

Nova Metodologia de Medição Indireta da Corrente de Descarga Atmosférica para Fins de Calibração de SLT's

S. Visacro, J.L. Silvino, C.R. Mesquita, R.N. Dias, L.C.L. Cherchiglia, V.J. Souza / LRC : UFMG - CEMIG

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um novo método de medição indireta dos parâmetros de corrente da descarga atmosférica. A nova metodologia utiliza um dispositivo capaz de registrar a forma de onda de corrente da descarga. Este projeto, executado pela equipe do LRC, recorre à utilização de dados de referência objetivando a calibração do Sistema de Localização de Descargas Atmosféricas (SLT) instalado no estado de Minas Gerais. Comparando-se os dados relativos a incidências locais e os dados indicados pelo SLT, pode-se estimar os erros do sistema e medidas adequadas de correções poderão ser efetuadas.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Atmosféricas, Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (SLT), Medição indireta da corrente de retorno, Erros dos Sistemas de Detecção de Raios, Calibração do SLT.

I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas (SLT'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, determinando o instante de ocorrência, localização da descarga (latitude e longitude), polaridade, multiplicidade e estimativa da amplitude da corrente associada [3,4,5]. Dados de grande relevância são disponibilizados para aplicações na engenharia de proteção contra descargas e também em atividades relacionadas a planejamento, projeto, operação e manutenção dos sistemas elétricos de potência.

Como qualquer sistema físico, os SLT's são susceptíveis a erros em suas medições. Tal fato pode diminuir a confiabilidade dos dados gerados e a eficiência de detecção do sistema. Estes erros podem resultar de considerações assumidas na concepção do SLT e, principalmente, da influência do meio na propagação do sinal eletromagnético (EM), antes do mesmo ser detectado pelas estações remotas do sistema [6,7,8]. Os fabricantes tentam compensar os

erros do sistema utilizando correções e ajustes, que são implementadas no SLT 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.

Para realizar uma calibração eficiente, é necessário dispor de referências relacionadas a ocorrências de descargas, objetivando-se avaliar os erros absolutos nas indicações do SLT (como no procedimento usualmente utilizado em processos de identificação de parâmetros).

As medições de referência poderiam ser obtidas utilizando-se os dados de descargas atmosféricas providos por torres instrumentadas [7]. No entanto, como o SLT possui grande região de cobertura, é necessário um conjunto representativo de referências. Sendo assim, parece conveniente a utilização de outro método de calibração do sistema.

Nesta perspectiva, existe uma pesquisa em desenvolvimento no LRC, contratada pela CEMIG através de projeto de P&D da ANEEL: *Obtenção de parâmetros de Descargas Atmosféricas e Aferição do Sistema de Localização de Tempestade*. A investigação inclui a concepção de um dispositivo de baixo custo e pequenas dimensões a ser instalado em locais de alta incidência de descargas atmosféricas. Este dispositivo, através do método de medição indireta, é capaz de registrar a forma da onda de corrente, bem como o instante da incidência da descarga. Utilizando os dados absolutos obtidos pelo dispositivo, será possível determinar os parâmetros para a calibração do sistema. Esta pesquisa compreende a calibração do SLT instalado no estado de Minas Gerais (SLT-MG), através da instalação do dispositivo em locais estratégicos na área de cobertura do sistema.

II. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO SLT

Um SLT é composto basicamente por uma rede de estações detectoras remotas e uma unidade central de processamento dos dados, incluindo um sistema de informação em vídeo. As estações detectoras estão geralmente dispostas a uma distância de 100 a 400 km e cada sensor está conectado à central através de um sistema de comunicação. Embora existam diferentes SLT's que utilizam outras técnicas de detecção e localização das descargas atmosféricas,

Os autores são da equipe do LRC – Lightning Research Center (Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas) UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais e CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais (Lrc@cpdee.ufmg.br)

C. R. Mesquita e R. N. Dias são bolsistas do CNPq.

os métodos de localização mais comumente utilizados são a indicação da direção (DF), tempo de chegada (ToA) e a combinação das duas técnicas, o sistema IMPACT [3,4,5]. Estas técnicas serão descritas sucintamente a seguir.

A *técnica DF* consiste na utilização de um par de espiras ortogonais. Para cada estação detectora, a direção de chegada do campo incidente é determinada, considerando-se a razão entre a intensidade do sinal induzido pelo campo magnético irradiado pela descarga atmosférica nas espiras leste-oeste e norte-sul. Utilizando-se duas dessas estações remotas, é possível estimar o ponto de incidência da descarga, através da triangulação das direções indicadas por cada DF. Os SLT's geralmente utilizam três ou mais estações, aumentando-se assim a precisão dos dados de localização de descargas. O sistema LLP (*"Lightning Location and Protection System"*) utiliza esta técnica. As informações armazenadas em cada DF são enviadas à central de processamento (direção, intensidade do sinal, tempo, etc) e a mesma estima a localização da descarga e sua intensidade da corrente, utilizando um determinado modelo de corrente de retorno. A informação já processada é então disponibilizada aos usuários através de um sistema de informação em vídeo.

A *técnica ToA* determina o ponto de incidência do raio utilizando a diferença relativa entre o instante de chegada do sinal irradiado pela descarga em diferentes estações detectoras. Esta técnica requer a participação de ao menos três estações, permitindo, assim, a estimativa do ponto de ocorrência da descarga através das interseções hiperbólicas [5]. O sistema LPATS (*"Lightning Positioning and Tracking System"*) utiliza a técnica ToA. Sua central de processamento utiliza as diferenças dos tempos indicados por cada sensor para calcular a localização da descarga atmosférica. Para isso, os sensores devem estar perfeitamente sincronizados.

O sistema IMPACT (*"Improved Accuracy from Combined Technology"*) combina as duas técnicas já citadas. Tal sistema incorpora tanto informações de indicação de direção quanto informações de tempo de chegada, permitindo uma melhor precisão na localização das descargas, quando comparada às duas tecnologias separadamente.

O SLT instalado em Minas Gerais foi implantado em 1988. Inicialmente, possuía quatro estações LPATS série III. Ao longo dos anos, o sistema foi modificado, incorporando estações IMPACT. Atualmente, o SLT-MG é composto por 9 estações detectoras (5 LPATS e 4 IMPACTS) sincronizadas por sistema GPS (*"Global Positioning System"*)

III. FONTES DE ERROS NAS INDICAÇÕES DOS SISTEMAS

Independentemente da avançada tecnologia utilizada pelos Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas, os dados gerados pelo sistema devem ser utilizados

com prudência. Além dos erros inerentes ao sistema, reconhecidos e estimados pelos fabricantes, existem outras possíveis fontes de erros externas, devido às aproximações assumidas pelos modelos adotados para o canal de descarga e para a propagação do sinal de campo. O sinal EM que propaga do ponto de incidência da descarga até as estações remotas é utilizado pelos SLT's para se estimar os parâmetros da descarga atmosférica. Sendo assim, a influência dos elementos físicos existentes no caminho percorrido pelo sinal EM, tais como as características de solo e relevo, podem alterar a forma de onda e amplitude do sinal EM que chega às estações detectoras. Deste modo, tanto a eficiência de detecção do sistema quanto a precisão dos dados de descargas fornecidos podem ser afetadas. As principais fontes de erros associados aos SLT's serão descritas a seguir [6]:

A. Erros Associados ao Modelo de Canal da Descarga Adotado pelo SLT

De um modo geral, a expressão empírica utilizada pelos Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas para se estimar o valor de pico da corrente da descarga é fundamentada nos modelos de engenharia do canal de descarga [9], mais especificamente, no modelo de linha de transmissão. Este modelo considera o canal de descarga perfeitamente vertical, o solo plano com condutividade infinita e a corrente com velocidade constante. Considerando estas aproximações, a intensidade máxima da corrente (I_{pico}) será proporcional à intensidade do sinal EM (E_{pico}):

$$I_{pico} = - \frac{2\pi D E_{pico}}{\mu_0 v} \quad (1)$$

sendo D a distância horizontal entre o canal da descarga e a estação detectora (distância de observação), v a velocidade de propagação da corrente de retorno do canal e m_0 a permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

Segundo o fabricante, o campo EM é captado pelo sensor nos primeiros microssegundos, quando a onda de corrente de descarga situa-se a aproximadamente 100m da superfície terrestre. Nesta região, o canal de descarga pode ser considerado mais vertical (sem tortuosidades), reduzindo-se assim os efeitos produzidos pela não-verticalidade real do canal. Por outro lado, a amplitude de corrente estimada pelo SLT pode, ainda assim, apresentar erros, devido ao fato da velocidade da corrente de retorno variar com a intensidade de corrente da descarga.

B. Erros de Propagação do Campo EM

Os SLT's utilizam a técnica de medição remota do sinal EM irradiado pela corrente de descarga atmosférica para estimar a intensidade da corrente. No caso do SLT, a única parcela relevante do campo EM é o campo irradiado (campo distante), isto devido à magnitude da distância entre o ponto de observação e o ponto de ocorrência da descarga e às próprias configurações do sistema. A parcela de

campo irradiado, numa aproximação, decai com o inverso da distância (considerando-se as condições ideais do solo: condutividade infinita). No entanto, em condições reais, o solo apresenta condutividade finita; logo, o campo EM sofre atenuação e distorção. O tempo de frente da forma de onda do campo EM aumenta à medida que a condutividade do solo diminui, devido ao efeito da atenuação ser mais significativo em altas frequências. Geralmente, os SLT's utilizam um modelo de propagação ("fatores de correção") para compensar o efeito da atenuação na estimativa da intensidade do sinal normalizado [3]:

$$RNSS = C.SS \cdot \left(\frac{D}{D_n} \right)^p \cdot e^{\left(\frac{D-D_n}{A} \right)} \quad (2)$$

Onde:

D: Distância percorrida pelo sinal EM compreendida entre o ponto de incidência da descarga e a estação remota;

D_n: Distância de normalização;

RNSS: Intensidade do sinal normalizado;

SS: Intensidade do sinal EM medido pela estação;

C: Constante obtida experimentalmente;

p: Constante de atenuação;

A: Constante de espaço.

Os mesmos parâmetros *C*, *p* e *A* são utilizados para toda a área de cobertura do SLT. Não são consideradas as possíveis discontinuidades do solo ao longo do caminho de propagação do sinal EM (montanhas, lagos, oceanos e solos com características diferentes). Estas discontinuidades são capazes de modificar a atenuação do sinal em determinados trechos de propagação, gerando reflexões múltiplas. Conseqüentemente, o sinal EM que chega à estação detectora pode estar distorcido [7], afetando assim a precisão de localização do SLT.

Os algoritmos utilizados pelos SLT's consideram a terra como uma elipse perfeita, não considerando a existência de montanhas e vales ao longo do percurso do campo EM. Tais obstáculos aumentam o caminho de propagação do campo irradiado pela descarga, principalmente em áreas montanhosas. A distância real percorrida pelo sinal torna-se maior que o valor estimado pelo sistema. Esta elongação do percurso pode gerar erros de ângulo e de tempo nas indicações do sistema, uma vez que o sinal do campo EM pode sofrer maiores distorções, devido aos efeitos da propagação.

Alguns trabalhos desenvolvidos por Diendorfer [7,8] evidenciam a importância dos efeitos de propagação na obtenção da intensidade do sinal normalizado reportado pelas estações detectoras.

C. Erros Locais

Este tipo de erro está associado à absorção e radiação do campo EM por eventuais objetos metálicos existentes nas proximidades das estações detectoras (linhas de transmissão, cercas e cabos enterrados), resultando em

distorções do campo EM resultante. Deste modo, o ângulo de direção da descarga indicado pelo sistema pode sofrer reduções em sua precisão.

Existem alguns procedimentos adotados para identificar e reduzir estes erros. Normalmente, tais medidas são embasadas em medidas locais (comparação de dados) ou análises estatísticas, mas tais medidas requerem um diagnóstico detalhado dos erros estimados.

Os ruídos existentes nas proximidades das estações detectoras são responsáveis pelos erros aleatórios das indicações fornecidas pelo SLT. Os fabricantes do sistema fornecem um procedimento padrão para a correta escolha da localização das estações detectoras, objetivando, assim, melhores condições de operação do sistema.

D. Erros do Sistema

Este grupo inclui todos os erros associados à dinâmica e configurações do sistema, tais como ajustes, valores de ganho, valores de limiar de sensibilização e critérios de processamento da informação da descarga. Os valores pré-definidos influenciam diretamente no desempenho do sistema (eficiência de detecção e precisão da localização). Outros fatores associados à ocorrência da descarga (tipo de descarga atmosférica, multiplicidade, intensidade da atividade elétrica) podem também afetar o desempenho do sistema. Em períodos de alta atividade elétrica, dependendo da capacidade de processamento, dados de correntes de retorno podem ser perdidos (principalmente de correntes subseqüentes).

Os sistemas LLP e IMPACT empregam determinados critérios de discriminação de forma de onda para identificar os sinais originados por descargas nuvem-solo, que é o dado de interesse prático do SLT. Tais critérios são fundamentados em alguns padrões de formas de ondas de campos eletromagnéticos originadas por descargas nuvem-solo típicas [10]. Eventualmente, algumas descargas de nuvem podem ser detectadas pelo sistema e interpretadas como descarga nuvem-solo, caracterizando a contaminação dos registros de descargas (as descargas de nuvem podem ser reconhecidas como descargas positivas de baixa intensidade).

A escolha da geometria do sistema (número de estações remotas e seu posicionamento na área de abrangência do SLT) influencia diretamente nos parâmetros de desempenho, tais como a eficiência de detecção e a precisão da localização da descarga.

E. Implicações dos Erros no SLT-MG

Os erros que aparentemente podem apresentar maior impacto, no caso específico do SLT-MG, referem-se à influência do relevo e do tipo de solo na propagação do sinal do ponto de incidência da descarga até as estações detectoras. Tipicamente, o estado de Minas Gerais apresenta solos de alta resistividade e relevo muito aci-

dentado e, por conseguinte, espera-se que as atenuações e distorções das ondas eletromagnéticas sejam significativas.

É razoável a expectativa de que os fatores de ajuste e correção, desenvolvidos ao longo dos anos pelos fabricantes em condições ambientais específicas, não sejam adequados às condições particulares do estado de Minas Gerais. Configura-se então a necessidade de se adotar procedimentos de calibração local, o que não se constitui em tarefa técnica trivial, dada a falta de referências reais para comparação aos resultados indicados pelo sistema.

A necessidade de confiabilidade nas indicações do SLT-MG tem motivado o desenvolvimento de uma investigação específica. Tal investigação destina-se a desenvolver meios de avaliar a faixa de erro nas indicações do sistema, utilizando referências locais, a fim de permitir uma posterior calibração do sistema. O trabalho compreende a concepção e o desenvolvimento de um dispositivo específico para medição indireta e registro da corrente de descarga atmosférica, correspondendo ao enfoque deste texto. Dando seqüência à investigação, pretende-se instalar uma rede destes dispositivos em pontos estratégicos no estado de Minas Gerais, a fim de coletar dados de referências locais, os quais serão comparados aos dados do SLT. Os locais selecionados são pontos preferenciais de incidência de descargas, como certas torres de telecomunicações posicionadas em topos de montanha.

Tem-se a expectativa de que os erros referentes a cada região do estado de Minas Gerais apresentem um caráter sistemático, uma vez que os mesmos estão associados a fatores que permanecem praticamente inalterados no decorrer do tempo (as estações detectoras são fixas). Tais erros sistemáticos poderiam ser identificados para cada região e procedimentos de correções poderiam ser adotados a fim de minimizar a faixa de erro nas indicações do sistema.

O próximo item descreve o método proposto para obtenção dos parâmetros de corrente de descargas atmosféricas.

IV. MEDIÇÃO INDIRETA DA CORRENTE DE DESCARGA

O campo magnético gerado pela corrente de descarga atmosférica pode ser estimado a partir da tensão eletromotriz induzida nos terminais de uma espira. Assim sendo, é possível a reconstrução da onda de corrente que o originou e, conseqüentemente, a extração dos parâmetros envolvidos (valor de pico, tempo de frente, tempo de cauda, etc) [6].

Considere uma corrente i que flui ao longo de um canal condutor vertical acima do solo de condutividade infinita, conforme figura 1. O valor instantâneo da tensão induzida na espira (fem) posicionada no ponto de observação é dada por:

$$fem = -\frac{\mu_0}{2\pi r} Na \cos \varphi \frac{1}{\sqrt{l^2 + r^2}} \frac{di}{dt} \quad (3)$$

onde a é a área da espira, N é o número de espiras, j é o ângulo formado entre a área da espira e a linha r e μ_0 é a permeabilidade do vácuo. Se todos os parâmetros são conhecidos, a onda de corrente pode ser obtida através da integração da fem .

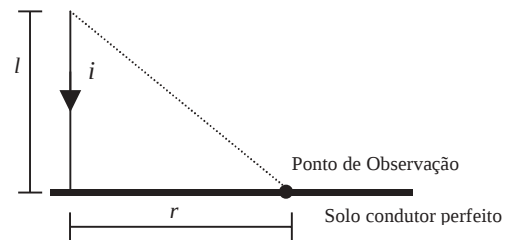


FIGURA 1 - Geometria simplificada para representação do canal de descarga acima de uma superfície plana de condutividade infinita.

Além da onda de corrente, o instante de incidência também é registrado. Tais registros somados à informação da localização da descarga atmosférica constituem-se referências valiosas para o ajuste dos parâmetros do SLT. Com base neste princípio, um dispositivo encontra-se em desenvolvimento nos laboratórios do LRC. Tal dispositivo possui duas antenas ortogonais, denominadas d-antena e q-antena, conforme Figura 2. Se as posições da corrente incidente e do dispositivo são conhecidas, é possível orientar a d-antena de modo que a mesma receba indução máxima (figura 2a) e a q-antena receba indução mínima (figura 2b) do canal monitorado.

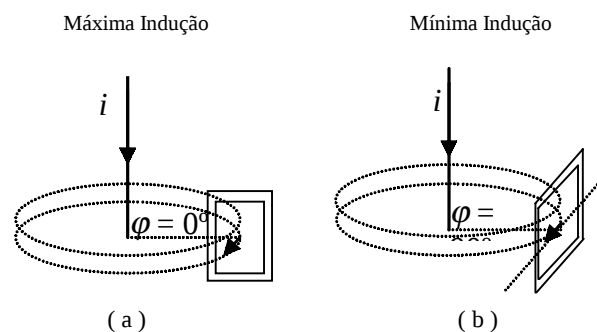


FIGURA 2 - Condições Geométricas para indução. (a) d-antena orientada de forma a receber indução máxima e (b) q-antena orientada de forma a receber indução mínima

A orientação das antenas atua como um fator seletivo para assegurar que somente sinais associados a descargas incidentes no mastro (torre ou corpo) monitorado sejam registrados. Se uma fem detectada na q-antena possuir valor superior a um limiar pré-selecionado, significa que a corrente de descarga que gerou o sinal muito provavelmente não incidiu no mastro monitorado. Neste caso, o dado do sinal é desconsiderado e não é gravado.

V. UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO INDIRETADA CORRENTE DE DESCARGA

O diagrama do dispositivo proposto é mostrado na Figura 3.

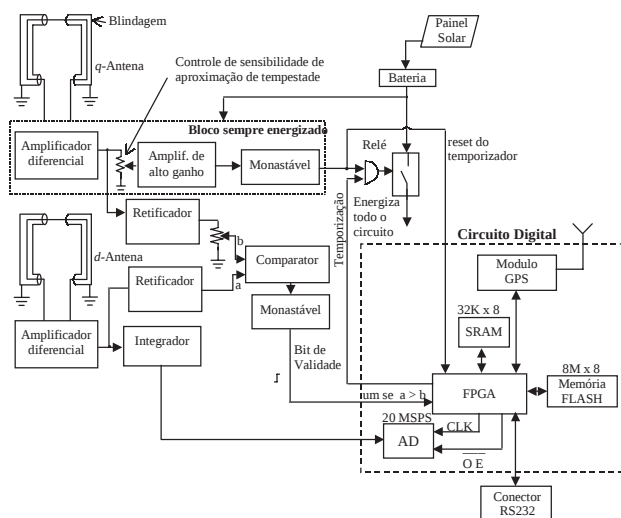


FIGURA 3 - Diagrama de blocos do dispositivo proposto.

O sinal integrado da d-antena é enviado para um conversor analógico-digital de 10 bits e armazenado continuamente na RAM estática (SRAM). Se o bit de validade alternar de 0 para 1 (indicativo de que existe corrente de descarga fluindo ao longo do mastro), o FPGA imediatamente lê o instante de ocorrência do módulo GPS e armazena o dado correspondente na memória FLASH. Tais dados armazenados podem ser extraídos, quando necessário, pela conexão a um *notebook* através de um conector RS232.

As antenas devem ser 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 100 kA. Além das funções de amplificação e integração, a placa analógica deve ser capaz de retificar e comparar os sinais das duas antenas num período da ordem de 1 microssegundo. Amplificadores operacionais “slew rate” 3200V/ms foram utilizados com resultados satisfatórios. Uma outra função importante do circuito analógico é a redução do consumo de energia, uma vez que o dispositivo é alimentado por uma bateria carregada a partir de células solares. Entretanto, somente uma parte do circuito analógico é mantida energizada (bloco pontilhado na figura 3), consumindo assim poucos miliampéres. Todo o circuito, incluindo a parte digital, é energizado através do relé somente quando a q-antena detecta a aproximação de tempestade.

A Figura 4 mostra o protótipo do dispositivo, atualmente instalado próximo à torre instrumentada da estação Morro do Cachimbo do LRC (CEMIG-UFMG).



FIGURA 4 - Foto do protótipo do dispositivo instalado próximo à torre instrumentada da Estação Morro do Cachimbo.

Durante um período, a precisão do dispositivo será verificada através de comparações de suas medições às medições de corrente registradas pelas facilidades da estação.

VI. ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A antena desenvolvida é constituída por duas espiras ortogonais de cabo coaxial (75W). Seus terminais estão conectados a uma resistência de 75W, para fins de casamento de impedâncias, garantindo a perfeita transferência do sinal para o circuito de medição [6].

Testes preliminares foram realizados nos laboratórios do LRC para a medição de correntes impulsivas. Um modelo em escala reduzida foi utilizado, de forma a obter as mesmas amplitudes de campo esperadas em casos reais. Nestes experimentos, a corrente foi gerada por uma descarga de um gerador de pulsos. Um longo condutor vertical simulou o canal de descarga e o solo perfeito foi representado por uma placa de alumínio. A distância de observação foi de 0,5 m, ao passo que em casos reais, são esperadas distâncias de 30 a 60m. A Figura 5 mostra a onda de corrente medida diretamente no canal experimental e o correspondente sinal medido pelo dispositivo. A onda apresenta um tempo de frente de aproximadamente 5ms (usualmente ela pode variar de 0,5 a 10ms em correntes de descargas atmosféricas reais). Os resultados obtidos indicam que informações de frente de onda, valor de pico e tempo de cauda po-

dem ser extraídas do sinal reconstituído com precisão satisfatória para fins de comparação aos valores indicados pelo SLT.

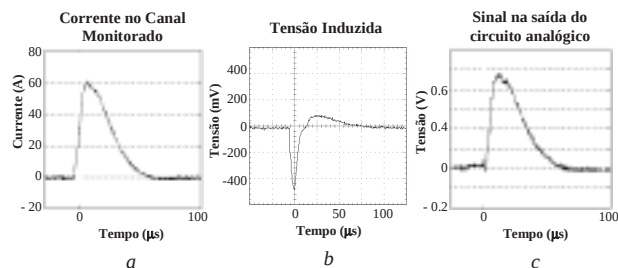


FIGURA 5 - (a) Onda de corrente real medida no canal monitorado, (b) tensão induzida na d-antena e (c) onda de corrente reconstituída pelo circuito analógico do dispositivo.

Outros testes, cujos resultados não são apresentados neste trabalho, foram também realizados a fim de avaliar:

- (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 e o pico da tensão induzida;
- (c) a relação esperada entre o valor de pico da tensão induzida e o ângulo θ .

VII. CONCLUSÕES

Neste texto evidenciou-se a importância de se utilizar dados de referência de medições para quantificar adequadamente os erros nas indicações dos SLT's. No entanto, a nova metodologia proposta permitirá a obtenção de dados de referência para fins de calibração do SLT instalado no estado de Minas Gerais, utilizando um novo instrumento de medição capaz de registrar correntes impulsivas rápidas.

Os primeiros resultados experimentais obtidos em laboratórios mostraram que o equipamento opera conforme o esperado. Atualmente, um protótipo do dispositivo encontra-se instalado próximo à torre instrumentada da estação Morro do Cachimbo. Durante um certo período de tempo, a precisão do protótipo será avaliada através de comparações de seus registros às medições de corrente registradas pelas facilidades convencionais da estação, com o objetivo de validar o desempenho do dispositivo.

A próxima etapa consiste na instalação de uma rede de dispositivos em pontos estratégicos no estado de Minas Gerais, a fim de se coletar dados de referências locais. Os pontos selecionados são locais preferenciais de incidência de descargas atmosféricas, como certas torres de telecomunicações posicionadas em topos de montanhas. Os dados coletados deverão ser comparados às indicações do SLT, alcançando, assim, a calibração do SLT-MG.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.L. Silvino, C.R. Mesquita, S. Visacro, "Non-direct lightning current measurement for Lightning Location Systems calibration", *IEE Electronic Letters*, vol. 39, No 6, pp. 504-505, 20th March 2003.
- [2] J.L. Silvino, C.R. Mesquita, S. Visacro, "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 & 3rd WAE)*, Rio de Janeiro-Brazil, pp. 133-138, November 4-7, 2002.
- [3] K.L. Cummins, M.J. Murphy, E.A. Bardo, W.L. Hiscox, R.B. Pyle, A.E. Pifer, "A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network", *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, N° D8, pp. 9035-9044, Apr. 27, 1998.
- [4] Global Atmospheric, Inc., "Introduction to Lightning Detection", Copyright © 1996.
- [5] C.R. Mesquita, "Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas", Dissertação de Mestrado, Orientador: S. Visacro, Dept. Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Jun. 2001.
- [6] A.L.F. Naime, "Contribuição ao estudo dos erros dos Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas: Proposta de antena de medição indireta de corrente de Retorno", Dissertação de Mestrado, Orientador: J. L. Silvino, Dept. Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Dez. 2001.
- [7] G. Diendorfer, W. Schulz, "Effects of field propagation on the peak current estimates"; *Proc. of International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, USA, November 17-18, 1998.
- [8] M. Mair, W. Handrian, G. Diendorfer, W. Schulz, "Effect of signal attenuation on the peak current estimates from lightning location systems", *Proc. of 24th International Conference on Lightning Protection*, Birmingham, September, 1998.
- [9] V.A. Rakov, M.A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application"; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*; Vol. 40, N° 4, Nov. 1998.
- [10] E. P. Krider, R.C. Noggle, A.P. Pifer, D.L. Vance, "Lightning Direction-Finding Systems for forest fire detection"; *Reprinted from Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 61, No. 9, September 1980.
- [11] M.A.O. Schroeder, "Modelo Eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: Aplicação às medições da estação Morro de Cachimbo", Tese de Doutorado, Orientador: S. Visacro, Dept. Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, Mar. 2001.