instalado em Minas Gerais.

Em relação aos demais métodos, o diferencial da metodologia proposta é que ela se fundamenta no estabelecimento de referências em diversos pontos da área coberta pelo LLS local. Dessa forma, a metodologia possibilita verificar a faixa de erros nas indicações do sistema em toda sua região de cobertura e elaborar propostas para a correção dos dados gerados por região, consoante avaliações realizadas para aquele local e não apenas para um ponto específico numa extensa área de cobertura.

---

O objetivo desta tese de doutorado se concentrou na proposta desta metodologia inovadora. Para sua realização foram necessários a concepção e o desenvolvimento de um dispositivo dedicado à medição da onda de corrente da descarga obtida através do campo magnético associado e de registro do instante de ocorrência. Incluiu também a implantação preliminar de uma rede para a constituição da base de dados de referência.

### ***9.3 Atividades desenvolvidas e conclusões preliminares***

Para propiciar a elaboração desta nova metodologia, conferindo-lhe uma aplicação segura e adequada à realidade de operação dos LLS's, mais especificamente do sistema instalado no Brasil, foram necessários estudos detalhados dos principais elementos que podem influenciar nos dados providos pelos sistemas. As principais atividades realizadas nesta investigação foram:

- Estudo dos modelos e critérios adotados pelo LLS-MG no cômputo das informações da descarga atmosférica;
  - Análises críticas dos modelos e critérios adotados pelos LLS's;
  - Avaliação das fontes potenciais de erro nas indicações do LLS;
  - Estudo detalhado dos diferentes formatos de saída de dados dos LLS's, que incluiu o reprocessamento de dados na central do LLS local, disponibilizando além do usual formato de dados relativo aos *strokes*, formatos de dados mais detalhados que consideram inclusive as informações individuais dos sensores. Estas informações mais detalhadas só são obtidas através de um cuidadoso trabalho de reprocessamento dos dados;
  - Proposta e elaboração de um método alternativo para avaliar a faixa de erro esperada na localização das descargas atmosféricas. Tal método recorreu à utilização da própria base de dados;
  - Proposição de uma nova metodologia para a calibração do LLS-MG, através da medição indireta da onda de corrente;
  - Desenvolvimento de um dispositivo para registro da onda de corrente através de medição indireta;
-

- Seleção dos “sites” para a formação da “rede de referência”, através de critérios próprios que consideram dados de descargas providos pelo LLS local e informações de relevo;
- Monitoramento preliminar da operação da rede de referência;
- Análises preliminares de atrasos de tempo de propagação e de atenuação da intensidade do sinal eletromagnético do ponto de incidência da descarga até as estações detectoras, considerando amostra de dados do LLS. Estes estudos foram realizados com o intuito de traçar os caminhos para as futuras análises, que ao invés de utilizar amostras de dados do LLS, devem utilizar apenas aqueles eventos correlatos a medições reais obtidas pela rede de referência, inclusive instantes e pontos de incidência exatos, conferindo assim maior consistência às análises.

Entre as diversas fontes de erros e limitações dos LLS apresentadas ao longo do texto, aquelas que aparentemente podem ter maior impacto no caso específico do sistema instalado em Minas Gerais, referem-se à influência do relevo e do tipo de solo na propagação do sinal irradiado pela descarga e detectado nas estações. Isto decorre dos valores muito elevados da resistividade do solo no Estado e seu relevo tipicamente muito acidentado. Uma quantificação segura da faixa de erro associado a tais fatores não é uma tarefa fácil, principalmente quando se trata de regiões caracterizadas por uma grande diversidade de solo e relevo, como é o caso do Estado.

O desempenho de um LLS é devidamente quantificado apenas quando se utilizam medições reais de descargas atmosféricas (referências), para fins de comparação as indicações do sistema. Alguns erros podem apresentar caráter sistemático e, no entanto, não serem identificados através da mera redundância dos dados providos pelo LLS. Sendo assim, os ajustes e correções indicados pelo fabricante durante a realização da análise de desempenho da rede de detecção podem não ser suficientes para considerar as particularidades locais.

Neste contexto, realça-se como principal contribuição desta tese a proposta da metodologia original para aferição do LLS, aí incluído o desenvolvimento do dispositivo registrador de corrente.

---

## 9.4 *Proposta de Continuidade*

Tendo em vista os tópicos desenvolvidos e objetivando a calibração futura do LLS-MG, a seguir estão relacionadas algumas propostas de continuidade da pesquisa:

- Dar continuidade ao monitoramento da rede de dispositivos durante um período de tempo para a coleta significativa de dados locais de descargas atmosféricas.
- Aprimoramento do dispositivo para realizar atividades de auto-teste e transmissão de dados à distância, com o uso de telefonia celular, pois na prática verificou-se que o monitoramento da rede de sensores tem como fator crítico os deslocamentos para os pontos remotos de instalação dos dispositivos.
- Expansão da rede de referência e coleta significativa de dados em diferentes locais, para a adequada calibração do LLS. Tal ajuste permitirá contemplar as particularidades locais.
- Considerando os eventos a serem registrados na estação de pesquisa, realizar uma avaliação da faixa de erro nas indicações do LLS-MG (localização, estimativa de intensidade de corrente). Avaliar os efeitos de propagação do sinal EM irradiado no percurso da torre até cada estação detectora que participar da solução da descarga, considerando não somente os efeitos do solo, mas também avaliar a influência do relevo no percurso dos campos.
- Efetuar estudos dos efeitos de propagação dos sinais EM para os demais locais da rede de referência.
- Ajustes dos parâmetros dos modelos adotados nos LLS's para redução dos erros em suas indicações.
- Estudo teórico dos efeitos do solo na propagação do campo eletromagnético irradiado pela descarga atmosférica e sua formulação.

Tendo em vista as críticas aos modelos e critérios adotados pelo LLS-MG, espera-se que, após uma coleta significativa de dados locais, seja possível ajustar os parâmetros associados ao modelo de propagação (eq. 4.2) e da regressão linear (eq. 4.3) na central de processamento, buscando-se adequar mais à realidade do LLS-MG. Porém, como discutido

---

---

do item 6.4 deste texto, tal ajuste apresenta um caráter generalizado e, possivelmente, não seria suficiente para considerar as particularidades de solo e relevo em toda a região de cobertura do sistema.

Demais ajustes e correções na central de processamento poderão ser realizados considerando outros parâmetros ajustáveis relativos a cada sensor da rede de detecção (fatores de ganho, correção de erros locais, etc.).

Aparentemente, além dos ajustes dos parâmetros dos modelos acima citados, talvez sejam necessárias medidas de **correção nos resultados de strokes** gerados pelo LLS-MG utilizando outros *softwares* como, por exemplo, de geoprocessamento, como um tratamento pós-processamento da central do LLS. Assim, espera-se que os erros nas indicações do LLS-MG sejam minimizados, garantindo maior confiabilidade ao sistema.

Tem-se a expectativa de que a metodologia proposta a partir deste trabalho possa ter aplicação generalizada em qualquer sistema como, por exemplo, na Rede Integrada Nacional.

---

# Referências Bibliográficas

ANDERSON, R.B; ERIKSSON, A.J; “Lightning Parameters for Engineering Application”, *Electra*, N° 69, pp. 65-102, Março de 1980.

BERGER, K; ANDERSON, R.B.; KRÖNINGER, H.; “Parameters of Lightning Flashes”; *Electra*, N° 41, pp. 23-37, Jul 1975.

CIGRÉ WG C4.4.04-A Lightning, “Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived from Lightning Detection Systems – The Effects of System Performance”, *Draft*, 2005.

COORAY, V; “Underground Electromagnetic Fields Generated by the Return Strokes of Lightning Flashes”; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*; Vol. 43, N° 1, February 1998.

CRAMER, J.A.; CUMMINS, K.L.; MORRIS, A.; SMITH, R.; TURNER, T.R.; “Recent Upgrades to the U.S. National Lightning Detection Network”; *International Lightning Detection Conference (ILDC2004)*, Helsinki, Finland, June 2004.

CUMMINS, K.L; MURPHY, M.J; BARDO, E.A.; HISCOX, W.L.; PYLE, R.B.; PIFER, A.E.: “NLDN’95 - A Combined ToA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network”, *Intl. Aerospace & Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Williamsburg, USA, Sept 26-28,1995.

---

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”; in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, N° D8, Pages 9035-9044, April 27, 1998.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M.J.; “Overview of Lightning Detection in VLF, LF and VHF Frequency Ranges”, in *Proc. of International Lightning Detection Conference*; Tucson, Arizona, USA; November 7-8, 2000.

CUMMINS, K.L, BARDO, E. A., “On the Relationship Between Lightning Detection Network Performance and Measured Lightning Parameters”, *International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground’2004 & 1st LPE)*, Belo Horizonte-Brazil, November 2004.

DIAS, R. N; “Aplicações do SLT em Proteção Elétrica: Constituição de Base de Dados para Análise de Incidência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão”; Orientador: Silvério Visacro Filho; *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 29 de Julho de 2002.

DIAS, R. N; MESQUITA, C.R; VISACRO, S; RESENDE, P; CAZETTA F. A; “Grouping Criteria of Data Provided by Lightning Location System: A Sensitivity Analysis”, *International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground’2004 & 1st LPE)*, Belo Horizonte-Brazil, November 2004.

DIAS, R. N; MESQUITA, C.R; VISACRO, S; CAZETTA F. A; “Análise de Sensibilidade dos Critérios de Agrupamento de Descargas Individuais do Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas”; *Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré – XI ERIAC - Hernandarias, Paraguai, 22-26 Maio, 2005.*

DIAS, R. N; MESQUITA, C. R; VALE, M. H. M; VISACRO, S; “Lightning Location Systems: A Discussion about Flash and Stroke Density”, *International Conference on Lightning Protection (ICLP’2006)*, Kanazawa, Japan, September 2006.

DIAS, R. N.; “Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos de Desempenho em Linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas” Orientador: Silvério Visacro Filho; *Tese de Doutorado*, Programa de Pós-



---

Graduação em Engenharia Elétrica (LRC/PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Dezembro de 2006.

DIENDORFER, G; SCHULZ, W; RAKOV, V.A; "Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Location System", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, Number 4, November 1998a.

DIENDORFER, G; SHULZ, W; "Effects of Field Propagation on the Peak Current Estimates"; in *Proc. of International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, USA, November 17-18, 1998b.

Global Atmospheric, Incorporation, "Model 141-ALDF - IMPACT Advanced Lightning Direction Finder, Installation Operation and Maintenance Manual", document number: IOM-4.0/141-T, version 4.0, manual revision date: May 9, 1994.

Global Atmospheric, Incorporation, "Technical Manual for LPATS Remote Receiver Series III", document number: - 40137 REV 9511, version 4.7, manual revision date: November 29, 1995.

Global Atmospheric, Incorporation - "Performance Projection Programs" - Ken Cummins, June 1995 - Revised 04/20/96.

Global Atmospheric, Incorporation, "LP2000 - Lightning Processor 2000 User's Guide", document number: 40116 REV 9704, version 1.1, manual revision date: April 7, 1997.

GOMES, C.; COORAY, V; "Concepts of Lightning Return Stroke Models"; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*; Vol. 42, Nº 1, February 2000.

HERODOTOU, N., CHISHOLM, W.A., JANISCHEWSKYJ, W.; "Distribution of Lightning Peak Stroke Currents in Ontario Using an LLP System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, July 1993.

IDONE, V.P.; SALJOUGHY, A.B.; HENDERSON, R.W.; MOORE, P.K.; PYLE, R.B.; "A Reexamination of the Peak Current Calibration of the National Lightning Detection Network"; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. D10, pp. 18323-18332, October 20, 1993.

ISHII, M.; SHINDO, T.; HONMA, N.; MIYAKE, Y.; "Lightning Location Systems in Japan", in *Proc. of 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection*, Rhodes-Greece, page 161-165, 18-22 September 2000.

---

JAYARATNE, K.P.S.C; COORAY, V; “Effects of Propagation Across a Coast Line on the Electromagnetic Fields from Lightning Return Strokes”; in *Proc. of 20<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection*; Interlake, Switzerland, September 24-28, 1990.

JÓHANNSTÓTTIR, H; “Comparison Of Lightning Location Systems”, Technical University Of Denmark - *M.Sc. Thesis TED* - Denmark - June 1993.

KEHOE, K.E.; KRIDER, E. P.; “NLDN performance in Arizona”; in *Proc. of 18th International Lightning Detection Conference (ILDC2004)*; Helsinki, Finland, 7-9 June 2004.

KRIDER, P; NOGGLE, R.C; PIFER, A.E; VANCE D.L; “Lightning Direction-Finding Systems for Forest Fire Detection”; *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 61, No. 9, September 1980.

KRIDER, E. P; “The Earth’s Electrical Environment”, *National Academy Press Washington, D. C* – 1986, Studies in Geophysics.

KRIDER, E. P; BIAGI, C. J.; CUMMINS, K. L.; KEHOE, K. E.; “NLDN Performance in Southern Arizona, Texas and Oklahoma in 2003-2004”, *International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground’2006 & 2nd LPE)*, Maceio-Brazil, November 2006.

LIN, Y.T; UMAN, M.A; TILLER, J.A; BRANTLEY, R.D; BEASLEY, W.H; KRIDER, E.P; WEIDMAN, C.D; “Characterization of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields from Simultaneous Two-station Measurement”; *Journal of Geophysical Research*. Vol. 84, pp. 6307-6314, 1979.

MAIR, M; HADRIAN, W; DIENDORFER, G; SHULZ, W; “Effects of Signal Attenuation on the Peak Current Estimates from Lightning Location Systems”; in *Proc. of 24<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection*, Birmingham, September, 1998.

MESQUITA, C R; “Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas”; Orientador: Silvério Visacro Filho; *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Junho de 2001.

MESQUITA, C.R; NAIME, A.L.F; VISACRO, S.; SILVINO, J. L; “Monitoramento de Descargas Atmosféricas: Análise dos Sistemas Existentes e Aferição do SLT de Minas Gerais”; *XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Campinas, São Paulo, Brasil, 21 a 26 de Outubro de 2001.

---

MESQUITA, C.R; NAIME, A.L.F; VISACRO, S.; SILVINO, J. L; “Lightning Detection and Monitoring: Evaluation of Accuracy for CEMIG’s System”; *VI International Symposium on Lightning Protection, Santos, Brazil, 19<sup>th</sup> – 23<sup>rd</sup> November 2001.*

MESQUITA, C.R; DIAS, R. N; VISACRO, S; RESENDE, P; CAZETTA F. A; “Lightning Location Accuracy: An Analysis of Minas Gerais Stroke Data”, *International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground’2004 & 1st LPE)*, Belo Horizonte-Brazil, November 2004.

MESQUITA, C.R; DIAS, R. N; VISACRO, S; RESENDE, P; CAZETTA F. A; “Análise da Precisão da Localização de Descargas Atmosféricas na região Sudeste do Brasil”; *XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Curitiba, Paraná, Brasil, 16 a 21 de Outubro de 2005.

MESQUITA, C. R; DIAS, R. N.; VISACRO, S; CUNHA L. V.; CAMPICI, P. P. F; FERREIRA J. R.; CAZETTA F. A.; “Alternative Analyses to Evaluate Lightning Location System Performance”, *VIII International Symposium on Lightning Protection*, São Paulo-SP Brazil, 21st-25th November 2005.

MESQUITA, C.R; DIAS, R. N; VISACRO, S; CAZETTA F. A; “A Influência da Eficiência de Detecção de LLS nos Dados Gerados de Descargas Atmosféricas: Análise de um Caso-Estudo”; *XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro, Brasil, 14 a 17 de Outubro de 2007 (Artigo aceito em 2006 para publicação no seminário).

MONTANDON, E.; RUBINSTEIN, M.; "The Need for Guidelines for the Use of Lightning Data from Lightning Detection Systems", of *23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection*, Florence- Italy, September 23-27, 1996.

MURPHY, M.J.; PIFER, A.E.; "Network Performance Improvements Using Propagation Path Corrections"; in *Proc. of International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, USA, November 17-18,1998.

NACCARATO, K.P; “Estudo de Relâmpagos no Brasil com Base na Análise de Desempenho do Sistema de Localização de Tempestades”; Orientador: Osmar Pinto Jr, *Dissertação de Mestrado*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Maio de 2001.

NAIME, A.L.F., "Contribuição ao Estudo dos Erros dos Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas: Proposta de Antena de Medição indireta de Corrente de Retorno", Orientador: José Luiz Silvino e Silvério Visacro Filho; *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Dezembro de 2001.

NUCCI, C.A.; DIENDORFER, G.; UMAN, M.A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M.; MAZZETTI, C.; "Lightning Return Stroke Models with Specified Channel-Base Current: A Review and Comparison"; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D12, pp.20395-20408, November 20, 1990.

ORVILLE, R; "Calibration of a Magnetic Direction Finding Network Using Measured Triggered Lightning Return Stroke Peak Currents"; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. D9, pp. 17135-17142, September 20, 1991.

RAKOV, V.A.; THOTTAPPILLIL R.; UMAN, M. A.; "First vs. Subsequent Stroke Intensity and Multiple Channel Terminations in Cloud-to-Ground Lightning"; 21<sup>st</sup> International Conference on Lightning Protection, Berlin, Germany, September 21-25, 1992.

RAKOV, V.A.; "Comparison of Positive and Negative Lightning"; in *Proc. of International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, U.S.A., November 17-18, 1998a.

RAKOV, V.A; UMAN, M.A; "Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application"; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*; Vol. 40, N° 4, November 1998.

RAKOV, V. A; "Lightning Electric and Magnetic Fields", in *Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. Zurich Symp. on EMC*, Zurich, Switzerland, pp 561-566, February 16-18, 1999.

RAKOV, V.A.; HUFFINES, G.R.; "Return-stroke Multiplicity of Negative Cloud-to-Ground Lightning Flashes"; *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 42, October, 2003.

RICHARD, P; "Propositions of Methods of Validation of Lightning Localization Systems Performances", in *Proc. of 24th International Conference on Lightning Protection*, page 156-160, Birmingham, September, 1998.

SCHROEDER, M.A.O; "Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas" ; Orientador: Silvério Visacro Filho; *Tese de Doutorado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG),

---

Belo Horizonte, Março de 2001.

SHULZ, W.; DIENDORFER, G.; "Detection Efficiency and Site Errors of Lightning Location Systems"; in *Proc. of International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona-USA, November 1996.

SHULZ, W.; DIENDORFER, G.; "Evaluation of a Lightning Location Algorithm Using an Elevation Model"; in *Proc. of 25<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection*, Rhodes - Greece; September 18-22, 2000.

SCHULZ, W.; DIENDORFER, G.; "Amplitude Site Errors of Magnetic Direction Finder"; in *Proc. of 26<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection*, Cracow, Poland, September 2-6, 2002.

SILVEIRA, F.H. "Aplicação de um Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas"; Orientador: Silvério Visacro Filho; *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2001.

SILVINO, J.L., MESQUITA, C.R., VISACRO, S.; "Non-Direct Lightning Current Measurement for LLS Gauging Purpose" in *Proc. of International Conference on Ground and Earthing & Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity (Ground'2002 & 3<sup>rd</sup> WAE)*, Rio de Janeiro-Brazil, November 4-7,2002.

SILVINO, J.L., MESQUITA, C.R., VISACRO, S.; "Non-Direct Lightning Current Measurement for Lightning Location Systems Calibration", *IEE Electronic Letters*, vol. 39, No 6, pp. 504-505, 20th March 2003.

SORENSEN, T; "Lightning Registration Systems Analysis, Optimization and Utilization", Technical University Of Denmark - *M.Sc. Thesis TED* - Denmark – February 1995.

STANSFIELD, R.G; "Statistical Theory of DF Fixing", *Journal of IEE*, Vol. 4, pt 3A, pg 94 762-770, 1947.

THOTTAPPILLIL, R; UMAN, M.A; "Comparison of Lightning Return-Stroke Models", *Journal of Geophysical, Research*, Vol. 98. No. D12, Pages 22903-22914, December 20,1993.

UMAN, A.M; MCLAIN, D. K; KRIDER, E.P; "The Electromagnetic Radiation from a Finite Antenna", *American J. Phys.*, Vol 43, 33-38; January 1975.

UMAN, M.A.; "Lightning", *Dover Publications, Inc.*, New York – 1984.

---

---

UMAN, M.A.; KRIDER, E. P.; “Natural and Artificially Initiated Lightning”, *Science*, Vol. 246, pp.457-464, 1989.

UMAN, M.A; RAKOV, V.A; RAMBO, K.J; VAUGHT, T.W; FERNANDEZ, M.I; BERNSTEIN, R.; GOLDEN, C; “Triggered-Lightning Facility for Studying Lightning Effects on Power Systems”, in *Proc. of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection*, Florence- Italy, pp 73-78, September 23-27, 1996.

UMAN, M.A; RAKOV, V.A; RAMBO, K.J; VAUGHT, T.W; FERNANDEZ, M.I; CORDIER, D.J; CHANDLER, R. M; BERNSTEIN, R; GOLDEN, C; “Triggered-Lightning Experiments at Camp Blanding, Florida (1993 - 1995)”, *IEE Japan*, Vol. 117-B, No. 4, 1997.

VAISALA DIMENSIONS; “*Technical Description*”.

VAISALA, “LP Series™: LP2000™, LP5000™ – *User’s Guide*”, document number: M210413EN-B, November 2003.

VISACRO F., S.; Portela, C. M.; “Modelagem de Aterramentos Elétricos para fenômenos Rápidos”, *Eletroevolução*, pg.47-54, junho de 1995.

VISACRO, S.; SCHROEDER, M.A.O., SOARES, Jr., A., CHERCHIGLIA, L.C.L., SOUZA, V.J., “Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station, *Journal of Geophysical Research*, V.109, N.D01105, 1-11, 2004.

VISACRO, S.: “Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia” *livro*, Artiber Editora Ltda, São Paulo-SP, 2005.

---