



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Sistema de monitoramento de descargas atmosféricas para o estado do Ceará

<b>Carlos A. Morales</b>	<b>Francisco Sales</b>	<b>Fco. Geraldo Pinheiro</b>	<b>Keyla S. Câmara</b>
<b>Universidade de São Paulo - USP</b>	<b>Universidade Estadual do Ceará -UECE</b>	<b>Universidade Estadual do Ceará - UECE</b>	<b>Companhia Energética do Ceará - COELCE</b>
morales@model.iag.usp.br	fsales@uece.br	fgmpinheiro@uece.br	keyla@coelce.com.br

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Descargas Atmosféricas;  
Relâmpagos;  
Sistema de Detecção de Relâmpagos;

#### **RESUMO**

Este artigo apresenta o estágio atual do sistema de monitoramento de descargas atmosféricas para o estado do Ceará que conta com uma rede de detecção de raios e um sistema de probabilidade de tempestades com o objetivo de auxiliar as operações da Companhia de Energética do Ceará (COELCE) bem como a implementação de nova infra-estrutura. O sistema de monitoramento de relâmpagos a longa distância ZEUS foi implementado no Brasil em 2006, a partir de um projeto de P&D da Companhia Energética do Ceará (COELCE) com as Universidades estaduais do Ceará (UECE) e São Paulo (USP). Já o sistema de probabilidade de tempestades disponibiliza mapas com as possíveis regiões com incidência de raios a partir das imagens do satélite GOES disponíveis a cada 30 minutos. Adicionalmente, mapas com a distribuição horária, mensal e anual estão disponíveis a uma escala de 100 km<sup>2</sup>. A partir da nova configuração de sensores no Brasil, a rede ZEUS está medindo continuamente as descargas atmosféricas sobre a América do Sul e Norte, oceano Atlântico e África, em especial para regiões a norte de 20°S.

#### **1. INTRODUÇÃO**

O monitoramento de tempestades tem sido amplamente utilizado por companhias de energia elétrica, centros de meteorologia e a comunidade científica. As descargas atmosféricas emitem campos de radiação durante os processos de quebra da rigidez dielétrica do ar e a ionização e são observados nas faixas de frequência de VLF, LF, ELF e VHF, [1]. As descargas do tipo nuvem terra (NS) são basicamente observadas na faixa de frequência de VLF, LF e ELF enquanto que as descargas do tipo nuvem-nuvem (NN) ou intra-nuvem (IN) dominam espectro de VHF. Esta dependência de frequência limita a cobertura de monitoramento de descargas atmosféricas bem como o tipo de relâmpago, a acurácia de localização e a eficiência de detecção.

No Brasil, a rede nacional de detecção de descargas atmosféricas (RINDAT) opera desde 2004, 25 sensores IMPACT/LPATS, [2]. Estas antenas foram instaladas em 7 estados brasileiros situados no centro, sul e sudeste do Brasil. De acordo com Cummins [3] a RINDAT tem uma eficiência de detecção de flashes de 80-90% e uma acurácia de localização de 0.5-2 km dentro da área de cobertura das antenas.

No primeiro semestre de 2006, a rede de monitoramento de relâmpagos a longa distância –ZEUS tinha 11 antenas instaladas na Europa (7) e África (4), [4], e foi atualizada com mais 3 antenas

[<http://www.zeus.iag.usp.br>]. Duas antenas foram instaladas em Fortaleza (Ceará) e Cachoeira Paulista (São Paulo) e a terceira foi instalada em Guadeloupe no Caribe, Figura 1. Finalmente, em Setembro de 2007, a antena da Nigéria foi deslocada e instalada em Campo Grande (MS). As duas primeiras antenas instaladas no Brasil fazem parte de um projeto de P&D de parceria com a COELCE e as universidades UECE e USP, enquanto que a terceira antena faz parte de um acordo entre a Universidade de Connecticut e a USP. Através desta nova configuração da rede ZEUS espera-se obter uma melhor eficiência de detecção e a acurácia de localização de raios a América do Sul, como será discutido a seguir.



Figura 1 - Localização dos detectores de relâmpagos da rede ZEUS.

Este trabalho pretende apresentar os novos resultados obtidos com a rede ZEUS a partir do segundo semestre de 2006 e o sistema de monitoramento de raios desenvolvido para a COELCE. Sendo que este sistema visa auxiliar na manutenção e prevenção das linhas de transmissão da COELCE bem como um melhor planejamento da infra-estrutura da rede. O artigo encontra-se organizado da seguinte forma: Revisão do sistema ZEUS seguido dos resultados da eficiência de detecção e erros de localização, resultados preliminares e finalmente é apresentado o sistema de visualização de relâmpagos desenvolvido para a COELCE.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Rede de Monitoramento de Relâmpagos a Longa Distância - ZEUS

O sistema ZEUS consiste de uma rede de 11 receptores de frequência muito baixa (VLF) que medem o ruído de rádio emitido por descargas atmosféricas na faixa de frequência de 7-15 kHz. A rede ZEUS foi desenvolvida pela Resolution Displays Inc, e está situada nas seguintes localidades: Birmingham [Inglaterra], Roskilde [Dinamarca], Iasi [Romênia], Larnaka [Chipre], Evora [Portugal], Addis Ababa [Etiópia], Dar e Salaam [Tanzânia], Bethlehem [África do Sul], Guadeloupe [Caribe], Campo Grande, Fortaleza e São Paulo [Brasil], Figura 1.

A implementação dos sensores Europeus foi finalizada em Junho de 2001 ([4]), enquanto que os receptores da África foram instalados em Julho de 2003. Mais tarde em Maio de 2006, os sensores do Brasil e Guadeloupe foram instalados. O receptor de Guadeloupe foi financiado pela Universidade de Nevada em Las Vegas (EUA) enquanto que os Brasileiros foram adquiridos a partir da parceria com a COELCE/Universidade Estadual do Ceará e Universidade de São Paulo. Finalmente, o sensor instalado previamente na Nigéria foi transferido para Campo Grande em Setembro de 2007. A presente configuração da rede ZEUS permite monitorar a atividade de relâmpagos de forma contínua sobre a Europa, África, Américas e oceano Atlântico. Os leitores mais interessados podem acessar o portal da rede ZEUS [<http://www.zeus.iag.usp.br>] para maiores informações bem como visualizar os dados em tempo real e série histórica.

Tipicamente um relâmpago nuvem-terra irradia energia eletromagnética que pode se propagar ao longo da superfície terrestre (onda de chão) e ou a partir de múltiplas reflexões entre a superfície terrestre e a parte mais baixa da ionosfera (camada D) (ondas de céu). Cada detector do sistema ZEUS mede continuamente o campo elétrico vertical proveniente das ondas de céu que está sincronizado com o relógio do GPS a uma resolução de 1 micro-segundo. A localização dos sferics é obtida a partir da técnica conhecida como diferença do tempo de chegada (ATD) desenvolvida por Lee [5].

Basicamente as ATDs são calculadas através da maximização da correlação temporal das formas de onda extraídas de cada par de sensores. As ATDs medidas definem hiperbolas que representam possíveis posições de relâmpagos com a mesma diferença de tempo de chegada. Combinando as hiperbolas de todos os pares de ATDs é possível identificar um ponto comum de intersecção, o qual define a localização de uma descarga atmosférica. A solução inversa para a localização de um ponto a partir das hiperbolas pode ser feito a partir da minimização da seguinte função de erro [5].

$$\chi^2 = \sum_{p=1}^{15} \left\{ \frac{1}{\sigma_p^2} \left( ATD_p^{Medido} - ATD_p^{Simulado}(V, u) \right)^2 \right\} \quad (1)$$

onde “p” significa o índice dos pares das ATDs, “Medidos” representa as ATDs extraídas pelo sistema ZEUS, e “Simulado” indica os valores de ATDs teóricos que são calculados a partir considerações sobre o caminho percorrido pelo sinal eletromagnético para cada sensor (v). Sendo que estes cálculos levam em consideração a altura da ionosfera, a velocidade de grupo (V) ao longo caminho e diferentes superfícies (continente e oceano).

Finalmente a variável  $\sigma^2$  representa variância medida pelo sensor ou valores teóricos para cada par de ATDs. Este erro é basicamente correlacionado com as especificações técnicas de cada sensor que é sensível a ruídos não naturais e à resolução temporal.

O software operacional de localização da rede ZEUS permite a utilização máxima de 7 sensores, o que representa 21 pares de ATDs. Entretanto, o algoritmo permite a configuração de soluções por continentes, que no caso da rede ZEUS é de 3, ou seja, Europeu, Africano e Americano. Se durante o processo de localização mais de 7 sensores estão disponíveis, o algoritmo calcula a solução que tenha o menor erro residual, eq. 1.

No presente momento, o sistema ZEUS para o continente Americano está configurado para operar com 7 estações de VLF (África do Sul, Tanzânia, Etiópia, Guadalupe, Campo Grande, Fortaleza e São Paulo) os quais se espera melhor representar os relâmpagos observados nos continentes Americano e Africano.

## 2.2. *Errors de Localização e Eficiência de Detecção*

Os erros esperados de localização são calculados a partir de simulações de Monte-Carlo assumindo a presente configuração de 7 sensores, conforme a metodologia descrita por Morales [6]. Nesta simulação, assume-se que as ATDs tem um erro aleatório de 20  $\mu$ s devido ao processamento do sinal, ruído devido a atenuação do sinal e acurácia do tempo do GPS. Na Figura 2a é apresentado o erro de localização esperado sobre a América do Sul e África. Pode-se notar que na maior parte do Brasil o erro esperado é inferior a 5 km e aumenta para 10-20 km no resto da América do Sul e oceano Atlântico. Estes resultados indicam que este tipo de sistema de monitoramento é capaz de detectar as tempestades que se formam no Brasil ou ainda as que se propagam para ele.

Adicionalmente, foi utilizado o modelo de eficiência de detecção (DE) desenvolvido por [6] que leva em consideração os efeitos de propagação sobre o dia e noite, diferentes superfícies (continente/oceano) e direção de propagação (leste-oeste, oeste-leste, norte-sul e sul-norte). Este modelo foi validado com a rede nacional de detecção de relâmpago (NLDN) dos EUA para o sistema STARNET, que foi o protótipo da rede ZEUS, e disponibiliza as variações do sinal do campo elétrico vertical em função da distância e da hora. A Figura 2b apresenta um simulação da DE da rede ZEUS assumindo os 7 receptores. Os resultados mostram que a maior parte da América do Sul apresenta uma DE de 80%, ou seja, é esperado que o sistema seja capaz de medir 80% das descargas elétricas do tipo nuvem-terra. Comparando-se com o a rede RINDAT, a qual está medindo sobre a região sul, sudeste e centro-oeste do Brasil, o sistema ZEUS representará em uma melhora no monitoramento das tempestades, pois estará medindo nas regiões aonde o sistema Brasileiro ainda possui uma baixa eficiência de detecção. Portanto, estes dados poderão ser integrados de forma a termos um melhor monitoramento de relâmpagos sobre o Brasil e América do Sul.

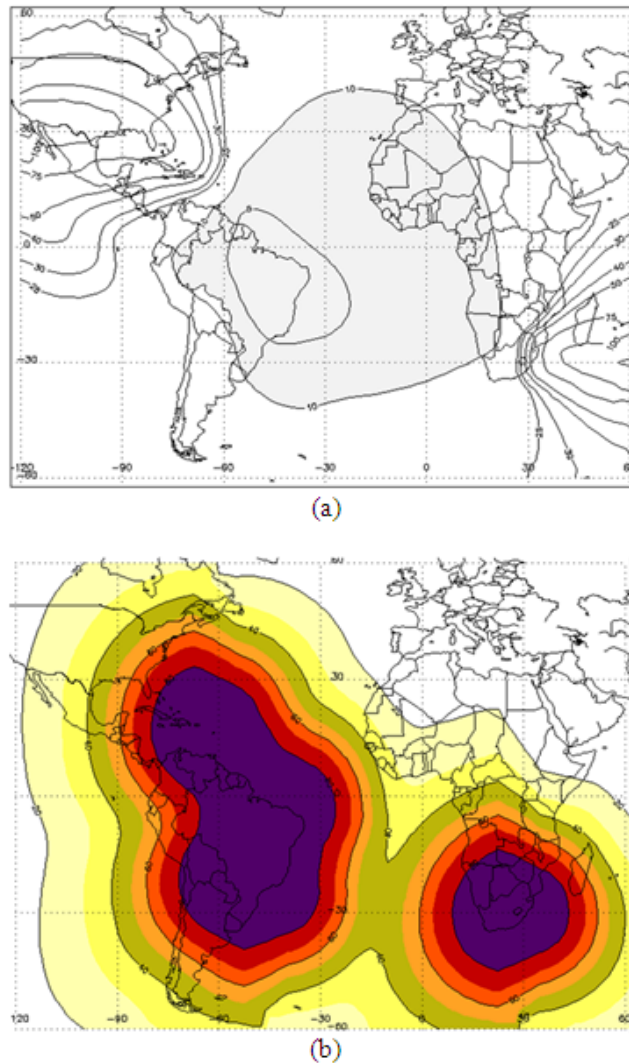


Figura 2 - (a)(topo), Erro de localização calculado basead em um erro aleatório das ATDs de 20  $\mu$ s; (b) (abaixo), eficiência de detecção calculada.

### 2.3. Resultados

Com a inclusão dos novos sensores (Guadeloupe, Fortaleza e São Paulo) em maio de 2006, a rede ZEUS começou a operar com todos as antenas integradas no final de Julho de 2006. Dessa maneira, desde este periodo a rede ZEUS vem coletando medidas de sferics em tempo real, porém ao final de cada mês um reprocessamento é realizado de forma a incluir as medidas que não estavam disponíveis em tempo real.

As Figura 3a e 3b apresentam as acumulações de sferics e flashes observadas pela rede ZEUS e pelo sensor LIS abordo do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) durante o periodo de Agosto a Novembro de 2006. Os resultados da rede ZEUS, Fig. 3a, estão de acordo com a eficiência de detecção calculada e representada pela Fig. 2b, ou seja, a maior parte das medidas se concentra na Africa do Oeste, America do Norte e Sul e áreas do mediterrâneo. Percebe-se ainda que os sensores de VLF são capazes de medir descargas atmosféricas a longas distâncias ( $> 5.000$  km). Comparando-se com as medidas do sensor LIS, Fig. 3b, nota-se que as observações da rede ZEUS são consistentes tanto em intensidade como em extensão, dentro da área aonde a eficiência de detecção é superior a 30%.

Durante este periodo, inverno e primavera, os principais sistemas convectivos foram observados na Africa oeste, norte da região Amazônica, America Central e no Caribe, como observados nas Fig. 3a e 3b. No início de Setembro de 2006, vários furacões foram observados no oceano Atlântico, que pode ser notado como acumulações isoladas próximas à zona de convergência intertropical (ZCIT), Caribe e golfo do México. Outra importante característica observada nestas figuras são os periodos de monção

da América Central e que a maior parte da atividade de relâmpagos encontra-se sobre o continente o que já foi observado por diversos pesquisadores.

Sobre a América do Sul temos que a região do norte encontra-se durante a estação seca. Entretanto, é neste período do ano que são observadas as maiores tempestades, e de acordo com a Figura 3 pode-se notar um aumento da atividade de relâmpagos na parte oeste da Amazônia, Colômbia, Venezuela e as Guianas. Pode-se notar também, mas em uma escala menor devido à baixa eficiência de detecção, os sistemas convectivos de meso-escala (SCM) sobre o norte da Argentina, Paraguai e sul do Brasil. Adicionalmente, com o mesmo efeito da eficiência de detecção nota-se a passagem das frentes sobre o Brasil.

Em Setembro de 2007, após a inclusão da antena em Campo Grande, as deficiências encontradas no ano de 2006 começam a ser solucionadas, Figura 4. Nas composições da Figura 4 são apresentadas as acumulações de raios observados durante os meses de Dezembro de 2007 e Janeiro de 2008. Observa-se a partir destes resultados um aumento significativo da frequência de raios, em especial as modulações sazonais observadas na região norte do Brasil (Amazônia) e América do Sul, bem como o oceano Atlântico. Outro ponto importante é a remoção da acumulação de raios na região do equador, o que se devia à configuração de sensores disponíveis naquela época que induziam em erros de localização.

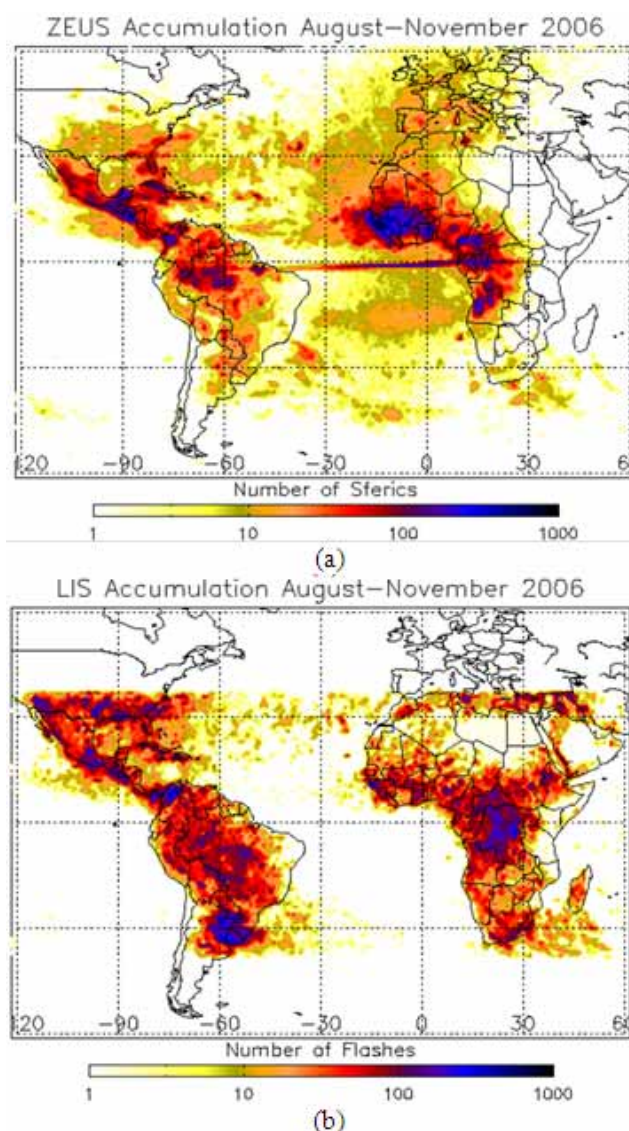


Figura 3 - (a) acumulação de sferics durante o período de Setembro a Novembro de 2006; (b) Acumulação de flash observados pelo Lightning Imaging Sensor para o mesmo período.

É importante ressaltar que a parte sul da América do Sul ( $< 20^{\circ}\text{S}$ ) ainda apresenta uma baixa eficiência de detecção devido, em parte devido ao número de sensores disponíveis (Brasil, Guadeloupe e África do Sul). Este problema está relacionado ao nível mínimo do sinal detectado por antenas

separadas a mais de 5 mil quilômetros de distância além da necessidade de pelo menos 4 sensores (a distância mínima entre um raio e o sensor tem que ser superior a 500 km de forma a não ter interferência entre ondas de céu e chão)

#### 2.4. Sistema de Aplicação de Raios

Uma vez que a rede ZEUS disponibiliza a posição e o tempo das descargas atmosféricas em tempo real, é possível identificar as cidades e municípios que estão sendo afetados por tempestades. Portanto é importante desenvolver uma ferramenta que utilize estas informações bem com um produto que identifique a extensão das tempestades. Baseado nesta idéia foi desenvolvido um aplicativo disponível no portal deste projeto de P&D, <http://www.zeus.iag.usp.br/coelce>, Figura 5, que disponibiliza em tempo real as informação de descargas atmosféricas e a probabilidade de ocorrência de raios sobre as nuvens. Além das informações em tempo real, pode-se obter todas a série histórica a partir dos menus disponíveis. O produto de probabilidade de raios é baseado na metodologia desenvolvida por Lima [7], que utiliza as imagens do satélite GOES-12.

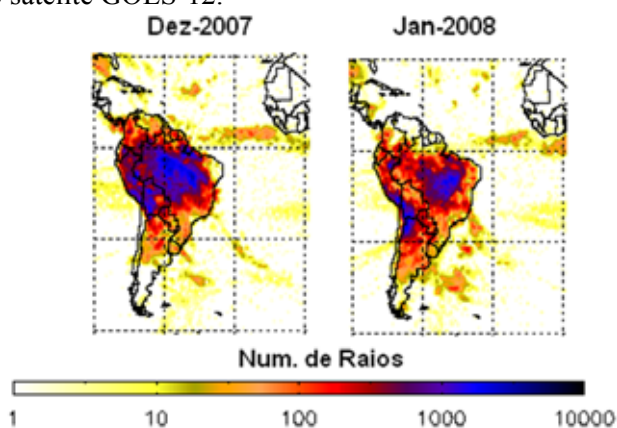


Figura 4 - Acumalação de sferics durante os meses de Dezembro de 2007 e Janeiro de 2008.

O portal do projeto foi desenvolvido de forma que os usuário possam selecionar as imagens e obter uma ampliação da mesma. Por exemplo nas Figuras 6 e 7 são apresentados as ampliações das figuras de medidas de raios e probabilidade de raios. Neste exemplo, Fig. 6, existem alguns eventos sobre os estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte e Paraíba. Dependendo da densidade de raios, um sistema de alerta é ativado e fica indicado no menu do lado direito, o qual indicará a intensidade e o município afetado. Na Fig. 7 observa-se a extensão das tempestades que podem afetar o estado do Ceará. Neste exemplo temos que a maioria das tempestades encontra-se sobre o oceano Atlântico e com baixa probabilidade de raios.

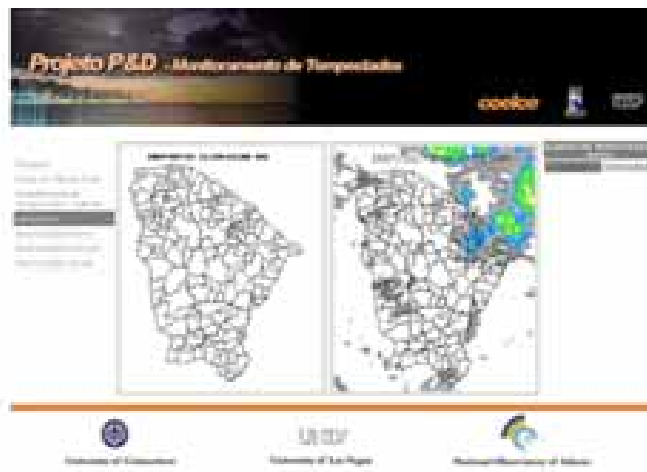


Figura 5 - Portal principal do projeto de P&D da COELCE. O portal é atualizado a cada 10 minutos (raios) e 30 minutos (probabilidade de raios).

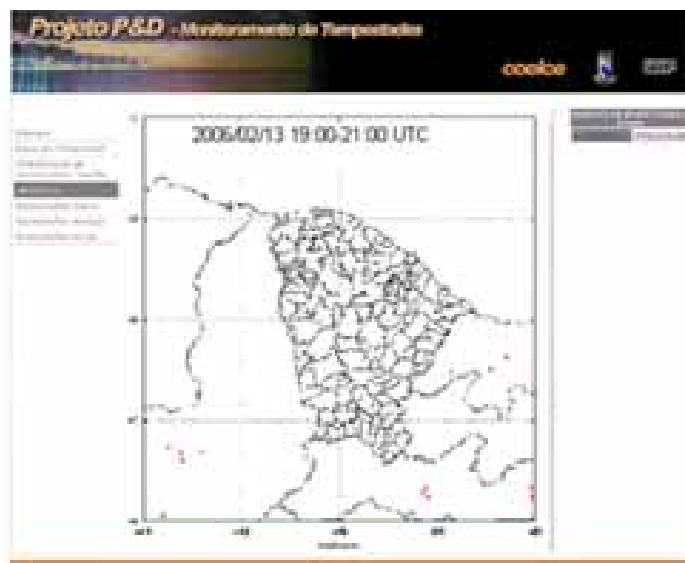


Figura 6 - Medidas em tempo real de sferics no Estado do Ceará.

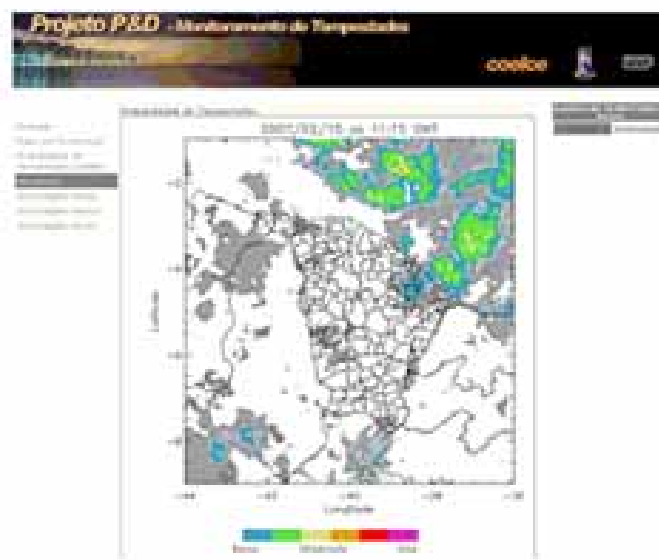


Figura 7 - Probabilidade de raios baseado nas imagens do infra-vermelho e vapor d'água do satélite GOES-12. As cores frias significam baixa probabilidade e as quentes alta probabilidade. A escala de cinza representa a nuvem que não tem probabilidade de raios.

Nas Figura 8a-c são apresentados as distribuições de raios mensais disponíveis no portal para os meses de Novembro e Dezembro de 2007 e Janeiro de 2008. Nestes exemplos pode-se notar que existe um baixa frequência de raios sobre o estado do Ceará, porém estas descargas atmosféricas encontram-se próximas das linhas de transmissão da COELCE, o que pode comprometer a funcionabilidade do sistema.

### **3. CONCLUSÕES**

Este artigo apresentou os resultados preliminares da rede de monitoramento de relâmpagos a longa distância – ZEUS, bem como a sua aplicabilidade para o monitoramento de raios sobre o estado do Ceará, em especial para a COELCE.

Testes teóricos foram conduzidos de forma a calcularmos o erro esperado de localização e a eficiência de detecção de raios nuvem-terra. Neste estudo encontrou-se que os erros previstos de localização são entre 5-10 km sobre o Brasil e aumentando para mais de 20 km para a América do Sul. Já as análise de eficiência de detecção apontam para uma detecção de 70% sobre a maior parte da América do Sul, oceano Atlântico e África do Oeste.

As comparações dos dados da rede ZEUS com os observados pelo LIS durante o período de Agosto à Novembro de 2006, indicam que a rede ZEUS é capaz de observar as tempestades sobre a América Central e do Sul, Golfo do Mexico, Oceano Atlântico e África do oeste. Entretanto vale ressaltar que no sul da América do Sul e África do Leste, não existe um adequado monitoramento, o que é previsto no modelo de eficiência de detecção. Este efeito consite basicamente da disponibilidade de sensores naquelas regiões o que poderia viabilizar a melhora da detecção. Um grande esforço está sendo realizado com o intuito de se instalar mais dois sensores no Brasil e assim melhorar a performance desta rede. A partir da instalação de mais uma antena no Brasil em Setembro de 2007 (Campo Grande), observou-se uma grande melhora na eficiência de detecção e na acurácia das medidas.



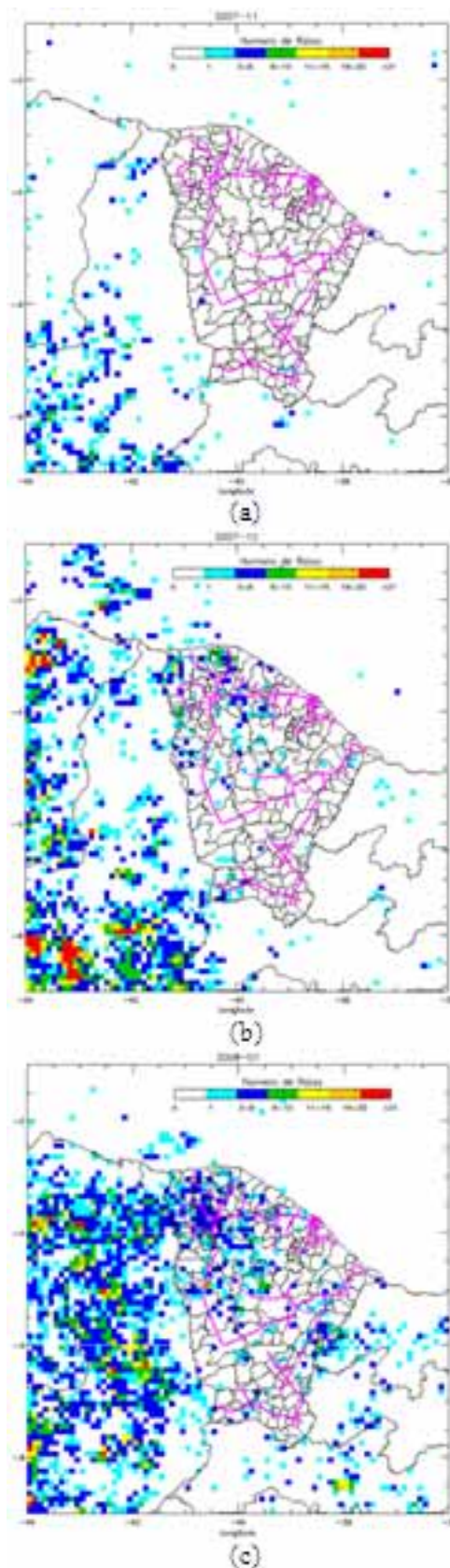


Figura 8 - Distribuição de raios mensal sobre o estado do Ceará para os meses de Novembro (a) e Dezembro (b) de 2007 e Janeiro (c) de 2008.

Finalmente, foi apresentado um sistema aplicativo de raios para o COELCE que é uma ferramenta útil para as companhias de energia elétrica que necessitam identificar a posição dos relâmpagos e a extensão das tempestades. Dessa maneira, as companhias de eletricidade podem configurar as equipes

de manutenção e prevenir as quedas súbitas de energia ou mesmo acelerar o restabelecimento de energia. Adicionalmente, mapas de climatológicos e acumulações da frequência de raios sobre a região de interesse são produzidos automaticamente, o que permitirá um melhor planejamento da infra-estrutura existente ou a sua respectiva adequação.

#### **4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E/OU BIBLIOGRAFIA**

- [1] Pierce, E.T., 1977: Atmospheric and radio noise, in lightning, vol. 1, Physics of Lightning, R.H. Golden, 351-384.
- [2] Pinto Jr., O., Pinto, I.R.C.A., Naccarato, K.P., Saba, M.M.F., Cazetta Filho, A., Garcia, S.,R., Beneti, C., 2004: Brazilian integrated lightning detection network – RINDAT, 18th International Lightning Detection Conference, Helsinki, Finland, CDROM..
- [3]- Cummins, K.L., M. Murphy, E. Bardo, W. Hiscox, R. Pyle, and A. Pifer, 1998a: A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network, J. Geophys. Res., 103, 9035-9044.
- [4] Anagnostou, E.N., T. Chronis, and D.P. Lalas, 2002: New Receiver Network Advances Long-Range Lightning Monitoring. *EOS-Transactions*, Vol. 83, No. 50, Pages 589, 594-595.
- [5] Lee, A.C.L., 1986: An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique, Quart. J. R. Met. Soc., 112, 203-229.
- [6] Morales, C. A., 2001: A Long-Range VLF Receiver Network to Continuously Monitor Thunderstorms: Experimental Calibration and Validation: Part I of Ph.D. thesis.
- [7] Lima, W.F.A., Machado, L.A.T., Morales, C.A., Pinto Jr., O.: Estimativa de probabilidade de ocorrência de relâmpagos, XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia: A Meteorologia a Serviço da Sociedade, Florianópolis – SC, 27.11 – 01.12.2006, CD-ROM.