



**SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC 25  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO X**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

#### **INVESTIGAÇÕES SOBRE O USO DE LINHAS DE ELETRODOS DE ATERRAMENTO DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO (CCAT) PARA MEDIÇÕES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Alexandre Pinhel Soares\* - Juarez Neves Cardoso - Guilherme Sarcinelli Luz  
Ulisses de Vasconcelos Ordones - Ricardo Fraga Abdo - Alexandre Regis Nóbrega, MSc

**Furnas Centrais Elétricas S.A.**

## **RESUMO**

Esse trabalho propõe a utilização de técnicas de refletometria para identificação das coordenadas de incidência de descargas atmosféricas.

A investigação se baseia na utilização das linhas dos eletrodos de aterramento do Sistema de Corrente Contínua em Alta Tensão de FURNAS como captadores das descargas. Como essas linhas são precisamente georreferenciadas, a localização do ponto de incidência pode ser obtida através dos tempos de chegada da onda direta e da onda refletida em instrumentos especiais instalados em uma das extremidades.

Como resultado direto espera-se poder contribuir na determinação dos erros de localização de descargas atmosféricas de redes de medição como a RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas) da qual FURNAS é uma das principais participantes e usuárias.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Descargas atmosféricas, RINDAT, Sistema de Corrente Contínua em Alta Tensão, eletrodo de aterramento, Refletometria.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Várias linhas de pesquisa na área de descargas atmosféricas necessitam de informações sobre a localização e as características físicas desses eventos, de forma que diversas iniciativas têm sido tomadas para o desenvolvimento e implementação de sistemas de detecção que consigam, efetivamente, obter as informações com a precisão desejada.

Dentre as necessidades percebidas, a determinação dos erros de medição das Redes de Detecção (como a RINDAT por exemplo), relacionados às detecções dos pontos de incidência das descargas, é uma prioridade para alguns usuários. Porém essa busca depara-se com a dificuldade de escolha de locais que maximizem a chance de coletas de dados bem sucedidas.

Esse trabalho pretende investigar a possibilidade de utilização das linhas dos eletrodos de aterramento dos Sistemas de Corrente Contínua em Alta tensão (CCAT) como captadores de descargas atmosféricas. A investigação será feita a partir do estudo das características do Sistema CCAT de FURNAS, cujas linhas dos eletrodos de aterramento chegam a alcançar 70km de comprimento, e percorrem regiões com alto índice cerâmico (Regiões Sul e Sudeste do Brasil).

(\*) Rua Real Grandeza, 219 – Bloco E Sala 109 – CEP 22283-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Tel: (+55 21) 2528-4049 – Fax: (+55 21) 2528-5656 – Email: pinhel@furnas.com.br

## 2.0 - REDE INTEGRADA NACIONAL DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS - RINDAT

Os sensores da RINDAT (figura 1) operam em rede a partir da detecção dos campos eletromagnéticos gerados pelas descargas, correlacionando-os com sinais padrão armazenados localmente [1]. Desta forma, uma rede de sensores estrategicamente localizados torna possível a obtenção dos dados de localização das descargas atmosféricas e de suas características físicas estimadas (intensidade, polaridade, multiplicidade, etc) em uma vasta região.

Após a discriminação dos sinais, os dados coletados são transmitidos para computadores, onde são processados, armazenados e distribuídos para alguns usuários que necessitam dessas informações em tempo real (FURNAS, por exemplo). Porém os dados armazenados podem ser utilizados também para análises estatísticas e estudos como o apresentado neste artigo.



Figura 1: Localização dos sensores de descargas atmosféricas da RINDAT (Ano: 2004).

A tecnologia empregada pelo método de detecção possui um erro inerente que deve ser conhecido. Na literatura técnica, o erro de localização no ano de 2004 estava na faixa de 500 a 5000 metros [3], o que impossibilita a utilização destes dados de medição em uma série de aplicações, havendo necessidade de investigações adicionais sobre o assunto [4, 5].

## 3.0 - O SISTEMA DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO

Um sistema de transmissão de energia elétrica em alta tensão na forma de corrente contínua baseia-se na retificação e posterior inversão da energia elétrica. É utilizado, principalmente, em situações onde a origem e o destino operam em frequências diferentes, quando deseja-se desacoplar dois sistemas elétricos ou quando deseja-se transmitir grandes blocos de energia a grandes distâncias. Há relativamente poucos deles no mundo e um dos maiores encontra-se no Brasil, convertendo parte da energia de Itaipu gerada em 50Hz (devido ao sistema elétrico do Paraguai) para os 60Hz utilizados no Brasil.

Em ambas extremidades do sistema, a conversão CC/CA e CA/CC é feita por grandes conjuntos de tiristores, conhecidos simplesmente por bipolos. Os pontos centrais dos bipolos (figura 2) são aterrados por eletrodos cujas localizações ideais podem situar-se a muitos quilômetros das subestações conversoras. Essas conexões aos eletrodos de aterramento são estabelecidas por linhas aéreas (figuras 3,4,5 e 6) usualmente longas. No caso do sistema estudado, o lado Foz do Iguaçu possui linhas com comprimento da ordem de 15km e o lado Ibiúna da ordem de 70km.

As linhas são compostas por pares de fios que ficam afastados, em média, por cerca de 2m e são sustentados por seis tipos diferentes de postes, com variação de altura entre 13 e 21 metros (com 3m de fundação). Todos os postes são aterrados com fio de aterramento de 30m de comprimento circundando a parte enterrada a partir de 30cm da superfície e possuem dispositivos pára-raios do tipo centelhador com *gap* de 20cm. Os vãos variam de 200m a 440m.

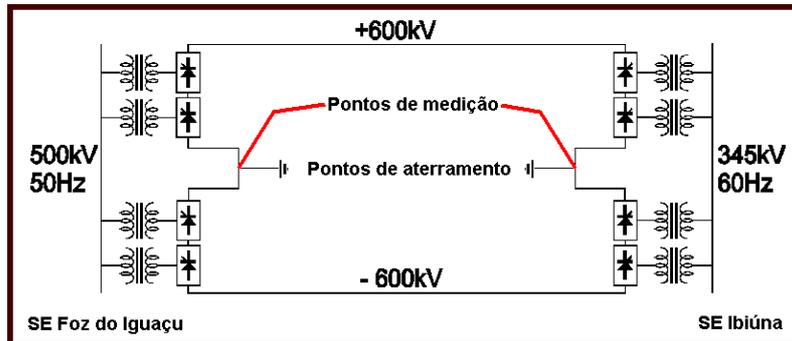


Figura 2: Esquema simplificado do Sistema de Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) de FURNAS com indicação dos pontos de medição necessários às investigações deste artigo.

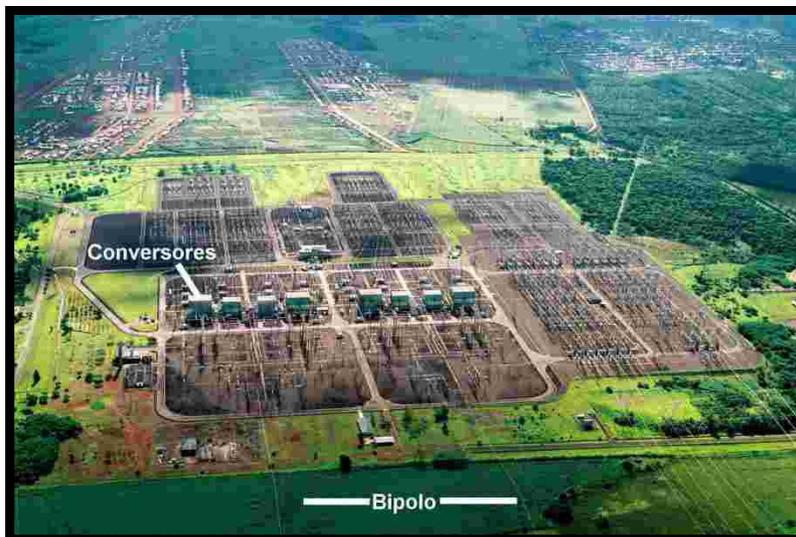
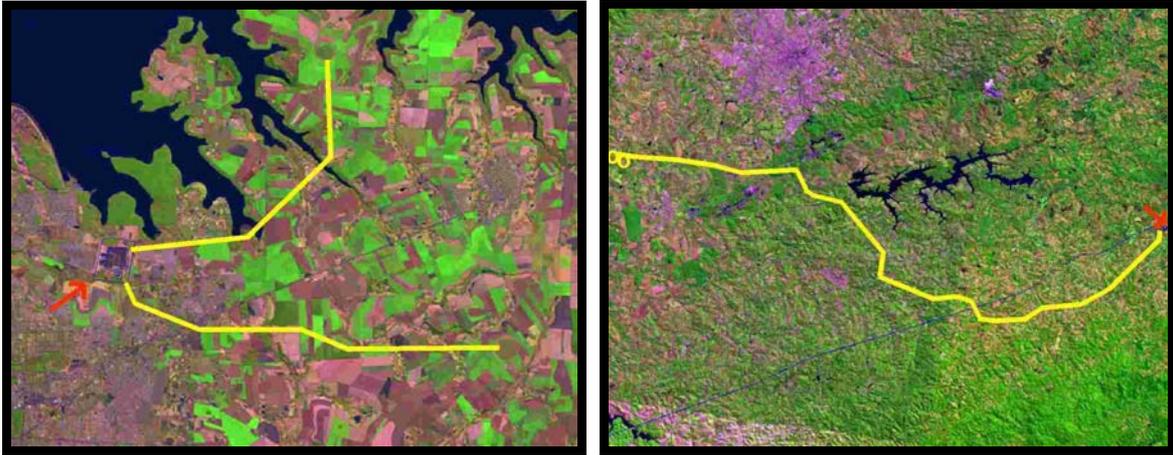


Figura 3: Visão geral do CCAT (SE Foz do Iguaçu – Autor: Arquivo Furnas).



Figura 4: Saídas das linhas dos eletrodos de aterramento do CCAT da SE Ibiúna.



Figuras 5 e 6: Trajetos das linhas dos eletrodos de aterramento das SEs (setas).  
 Foz do Iguaçu (Lat: -25.467, Long: -54.546, escala 1:75.000).  
 Ibiúna ((Lat: -23.665, Long: -47.101, escala 1:200.000).

#### 4.0 - CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DAS REGIÕES DAS LINHAS DOS ELETRODOS

O sistema CCAT de FURNAS localiza-se em regiões com características climáticas associadas a grande ocorrência de descargas atmosféricas, o que justifica a implementação da técnica de detecção proposta neste artigo.

Na Região Sul, onde está localizada a SE Foz do Iguaçu, tem-se as frentes frias e outros sistemas meteorológicos associados a eventos de precipitações intensas, fortes rajadas de vento e até tornados. As chuvas, em quase toda a região, distribuem-se com relativa regularidade pelo ano inteiro, o que se deve principalmente aos sistemas frontais que se deslocam pelo sul do país durante a maior parte do ano.

As linhas de instabilidade pré-frontais também provocam intensa precipitação. Estas linhas se formam principalmente no verão, na vanguarda de uma frente fria devido ao forte aquecimento que estas regiões estão submetidas. Estes aglomerados se desenvolvem rapidamente, geralmente provocando descargas atmosféricas, pancadas de chuva e rajadas de vento.

Já na Região Sudeste, onde localiza-se a SE Ibiúna, o clima é bastante diversificado no que diz respeito à temperatura, em função de três fatores principais: a posição latitudinal, a topografia acidentada e a influência dos sistemas sinóticos. Corresponde a uma faixa de transição entre climas quentes das baixas latitudes e os climas mesotérmicos das latitudes médias, mas suas características mais fortes são de clima tropical.

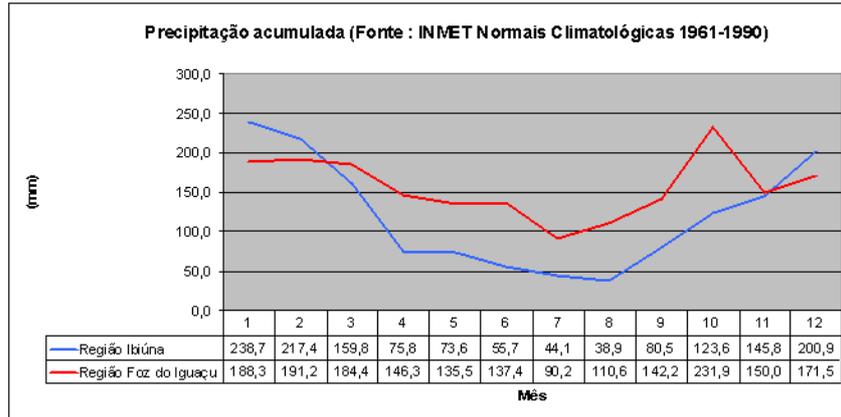
Além das frentes frias e dos sistemas convectivos, uma faixa de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste que se estende desde o oeste da Amazônia até o litoral sudeste do Brasil é observada nesta região. Essa banda de nebulosidade é denominada Zona de Convergência do Atlântico Sul, sendo um dos mais importantes fenômenos na escala intrasazonal que ocorre durante o verão na América Sul e responsável por uma fração considerável da precipitação na Região Sudeste.

Na tabela 1, são apresentados os valores médios para precipitação acumulada mensal. Foram escolhidas as estações meteorológicas de Foz do Iguaçu, em 25°33 S de latitude e 54°34 W de longitude e de São Paulo, em 23°30 S de latitude e 46°37 W de longitude, por serem estas as mais próximas das subestações de Foz do Iguaçu (PR) e Ibiúna (SP), respectivamente [2].

A precipitação média próxima à SE Ibiúna apresenta os maiores valores nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e os menores valores em junho, julho e agosto caracterizando, respectivamente, a estação chuvosa de verão e seca de inverno da região. Os meses de outono e da primavera representam as estações de transição entre o período chuvoso e seco.

Em Foz do Iguaçu o comportamento da precipitação média não apresenta um padrão muito bem definido como próximo à Ibiúna. Nesta região, a diferença entre os valores da precipitação média de um mês para o outro não é muito acentuada, o que dificulta a definição das estações chuvosa, seca e as de transição. O maior valor de precipitação acumulada mensal média é observado no mês de outubro enquanto o menor valor é registrado no mês de julho.

Tabela 1: Precipitação acumulada nas regiões próximas à Ibiúna e Foz do Iguaçu.



Nas figuras 7 e 8 pode-se observar as características regionais de descargas atmosféricas nas regiões das SEs de Ibiúna e Foz do Iguaçu. Esse levantamento foi realizado a partir dos dados da RINDAT e está de acordo com as características climáticas de ambas as regiões. Fica claro aí o grande potencial de coleta de dados ao longo das linhas.



Figura 7: Densidade de descargas atmosféricas (strokes) na região das linhas dos eletrodos de aterramento da SE Foz do Iguaçu.

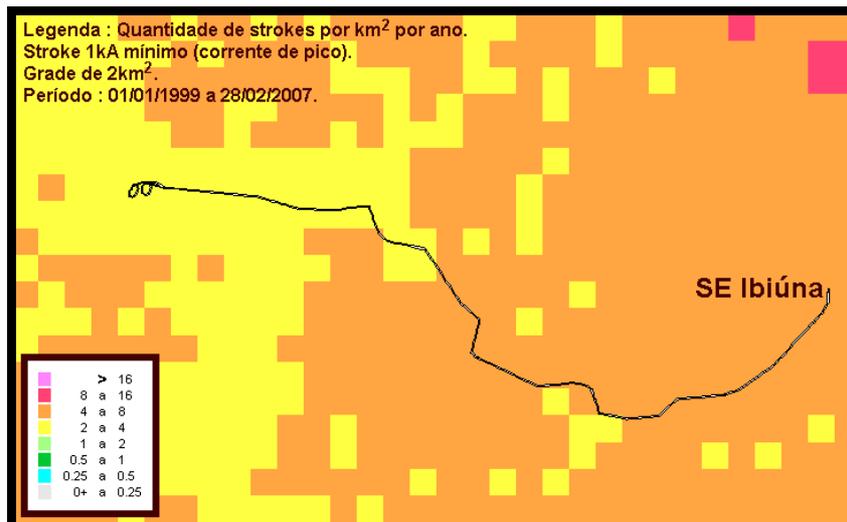


Figura 8: Densidade de descargas atmosféricas (strokes) na região das linhas dos eletrodos de aterramento da SE Ibiúna.

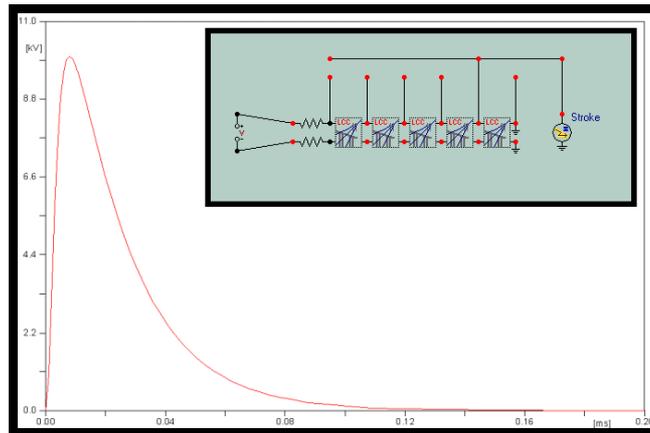
## 5.0 - DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS POR REFLETOMETRIA

Uma descarga atmosférica incidente na linha do eletrodo do sistema CCAT geraria duas frentes de onda eletromagnética em ambas as direções da linha, sendo que a primeira trafegaria diretamente para o registrador situado na subestação e a segunda, a partir de uma reflexão na extremidade aterrada do eletrodo, inverteria sua polaridade e trafegaria de volta na direção do registrador. As polaridades e a diferença entre os tempos de chegada das ondas impulsivas são informações suficientes para uma estimativa precisa da localização de incidência da descarga. Como a linha está georreferenciada, sabe-se com precisão a localização do percurso. Uma campanha de coleta de dados bem sucedida poderia fornecer eventos suficientes para verificação dos erros de localização de descargas incidentes na região considerada, os quais são inerentes aos dados das redes de detecção, como a RINDAT por exemplo.

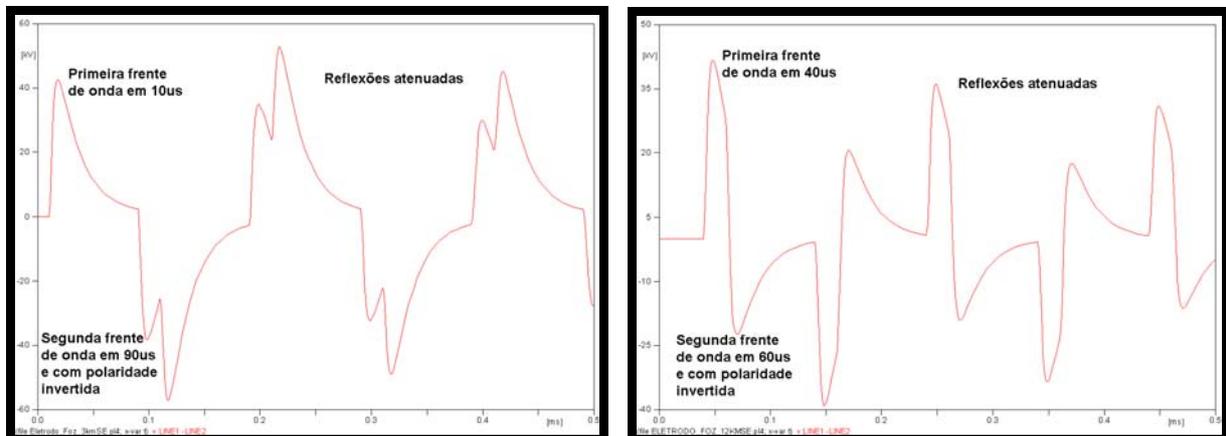
Nas figuras 9 e 10 pode-se ver a simulação computacional da linha do eletrodo usando-se o software ATP. O circuito procurou representar as características básicas de uma das linhas da SE de Foz do Iguaçu, com comprimento de 15km, dividida em trechos de 3km para facilitar a visualização dos resultados. Cada trecho impõe um retardo de  $10\mu\text{s}$  no deslocamento da onda trafegante, como pode ser observado nas figuras 11 e 12. O eletrodo, pelo fato de estar aterrado, inverte a polaridade da onda refletida conforme descrito no parágrafo anterior.

Como há pára-raios distribuídos ao longo da linha, empregou-se um impulso de corrente de entrada com valor de pico de 200 A com forma de onda  $8 \times 20\mu\text{s}$  (figura 9). Este é um valor próximo do limite para atuação dos pára-raios de linha. Para exemplificação, este impulso foi injetado a 3km e a 12km da extremidade do registrador (voltímetro na figura 10), e os impulsos trafegantes resultantes observados na extremidade do registrador são mostrados nas figuras 11 e 12.

Na atuação dos pára-raios de linha, parte da corrente impulsiva é drenada para o solo e parte da corrente é conduzida pela linha do eletrodo, de forma que ocorrerão deformações nas ondas trafegantes. Será necessário então o desenvolvimento de um critério de avaliação dos tempos de chegada para determinação precisa da localização da incidência.



Figuras 9 e 10: Circuito para exemplificação da técnica proposta e onda simulando descarga atmosférica.



Figuras 11 e 12: Exemplos de simulação com onda inserida à 3km e 12km da SE Foz do Iguaçu.

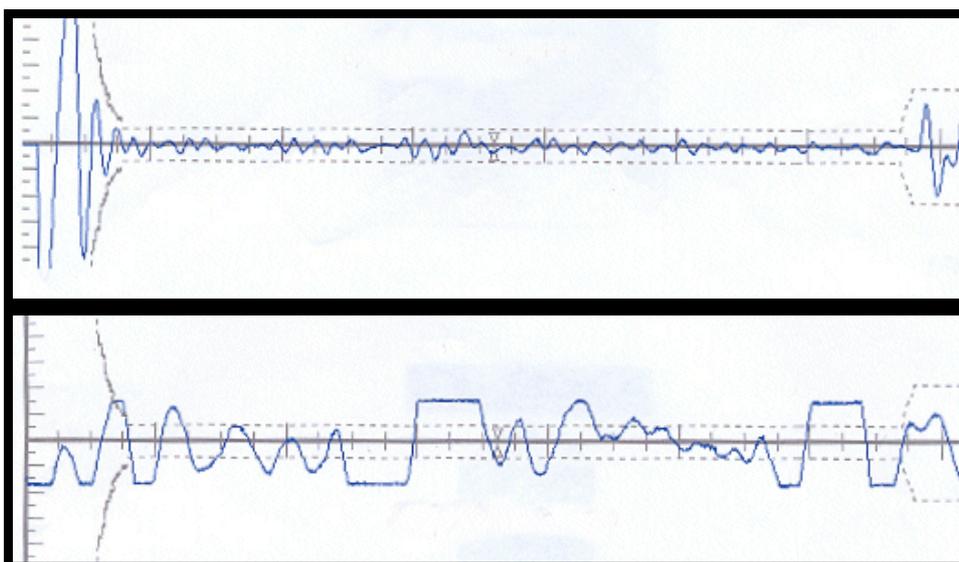
## 6.0 - COLETA DE DADOS

A coleta de dados e sua interpretação não serão triviais. Os impulsos eletromagnéticos que percorrem a linha após a incidência de uma descarga não são tão bem comportados quanto as simulações computacionais e estão sobrepostos aos ruídos presentes no meio. A extração dos sinais de interesse pode ser extremamente difícil, porém as investigações preliminares são encorajadoras.

Por questões de segurança, as linhas dos eletrodos de aterramento do sistema CCAT de FURNAS possuem monitoração, a qual é realizada por instrumentos especiais (figura 13) desenvolvidos por FURNAS e em processo de patente e que poderiam, com poucas modificações, coletar os dados de descargas atmosféricas (figuras 14 e 15). Essa linha de ação é perfeitamente realizável pois FURNAS detém todo o *know-how* técnico necessário.



Figura 13: Instrumentação instalada nas linhas dos eletrodos de aterramento.



Figuras 14 e 15: Registro de operação normal (acima) e com ocorrência de descarga atmosférica (abaixo) no sistema de monitoração de uma das linhas dos eletrodos de aterramento.

## 7.0 - CONCLUSÕES

A comunidade científica e os usuários de redes de detecção como a RINDAT necessitam de sistemas de detecção de descargas com erros de localização menores, i.e., dados mais precisos sobre a localização de incidência de descargas. Necessitam também conhecer a magnitude desses erros com maior precisão de forma a poderem avaliar a qualidade e a aplicabilidade dos dados coletados.

O sistema CCAT de FURNAS apresenta características construtivas que encorajam a tentativa de coleta de dados de descargas atmosféricas por técnica de refletometria. Além disso, as linhas transpassam regiões com grande índice cerâmico, dando embasamento estatístico para o experimento.

Por questões de segurança, atualmente as linhas são monitoradas por uma instrumentação específica, desenvolvida inteiramente por FURNAS, que possui as características básicas necessárias para implementação da idéia aqui apresentada o que tornaria a sua execução viável econômica e tecnicamente.

Caso a idéia se mostre funcional, FURNAS poderá proporcionar grande volume de dados para investigação sobre os erros de localização de redes de detecção como a RINDAT na região considerada. Porém, as informações referentes à amplitude das descargas, em uma primeira análise, não poderão ser obtidas, uma vez que a linha foi projetada para drenar localmente a corrente de descarga para o solo, comprometendo fortemente sua assinatura.

A coleta de dados através de torres especialmente instrumentadas (de telecomunicações, por exemplo) continua sendo a linha principal de estudo desse tema. As investigações preliminares apresentadas neste artigo, relativas à proposta de detecção de descargas atmosféricas por refletometria, objetivam contribuir de forma complementar nesta Área.

## 8.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Divisão de Hidrologia de FURNAS pelas informações sobre as características climáticas das regiões das linhas dos eletrodos e à Assessoria de Planejamento da Informação de FURNAS e à Coordenação de Comunicação Social de FURNAS pelas imagens fornecidas.

## 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Endereço eletrônico, RINDAT, 2006: <http://www.rindat.com.br>.
- [2] INMET. Normais Climatológicas 1961-1990, Instituto Nacional de Meteorologia, 1a ed., 1992.
- [3] Pinto Jr., O: "A Arte da Guerra contra os Raios", Ed. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2005, Pg.: 56.
- [4] Portela, C. M.; Alvim, M. G.; Nobrega, A.R.: "The Importance of Reliable Measurements of Lightning Currents to Electric Power Companies", Proceedings 19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference, 2006, Tucson, Arizona, EUA. v. 1. p. 1-9.
- [5] Nobrega, A. R.; Soares, A. P.; Girardi, A. S.; Oliveira, J. R.: "Data Survey of Lightning Incidence on Telecommunication Stations and Correlation to RINDAT Data", International Conference on Grounding and Earthing (GROUND2004), Belo Horizonte, Brasil, Novembro 7-11, 2004.