



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

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO GOP**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GOP**

**SISTEMA DE PREVISÃO PROBABILÍSTICA ESPACIAL DE EVENTOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SUA APLICAÇÃO NA VIGILÂNCIA METEOROLÓGICA DO SISTEMA ELÉTRICO**

**Eduardo Alvim Leite(\*)  
SIMEPAR**

**Adriel Yoshio Igarashi  
SIMEPAR**

**Marco Antonio Jusevicius  
SIMEPAR**

**RESUMO**

O informe descreve as características conceituais e operacionais de um sistema de monitoramento e previsão de descargas atmosféricas, denominado SIPPER Espacial. O sistema, de enforque probabilístico, gera mapas de alta resolução espacial e alta frequência de atualização temporal da evolução e severidade das tempestades elétricas. Ele também gera alertas de ocorrência de descargas para objetos específicos cadastrados, como linhas de transmissão. A aplicação do sistema na vigilância meteorológica do linhão de Itaipu é discutida, bem como são apresentados os desafios para tornar o SIPPER ferramenta especializada na “gestão de risco” associado ao problema das descargas atmosféricas na transmissão de energia.

**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas Atmosféricas, Alerta Meteorológico, Linhas de Transmissão

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Descargas atmosféricas se constituem em importantes causadores de perturbações nos sistemas de transmissão de energia. Essas perturbações, derivadas principalmente da incidência direta das descargas sobre as linhas de transmissão, podem afetar o funcionamento do sistema elétrico, alterando suas condições nominais de operação e provocando falhas, desligamentos, variações de tensão e introdução de transientes no sistema de transmissão de energia [1] [2]. Segundo dados do *National Lightning Safety Institute*, entidade americana dedicada à pesquisa e consultoria na área de proteção contra descargas atmosféricas, a infra-estrutura elétrica é fortemente impactada por esses eventos, que provocam cerca de 30% dos desligamentos de energia e prejuízos no setor, avaliados somente para os EUA em mais de US\$ 1 bilhão / ano.

O risco de ocorrência de falhas é resultado da composição entre a ameaça representada pelas descargas, principalmente caracterizada por suas localizações, magnitudes e durações de suas correntes, bem como pela vulnerabilidade da linha, onde realçam suas características construtivas e de isolamento e seu nível de carregamento [2]. As incertezas presentes no monitoramento e previsão de descargas atmosféricas, bem como na resposta em termos de desempenho das linhas de transmissão, relacionadas às imprecisões de equipamentos, carência de dados e simplificações de modelos, impedem um conhecimento determinístico da incidência das descargas e de sua consequência em termos de perturbações elétricas [3] [4]. A presença dessas múltiplas incertezas motivou o interesse e desenvolvimento de modelos probabilísticos de monitoramento, previsão e análise de impactos para o problema em questão.

O informe técnico apresenta um sistema de monitoramento e previsão probabilística espacial de eventos de descargas atmosféricas, denominado SIPPER Espacial, descreve suas características conceituais e operacionais e relata a experiência da aplicação de suas previsões no alerta de ocorrência de tempestades elétricas para

(\*) Centro Politécnico da UFPR – Caixa Postal 19100 – CEP 81531-980 – Curitiba – Paraná – Brasil  
Tel: (+55 41) 3320-2075 – Fax: (+55 41) 3366-2122 – Email: alvim@simepar.br

vigilância meteorológica do linhão de Itaipu, nos estados do Paraná e São Paulo.

O projeto do SIPPER Espacial se insere em um programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico em curso no SIMEPAR desde 2005, que visa construir sistemas de suporte à decisão em situações envolvendo riscos devido à ocorrência de descargas atmosféricas [5] [6]. Essas situações envolvem aplicações nos setores elétrico (sistemas de transmissão e distribuição de energia), industrial (sítios sujeitos a acidentes com raios) e aeronáutico (rotas aéreas e terminais). A perspectiva probabilística incorporada ao SIPPER é adequada e condizente com a aplicação de uma abordagem de “gestão de risco” ao problema de perturbações causadas pelas descargas atmosféricas no sistema de transmissão de energia [7] [8] [9].

## 2.0 - CARACTERÍSTICAS CONCEITUAIS DO SIPPER ESPACIAL

O SIPPER Espacial é um sistema de monitoramento e previsão probabilística de descargas atmosféricas, concebido para gerar mapas de alta resolução espacial (previsão em pontos a cada 2x2 km) e de alta frequência de atualização temporal (1/1 minuto), de determinada região de interesse, dentro da área de cobertura da Rede Nacional de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (RINDAT), que atualmente abrange a região sul e sudeste do país e parte de seu entorno.

Para caracterizar a distribuição esperada do número de descargas em determinada área, foram selecionadas duas variáveis representativas da mesma, que são mostradas na forma de mapas gerados pelo SIPPER. Essas variáveis expressam informações da evolução e severidade das tempestades elétricas, referem-se a uma quadricula de 10x10 km no entorno de cada ponto de previsão e possuem validade de uma hora à frente. Elas são as seguintes:

- (1) Probabilidade de incidência de descargas atmosféricas (*PROB*);
- (2) Número esperado de raios (*NER*).

Além de disponibilização desses mapas sistematicamente atualizados, o SIPPER agrega a capacidade de monitorar áreas geográficas específicas construídas na forma de polígonos. Assim, para cada polígono cadastrado e em cada tempo de atualização, o SIPPER monitora as descargas incidentes na última hora, em termos de quantidade e magnitude do pico de corrente, bem como estima a probabilidade de incidência de descargas (*PROB*) e o número esperado de raios (*NER*) para a próxima hora.

### 2.1 Modelo preditivo utilizado pelo SIPPER

O sistema incorpora modelo preditivo baseado em técnicas de inteligência artificial, utilizando um tipo especial de rede neural denominada *Self-Organizing Maps* (SOM). O modelo SOM pertence ao grupo das redes neurais conhecidas por redes de Kohonen, e é formada por algoritmos estatísticos aplicáveis ao reconhecimento de padrões. Ela pode ser utilizada para reconhecer padrões de variáveis de diversas origens e características, desde que representadas por vetores *n*-dimensionais [10]. Outras redes neurais voltadas ao reconhecimento de padrões foram testadas, como as redes bayesianas e do tipo *Multi-Layer Perceptron*, mas apresentaram resultados inferiores a esse modelo de rede, dentro do problema e abordagem selecionados.

O modelo utiliza como preditores dados em tempo real relativos à incidência de descargas atmosféricas obtidos pela rede de sensores da RINDAT. São considerados no conjunto todas as descargas que incidiram na última hora, até uma distância de 100 km do ponto de referência, agrupadas por setores e tempos de acumulação de 10 minutos. Com a utilização da rede SOM, para cada ponto de referência, são gerados padrões de comportamento esperado das descargas no seu entorno e, posteriormente, em um processo de aprendizagem do tipo *fuzzy*, são associados probabilidades de incidência e número esperado de raios para cada padrão identificado pela rede. Nos períodos de geração de padrões e aprendizagem foram utilizados dados do período de 1996 a 2008, do histórico de incidência de descargas na área de abrangência da RINDAT, sendo reservados os períodos de 2009 a 2010 para verificações e avaliações do comportamento do sistema.

A estimação das probabilidades e do número esperado de raios incidentes sobre polígonos quaisquer exigiu o desenvolvimento de abordagens específicas para o problema. O cálculo do número esperado de raios baseou-se no uso de interpoladores que conservam o número original de raios previstos pela rede, para cada área de quadricula considerada. A estimação da probabilidade de incidência por polígono exigiu o desenvolvimento de modelos probabilísticos, que correlacionam *PROB* e *NER*, condicionados pela área e forma do polígono. Com a utilização desses métodos, preservou-se a coerência entre os mapas gerados pelo SIPPER e as probabilidades e número esperados de raios previstos para cada polígono cadastrado.

Alguns aspectos inovadores foram incluídos no modelo preditivo do SIPPER, que incrementaram a qualidade de suas previsões:

- (1) Atualização dinâmica, para cada ponto de previsão, das probabilidades de incidência e do número esperado de raios associados a cada padrão identificado pela rede SOM, incrementando continuamente o aprendizado do sistema;
- (2) Recalibração das previsões por polígono cadastrado, buscando garantir confiabilidade nas probabilidades previstas e no número esperado de raios.

Apesar da natureza caótica do processo atmosférico de produção de descargas nas nuvens de tempestades, o SIPPER apresenta qualidade suficiente para a identificação de situações meteorológicas críticas e emissão antecipada de alertas de tempestades elétricas com potencial de incidência sobre o sistema de transmissão.

### 3.0 - CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SIPPER ESPACIAL

O compromisso do SIPPER em gerar previsões de alta resolução espacial (2x2 km) sobre toda a área de abrangência da RINDAT resultou na especificação de 1,088 milhões de pontos de previsão. O compromisso adicional da alta frequência de atualização temporal (1/1 minuto), considerado requisito importante para prontamente responder às mudanças repentinas no padrão das descargas monitoradas, exigiu a implementação de algoritmo de processamento paralelo e dedicação exclusiva de servidor computacional apropriado. A Figura 1 mostra a área total de processamento do SIPPER Espacial e duas regiões de monitoramento selecionadas: o Paraná e parte da região Sudeste, onde é possível visualizar os polígonos correspondentes aos *buffers* associados aos circuitos do linhão de Itaipu. Outras regiões, abrangendo Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro, passarão a ter visualização diferenciada por também possuírem polígonos de interesse para monitoramento e previsão.

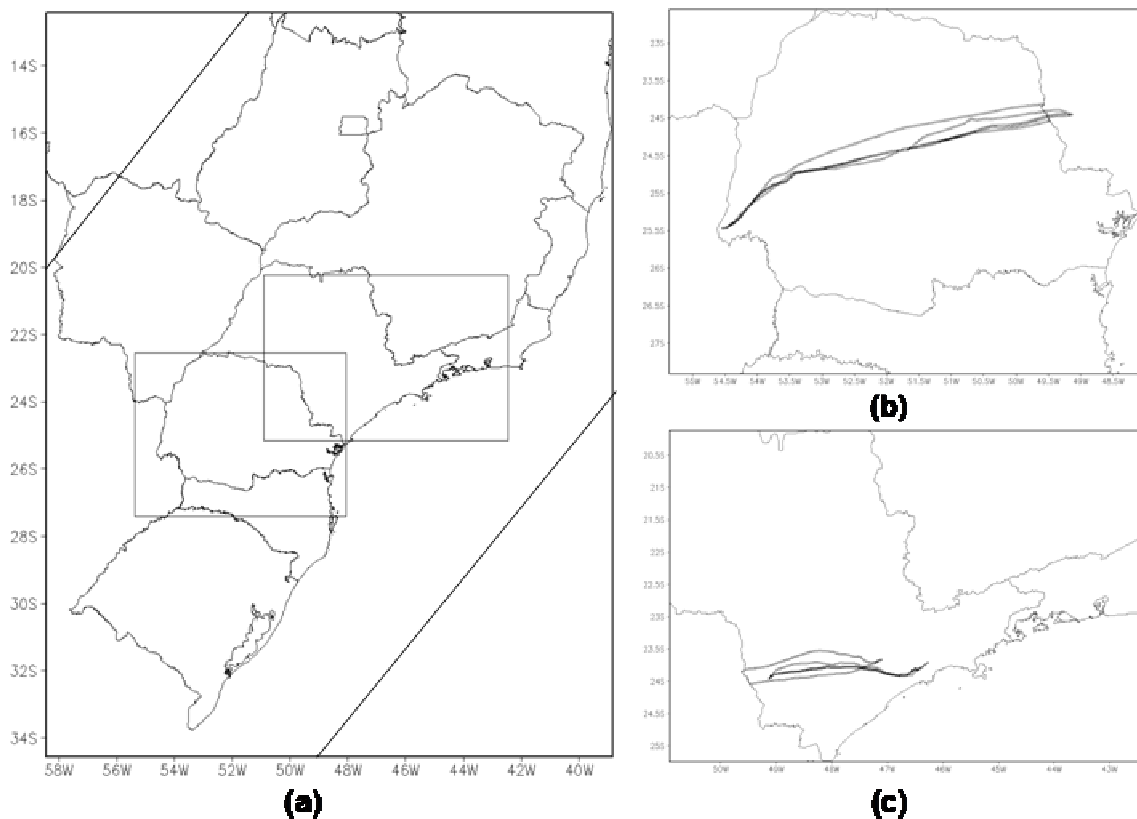


Figura 1 – Área total de processamento do SIPPER Espacial, compreendida pelas duas retas inclinadas paralelas (a), e duas regiões de monitoramento selecionadas: o Paraná (b) e parte do Sudeste (c)

Os mapas produzidos pelo SIPPER são atualmente gerados pelo GrADS (*Grid Analysis and Display System*), ambiente usual de visualização espacial de dados meteorológicos. A necessidade de integração das informações espaciais geradas pelo SIPPER em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) de usuários diversos exigiu a construção de uma plataforma GeoServer para a geração de mapas nos padrões WMS (*Web Map Service*) e WFS (*Web Feature Service*). Esse novo ambiente de visualização e integração encontra-se em fase final de desenvolvimento e permitirá múltiplas operações de manipulação das informações no próprio SIG do usuário.

A Figura 2 mostra os mapas gerados pelo SIPPER correspondentes às previsões de probabilidade de incidência (*PROB*) e número esperado de raios (*NER*), para uma data e hora específica (21/09/2010, às 10:40h), com tempestades elétricas no entorno do linhão de Itaipu. Conforme se pode observar, existe previsão de elevadas

probabilidades de incidência (superiores à 0,95) à sudoeste do linhão, já se observando probabilidades entre 0,4 e 0,5 em área atravessada pelos circuitos entre Foz e Ivaiporã (Figura 2(a)). Nessas áreas de elevada probabilidade de incidência, o número esperado de raios chega a 7,5 raios/100 km<sup>2</sup> revelando situação de severidade nas tempestades em desenvolvimento na região (áreas identificadas pela cor amarela na Figura 2(b)).

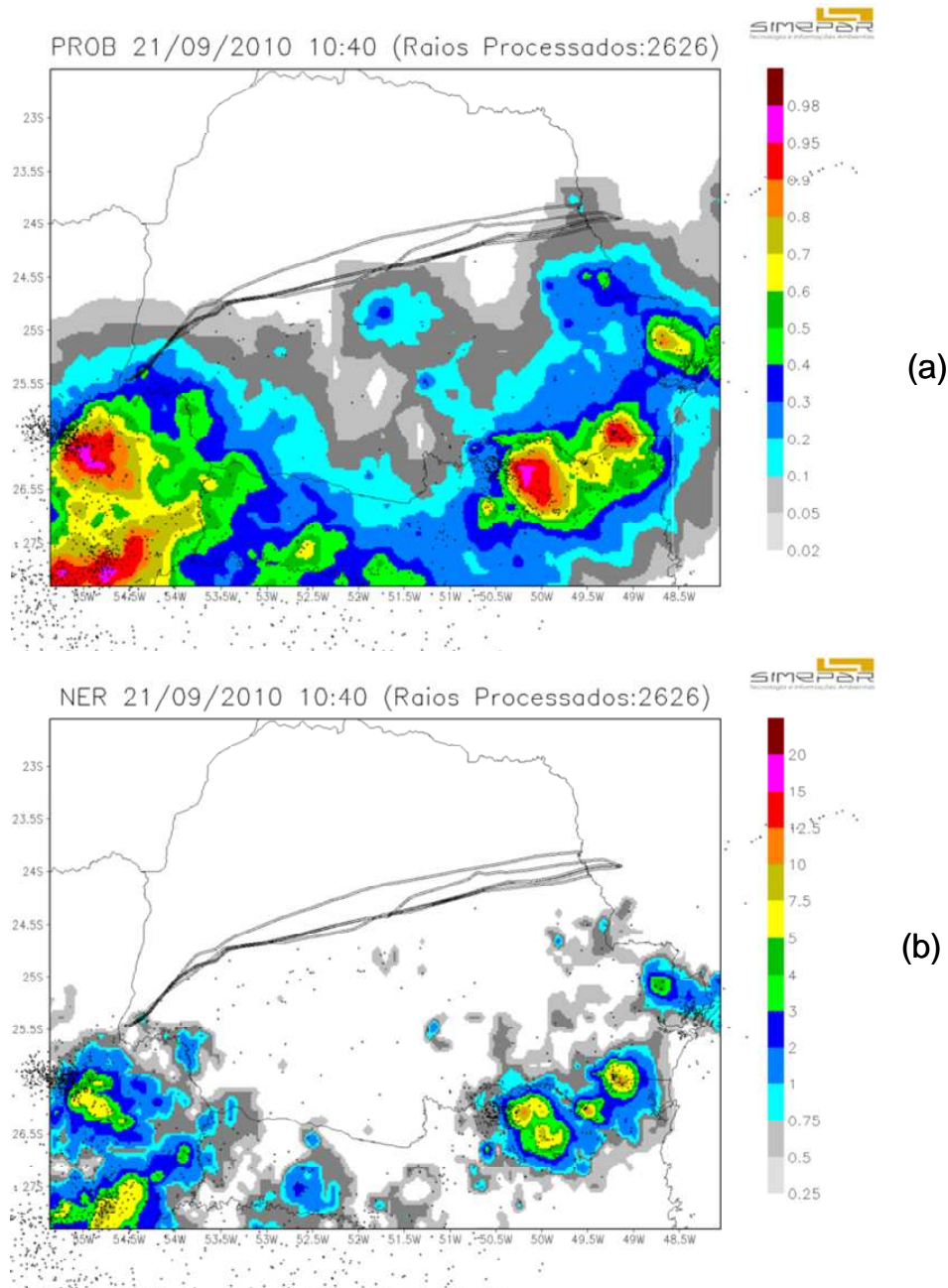


Figura 2 – Mapas gerados pelo SIPPER Espacial em 21/09/2010 às 10:40 h, mostrando a previsão de probabilidade de incidência de descargas (a) e o número esperado de raios (b) para a próxima hora (10:40 a 11:40h) em áreas de 10x10 km. Os pontos correspondem às descargas ocorridas na última hora (09:40 a 10:40h)

Um processo de monitoramento e vigilância mais apurado de polígonos específicos cadastrados é possível através do acompanhamento de uma tabela dinâmica atualizada pelo SIPPER a cada tempo de previsão (de 1 em 1 minuto). A manutenção sempre atualizada dessa tabela exigiu a incorporação ao sistema de capacidade de geoprocessamento e realização de operações topológicas sobre os polígonos de interesse. Essas operações são realizadas em processos computacionais independentes gerados pelo sistema de maneira a não degradar o processamento principal das previsões espaciais de *PROB* e *NER*. As variáveis atualmente processadas correspondentes às colunas dessa tabela são as seguintes:

- (1) **Localizados:** número de descargas atmosféricas ocorridas na última hora cuja localização mais provável está contida na região/polígono de interesse;

- (2) **Incidentes:** número de descargas atmosféricas ocorridas na última hora que é esperado de ter incidido na região/polígono de interesse. A sua estimativa leva em consideração a elipse de incerteza de localização das descargas dada pela RINDAT [3] [4];
- (3) **Esperados:** número esperado de descargas atmosféricas que devem incidir na próxima hora sobre a região/polígono de interesse (*NER*);
- (4) **Probabilidade:** probabilidade de incidência de pelo menos uma descarga atmosférica na próxima hora sobre a região/polígono de interesse (*PROB*);
- (5) **Extremo:** número esperado máximo de descargas atmosféricas que devem incidir na próxima hora sobre uma área de 10x10km, que esteja contida ou seja vizinha da região/polígono de interesse;
- (6) **Pico -, Pico0, Pico+:** valores mínimo, médio e máximo do módulo do pico de corrente das descargas atmosféricas ocorridas na última hora, cuja probabilidade individual de incidência sobre a região/polígono de interesse não seja desprezível.

A Tabela 1 mostra um exemplo dessa facilidade, incorporando dados de monitoramento e previsão de descargas sobre os circuitos do linhão de Itaipu, cuja última atualização foi realizada às 10:39 h do dia 21/09/2010. Conforme definições anteriores, as colunas correspondentes às variáveis “Localizados”, “Incidentes” e “Pico (-,0,+)” contém informações de monitoramento e referem-se à última hora (9:39-10:39h), enquanto aquelas correspondentes às variáveis “Esperados”, “Probabilidade” e “Extremo” contém informações de previsão para a próxima hora (10:39-11:39h). A partir dessa tabela dinâmica, o SIPPER Espacial está preparado para a emissão de alertas vinculados à definição de limites para quaisquer das variáveis processadas. A esses alertas individuais por polígono, indicados pela cor amarela na Tabela 1, podem ser associados avisos automáticos enviados pelo sistema aos responsáveis, através de mensagens de celular ou de *e-mail*.

Tabela 1 – Tabela de monitoramento e previsão de descargas atmosféricas sobre os circuitos do linhão de Itaipu, atualizada dia 21/09/2010 às 10:39 h

Situacao das Regioes Monitoradas, Ultima Atualizacao: 21/09/2010 10:39

Id-Poligono	Localizados	Incidentes	Esperados	Probabilidade	Extremo	Pico-	Pico0	Pico+
071-LT 660 kV F.IGUACU/IBIUNA C-1 C-2 (PR)	0	0.7	0.7	0.22	1.2	0	0	0
072-LT 660 kV F.IGUACU/IBIUNA C-1 C-2 (SP)	0	0.3	0.9	0.26	1.1	0	0	0
073-LT 660 kV F.IGUACU/IBIUNA C-3 C-4 C-5 (PR)	4	2.6	0.8	0.24	1.2	36	57	87
074-LT 660 kV F.IGUACU/IBIUNA C-3 C-4 C-5 (SP)	3	0.6	1.9	0.41	2.2	12	13	14
075-LT 765 kV F.IGUACU 60HZ/IVAIPORA C-1 PR	2	0.8	0.6	0.19	1.2	36	36	36
076-LT 765 kV F.IGUACU 60HZ/IVAIPORA C-2 PR	2	1.3	0.6	0.19	1.2	36	36	36
077-LT 765 kV ITABERA/IVAIPORA C-1 SP/PR	0	0.0	0.2	0.09	0.4	0	0	0
078-LT 765 kV ITABERA/IVAIPORA C-2 SP/PR	0	0.0	0.2	0.07	0.4	0	0	0
079-LT 765 kV ITABERA/IVAIPORA C-3 SP/PR	0	0.0	0.3	0.10	0.4	0	0	0
080-LT 765 kV ITABERA/ITJUCO PRETO C-1 SP	0	0.7	1.2	0.30	1.2	0	0	0
081-LT 765 kV ITABERA/ITJUCO PRETO C-2 SP	1	0.6	1.2	0.31	1.2	33	33	33
082-LT 765 kV ITABERA/ITJUCO PRETO C-3 SP	1	0.9	1.3	0.32	2.2	30	30	30

Um último aspecto operacional incorporado ao SIPPER Espacial foi a possibilidade de acompanhamento, em tempo quase real, do desempenho do sistema nas previsões do número esperado de raios (*NER*) para os polígonos cadastrados. Dessa forma, o sistema gera, por solicitação do usuário, gráficos de linha por polígonos, mostrando a evolução do número observado de descargas incidentes na última hora e de sua correspondente previsão, em termos de *NER*, produzidos uma hora antes. A Figura 3 mostra gráficos de acompanhamento do desempenho do SIPPER Espacial para as linhas LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã, circuito 1 (a) e circuito 2 (b), para eventos no dia 23/03/2010. Nesse dia o SIPPER apresentou bom desempenho, não atrasou na previsão do número de raios e reproduziu com fidelidade a severidade da tempestade atuando sobre esse trecho do linhão de Itaipu.

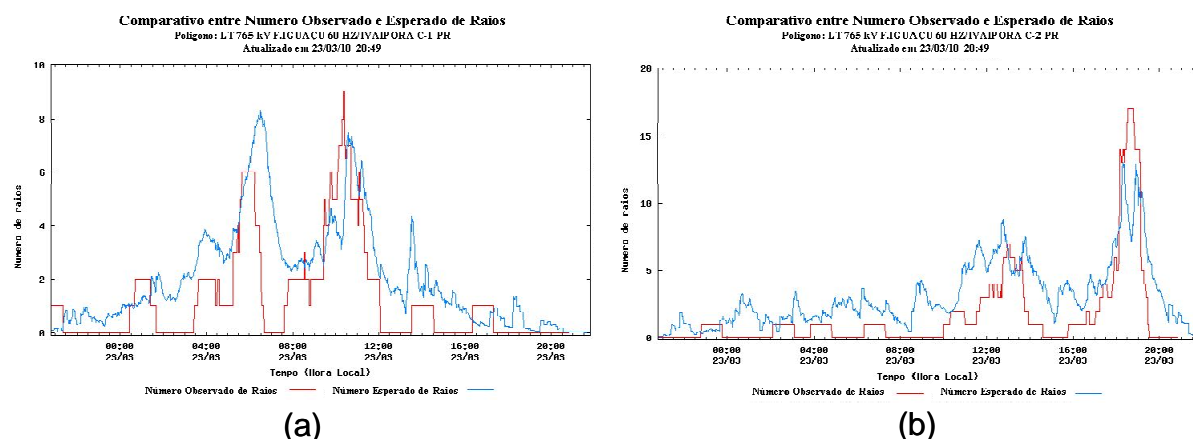


Figura 3 – Gráficos de acompanhamento do desempenho do SIPPER Espacial na previsão do número esperado de raios (*NER*) para os polígonos correspondentes às linhas LT 765 kV Foz do Iguaçu–Ivaiporã, circuito 1 (a) e circuito 2 (b) para eventos no dia 23/03/2010

#### 4.0 - APLICAÇÃO DO SIPPER ESPACIAL NA VIGILÂNCIA METEOROLÓGICA DO LINHÃO DE ITAIPU

Uma das experiências em curso de aplicação do SIPPER Espacial é na vigilância meteorológica do linhão de Itaipu, implementada no ano de 2010, em um trabalho conjunto entre o Instituto Tecnológico SIMEPAR e Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Nessa aplicação, a partir dos dados georeferenciados das torres, foram cadastrados os circuitos de 765 kV em três trechos, considerando as subestações Foz do Iguaçu, Ivaiporã, Itabera e Tijuco Preto. Também os circuitos de 660 kV de corrente contínua foram cadastrados no sistema, mas não serão objetos de análise nesse informe.

A definição do polígono representativo da linha de transmissão passa pela determinação de uma envoltória de distância constante da linha, comumente denominada de *buffer*. Alguns modelos têm sido propostos para definição do tamanho do *buffer*, conforme os discutidos em [2], [3] e [4]. A opção metodológica adotada foi utilizar um modelo simplificado que considera a preponderância da incidência direta da descarga como causadora de perturbação na linha, o qual determina o tamanho do *buffer* como aquele que iguala as distâncias do ponto de origem da descarga em direção à terra e ao cabo guarda da linha. Segundo esse modelo, tem-se que:

$$b^2 + (hn - ht)^2 = hn^2 \quad (1)$$

onde  $b$  é o tamanho do *buffer*,  $hn$  é a altura do centro de carga negativa da nuvem; e  $ht$  é a altura média das torres da linha de transmissão. Conforme discutido em [11], a consideração de  $hn$  máxima próxima a 8.000 m e de  $ht$  máximo de 57 m conduziram a uma estimativa do *buffer* da LT de 765 kV de 1.000 m.

A carência de estudos de vulnerabilidade da linha em termos de descargas atmosféricas impediu o estabelecimento do limite de alerta baseado em riscos aceitáveis de perturbação. A opção nesse caso foi levantar a distribuição de frequência do número observado de raios acumulados em uma hora, por trecho de linha, e selecionar um percentil desejável (no caso 0,9) e seu correspondente número de raios para servir de limite de alerta. Nesse caso, o alerta é emitido sempre que a previsão apontar a ocorrência de uma tempestade elétrica das 10% mais críticas em número de raios atuando sobre a linha. Essa abordagem levou ao estabelecimento dos seguintes valores de *NER* para limite de alerta de cada circuito da LT 765 kV: 15 descargas para o trecho Foz do Iguaçu–Ivaiporã; 13 para o trecho Ivaiporã–Itabera; e 18 para o trecho Itabera–Tijuco Preto. Com esses limites, o tempo anual estimado em situação de alerta por circuito é de 62 h para o primeiro trecho, 47 h para o segundo e 42 h para o terceiro.

Com essa aplicação do SIPPER Espacial foi possível monitorar a evolução e acompanhar a severidade das tempestades elétricas atuantes na região do linhão de Itaipu. Os dados de monitoramento da tabela de vigilância por circuito e trecho permitem pronta definição se a causa de possíveis perturbações foi ou não descargas atmosféricas; os dados de previsão dessa tabela permitem decisões sobre a operação da linha em situações meteorológicas críticas. Nesse sentido, o sistema emite alerta das situações mais críticas, correspondendo aos 10% dos eventos de maior severidade na produção de descargas, que devem incidir sobre a linha.

##### 4.1 Verificação das previsões geradas pelo SIPPER Espacial

Um processo de verificação pode assumir grande dimensionalidade, estar focado na realização de avaliações absolutas ou relativas e priorizar aspectos variados de qualidade [12] [13] [14]. Para o caso em questão, envolvendo previsões probabilísticas, os aspectos selecionados para investigação foram a acurácia, a acurácia relativa (*skill*) e a confiabilidade. Para avaliar a acurácia das previsões, foi utilizada uma medida clássica, o erro médio quadrático (*EMQ*). Essa medida penaliza os erros maiores em relação aos menores, sendo particularmente sensível aos grandes desvios. Também foi avaliado um índice de melhoria ( $SS - Skill Score$ ) da acurácia da previsão em relação a uma referência, calculado da seguinte forma:

$$SS_{EMQ}(f, r, x) = 1 - (EMQ(f, x) / EMQ(r, x)) \quad (2)$$

onde  $EMQ(f, x)$  é o erro médio quadrático da previsão e  $EMQ(r, x)$  é o erro médio quadrático da referência.

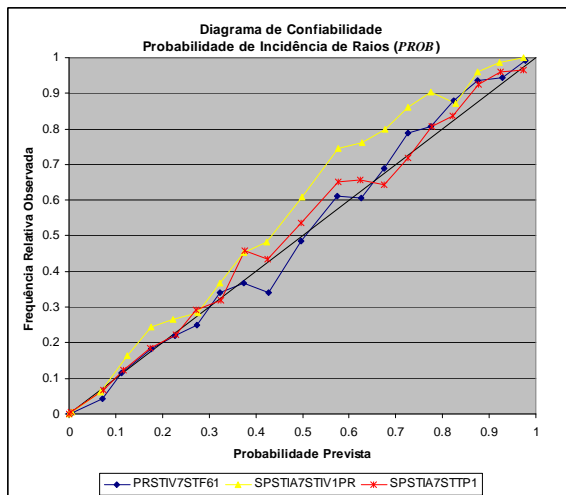
As variáveis avaliadas foram *PROB* e *NER* associadas aos *buffers* do circuito 1 dos 3 trechos da LT 765 kV e foi selecionada como referência a persistência do último valor observado. A Tabela 2 mostra os resultados dessa avaliação para o ano de 2010. Conforme se pode observar, o sistema foi capaz de melhorar a previsão por persistência em todos os trechos, tanto na previsão da probabilidade de incidência, quanto no número esperado de raios em percentuais médios de 46% para *PROB* e 44% para *NER*.

A Figura 4 mostra os diagramas de confiabilidade para as previsões de *PROB* e *NER* referentes ao mesmo período (2010) e à mesma linha, circuito e trechos. Conforme se pode observar, o SIPPER Espacial mostrou-se bastante confiável para ambas as previsões, em especial para os trechos Foz do Iguaçu–Ivaiporã e Itabera–Tijuco Preto. Os resultados referentes aos demais circuitos não mostrados, tanto para a acurácia quanto para a confiabilidade, são similares. Os procedimentos de recalibração das previsões por polígono têm garantido a geração de previsões confiáveis, ou seja, podem ser utilizadas pelo seu valor de face (*NER* de 5 raios/100 km<sup>2</sup> estão associados à uma média observada no trecho/circuito de aproximadamente 5 raios/100 km<sup>2</sup>, o mesmo ocorrendo com *PROB*).

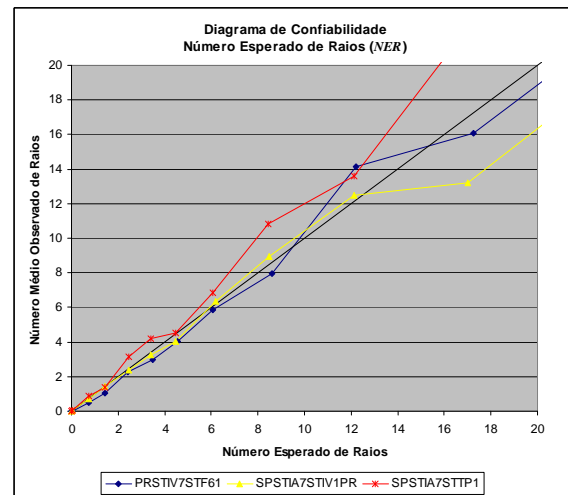


Tabela 2 – Resultados da verificação de qualidade das previsões geradas pelo SIPPER Espacial para o Circuito 1 da LT 765 kV do Linhão de Itaipu, ano de 2010

Medida de Qualidade	Unidade	Circuito 1 da LT 765 kV		
		Foz-Ivaiporã	Ivaiporã-Itabera	Itabera-Tijuco Preto
		PRSTIV7STF61	SPSTIA7STIV1PR	SPSTIA7STTP1
$EMQ(PROB)$	$probabilidade^2$	0.02	0.03	0.02
$EMQ(NER)$	$unidade^2$	3.37	1.56	10.77
$SS_{EMQ}(PROB)$	<i>adimensional</i>	0.47	0.46	0.45
$SS_{EMQ}(NER)$	<i>adimensional</i>	0.38	0.50	0.43



(a)



(b)

Figura 4 – Diagramas de confiabilidade das previsões geradas pelo SIPPER Espacial para as variáveis *PROB* (a) e *NER* (b), ano de 2010, para o circuito 1 da LT 765 kV do linhão de Itaipu (os trechos estão identificados pelo código conforme Tabela 2)

## 5.0 - CONCLUSÕES

O informe apresentou o sistema de monitoramento e previsão probabilística de descargas atmosféricas, denominado SIPPER Espacial, descreveu suas características conceituais e operacionais, configurando-o como ferramenta de suporte à “gestão de risco” de problemas causados por tempestades elétricas, entre eles perturbações no sistema de transmissão de energia. De acordo com sua concepção, o sistema gera mapas de alta resolução espacial e alta frequência de atualização temporal de duas variáveis representativas da distribuição do número de descargas em quadriculas de 10x10 km e validade de uma hora: a probabilidade de incidência (*PROB*) e o número esperado de raios (*NER*). O domínio do sistema contempla toda a área de cobertura da RINDAT. Um aspecto relevante em sua concepção foi agregar ao sistema a capacidade de monitorar áreas geográficas específicas construídas na forma de polígonos. Nesse sentido, o SIPPER Espacial tem monitorado e previsto tempestades elétricas para linhas de transmissão, conjuntos de consumidores, sítios industriais e rotas aéreas.

A seleção do modelo preditivo do SIPPER Espacial contemplou um algoritmo baseado em redes neurais artificiais do tipo SOM (*Self-Organizing Maps*). Algumas inovações foram introduzidas no modelo, com destaque para a atualização dinâmica de *PROB* e *NER* associados a cada padrão identificado pela rede SOM e para o procedimento de recalibração das previsões por polígono cadastrado. Os requisitos operacionais do sistema exigiram implementação de código paralelo e especificação de servidor computacional apropriado. As demandas por integração das informações do SIPPER em outros ambientes SIG tem motivado a migração dos atuais mapas gerados pelo GrADS (*Grid Analysis and Display System*) para a plataforma GeoServer, que permite a geração de mapas nos padrões WMS (*Web Map Service*) e WFS (*Web Feature Service*). Atualmente, os resultados do geoprocessamento de polígonos cadastrados são visualizados através de uma tabela que explicita informações de monitoramento (número de descargas localizadas e incidentes na última hora e suas correntes de pico) e de previsão (probabilidade de incidência, número esperado de raios e extremo esperado de raios para a próxima hora). O SIPPER permite também o acompanhamento, em tempo quase real, do desempenho de suas previsões dedicadas aos polígonos cadastrados.

Uma aplicação relevante apresentada foi a utilização do SIPPER Espacial na vigilância meteorológica do linhão de Itaipu, que foi avaliada ao longo de 2010. Desde sua implementação, o SIPPER vem monitorando, prevendo e

alertando, a cada minuto, a presença de tempestades elétricas e o comportamento das descargas, tanto na região de abrangência do linhão, como, especificamente, nas envoltórias das linhas cadastradas. A verificação de qualidade das previsões de *PROB* e *NER* geradas pelo SIPPER para a LT 765 kV em 2010 revelaram uma boa acurácia na previsão de uma hora, apresentando melhorias da ordem de 46% para *PROB* e 44% para *NER* em relação à persistência. Também foi verificada a existência de confiabilidade em ambas as previsões, o que permite a sua utilização direta pelo valor de face e demonstra a utilidade do procedimento de recalibração utilizado.

A união de informações de monitoramento e previsão em um único sistema caracteriza o SIPPER como ferramenta de suporte à gestão da operação em tempo real de linhas de transmissão: Os dados de monitoramento permitem pronta definição se a causa de possíveis perturbações foi descargas, para subsidiar decisão de religamento; os dados de previsão permitem decisões sobre a operação da linha em situações meteorológicas críticas, como manobras de alteração de carregamento visando minimizar riscos de desligamentos sistêmicos. Os próximos desafios de aplicação do SIPPER no setor elétrico contemplam: (1) a elaboração e refinamento de estratégias mais adequadas de alerta de tempestades elétricas; (2) a caracterização dos eventos meteorológicos críticos para o sistema elétrico monitorado; e (3) estudos de vulnerabilidade, que permitam derivar o risco de perturbação do sistema quando da incidência de descargas atmosféricas sobre o *buffer* das linhas de transmissão.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WESTINGHOUSE Central Station Engineers, *Electrical transmission and distribution reference book*. East Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Westinghouse Electric Corporation, 1964.
- [2] LEITE, E. A. et. al., "Metodologia para análise e correlação entre desligamento e incidência de descargas atmosféricas". In: *Anais do XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2009.
- [3] LEITE, E. A., BENETI, C., JUSEVICIUS, M. A., "An environment for automatic correlation analysis between lightning and faults in transmission lines". In: *Anais do X International Symposium on Lightning Protection*, 2009.
- [4] LEITE, E. A., JUSEVICIUS, M. A., et al., "Resultados da análise de correlação entre desligamento e incidência de descargas atmosféricas", *Relatório Técnico SIMEPAR, Projeto P&D Ambiente de Análise e Correlação de Falhas por Descargas Atmosféricas no Sistema de Transmissão da Light*, Curitiba, PR, Brasil, 2008.
- [5] LEITE, E. A., Gestão do valor da informação hidrometeorológica. *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Doutorado em Engenharia Civil*, p. 224, 2008.
- [6] LEITE, E. A., ROTUNNO FILHO, O. C., "Sistema de previsão probabilística de raios – SIPPER". In: *XX Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2006.
- [7] CROUHY, M., GALAI, D., MARK, R., *The essentials of risk management*. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [8] MORGAN, M. G., HENRION, M., *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1990.
- [9] KRZYSZTOFOWICZ, R., "Probabilistic hydrometeorological forecast: toward a new era in operational forecasting", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 2 (Feb), pp. 243-251, 1998.
- [10] KOHONEN, T., *Self-Organizing Maps*. New York, Springer, 3 ed., 2001.
- [11] FLACK, R. A., LEITE, E. A., JUSEVICIUS, M. A., "Estimativa da altura do centro de cargas negativas das tempestades de raios". In: *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2010.
- [12] JOLLIFFE, I. T., STEPHENSON, D. B. (eds), *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*. Chichester, England, John Wiley & Sons, 2003.
- [13] KATZ, R. W., MURPHY, A. H., *Economic value of weather and climate forecasts*. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [14] WILKS, D. S., *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego, California, Academic Press, 1995.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Eduardo Alvim Leite, nascido em Carangola (MG), ano de 1959.

Graduado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 1982, mestre em administração estratégica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 1994 e doutor em engenharia civil, área de recursos hídricos e meio ambiente, pela Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia / Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2008.

Atuou como analista de sistemas e de pesquisa operacional (de 1984 a 2000 em empresas privadas), engenheiro e gerente de planejamento tecnológico (de 1988 a 1995 na COPEL/LACTEC), pesquisador, coordenador de desenvolvimento tecnológico e diretor superintendente (de 1995 a 2011 no Instituto Tecnológico SIMEPAR).