

# PREVISÕES DE RADIAÇÃO SOLAR PARA O SETOR DE ENERGIA: PÓS-PROCESSAMENTO ESTATÍSTICO DAS SAÍDAS DO MODELO ETA/CPTEC

*Ricardo A. Guarnieri<sup>1</sup>, Enio B. Pereira<sup>1</sup>, Fernando R. Martins<sup>1</sup>, Chou S. Chan<sup>2</sup>.*

**RESUMO:** Este trabalho apresenta os resultados de um estudo sobre a melhoria da performance da previsão de radiação solar oferecida pelo modelo Eta/CPTEC, visando melhor atender o setor de energia. A previsão diretamente determinada pelo modelo é sistematicamente superestimada, acarretando um viés elevado quando comparada a dados de radiação solar medidos por estações solarimétricas de superfície. Nesse trabalho é apresentada a avaliação de novas previsões obtidas por modelos de Regressão Linear Múltipla (RLM), empregando variáveis diversas previstas pelo modelo Eta/CPTEC. Na determinação dos coeficientes desses modelos lineares, foram empregadas medidas de radiação solar global, efetuadas por duas estações de coleta de dados do projeto SONDA: Florianópolis (SC) e São Martinho da Serra (RS). A partir de uma seqüência de testes, foi determinado um modelo simples, baseado em apenas 7 variáveis previstas pelo modelo Eta, e que proporcionou ganhos da ordem de 30%, em termos de RMSE.

**ABSTRACT:** This article presents the results of a study about the statistical improvement of the solar radiation forecasts provided by the Eta/CPTEC model linked to the energy sector. Currently, Eta's forecast for solar irradiation presents a systematic overestimation, leading to a high bias when compared to ground data. This study presents the evaluation of new forecasts obtained using Multiple Linear Regression (RLM) schemes. These schemes use the forecasts of a set of variables from Eta/CPTEC model as input. We employed ground data of global solar radiation supplied by two SONDA sites – Florianópolis (SC) and São Martinho da Serra (RS) – to fit the RLM coefficients. After several tests, the best outcome was achieved with a RLM-model based on just 7 variables provided by Eta forecast output. This simple RLM-model led to improvements of about 30% in terms of RMSE.

**Palavras-Chave:** energia solar, previsão de radiação solar, modelo Eta/CPTEC.

## INTRODUÇÃO

O levantamento e a previsão da intensidade da radiação solar incidente à superfície encontram aplicações na agropecuária, na arquitetura (iluminação e aquecimento natural de ambientes), na pesquisa meteorológica, no setor de energia, dentre outros setores produtivos. A demanda por estudos de incidência de energia solar pelo setor de energia tem aumentado recentemente, tanto com a finalidade de melhor planejar o uso deste recurso de energia, como para melhor gerenciar o despacho de carga em linhas de transmissão pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Vale mencionar que a inserção de energias renováveis e alternativas, como a energia solar e eólica, vem sendo motivada por uma série de razões econômicas e ambientais, podendo-se citar: os danos ecológicos decorrentes do uso de combustíveis fósseis (poluição atmosférica, emissões de

---

<sup>1</sup> Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), Avenida dos Astronautas 1758, 12227-010, São José dos Campos (SP), (12)3945-{6738,6786,6778}, ricardog@cptec.inpe.br, eniobp@cptec.inpe.br, fernando@dge.inpe.br.

<sup>2</sup> CPTEC/INPE, Rodov. Pres. Dutra Km 40, 12630-000, Cachoeira Paulista (SP), (12)3186-8424, chou@cptec.inpe.br.

gases do efeito estufa e conseqüente aquecimento global); a ratificação do Protocolo de Kyoto; perspectivas de um futuro esgotamento do petróleo; aumento da demanda por energia, especialmente pelos países em desenvolvimento; crises internacionais que afetam o preço do petróleo; necessidade por complementar as matrizes energéticas, de maneira a evitar crises de abastecimento como aquela enfrentada pelo Brasil entre 1999 e 2001.

O modelo Eta/CPTEC gera previsões da incidência de radiação solar à superfície, bem como diversas outras variáveis meteorológicas. Contudo, foi constatado que esta previsão de radiação é sistematicamente superestimada [1,2]. Com a finalidade de suprir o setor de energia com melhores previsões de radiação solar, foi realizado um estudo de refinamento estatístico das previsões do modelo Eta/CPTEC, visando obter estimativas de radiação solar com erros menores.

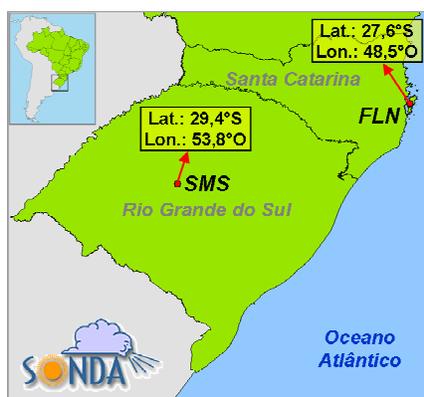
Neste trabalho, serão apresentados alguns dos resultados obtidos neste estudo de refinamento de previsão de radiação solar, tendo-se empregado modelos de Regressão Linear Múltipla (RLM) alimentados com variáveis previstas (representando as condições atmosféricas futuras) pelo modelo Eta operacional do CPTEC. Serão avaliadas previsões pontuais de radiação, para duas localidades que contam com estações do projeto SONDA, para as quais os modelos RLM foram ajustados.

## **DADOS E METODOLOGIA**

Devido aos movimentos da Terra, a radiação que atinge um dado ponto no topo da atmosfera (TOA) possui variação sazonal e diurna, e pode ser calculada para cada instante de forma simples. A quantidade desta radiação que consegue atravessar a atmosfera e atingir a superfície do planeta depende ainda das condições atmosféricas, especialmente a cobertura de nuvens. Assim, a previsão da radiação solar incidente demanda informações antecipadas das condições atmosféricas futuras, que podem ser obtidas, com certo grau de incerteza, a partir de modelos meteorológicos.

O modelo Eta é um modelo meteorológico de previsão de tempo [3], que opera no CPTEC desde 1996, configurado para modelar a atmosfera numa área cobrindo a América do Sul e os oceanos vizinhos, com 40 km de resolução horizontal e 38 níveis verticais (para mais detalhes, ver [4,5]). O modelo gera saídas duas vezes ao dia (00UT e 12UT), com previsões para cada 6 horas a partir da condição inicial. Neste trabalho, foram empregadas 31 variáveis previstas pelo modelo, incluindo informações de: temperatura, umidade, pressão, vento, precipitação, nuvens, fluxos de energia na superfície, fluxos de radiação de onda curta e onda longa, etc.

Para o ajuste dos modelos de pós-processamento (RLMs) e para avaliação das previsões de radiação solar, foram empregados dados de radiação solar global medidos por piranômetros *Kipp&Zonen CM-21* em estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o Setor de Energia – CPTEC/INPE – [www.cptec.inpe.br/sonda](http://www.cptec.inpe.br/sonda)) instaladas em duas localidades do sul do Brasil (Figura 1): Florianópolis (FLN) e São Martinho da Serra (SMS).



**Figura 1: Estações SONDA no sul do Brasil: FLN e SMS.**

Como as variáveis previstas pelo modelo Eta são disponibilizadas com resolução de 6 horas, e suas previsões de radiação solar de cada horário de referência correspondem a integrais de 6 horas precedentes, os dados de radiação medidos foram integrados nos mesmos períodos. Após conversões, todos os dados (previsões do modelo Eta e medidas de radiação) passaram a ter valores nos horários sinóticos (0, 6, 12 e 18 UT) e que representam o período de 6 horas precedente.

Neste trabalho, são empregadas apenas as previsões do modelo Eta geradas às 00UT de cada dia para o horário de referência de 18UT (equivalente ao período 12UT-18UT) do mesmo dia, referidas como P00UT-Rad18UT e tomadas para os pontos de grade mais próximos às estações de medida de radiação. Essas previsões são empregadas como preditores dos modelos RLM que, em seu ajuste, empregam como preditando as medidas de radiação nos mesmos dias. Ao conjunto de 31 preditores fornecidos diretamente pelo modelo Eta, foram inseridos 5 outros preditores, derivados de combinações de previsões do modelo Eta (e.g., umidade relativa) ou de cálculos simples de geometria Sol-Terra (e.g., radiação solar incidente no TOA).

Foram empregados neste estudo, dados de janeiro/2001 a outubro/2005 para FLN (1150 dias válidos) e de julho/2004 a outubro/2005 para SMS (472 dias válidos). Os preditores e o preditando foram subdivididos em: *subconjunto de treinamento* (75% dos dados), empregado no ajuste dos modelos RLM; e *subconjunto de teste* (25% dos dados), empregado na geração de previsões de radiação solar e avaliação das mesmas frente às observações. Na seção de Resultados, são apresentadas as avaliações das previsões com os subconjuntos de testes, que totalizam dados para 287 dias para FLN e para 118 dias para SMS. As previsões ( $P_i$ ) de radiação solar do modelo Eta e as novas previsões obtidas pelos modelos RLM, foram avaliadas frente às medidas, ou observações ( $O_i$ ), tendo sido calculados os parâmetros (equações abaixo): erro médio relativo ou viés (ME%), raiz do erro quadrático médio relativo (RMSE%) e coeficiente de correlação (R).

$$ME\% = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \%$$

$$RMSE\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i)} \%$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

## RESULTADOS

A seguir, são apresentados, para FLN e SMS, diagramas de dispersão (Figuras 2 e 3) e parâmetros de avaliação (Tabelas 2 e 3) para: a previsão por persistência\*; a previsão diretamente disponibilizada pelo modelo Eta/CPTEC; a previsão refinada gerada por RLM, empregando os 36 preditores (RLM-36p.); e a previsão gerada por RLM utilizando um conjunto reduzido de 8 preditores\*\* (RLM-8p.) – sendo 7 deles saídas do modelo Eta (mas não incluindo a sua saída para radiação solar) – e que foi obtido após testes com várias combinações de preditores.

Verifica-se que, embora a previsão de radiação solar fornecida pelo modelo Eta/CPTEC represente um ganho sobre a previsão por persistência, esta possui um viés elevado. Os modelos de RLM levam a resultados melhores para ambas as estações (FLN e SMS), não apenas removendo o viés, como reduzindo o RMSE% e elevando o coeficiente de correlação.

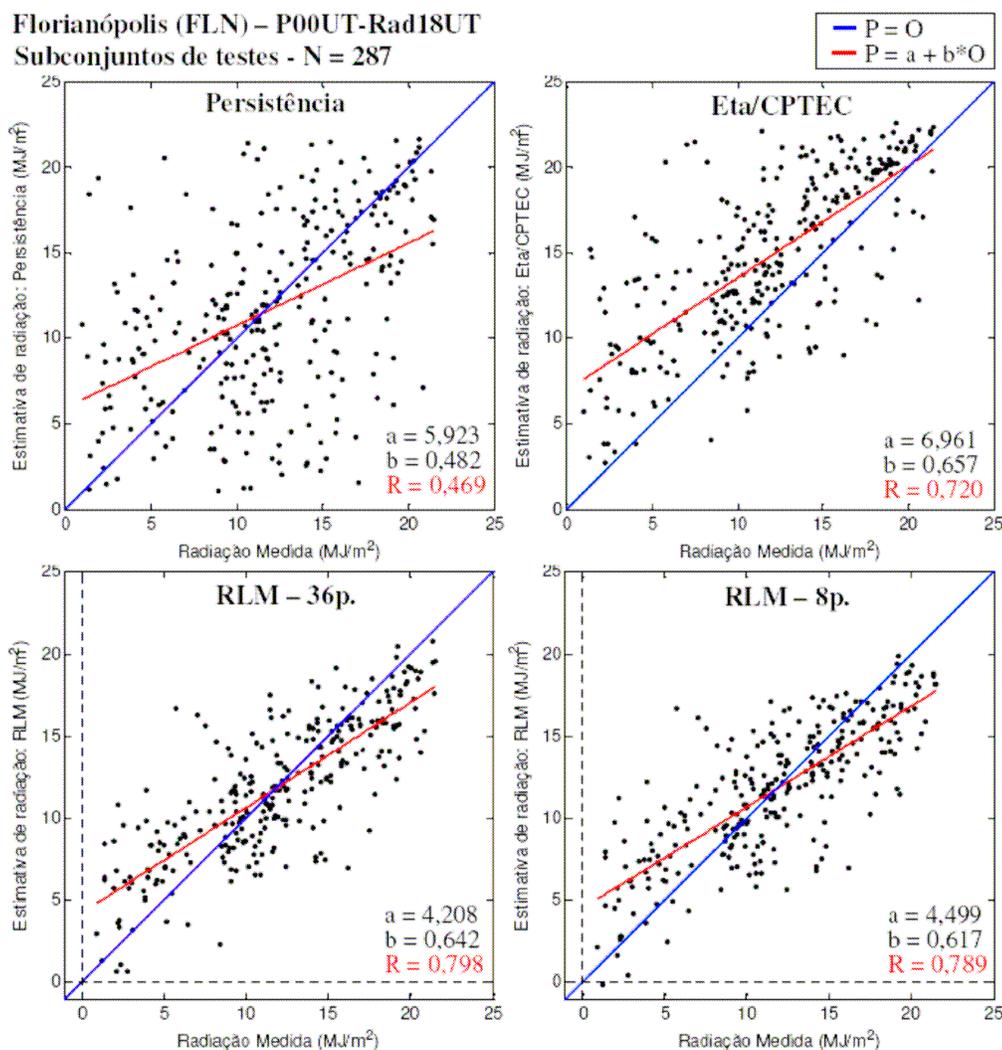


Figura 2: Diagramas de dispersão para previsões de radiação solar P00UT-Rad18UT para FLN.

\* Consiste em simplesmente tomar como previsão para um dado dia a medida de radiação do dia anterior.

\*\* Radiação solar no topo da atmosfera, umidade relativa, temperatura, conteúdo de água precipitável, velocidade zonal do vento a 10 metros de altura e 3 preditores para fração de cobertura de nuvens.

São Martinho da Serra (SMS) – P00UT-Rad18UT  
Subconjuntos de testes - N = 118

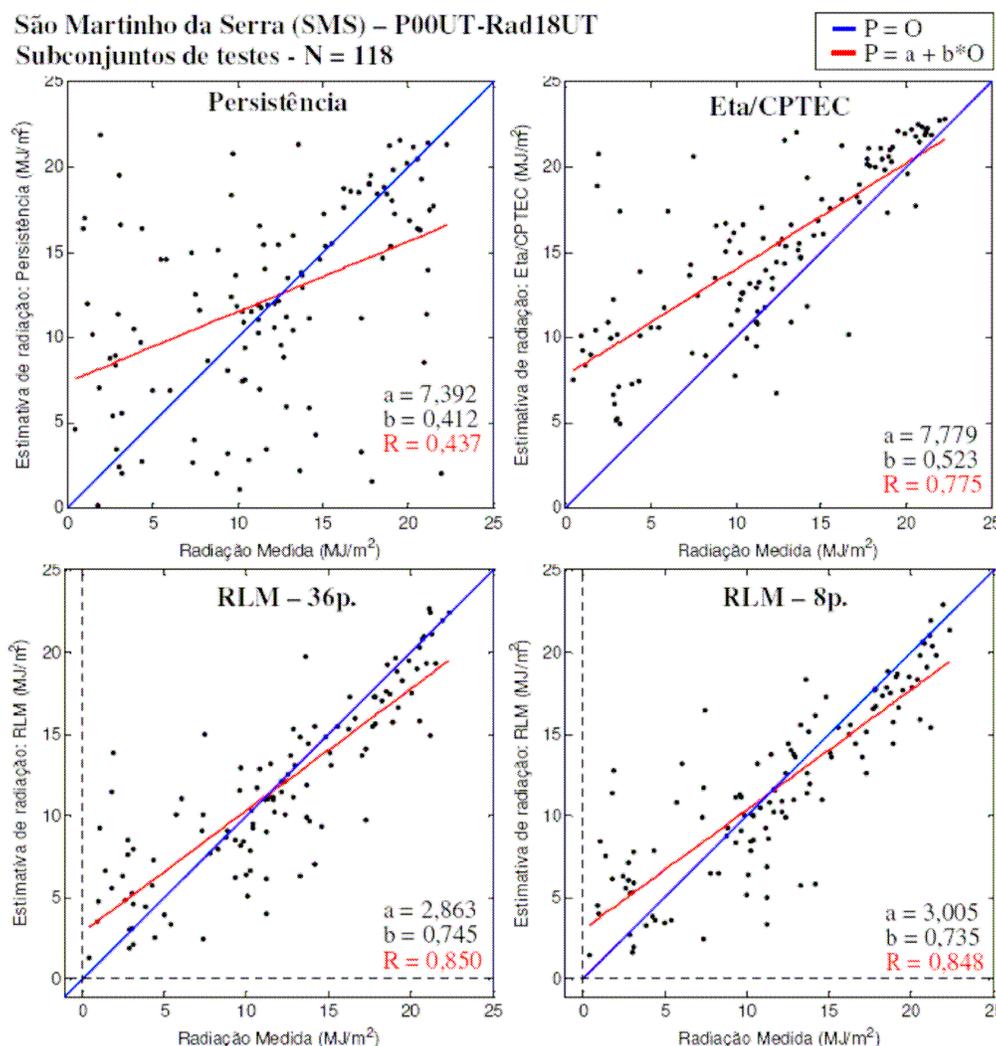


Figura 3: Diagramas de dispersão para previsões de radiação solar P00UT-Rad18UT para SMS.

Tabela 2: Parâmetros de avaliação de previsões de radiação solar P00UT-Rad18UT para FLN.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	ME %	RMSE %
Persistência	0,469	0,220	1,6%	45,9%
Eta	0,720	0,519	24,6%	40%
RLM-36p.	0,798	0,637	-0,2%	26,4%
RLM-8p.	0,789	0,623	-0,2%	27,0%

Tabela 3: Parâmetros de avaliação de previsões de radiação solar P00UT-Rad18UT para SMS.

Modelo	R	R <sup>2</sup>	ME %	RMSE %
Persistência	0,437	0,191	3,7%	53,8%
Eta	0,775	0,600	28%	43,2%
RLM-36p.	0,850	0,723	-1,4%	27,4%
RLM-8p.	0,848	0,719	-1,0%	27,6%

Os modelos RLM-36p. e RLM-8p. não apresentaram diferenças expressivas entre si, indicando que o conjunto de 36 preditores realmente contém variáveis desnecessárias ou redundantes para a finalidade de estimar radiação solar incidente. O fato de o modelo RLM-8p. não

empregar como preditor a previsão de radiação solar do modelo Eta, mostrou que é possível obter estimativas de radiação com variáveis que expressam a radiação solar no topo da atmosfera, as condições atmosféricas e a nebulosidade.

Os parâmetros de avaliação para os modelos RLM de ambas as estações foram bastante semelhantes aos encontrados para previsões calculadas com uso de Redes Neurais Artificiais alimentadas com os mesmos preditores, conforme resultados de um estudo mais amplo [5].

## CONCLUSÕES

O emprego de Regressões Lineares Múltiplas no pós-processamento das previsões do modelo Eta/CPTEC, permitiu serem obtidas previsões de radiação solar com erros menores e coeficientes de correlação maiores do que a previsão de radiação diretamente disponibilizadas pelo Eta. A redução do conjunto de preditores empregados no pós-processamento indicou que a utilização de poucas variáveis (8 preditores), representativas das condições atmosféricas futuras, é suficiente para a obtenção de previsões com qualidade semelhante às previsões obtidas pelo emprego do conjunto completo de 36 preditores. Os modelos RLM removeram o viés observado na previsão do modelo Eta e proporcionaram um ganho de mais de 30% em termos de redução de RMSE.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP (projeto SONDA – 22.01.0569.00) e ao CNPq (processos 132148/2004-8 e 141844/2006-0) pelo suporte financeiro, e à equipe do Laboratório de Instrumentação Meteorológica envolvida na instalação e manutenção das estações SONDA e no controle de qualidade dos dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chou, S. C.; Tanajura C. A. S.; Xue, Y.; Nobre, C. A. Validation of the coupled Eta/SsiB model over South América. **J. Geophys. Res.**, v.107, n. D20, LBA 56 p.1-20, 2002.
2. Hinkelman, L. M.; Ackerman, T. P.; Marchand, R. T. An evaluation of NCEP Eta model predictions of surface energy budget and cloud properties by comparison with measured ARM data. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n. D16, p. 19535-19549, 1999.
3. Ničković, S.; Mihailović, D.; Rajković, B. **Scientific documentation of the Eta model**. Word Meteorological Organization, in press, Geneva, Switzerland, 1998.
4. Chou, S. C. Modelo Regional Eta. **Climanálise**, Edição comemorativa de 10 anos, 1996. Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/>>
5. Guarnieri, R. A. **Emprego de Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla no Refinamento das Previsões de Radiação Solar do Modelo Eta**, Master Thesis, INPE, São José dos Campos, 2006.