

## **INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA, MEDIANTE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS, EM LOCALIDADES DO SERTÃO DE PERNAMBUCO - BRASIL**

**A.N. Siqueira<sup>1</sup>, C.Tiba<sup>2</sup>, N. Fraidenraich<sup>3</sup>**

Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco

Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU, CEP 50.740-540, Recife, Pernambuco, Brasil

Fone:+5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250 e-mail: adalbertons@cbtu.gov.br ; tiba@ufpe.br; naumf@uol.com.br

**RESUMO:** Este trabalho propõe uma alternativa para geração de séries sintéticas da irradiação solar diária, a partir da interpolação espacial usando redes neurais artificiais (RNA). Foram utilizadas variáveis geográficas e meteorológicas, facilmente disponíveis. Os dados foram medidos entre 2000 e 2006 em sete localidades brasileiras de clima tropical semi-árido. As estimativas foram realizadas para os meses de março, julho e novembro, correspondentes aos períodos de incidências média, mínima e máxima da irradiação solar na região. Para cada localidade, a série foi estimada a partir do aprendizado fundamentado nas seqüências experimentais referentes às outras seis localidades. As séries calculadas, quando comparadas com as séries experimentais produziram RMSE entre 11 e 25%, dependendo do local. Os valores acumulados da irradiação solar mensal, calculados e experimentais têm desvios máximos de 10%, demonstrando a aptidão do modelo para fornecer dados de entrada para a simulação de sistemas solares a longo prazo. O modelo mostrou-se capaz de reproduzir, de forma satisfatória, o coeficiente de auto correlação de primeira ordem para o mês de maior incidência da irradiação solar (novembro) e de forma decrescente, para os meses de menores incidências.

**Palavras chave:** Redes neurais artificiais, irradiação solar diária, séries temporais sintéticas

### **1 INTRODUÇÃO**

A escassez de informações precisas sobre a irradiação solar, disponível em uma determinada localidade, é um dos fatores limitativos do desenvolvimento de áreas como agropecuária, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e particularmente para a área da energia solar.

No Brasil, (Tiba et al, 2001) fez um levantamento das informações solarimétricas terrestres existentes, e mostrou que a principal deficiência refere-se à grande escassez de informações para a maioria das localidades brasileiras, provavelmente explicada tanto pelos altos custos dos equipamentos utilizados na obtenção desses dados como também pela grande extensão territorial. Para superar este problema, dentre as principais propostas sugeridas pelo trabalho pode-se destacar a geração de séries temporais sintéticas da irradiação solar diária, que reproduzam as principais características estatísticas das séries históricas.

A partir dessas séries, é possível obter dados de entrada que viabilizam a simulação de sistemas solares submetidos a regime estocástico diário e a avaliação de desempenho dos sistemas solares a longo prazo.

Dentre os fatores que favorecem a utilização das RNA como ferramenta de cálculo da irradiação solar podemos destacar a sua robustez (capacidade de manejar bem as seqüências temporais da irradiação solar com falhas), a complexidade do fenômeno físico em questão (diversos parâmetros físicos inter-relacionados) e a considerável quantidade de informações meteorológicas em nível espacial e temporal rotineiramente medidas em estações meteorológicas.

O uso de RNA para geração de séries sintéticas da irradiação solar, utilizando a interpolação espacial, é muito recente e tem sido utilizado basicamente em escala mensal.

Nesta abordagem a rede é treinada com dados referentes a um conjunto de localidades e graças a sua capacidade de generalização realiza estimativas para outra localidade dentro de uma determinada região, a partir do conhecimento da correlação existente entre a irradiação solar e outras variáveis, meteorológicas ou geográficas.

São exemplos dessa abordagem os trabalhos apresentados por (Alawi e Al-Hinai, 1998), (Mohandes et al, 2000), (Atsu et al, 2002), (Adnan et al, 2004) e (Mellit et al, 2005), desenvolvidos para estimar os valores da irradiação solar diária total, média mensal incidente em uma superfície horizontal.

No presente estudo pretende-se aplicar a abordagem da interpolação espacial na geração de séries temporais sintéticas da irradiação solar diária para sete localidades situadas no Sertão do estado de Pernambuco no Brasil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados durante os meses de março, julho e novembro, correspondentes aos períodos de incidências média, mínima e máxima da irradiação solar na Região, entre os anos de 2000 e 2006, pelo CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Brasil, em sete localidades do Sertão de Pernambuco, Tabela 1 e Figura 1. O conjunto refere-se às séries temporais medidas simultaneamente das seguintes variáveis meteorológicas diárias: irradiação global diária incidente em uma superfície horizontal ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$ ), medida com um piranômetro da LI-COR, precipitação pluviométrica (mm) e temperaturas máxima, e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ). Para a composição do conjunto de entrada da RNA utilizou-se ainda, as seguintes variáveis geográficas: latitude (graus), longitude (graus) e altitude (m).

Localidade	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Altitude (m)	Período de coleta		
				Março	Julho	Novembro
Araripina	7.57 S	40.50 W	622	2000 e 2002 a 2006	2000 a 2006	2000 a 2006
Arcoverde	8.42 S	37.05 W	663	2000 a 2006	2000 a 2006	2000 a 2006
Floresta	8.60 S	38.57 W	316	2003 a 2006	2002 a 2004	2002 a 2004
Ouricuri	7.88 S	40.08 W	451	2003 a 2006	2002 a 2006	2002 a 2006
Petrolina	9.15 S	40.38 W	376	2002 e 2005 a 2006	2001 a 2002 e 2004 a 2006	2001 e 2004 a 2006
S.M.B.Vista	8.80 S	39.82 W	361	2003 a 2006	2002 a 2006	2002 a 2006
S.Talhada	7.99 S	38.29 W	429	2002 a 2004 e 2006	2001 a 2004 e 2006	2001 a 2003 e 2005 a 2006

Tabela 1: Localidades estudadas.

Todas as localidades estão situadas na região Nordeste do Brasil, possuem climas tropicais semi-áridos, onde o período de maior incidência de irradiação é composto pelos meses de novembro, dezembro e janeiro e o de menor incidência por maio, junho e julho.

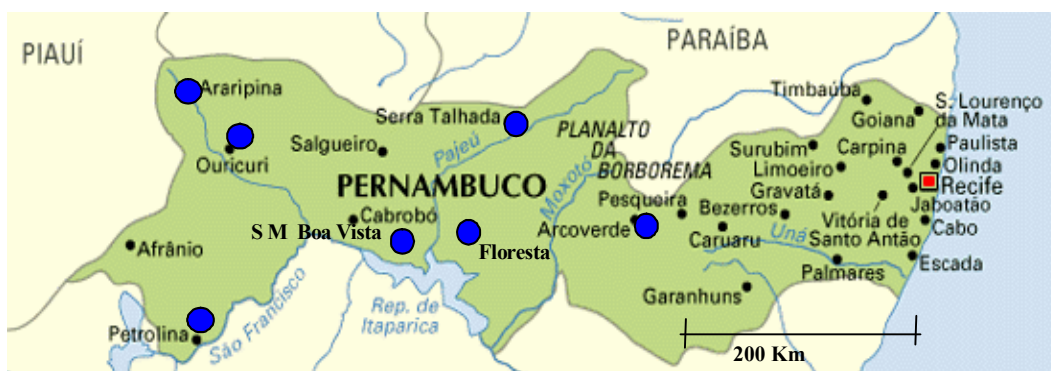


Figura 1: Mapa do estado de Pernambuco, onde as localidades estudadas estão destacadas em azul

### 2.1 Redes neurais artificiais

Durante a interpolação espacial a RNA foi treinada a partir de um conjunto de dados de seis localidades, e utilizada para estimar a irradiação na sétima localidade. O procedimento foi repetido até que fossem realizadas estimativas para todas as localidades.

Durante os trabalhos foram utilizadas RNA do tipo perceptron de múltiplas camadas (PMC) cuja camada de entrada possui o número de neurônios definido pela quantidade de variáveis de entrada utilizadas, a camada oculta possui o número de neurônios definido empiricamente em função do tamanho do conjunto de treinamento e a camada de saída é composta de apenas um neurônio, responsável pela estimativa da irradiação solar. Uma rede PMC tem os seus neurônios (unidades de processamento de informação) organizados em camadas sem conexões laterais e os sinais de entrada se propagam de trás para frente através da rede que é treinada por um algoritmo de retro propagação. Na Figura 2, está representada a estrutura deste tipo de rede.

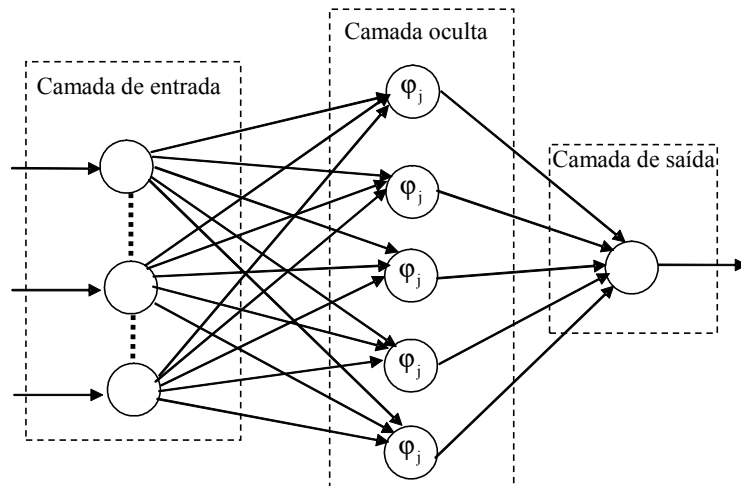


Figura 2: Rede Neural PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas).

Nas redes neurais do tipo PMC, figura 2, a ativação dos neurônios nas camadas oculta e de saída foi dada pela função de ativação do tipo sigmóide ( $\phi$ ).

### Fase de aprendizagem

As RNA utilizadas no estudo foram treinadas a partir do algoritmo back-propagation, que é um método de treinamento iterativo supervisionado para redes multicamadas com propagação de sinal de trás para frente, que minimiza o erro médio quadrático entre a saída da rede ( $y_k(n)$ ) e a saída desejada ( $d_k(n)$ ), figura 3, (Haykin, 2004).

Após neurônio  $k$  ser acionado por um vetor de estado  $x(n)$  produzido pela camada de neurônios ocultos, que foi por sua vez acionada por um vetor de entrada (estímulo) aplicado à camada de entrada da rede neural, o algoritmo determinou os pesos das conexões entre os neurônios da seguinte forma: a implementação da rede foi iniciada com um exemplo de treinamento e usando os pesos existentes, calculou a saída ou o exemplo de saída, em seguida, o algoritmo calculou o erro ( $e_k(n)$ ), tomando a diferença entre o resultado calculado e o esperado (resultado real), e finalmente, o erro foi realimentado para a rede e os pesos ajustados visando minimizar o erro, .

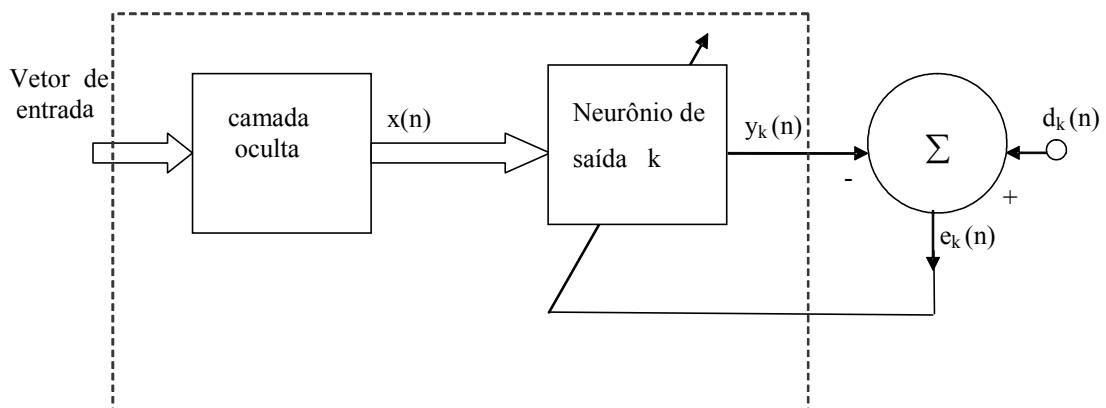


Figura 3: Diagrama de uma rede PMC treinada com a aprendizagem supervisionada

### Desenvolvimento dos modelos

Considerando os períodos de incidências média, mínima e máxima de irradiação solar na Região, foram analisadas às estimativas referentes às séries de diversos anos, relativas aos meses março, julho e de novembro. Após a etapa de filtragem dos dados, partindo de 106 meses e restando 76 meses, o conjunto de dados mensais resultante foi dividido em dois subconjuntos: treinamento, e teste conforme a Tabela 2.

Localidade	Teste (Março)	Teste (Julho)	Teste (Novembro)	Treinamento (Mês correspondente)
Araripina	2001 e 2003 a 2006	2001 a 2002 e 2005 a 2006	2003 a 2006	Demais localidades
Arcoverde	2001 a 2005	2000 e 2002 a 2006	2002 a 2004	Demais localidades
Floresta	2003 a 2006	2002 a 2004	2002 e 2003	Demais localidades
Ouricuri	2004 a 2005	2002 a 2006	2003;2005;2006	Demais localidades
Petrolina	2002 e 2005	2001 a 2002 e 2005 a 2006	2005 e 2006	Demais localidades
S.M.B.Vista	2003 e 2005 a 2006	2002 a 2005	2002 a 2005	Demais localidades
S.Talhada	2003 e 2006	2001 a 2003 e 2006	2001 e 2002	Demais localidades

Tabela II: Descrição dos conjuntos utilizados pelo modelo.

Na Tabela 3, está representada a arquitetura utilizada pelo modelo de RNA desenvolvido durante a realização do presente estudo. Neste modelo, a variável alvo (no caso a irradiação global diária) é incluída diretamente no conjunto de entrada, possibilitando a aprendizagem do conhecimento das correlações existentes com as demais variáveis.

Camadas	Número de Neurônios
<b>Entrada</b>	<b>(7 Neurônios)</b>
	Latitude
	Longitude
	Altitude
	Irradiação global diária
	Precipitação pluviométrica
	Temperaturas: máxima e mínima
	Amplitude térmica
<b>Oculto</b>	<b>(30 Neurônios)</b>
<b>Saída</b>	<b>(1 Neurônio)</b>

Tabela III: arquitetura das redes neurais utilizadas no estudo

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Desvios médios quadráticos e auto correlação de primeira ordem

As estimativas realizadas pelas RNA foram comparadas estatisticamente com as séries experimentais, obtendo-se os valores do RMSE e do coeficiente de auto correlação parcial de primeira ordem ( $\phi_1$ ) das séries temporais, e estão apresentados respectivamente nas Tabelas 4 e 5.

Localidade	RMSE		
	Março	Julho	Novembro
Araripina	20.4%	18.5%	19.0%
Arcoverde	15.6%	25.2%	14.4%
Floresta	17.3%	21.3%	11.4%
Ouricuri	21.4%	22.8%	15.9%
Petrolina	20.2%	17.6%	17.5%
S.M.B.Vista	17.0%	18.7%	15.0%
S.Talhada	19.6%	21.5%	13.8%

Tabela IV: RMSE, entre os valores experimentais e calculados.

Localidade	Coeficiente de auto correlação ( $\phi_1$ )					
	Março		Julho		Novembro	
	$\phi_1$	$\phi_1^*$	$\phi_1$	$\phi_1^*$	$\phi_1$	$\phi_1^*$
Araripina	0.26	0.49	0.28	0.52	0.55	0.55
Arcoverde	0.39	0.59	0.26	0.45	0.39	0.71
Floresta	0.31	0.45	0.34	0.38	0.43	0.49
Ouricuri	0.28	0.51	0.27	0.50	0.39	0.42
Petrolina	0.31	0.13	0.28	0.61	0.51	0.59
S.M.B.Vista	0.39	0.62	0.37	0.40	0.61	0.56
S.Talhada	0.37	0.23	0.46	0.48	0.51	0.42
<b>Média</b>	<b>0.33</b>	<b>0.43</b>	<b>0.32</b>	<b>0.48</b>	<b>0.48</b>	<b>0.53</b>

Tabela V: Coeficiente de auto correlação de primeira ordem das séries.

$\overline{\phi_1}$  : Coeficiente de auto correlação parcial médio mensal do período, da série experimental.

$\overline{\phi_1}^*$  : Coeficiente de auto correlação parcial médio mensal do período, da série estimada pela RNA.

A avaliação do RMSE, entre os valores experimentais e calculados da irradiação solar global diária, mostrou um bom desempenho resultando em valores entre 11% e 25% sendo que do total de 21 meses, 16 apresentaram  $RMSE \leq 20\%$ .

Além disso o modelo mostrou-se capaz de reproduzir o coeficiente de auto correlação parcial de primeira ordem de forma satisfatória, para o mês de maior incidência da irradiação solar (novembro) e de forma decrescente, para os meses de menores incidências.

Uma possível explicação é que o conjunto de variáveis utilizadas para o treinamento esteja adequado para situações onde ocorram maior persistência do clima (verão na região Nordeste do Brasil) porém, para o período de chuvas (mês de julho) pode ser necessária, a inclusão de outros parâmetros relacionados com a circulação global da atmosfera como por exemplo, as frentes frias.

As figuras de 4 a 6 mostram as séries experimentais e calculadas para Araripina e Floresta onde podem-se constatar a capacidade do modelo para acompanhar bem as variabilidades das séries experimentais, principalmente para o mês de maior incidência (novembro).

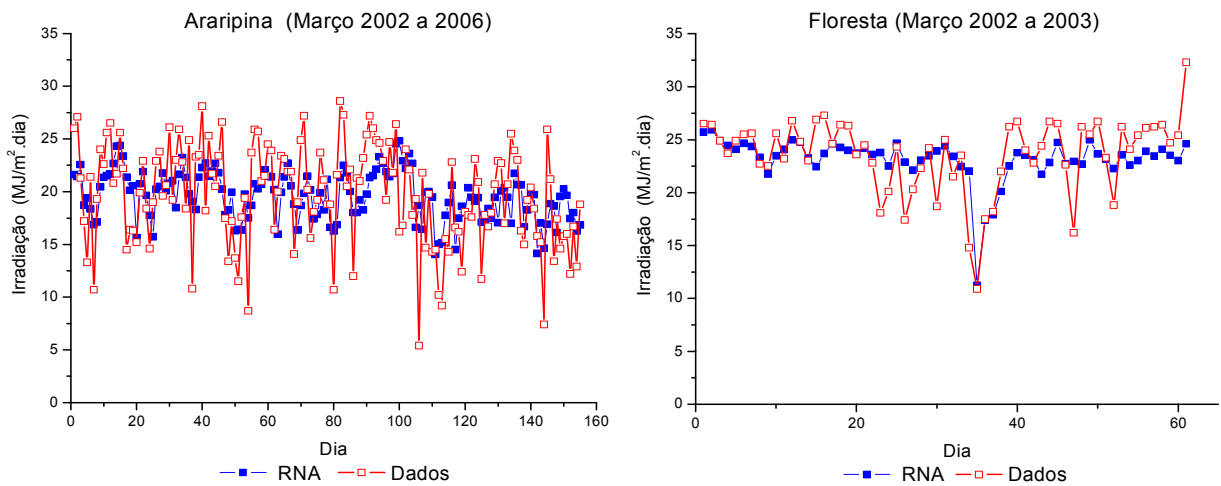


Figura 4: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para março em Araripina e Floresta.

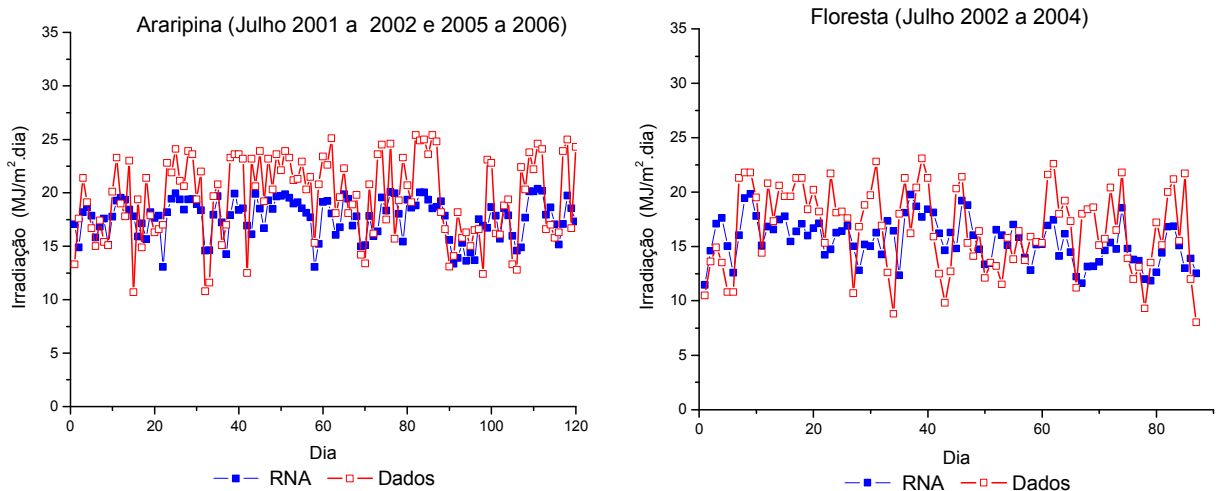


Figura 5: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para julho em Araripina e Floresta.

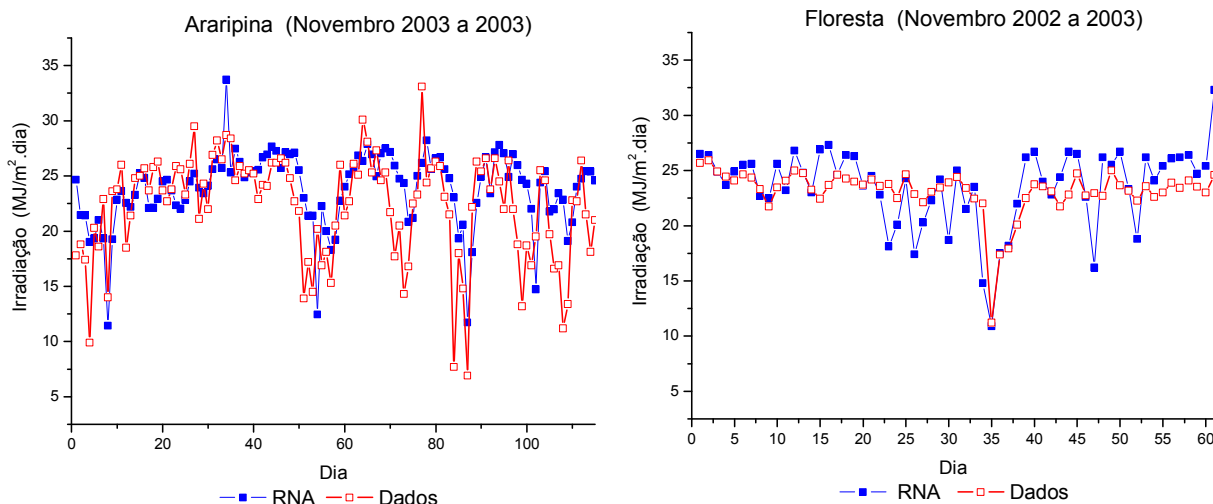


Figura 6: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para novembro em Araripina e Floresta.

### 3.2 Irradiação solar média mensal

Durante a avaliação do modelo analisou-se também os valores da irradiação solar média mensal pois, uma boa reprodução dessa medida configura-se como requisito básico para a adequação como dados de entrada de simulação de sistemas solares submetidos a regime estocástico diário e avaliação de desempenho dos sistemas solares a longo prazo, Tabela 6.

Localidade	Irradiação média mensal (MJ/m <sup>2</sup> .dia)					
	Março		Julho		Novembro	
	Dados	RNA	Dados	RNA	Dados	RNA
<b>Araripina</b>	19.7	19.6	19.6	17.7	22.3	23.8
<b>Arcoverde</b>	22.5	22.2	17.2	19.7	26.2	24.0
<b>Floresta</b>	22.4	22.4	16.7	15.5	23.6	23.2
<b>Ouricuri</b>	20.9	19.8	16.3	17.6	22.3	22.2
<b>Petrolina</b>	21.5	20.4	17.3	17.5	22.7	22.7
<b>S.M.B.Vista</b>	20.5	21.1	17.3	16.6	24.3	23.9
<b>S.Talhada</b>	21.7	23.5	16.6	16.5	23.7	25.4

Tabela VI: Irradiação média mensal das séries experimentais e sintéticas

Os valores observados permitem constatar que o modelo reproduz de forma satisfatória os valores analisados pois, todas as diferenças, em relação às medidas experimentais, ficaram abaixo de 15% sendo que do total de 21 meses, apenas dois apresentaram erros superiores a 8% , e em 13 a diferença foi menor ou igual a 5%.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do uso da interpolação espacial com redes neurais artificiais para estimar a irradiação solar diária, a partir da utilização de variáveis geográficas e de outras variáveis meteorológicas normalmente disponíveis, para localidades situadas no Sertão do estado de Pernambuco no Brasil.

Para a maioria dos meses estudados, 19 do total de 21, foram obtidas estimativas para os valores médios da irradiação solar com diferenças menores que 8%, em relação aos valores experimentais.

A reprodução do valor médio da auto correlação parcial de primeira ordem, foi realizada de forma satisfatória para o mês de novembro, mês de maior incidência da irradiação, com um erro aproximado de 10% e de forma decrescente para os meses com menores incidências de irradiação solar.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPQ), Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) e Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS) pelo suporte nas pesquisas em energia solar, particularmente nos temas referentes às medições, avaliação e mapeamento da irradiação solar.

## REFERÊNCIAS

- Adnan, S.; Erol, A.; Mehemet, O.; Galip, E.K. Use of artificial neural networks for mapping of solar potential in Turkey, *Applied Energy*, 77, pp. 273–286,(2004).
- Al-Alawi, S. M. & Ai-Hinai, H. A. An ANN-based approach for predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation. *Renewable Energy*, Vol. 14,1-4, pp. 199-204, (1998).
- Atsu, S. S.D.; Joseph, A. J.; Ali Al – Lawati Solar radiation estimation using artificial neural networks. *Solar Energy*, 71,pp. 307-319, (2002).
- Haykin, S. *Redes Neurais. Princípios e práticas*. Bookman,Porto Alegre,(2001), reimpressão 2004.
- Mellit,A.; Benghanem,M.; Hadj,A.A.;Guessoum, A. A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach. *Solar Energy*, Available online 14 March 2005.
- Mohandes , M.; Balghonaim, A.; Kassas, M.; Rehman, S.; Halawani,T. O. Use of radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation. *Solar Energy*, 68, 2, pp.161–168,(2000).
- Tiba, C.; Fraindenraich, N.; Grossi, H.; Lyra, F. *Atlas solarimétrico para localidades brasileiras*. Editora Universitária UFPE, Recife, (2001).

## ABSTRACT

This study proposes an alternative for generating daily solar irradiation synthetic series, through spatial interpolation by using artificial neural networks (RNN). Geographical and meteorological variables that are easily available were used. The data were measured between 2000 and 2006 in seven Brazilian semi-arid tropical climate localities. The estimations were carried out for the months of March, July, and November, corresponding to the periods of mean, minimum and maximum incidences of solar irradiation in the region. For each locality, the series was estimated from what was learned, based on the experimental sequences with regard to the other six localities. The calculated series, when compared with the experimental series, produced RMSE between 11 and 25%, depending on the local. The accumulated values, calculated and experimental, of monthly solar irradiation have maximum deviations of 10%, that demonstrate the ability of the model to furnish entry data for long term simulation of solar systems. The model showed that it was able to reproduce, in a satisfactory way, the auto correlation coefficient of first order for the month of higher solar irradiation incidence (November) and also for the decreasing form, for the months of lower incidence.

**Keywords:** Artificial neural network, daily solar irradiation, synthetic time series, spatial interpolation