

## MODELAGEM NUMÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR COMO MÉTODO ALTERNATIVO NA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DISPONÍVEL

## SOLAR IRRADIATION NUMERICAL MODELING AS ALTERNATIVE METHOD IN EVALUATING OF AVAILABLE ENERGY POTENTIAL

Marcio Ceconi

Nelson Jorge Schuch

Alexandre Ceretta Dalla Favera

Eduardo Weide Luiz

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, Santa Maria – RS

ceconi@lacesm.ufsm.br

Fernando Ramos Martins

Enio Bueno Pereira

Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/INPE – MCT, São José dos Campos – SP

fernando.martins@inpe.br

### RESUMO

A modelagem numérica é uma importante ferramenta para a estimativa e previsão dos recursos de energia solar, imprescindíveis para o desenvolvimento, implementação e operação de projetos para aproveitamento dessa fonte energética limpa e de caráter renovável. O artigo apresenta o estudo realizado para desenvolvimento e adaptação de modelos empíricos para estimativa de irradiação solar em superfície em dois âmbitos: com abrangência local para localidades específicas e com abrangência regional para todo o território brasileiro. Os baixos desvios estatísticos entre as estimativas dos modelos e as medidas coletadas em superfície (RMSE de 17% a 23% para o modelo regional e de 15% a 26% para os modelos locais) mostraram a boa confiabilidade das estimativas fornecidas pelos mesmos. Adicionalmente, o desempenho de dois modelos clássicos da literatura (Ruth e Chant, 1976; Collares-Pereira e Rabl, 1979) foram comparados com o modelo local para São Martinho da Serra – RS, verificando-se boa concordância entre suas estimativas, com exceção dos períodos de céu limpo ( $K_t > 0,7$ ), nos quais o modelo local mostrou-se superior aos modelos clássicos.

**Palavras-chave:** Energia solar, radiação solar, Projeto SONDA.

### ABSTRACT

Numerical modeling is an important tool for estimating and forecasting the renewable energy resources necessary for developing and operating solar power plants. The article presents the analysis performed in the development and adaptation of empirical models to estimate solar radiation at the surface on two scopes: with local coverage for selected sites and regional coverage for the entire Brazilian territory. Low statistical deviations between model estimates and surface measurements (17% to 23% RMSE for ALL model and 15% to 26% for local models) demonstrated the reliable performance of developed models. Additionally, two classic models (Ruth and Chant, 1976; Collares-Pereira and Rabl, 1979) and the local model performances were compared for São Martinho da Serra. The results showed a good agreement between the estimates provided by the three models and ground measurements, except for clear sky days ( $K_t > 0.7$ ), in which the local model is better than classic models.

**Keywords:** Solar energy, solar radiation, SONDA Project.

## 1. INTRODUÇÃO

Um bom planejamento do setor energético é determinante para o desenvolvimento de um país. No entanto, o contraste entre o aumento do consumo de energia decorrente principalmente do crescimento econômico dos países em desenvolvimento, e a escassez dos recursos energéticos mais utilizados atualmente, bem como a preocupação com a degradação ambiental gerada pela própria extração e aplicação desses recursos, têm incentivado a busca por fontes alternativas de energia, limpas e de caráter renovável, principalmente solar e eólica.

Estudos envolvendo previsões de irradiação solar são de fundamental importância em diversas áreas da meteorologia, como estudos sobre o clima e suas mudanças, e em áreas aplicadas, como a agropecuária, a arquitetura e a energética (Guarnieri, 2006; Pereira et al., 2006).

Neste escopo, torna-se necessário o estudo da disponibilidade dos recursos energéticos renováveis para diferentes localidades e em diferentes épocas do ano, viabilizando investimentos na área e propiciando o desenvolvimento de novas formas de aplicação das mesmas com novas tecnologias. Nesse sentido, o Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) mantém em operação diversas estações de coleta de dados espalhadas pelo Brasil, contemplando grande amplitude de fatores climatológicos e ambientais característicos de cada região.

O objetivo desta pesquisa é a realização de estudos de avaliação do potencial de energia solar disponível no território brasileiro, utilizando a modelagem numérica dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos. Com esse intuito, foram desenvolvidos e adaptados modelos para estimativa de irradiação solar em superfície. Na primeira etapa, foram desenvolvidos modelos empíricos de abrangência local para estimativa do parâmetro  $K$ , definido como a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global. A metodologia adotada emprega como entrada o índice de nebulosidade da atmosfera  $K_t$ , definido como a razão entre a irradiação solar global e a incidente no topo da atmosfera, para oito estações de coleta de dados do Projeto SONDA. Adicionalmente, desenvolveu-se

um modelo regional para aplicação em todo o território nacional utilizando os dados disponíveis das oito estações selecionadas.

### 1.1. Modelos Numéricos para Estimativa de Irradiação Solar

Segundo Pereira et al. (2006) existem basicamente dois métodos para obter as informações necessárias para estimar a irradiação solar incidente na superfície. O primeiro método seria a utilização de uma rede de radiômetros distribuídos estrategicamente sobre a região de interesse, em conjunto com a aplicação de técnicas de interpolação das medidas de radiação obtidas. A adoção de modelos computacionais para obter estimativas da radiação solar incidente por meio de relações empíricas ou da solução da equação de transferência radiativa seria a alternativa para o primeiro método de obtenção desses dados.

Estudos recentes mostram que a interpolação de valores medidos por uma rede de radiômetros fornecerá resultados mais precisos do que os obtidos em modelos computacionais que utilizam dados de satélite apenas se o número de fotômetros for grande e a distância entre eles pequena. Distâncias inferiores a 50 km entre os radiômetros são necessárias para que as estimativas horárias de radiação solar incidente obtidas por interpolação apresentassem uma precisão similar às obtidas utilizando modelos numéricos (Perez et al., 1997; Guarnieri et al. 2006). Dessa forma, o custo de instalação e manutenção de uma rede de radiômetros para mapeamento da radiação solar incidente com boa precisão dos resultados obtidos em extensões, como a do território brasileiro, seria extremamente elevado, inviabilizando sua execução. A adoção de modelos computacionais que utilizam dados de satélites é, certamente, a melhor alternativa para o mapeamento da disponibilidade de energia solar no território brasileiro (Pereira et al., 2006).

Segundo Martins (2007) os modelos computacionais podem ser classificados em modelos estatísticos e modelos físicos. Os modelos físicos caracterizam-se por utilizar métodos matemáticos que visam simular os processos físicos de transferência de energia que ocorrem na atmosfera e solucionar a equação de transferência radiativa. A

principal vantagem que os modelos físicos apresentam sobre os modelos estocásticos está relacionada ao fato de serem aplicáveis para qualquer localidade ou condições climáticas sem a necessidade de alterações. Um detalhe importante é que apesar da generalidade espacial dos modelos físicos, estes necessitam de informações confiáveis sobre as condições atmosféricas para fornecer estimativas precisas da radiação solar incidente. Nem sempre tais informações estão disponíveis ou apresentam a confiabilidade esperada para obtenção de estimativas precisas. Além disso, em algumas situações tornam-se necessárias adaptações na modelagem de alguns processos físicos a fim de que a influência de fenômenos característicos de determinadas regiões ou períodos sazonais, por exemplo, as queimadas durante a estação seca nas regiões Norte e Centro-Oeste brasileiras, possam ser levadas em consideração na determinação das estimativas de radiação solar incidente (Guarnieri, 2006; Pereira et al., 2006; Martins, 2007).

Vários métodos foram desenvolvidos para solucionar a equação de transferência radiativa de forma precisa. Por exemplo, os métodos que utilizam harmônicos esféricos (Dave e Canosa, 1974), ordenadas discretas (Liou, 1976), ordens sucessivas de espalhamento (Raschke, 1972), Monte Carlo e diferenças finitas (Lenoble, 1985). Estas técnicas necessitam um tempo computacional elevado para obtenção de estimativas da irradiância solar, principalmente em condições de céu com nuvens de elevada espessura óptica (Kerschgens et al., 1978), inviabilizando seu uso rotineiro. Como alternativa aos métodos precisos, foram desenvolvidos métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor com o objetivo de utilização operacional e rotineira para a obtenção de estimativas de irradiação solar confiáveis. Entre os métodos aproximados pode-se destacar a Aproximação de Eddington e o Método de Dois Fluxos (“two-stream approach”) bastante utilizados nos modelos em uso atualmente (Lenoble, 1985, Martins et al., 2007).

Estudos executados com o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, que utiliza a aproximação de Dois-Fluxos, demonstram o grande potencial para aproveitamento da energia solar que o Brasil possui em função de sua localização tropical.

Cenários energéticos de aproveitamento do recurso energético solar demonstram a viabilidade econômica mesmo no Rio Grande do Sul, estado localizado no extremo sul do país e abaixo do Trópico de Capricórnio (Pereira et al., 2006).

Os modelos estatísticos caracterizam-se por utilizar expressões empíricas para a estimativa da radiação incidente em função de alguma propriedade do sistema terra-atmosfera medida por satélite ou por instrumentos de superfície. Estes modelos apresentam validade restrita à região para a qual as expressões empíricas foram desenvolvidas. No entanto, podem apresentar grande confiabilidade e apresentam uma demanda computacional muito menor que os modelos físicos. Em virtude dessas vantagens, diversos estudos foram publicados para descrever modelos estocásticos desenvolvidos em diversas regiões do planeta para a avaliação da disponibilidade de energia solar na superfície.

## 1.2. A Rede SONDA e Medidas de Superfície

A Rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais voltados ao setor energético) é coordenada e executada pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) em conjunto com Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC). Sua implementação foi realizada com suporte financeiro da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), e sua manutenção e operação vem recebendo o apoio da PETROBRAS.

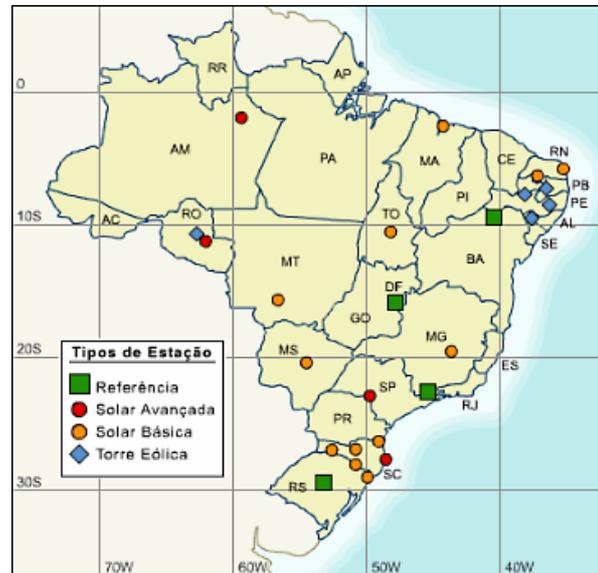
O objetivo da Rede SONDA é a aquisição de dados meteorológicos e climáticos destinados a atender a demanda de informações do setor energético sobre os recursos de energia solar e eólica no território brasileiro. A Rede SONDA vem possibilitando o estudo e desenvolvimento de modelos numéricos para estimativas dos potenciais de energia solar e eólica por meio de uma infraestrutura física e de recursos humanos destinada à coleta e qualificação de dados meteorológicos, eólicos e solarimétricos medidos em estações de superfície. A Figura 1 mostra a localização das estações de medida ao longo do território brasileiro. Atualmente, quatro estações são classificadas como “Estações de Referência” por serem dotadas de um conjunto completo de equipamentos para

monitoramento da irradiação solar e do vento. Uma lista detalhada dos equipamentos instalados nestas estações de referência, localizadas em Petrolina (PE), Brasília (DF), Rolim de Moura (RO) e São Martinho da Serra (RS), é apresentada no Quadro 1. Essas quatro estações participam do programa internacional “Baseline Solar Radiation Network” (BSRN) coordenado pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO). A BSRN é um programa que visa monitorar globalmente a interação da radiação solar com outras variáveis climáticas e sua influência sobre mudanças percebidas no clima do planeta. As demais estações da rede SONDA contam com configuração similar às estações de referência, mas realizam a aquisição de um número menor de variáveis.

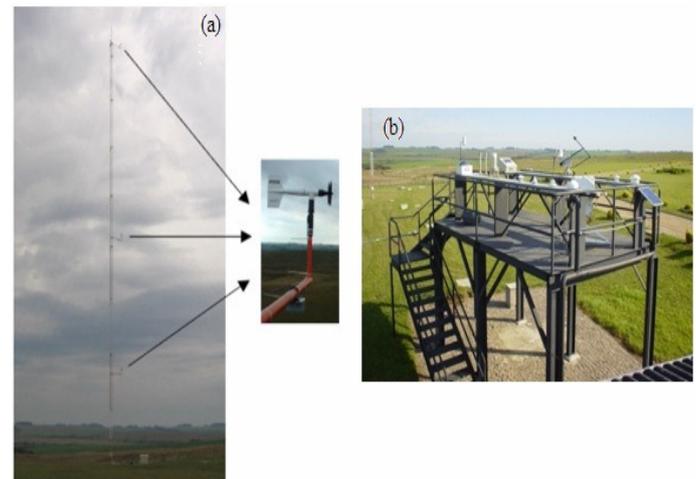
A plataforma com os sensores de medida das variáveis radiométricas e a torre eólica em operação na estação de São Martinho da Serra (RS), instalada no Observatório Espacial do Sul (OES), subunidade do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, é apresentada na Figura 2.

Os dados coletados nas estações SONDA passam por um processo de qualificação com o objetivo de identificar dados suspeitos (errôneos), reforçar a confiabilidade e servir de alerta para a manutenção dos equipamentos em operação na estação. Durante o processo de qualificação, os dados são sinalizados através da atribuição de um código numérico de quatro dígitos armazenados em arquivos disponibilizados junto com os dados medidos na estação. O processo de qualificação dos dados de radiação solar baseia-se na estratégia de controle de qualidade de dados adotada para a BSRN enquanto para dados meteorológicos e eólicos são adotados os critérios de qualidade estabelecidos pela Meteorological Resource Center e publicados na WebMET.com. Em resumo, a instalação dos equipamentos, a organização e o controle de qualidade dos dados coletados seguem padronização estabelecida internacionalmente de modo a garantir a confiabilidade das informações e dados disponibilizados para acesso público e estudos científicos. As quatro estações de referência da rede SONDA já integram a BSRN e os dados coletados nessas localidades estão disponíveis nos websites de ambas as redes. Os dados coletados nas demais estações estão disponíveis apenas no site

<sonda.cptec.inpe.br>.



**Figura 1** - Rede de estações coletoras de dados do Projeto SONDA. Fonte: SONDA <sonda.cptec.inpe.br>.



**Figura 2** - (a) Torre anemométrica, com destaque para os anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros de altura; (b) Plataforma com os equipamentos da Estação SONDA em São Martinho da Serra - RS. A estação está em operação no Observatório Espacial do Sul (29°26'34"S, 53°49'23"O), do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais.

**Quadro 1.** Principais equipamentos instalados nas estações da rede SONDA

Piranômetro CM 21 (Kipp & Zonen)	Aquisição de dados de irradiação solar global horizontal na faixa espectral de 0,3 $\mu\text{m}$ a 2,8 $\mu\text{m}$ .
Piranômetro CM 22 (Kipp & Zonen)	Aquisição de dados de irradiação solar difusa horizontal na faixa espectral de 0,2 $\mu\text{m}$ a 3,6 $\mu\text{m}$ .
Pireliômetro NIP (Eppley Laboratory, Inc)	Aquisição de dados de irradiação solar direta num plano normal à incidência da radiação.
Pirgeômetro PIR (Eppley Laboratory, Inc)	Aquisição de dados de irradiação de onda longa na faixa espectral de 3,5 $\mu\text{m}$ a 50 $\mu\text{m}$ .
LUX Lite (Kipp & Zonen)	Aquisição de dados de iluminância
PAR Lite (Kipp & Zonen)	Aquisição de dados de irradiação fotossinteticamente ativa (PAR), na faixa espectral de 400 nm a 700 nm.
Total Sky Imager TSI-440 (YES, Inc)	Imageador do céu para determinação da fração de cobertura de nuvens.
Sensor de Temperatura e Umidade do Ar Mod. 41372 (R. M. Young Company)	Aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar.
Sensor Temperatura do Ar Modelo 41342 (R. M. Young Company)	Aquisição de dados de temperatura do ar através de um sensor de platina.
Sensor de Pressão Barométrica PTB101 (Vaisala)	Aquisição de dados de pressão na faixa de 600 mb a 1060 mb, utilizando um sensor capacitivo.
Anemômetro Modelo 05106 (R. M. Young Company)	Aquisição de dados de velocidade horizontal e direção do vento no intervalo de 0 até 60 m/s.

Neste estudo, as integrais diárias das irradiâncias solar global e difusa serão representadas apenas por  $H$  e  $H_d$ , respectivamente. O Pireliômetro NIP mede a irradiância solar direta em um plano normal à direção de incidência da radiação, enquanto que os piranômetros medem a irradiância solar em um plano horizontal, independente da direção de incidência. Desta forma, faz-se necessária uma transformação para determinar a irradiância solar direta horizontal por meio da multiplicação dos valores medidos a cada minuto pelo cosseno do ângulo zenital nesse instante, determinado através da Equação (1).

$$\cos \theta_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(h) \quad (1)$$

onde  $\varphi$  representa a latitude do sítio em questão;  $\delta$  é a declinação solar, definida como o ângulo entre o plano da órbita da Terra e o plano da linha do

Equador; e  $h$  é o ângulo horário. As curvas diárias da irradiância solar direta normal e horizontal são apresentadas, respectivamente, na Figura 3 (a) e (b).

Grande parte das medidas de irradiação solar em superfície contempla apenas a aquisição de dados da componente global em virtude dos custos elevados envolvidos com a compra e operação dos sensores para coleta de dados de irradiação difusa e direta. A aquisição de dados para essas componentes de irradiação solar requer o uso de rastreadores que acompanham o movimento do Sol. Em medidas de irradiação difusa é necessário sombrear o sensor e evitar a incidência direta da luz solar no equipamento. Para a aquisição de dados de irradiação direta, é necessário que o equipamento esteja sempre direcionado para a posição do Sol a fim de garantir apenas a incidência direta da radiação solar sobre o sensor. Contudo, o conhecimento da componente

difusa encontra aplicações em diversos ramos da atividade humana incluindo o setor energético e arquitetura (Guarnieri, 2006). Maiores detalhes sobre os equipamentos para coleta de dados de irradiação solar podem ser obtidas em <sonda.cptec.inpe.br> ou <cesesb.cepel.br/tutorial/tutorial\_solar>.

A irradiação solar total que atinge o topo da atmosfera (TOA) durante o período de um dia, referenciada por  $H_0$ , pode ser calculada através da Equação (2).

$$H_0 = \frac{I_{sc}}{\pi} \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 [h_0 \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(h_0)] \quad (2)$$

onde  $I_{sc}$  é a constante solar, cujo valor é de aproximadamente  $1368 \text{ W/m}^2$ ;  $(d_m / d)^2$  é o fator de correção de excentricidade da órbita da Terra, sendo  $d_m$  a distância média entre a Terra e o Sol e  $d$  a distância para o dia específico; e  $h_0$  representa o ângulo horário ao nascer e pôr do Sol.

Segundo Liu e Jordan (1960), pode-se definir a limpidez da atmosfera, no que se refere à presença de material particulado que atenua a radiação solar, através do índice  $K_t$  que representa a relação entre a irradiação solar global que atinge a superfície e a irradiação solar incidente no topo da atmosfera (TOA), Equação (3).

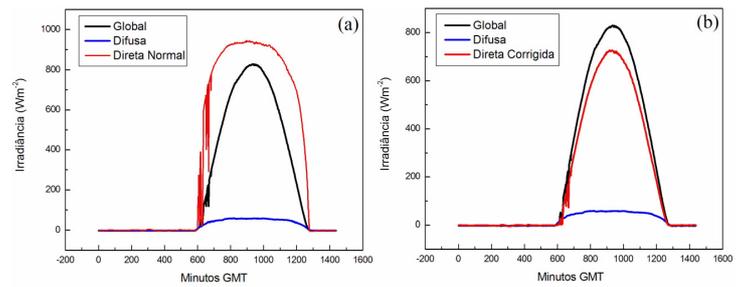
$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (3)$$

O índice  $K_t$  varia entre 0 e 1, sendo estes extremos representativos de uma atmosfera totalmente transparente à radiação solar ( $K_t = 1$ ) e totalmente opaca ( $K = 0$ ). É usual a definição de que o céu está completamente nublado para valores de  $K_t < 0,3$ , estará parcialmente nublado para valores  $0,3 < K_t < 0,7$ , e as condições de céu claro (sem nebulosidade) são observadas para valores de  $K_t > 0,7$  (Iqbal, 1983), conforme representado na Figura 4.

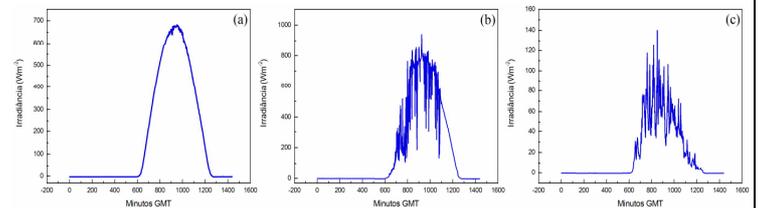
Além do índice  $K_t$ , os parâmetros  $K$  e  $K_d$  representam, respectivamente, a razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação solar global, e a

razão entre a irradiação solar difusa e a irradiação incidente no TOA, definidos de acordo com as Equações (4).

$$K = \frac{H_d}{H} \quad K_d = \frac{H_d}{H_0} \quad (4)$$



**Figura 3** - Gráfico comparando as medidas de irradiação solar global e difusa horizontais com as medidas de irradiação solar direta normal (a) e horizontal (b) coletadas na estação localizada no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra - RS, no dia 28/08/2007.



**Figura 4** - (a) Irradiação solar global em condições de céu claro observada em São Martinho da Serra (RS) no dia 01/08/2007; (b) irradiação solar global para um dia com céu parcialmente nublado observada em São Martinho da Serra no dia 07/08/2007; e (c) irradiação solar global em um dia nublado observada em São Martinho da Serra (RS) no dia 03/08/2007.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram desenvolvidos modelos estocásticos para estimar a irradiação difusa a partir de dados de irradiação solar global utilizando dados de oito estações da Rede SONDA listadas no Quadro 2, juntamente com o período de dados utilizado. O uso dos parâmetros  $K$  e  $K_t$  tiveram o intuito de eliminar a sazonalidade da série de dados de irradiação solar coletados em campo. Um modelo regional também foi desenvolvido para todo o território brasileiro empregando os dados coletados

nas mesmas oito estações de superfície. O intuito foi comparar o desempenho de modelos locais com o de um modelo regional.

**Quadro 2** - Estações da Rede SONDA utilizadas no estudo.

<i>Estação SONDA</i>	<i>Período de dados</i>
Brasília (DF) 15°36' S, 47°43' O, 1023m	08/2004 a 12/2006
Campo Grande (MS) 20°26' S, 54°32' O, 677m	01/2007 a 04/2008
Florianópolis (SC) 27°36' S, 48°30' O, 12m	08/2004 a 04/2005
Natal (RN) 5°50' S, 35°12' O, 58m	01/2007 a 04/2008
Ourinhos (SP) 22°57' S, 49°54' O, 446m	02/2006 a 05/2008
Palmas (TO) 10°11' S, 48°22' O, 48m	01/2006 a 08/2008
Petrolina (PE) 09°04' S, 40°19', 387m	07/2004 a 08/2007
São Martinho da Serra (RS) 29°44' S, 53°48' O, 489m	04/2006 a 11/2007

Todos os modelos foram desenvolvidos empregando 70% dos dados disponíveis. Os 30% dos dados restantes foram utilizados para a validação e análise do desempenho dos modelos descrita mais adiante.

O estudo também compara os resultados obtidos neste estudo com o desempenho de modelos desenvolvidos para outras regiões do planeta a fim de demonstrar a necessidade de desenvolvimento de modelos próprios e adequados para as condições ambientais observadas no Brasil. O modelo desenvolvido para a estação SONDA localizada em São Martinho da Serra foi comparado com dois modelos estocásticos originalmente desenvolvidos para regiões específicas dos Estados Unidos e Canadá e aplicados em diversos estudos publicados na literatura (Iqbal, 1983; Bashahu, 2003). Ruth e Chant (1976) desenvolveram um modelo empírico, descrito na Equação (5), para estimativa de  $K$  a partir de valores medidos de  $K_t$  (denominado neste estudo por Modelo RC). Os pesquisadores Collares – Pereira

e Rabl (1979) desenvolveram um modelo empírico semelhante, aqui denotado por CPR, conforme descrito em (6).

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.98 & (K_t \leq 0.1) \\ 0.910 + 1.154K_t - 4.936K_t^2 + 2.848K_t^3 & (0.1 \leq K_t \leq 0.7) \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & (K_t \leq 0.17) \\ 1.188 - 2.272K_t + 9.473K_t^2 - 21.856K_t^3 + 14.648K_t^4 & (0.17 \leq K_t \leq 0.8) \end{cases} \quad (6)$$

O desempenho dos modelos numéricos é avaliado por meio de comparação das estimativas por

eles fornecidas com dados coletados em superfície. Para a avaliação dos modelos, faz-se necessário o uso de métricas estatísticas como, por exemplo, os desvios apresentados entre as estimativas fornecidas pelos modelos e os dados coletados nas estações de superfície. Neste estudo foram calculados os desvios estatísticos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidos em (7).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  representam, respectivamente, os valores de irradiação solar medidos e estimados, e  $N$  representa o número total de medidas empregadas na análise. O desvio estatístico MBE, também conhecido como desvio médio (ou viés), fornece informações sobre a generalidade das estimativas de um modelo quanto à superestimativa ( $MBE > 0$ ) ou subestimativa ( $MBE < 0$ ) da irradiação solar na superfície. O valor do desvio RMSE está relacionado com a dispersão entre os valores estimados e observados nas estações de superfície decorrentes de erros não sistemáticos. Os valores dos dois desvios fornecem informações relevantes para avaliar a real confiabilidade das estimativas fornecidas por um modelo numérico. Os desvios estatísticos MBE e RMSE podem ser divididos pelo valor médio das observações de campo a fim de expressar os valores percentuais em relação ao valor médio da irradiação solar medida em superfície.

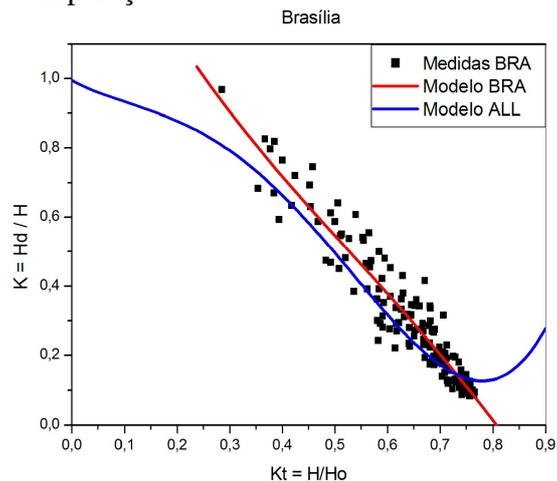
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito anteriormente, os parâmetros  $K$  e  $K_t$  foram calculados utilizando os totais diários de irradiação solar observadas nas oito estações da rede SONDA indicadas no Quadro 2, com os períodos de dados disponíveis em cada uma das estações. Um modelo estocástico foi desenvolvido para cada localidade adotando metodologia semelhante à empregada no desenvolvimento dos modelos empíricos RC e CPR (Ruth e Chant, 1976; Collares-Pereira e Rabl, 1979). Também foi desenvolvido um modelo regional (Modelo ALL) para o território brasileiro utilizando os dados disponíveis em todas as oito estações

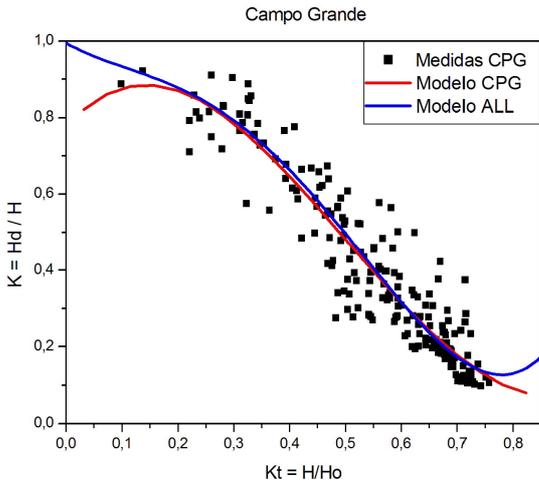
SONDA utilizadas neste estudo.

A Tabela 1 apresenta os modelos estocásticos desenvolvidos neste estudo. A Tabela 2 apresenta os desvios MBE e RMSE apresentados pelas estimativas dos modelos locais e regional. Os desvios estatísticos apresentaram comportamentos distintos nas diversas localidades. Especificamente, o modelo ALL adaptou-se melhor para as estações de Petrolina, Florianópolis e Campo Grande, e apresentou confiabilidade mais reduzida para as estações de Natal e Palmas onde apresentou desvios sistemáticos superiores a 10%. O modelo superestimou a irradiação difusa em Campo Grande, Ourinhos e Palmas e subestimou em Brasília, Florianópolis, Natal e São Martinho da Serra. O modelo ALL apresentou menor desvio MBE para Petrolina. O comportamento gráfico dos modelos estocásticos locais e regional em conjunto com os dados coletados nas estações SONDA é apresentado nas Figuras 5 a 12.

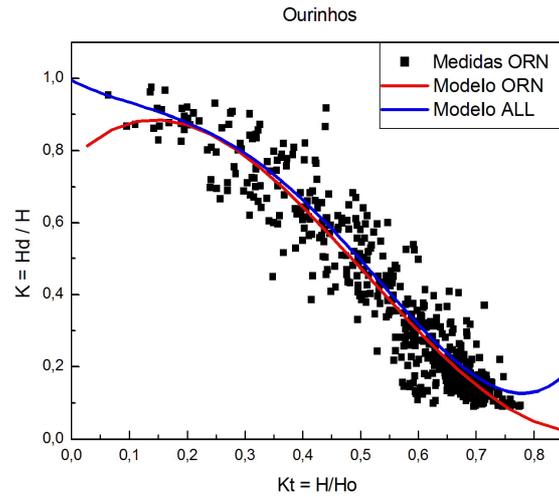
Os modelos empíricos RC e CPR foram aplicados para a localidade de São Martinho da Serra (RS) com o intuito de comparação do desempenho dos modelos desenvolvidos neste estudo para essa localidade. A Tabela 4 apresenta os desvios MBE e RMSE observados para os quatro modelos aplicados a São Martinho da Serra. A Figura 13 apresenta as curvas dos modelos empíricos RC, CPR e SMS para comparação.



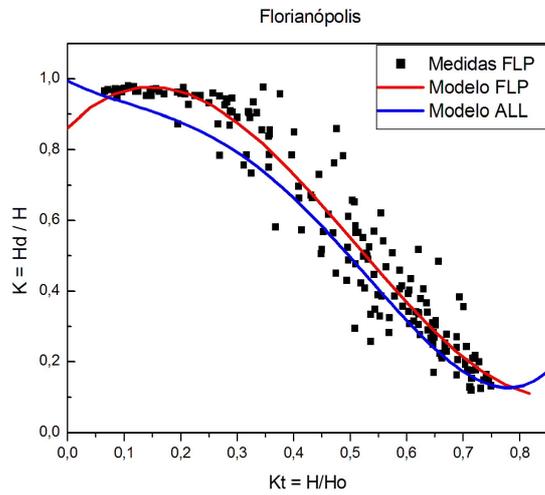
**Figura 5** - Modelos regional ALL e local BRA aplicados à estação SONDA de Brasília.



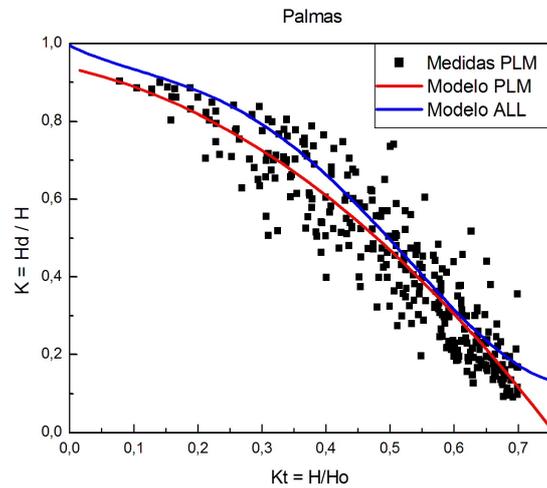
**Figura 6** - Modelos regional ALL e local CPG aplicados à estação SONDA de Campo Grande.



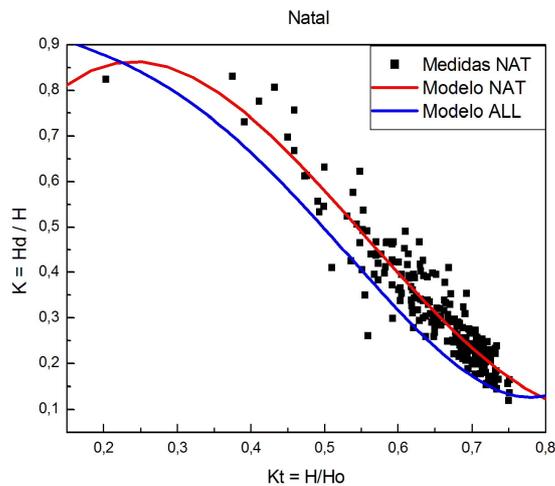
**Figura 9** - Modelos regional ALL e local ORN aplicados à estação SONDA de Ourinhos.



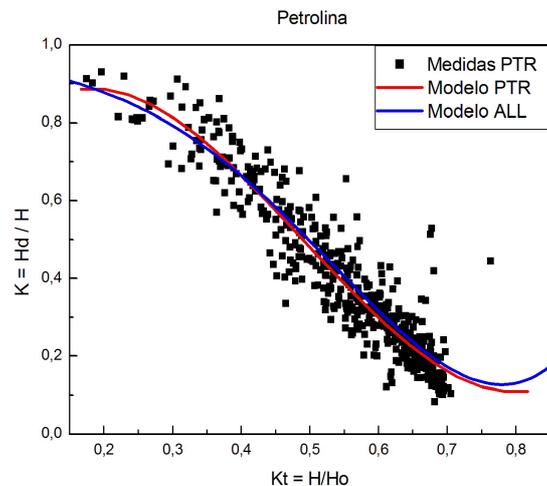
**Figura 7** - Modelos regional ALL e local FLP aplicados à estação SONDA de Florianópolis.



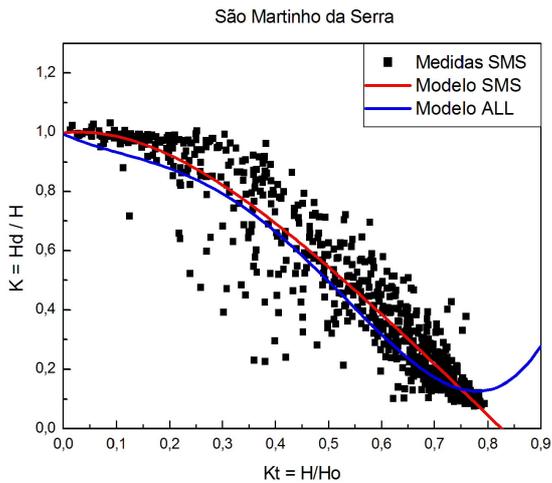
**Figura 10** - Modelos regional ALL e local PLM aplicados à estação SONDA de Palmas.



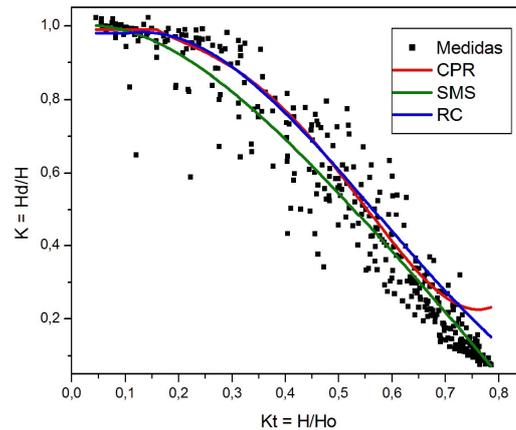
**Figura 8** - Modelos regional ALL e local NAT aplicados à estação SONDA de Natal.



**Figura 11** - Modelos regional ALL e local PTR aplicados à estação SONDA de Petrolina.



**Figura 12** - Modelos regional ALL e local SMS aplicados à estação SONDA de São Martinho da Serra



**Figura 13** - Comparação entre estimativas do índice K para a localidade de São Martinho da Serra utilizando os modelos empíricos CPR, RC e SMS

**Tabela 1** - Modelos estocásticos locais desenvolvidos para as estações SONDA selecionadas neste estudo.

<i>Estação SONDA</i>	<i>Modelo Empírico</i>
Brasília (BRA)	$1,68 - 3,457 * K_t + 3,683 * K_t^2 - 2,936 * K_t^3 + 0,589 * K_t^4$
Campo Grande (CPG)	$0,775 + 1,629 * K_t - 6,637 * K_t^2 + 4,415 * K_t^3$
Florianópolis (FLP)	$0,863 + 1,648 * K_t - 6,369 * K_t^2 + 3,192 * K_t^3 + 0,925 * K_t^4$
Natal (NAT)	$0,445 + 3,835 * K_t - 10,178 * K_t^2 + 6,100 * K_t^3$
Ourinhos (ORN)	$0,773 + 1,670 * K_t - 6,741 * K_t^2 + 4,403 * K_t^3$
Palmas (PLM)	$0,937 - 0,364 * K_t - 1,107 * K_t^2 - 0,064 * K_t^3$
Petrolina (PTR)	$0,640 + 2,937 * K_t - 9,863 * K_t^2 + 6,701 * K_t^3$
São Martinho da Serra (SMS)	$0,999 + 0,189 * K_t - 3,342 * K_t^2 + 2,75 * K_t^3 - 0,91 * K_t^4$
Regional Brasileiro (ALL)	$0,995 - 0,812 * K_t + 2,992 * K_t^2 - 10,995 * K_t^3 + 8,54 * K_t^4$

**Tabela 2** - Desvios estatísticos apresentados pelas estimativas dos modelos locais e regional (Modelo ALL) quando comparado com os valores coletados nas estações da Rede SONDA empregadas no estudo.

<i>Estação SONDA</i>	<i>Modelos Locais</i>		<i>Modelo Regional</i>	
	<i>MBE [%]</i>	<i>RMSE [%]</i>	<i>MBE [%]</i>	<i>RMSE [%]</i>
Brasília (BRA)	4,49	21,26	-8,47	21,40
Campo Grande (CPG)	5,46	17,72	3,15	19,38
Florianópolis (FLP)	2,69	16,95	-9,33	17,50
Natal (NAT)	9,60	22,29	-16,33	24,20
Ourinhos (ORN)	7,44	21,36	7,46	22,33
Palmas (PLM)	8,84	26,31	11,02	23,48
Petrolina (PTR)	-7,24	17,78	0,58	17,31
São Martinho da Serra (SMS)	-0,73	15,83	-8,35	21,98

De modo geral, verifica-se boa confiabilidade dos modelos empíricos. No entanto, esses modelos apresentam discrepâncias maiores quando os valores do índice  $K_t$  são superiores a 0,7. Nesta condição, os modelos RC e CPR superestimam as medidas enquanto que o modelo SMS consegue simular o comportamento do parâmetro  $K$  em função de valores de  $K_t$ . Provavelmente os modelos RC e CPR foram desenvolvidos em regiões onde existe maior presença de constituintes atmosféricos com elevados coeficientes de espalhamento da radiação solar. A Tabela 4 apresenta os desvios estatísticos apenas para dias de céu claro, com  $K_t > 0,7$ . No entanto, não foi possível o estudo do caráter sazonal dos desvios em dias de céu claro uma vez que a ocorrência desta condição ocorre principalmente nos meses de inverno.

Uma análise sazonal do desempenho dos três modelos foi realizada e os desvios encontrados estão apresentados na Tabela 5. Observou-se que o modelo SMS apresentou os menores desvios MBE% para todos os períodos do ano. Em geral, os modelos superestimaram a irradiação difusa na superfície. O modelo SMS mostrou pequenos desvios MBE% durante a Primavera e o Verão, mas apresentou superestimativa no Outono e subestimativa durante o Inverno quando o clima é mais seco e a quantidade de aerossóis na atmosfera é superior e apresenta maior variabilidade.

Adicionalmente, nota-se que os desvios RMSE são maiores durante a Primavera e Verão. As causas de desvios RMSE maiores devem ser investigadas, mas a hipótese inicial é que estejam relacionados à maior variabilidade da nebulosidade ao longo do dia nestas estações do ano. Em resumo, os desvios estatísticos apresentados na Tabela 4 indicam que o modelo SMS destaca-se pela sua significativa maior confiabilidade na previsão dos parâmetros de irradiação solar. Apesar de apresentar desvios MBE três vezes superior ao obtido com o modelo local, o modelo regional mostrou melhor desempenho que os modelos RC e CPR, exceto para o inverno quando subestimou a irradiação de forma muito intensa. Essa subestimativa é atribuída ao fato de que a região de São Martinho da Serra apresentar uma quantidade muito menor de aerossóis durante a estação seca do que outras localidades utilizadas no estudo, principalmente quando comparado com as estações em Campo Grande, Palmas, Brasília e Ourinhos onde

há grande influência de queimadas nesse período do ano.

**Tabela 4.** Desvios estatísticos calculados para os modelos CPR, RC e SMS em dias de céu claro para a localidade de São Martinho da Serra

<i>Modelo</i>	<i>MBE%</i>	<i>RMSE%</i>
CPR	77,52	83,55
RC	61,51	66,82
SMS	11,03	28,72
ALL	7,16	30,39

**Tabela 5.** Desvios estatísticos calculados para os modelos empíricos CPR, RC e SMS nas diferentes estações do ano para São Martinho da Serra.

<i>Mode lo</i>	<i>Desvios</i>	<i>Prim avera</i>	<i>Verão</i>	<i>Outono</i>	<i>Inver no</i>	<i>Anual</i>
CPR	MBE%	14,06	11,20	11,69	3,30	9,90
	RMSE%	23,88	23,24	19,26	13,26	19,11
RC	MBE%	13,14	12,72	13,18	3,25	10,68
	RMSE%	21,94	23,15	20,34	12,55	19,89
SMS	MBE%	0,86	0,17	2,18	-4,90	-0,73
	RMSE%	17,01	19,44	15,07	12,80	15,83
ALL	MBE%	8,67	-9,30	-7,00	-	-8,35
	RMSE%	14,60	22,4	16,70	17,25	21,98

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, PETROBRÁS e à FINEP pelo suporte financeiro e a todas as pessoas envolvidas na instalação e manutenção das estações da Rede SONDA. Agradecimento especial à equipe do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM/INPE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais que presta todo o suporte de manutenção das estações da rede SONDA.

## 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bashahu, M. 2003. Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical Africa site. *Solar Energy*, v.75, p.43-51.
- Collares-Pereira, M.; Rabl, A. 1979. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, v.22 n.2, p.155-164.
- Dave, J.V.; Canosa, Z. 1974. A direct solution of the radiative transfer equation: application to atmospheric models with

arbitrary vertical non-homogeneous. *Journal of Atmospheric Science*, v.31, p.1089-1101.

Guarnieri, R.A. 2006. Emprego de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo Eta. Master thesis. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 171p.

Iqbal, M. 1983. *An introduction to solar radiation*. Academic Press, Canada. 390p.

Kerschgens, M.; Pilz, U.; Rashcke, E. 1978. A modified two-stream approximation for computations of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere. *Tellus*, v.30 n.5, p.429-435.

Lenoble, J. 1985. *Radiative transfer in scattering and absorbing atmospheres: standard computational procedures*. A. Deepak Publishing, Virginia, 420p.

Liou, K. 1976. On the absorption, reflection and transmission of solar radiation in cloudy atmospheres. *Journal of Atmospheric Sciences*, v.33, p.798-805.

Liou, B.Y.H.; Jordan, R.C. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.4 n.3, p.1-19.

Martins, F.R.; Pereira, E.B.; Abreu, S.L.; Colle, S. 2007. Satellite-derived solar resource maps for Brazil – SWERA Project. *Solar Energy*, v.81, p.517-528.

Pereira, E.B.; Martins, F.R.; Abreu, S.L.; Rüther, R. 2006. *Atlas brasileiro de energia solar*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 60p.

Perez, R.; Seals, R.; Zelenka, A. 1997. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, v.60 n.2, p.89-96.

Raschke, E. 1972. Multiple scattering calculations of the transfer of solar radiation in an atmosphere-ocean system. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, v.45, p.1-19.

Ruth, D.W.; Chant, R.E. 1976. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. *Solar Energy*, v.18 n.2, p.153-154.