

# ESTIMAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL DIÁRIA USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS DOS TIPOS PMC E FBR

Adalberto N. Siqueira – adalbertons@cbtu.gov.br

Chigueru Tiba - tiba@ufpe.br

Naum Fraidenraich - naumf@uol.com.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

**Resumo.** Neste trabalho, foram comparados os desempenhos de dois tipos de Redes Neurais Artificiais (RNA) para geração de séries sintéticas da irradiação solar diária: as redes do tipo perceptron de múltiplas camadas (PMC) e do tipo Função de Base Radial (FBR). Além das variáveis geográficas e da irradiação solar global diária de localidades situadas em uma determinada vizinhança, foram utilizadas como entradas apenas a amplitude térmica e a umidade mínima, variáveis facilmente disponíveis nas estações meteorológicas convencionais. Os dados utilizados foram medidos entre 2000 e 2006 em sete localidades brasileiras de clima tropical semi-árido, situadas no Sertão de Pernambuco. As estimativas foram realizadas para os meses de julho e novembro, correspondentes aos períodos de incidências 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. A comparação das séries geradas com as séries experimentais mostrou que os desvios médios quadráticos são de 16% e 11%, para os meses de julho e novembro respectivamente. Ambas as redes demonstraram capacidade para reproduzir as médias diárias mensais da região com desvios de 2% para julho e de 1% para o mês de janeiro, demonstrando assim a aptidão para produzirem séries sintéticas de irradiação solar diária para simulação de sistemas solares a longo prazo. Não foram verificadas diferenças significativas entre os dois tipos de RNA no que concerne a melhor desempenho de um modelo em relação ao outro. As séries sintéticas geradas a partir dessa metodologia podem ser utilizadas nos procedimentos modernos de simulação e avaliação de sistemas solares que utilizam a série da irradiação solar simultaneamente com séries de outras variáveis meteorológicas como a temperatura ambiente e velocidade do vento.

**Palavras-chave:** RNA, irradiação solar diária, perceptron de múltiplas camadas (PMC), função de base radial (FBR) simulação de sistemas solares a longo prazo

## 1. INTRODUÇÃO

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. São exemplos do uso 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. SIQUEIRA et al. (2006, 2007a) realizaram um trabalho sobre interpolação temporal da irradiação solar diária, ou seja o treinamento de uma RNA com dados meteorológicos e de irradiação solar e a estimação para um período de tempo onde a irradiação solar não é conhecida. Mais recentemente SIQUEIRA et al. (2007b) utilizou uma RNA do tipo perceptron de múltiplas camadas (PMC) para geração, a partir da interpolação espacial, de séries sintéticas da irradiação solar diária. Na interpolação espacial, a rede é treinada com dados meteorológicos, geográficos e irradiação solar de um conjunto de localidades e realiza estimativas para outras localidades onde não existem dados sobre irradiação solar e situadas no interior ou vizinhanças da região definida pelo conjunto de treinamento. A rede captura as correlações existentes entre a irradiação solar e outras variáveis, meteorológicas ou geográficas.

Neste estudo, foram comparadas as capacidades das Redes Neurais Artificiais do tipo perceptron de múltiplas camadas (PMC) e as do tipo Função de Base Radial (FBR) (RNA)

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram medidos durante os meses julho e novembro, correspondentes aos períodos de incidências 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, Tab.1 e

Fig.1. O conjunto refere-se às séries temporais diárias medidas simultaneamente das seguintes variáveis meteorológicas: irradiação global incidente em uma superfície horizontal ( $MJ/m^2$ ), medida com um piranômetro da LICOR, a umidade mínima (%) e a amplitude térmica ( $^{\circ}C$ ). Para completar a composição do conjunto de entrada dos modelos de RNA utilizou-se ainda, as seguintes variáveis geográficas: latitude (graus), longitude (graus) e altitude (m).

Tabela 1 - Características geográficas e período de medidas, nas localidades estudadas.

Localidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Araripina	7° 57' S	40° 50' W	622	2000 a 2006
Arcoverde	8° 42' S	37° 05' W	663	2000 a 2006
Floresta	8° 60' S	38° 57' W	316	2000 a 2006
Ouricuri	7° 88' S	40° 08' W	451	2000 a 2006
Petrolina	9° 15' S	40° 38' W	376	2000 a 2006
S.M.B.Vista	8° 80' S	39° 82' W	361	2000 a 2006
S.Talhada	7° 99' S	38° 29' W	429	2000 a 2006

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.

## 2.2 Redes neurais artificiais

Durante a interpolação espacial as RNA foram treinadas a partir de um conjunto de dados de seis localidades. Utilizando o conhecimento assim adquirido e utilizando as outras variáveis disponíveis (com exceção da irradiação solar) a RNA foi utilizada para estimar a irradiação solar na sétima localidade. Os valores da irradiação solar calculada e medida nessa localidade são comparados para realizar a validação cruzada. O procedimento foi repetido para todas as localidades.

Nos dois tipos de redes utilizados, PMC e FBR, a camada de entrada possui o número de neurônios definido pela quantidade de variáveis de entrada, 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.

Na Fig. 2 está representado o diagrama de bloco do modelo de um neurônio típico, que é o constituinte básico das

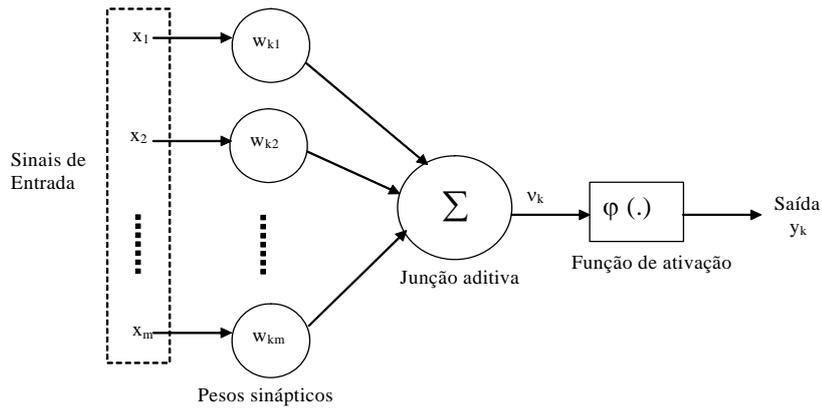


Figura 2 - Modelo do neurônio típico com propagação de sinal de trás para frente.

redes neurais artificiais. Identifica-se três elementos nesse modelo neural: um conjunto de sinapses ou elos de conexões (cada um caracterizado por um peso ou força própria), um somador para os sinais de entrada (ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio) e uma função de ativação (responsável pela restrição da amplitude da saída de um neurônio).

Apesar dos dois tipos de RNA serem considerados aproximadores universais, supervisionados e treinados pelo algoritmo de retro propagação, deve-se destacar os aspectos específicos, referentes à arquitetura e funcionamento de cada modelo.

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 Fig. 3, está representada a estrutura deste tipo de rede.

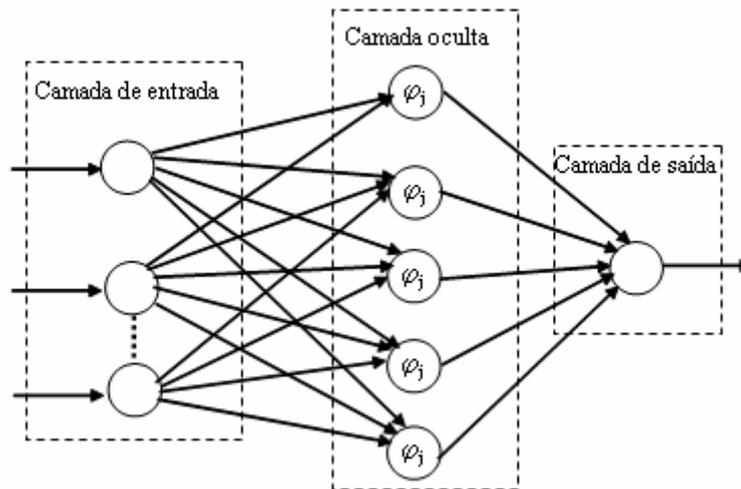


Figura 3 - Rede Neural PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas).

Nas redes neurais do tipo PMC a ativação dos neurônios nas camadas oculta e de saída é dada pela função de ativação do tipo sigmóide ( $\phi$ ). A função de ativação (Eq.1) é definida como estritamente crescente, Fig. 4, que exhibe um balanceamento adequado entre o comportamento linear e não linear.

$$\phi(v) = \left[ \frac{1}{1 + \exp(-av)} \right] \quad a > 0 \quad \text{e} \quad -\infty < v < +\infty \quad (1)$$

onde  $v$  é o campo local induzido do neurônio e  $a$  é o parâmetro de inclinação.

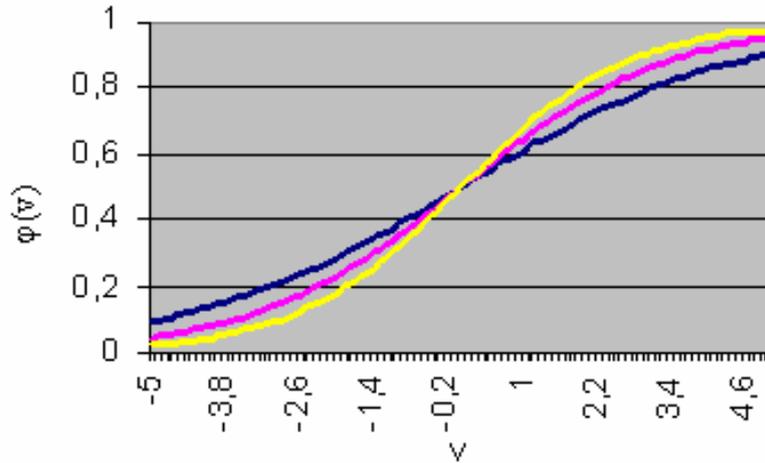


Figura 4 - Função de ativação do tipo da rede PMC, para a = 0,45 (azul), a = 0,60 (vermelho) e a = 0,75 (amarelo).

Dentre as características que diferenciam a RNA do (FBR) da apresentada anteriormente, pode-se destacar o fato de que enquanto a FBR constrói aproximações locais, nas quais as unidades que recebem entradas diretamente da entrada do sistema estão habilitadas a ver apenas parte destas, na PMC a rede constrói uma aproximação global de um mapeamento entrada-saída não linear.

A saída da rede do tipo FBR é representada por um somatório linear de uma função de base, que possui a seguinte forma:

$$y_k(x^p) = \sum_{j=1}^m w_{kj} \phi_j(x^p) \tag{2}$$

onde a função de ativação ( $\phi_j(x^p)$ ) é uma função com decaimento exponencial, Fig. 5, definida pela posição do centro  $C_j$  e pelo raio  $r_j$ , expressa por :

$$\phi_j(x^p) = \exp\left[\frac{-(x - c_j)^2}{2r_j^2}\right] \tag{3}$$

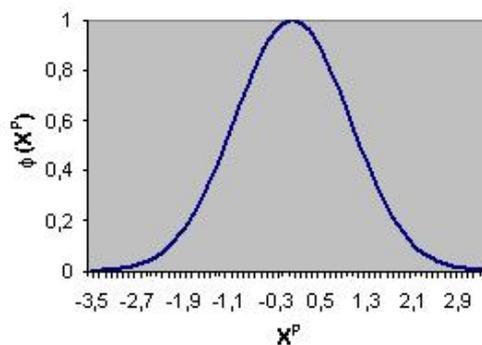


Figura 5 - Função de ativação da rede do tipo RBF, com  $C_j = 0$  e  $r_j = 1$

Na Fig. 5 verifica-se que de acordo com  $\phi_j(x^p)$ , a saída produzida a partir da camada escondida tem valor mais significativo quando o vetor de entrada estiver na vizinhança de  $C_j$  (quanto mais próximo o padrão de entrada estiver do centro maior será o valor assumido pela função de ativação), decaindo rapidamente caso contrário.

### Fase de aprendizagem

Os dois tipos de RNA utilizados no estudo foram treinados a partir do algoritmo back-propagation, que é um método de treinamento interativo 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 ( $d_k(n)$ ), Fig.6. 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 (Haykin, 2004).

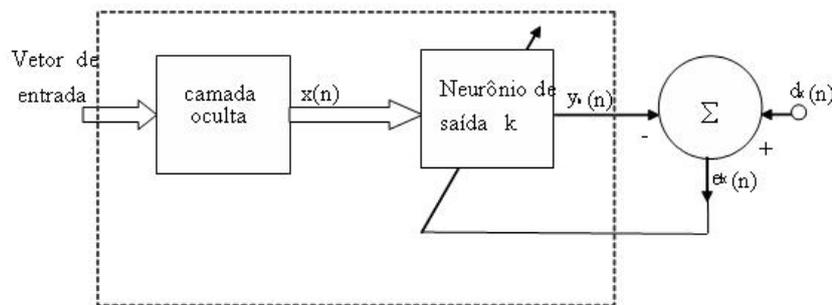


Figura 6 - Diagrama de uma rede PMC treinada com a aprendizagem supervisionada

### Desenvolvimento dos modelos

Considerando os períodos de incidências mínima e máxima da irradiação solar na região que correspondem aos meses de julho e novembro, foram realizadas estimativas diárias dos meses correspondentes para diferentes anos. Após a etapa de filtragem dos dados, o conjunto de meses testados pode ser visto na Tab. 2.

Tabela 2: Conjuntos de meses utilizados nos treinamentos e testes

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

A arquitetura utilizada pelos dois modelos de RNA foi a seguinte:

- camada de entrada composta por 6 neurônios, correspondentes às variáveis utilizadas na interpolação: latitude, longitude, altitude, irradiação solar diária global, amplitude térmica e umidade mínima;
- camada oculta com 30 neurônios, número definido empiricamente em função do tamanho do conjunto de treinamento e
- camada de saída com um neurônio, responsável pela estimativa da irradiação solar global diária.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As estimativas realizadas pelos dois modelos de RNA foram comparadas com as séries experimentais. Na Tab. 3 podem ser vistos os valores dos desvios médios quadráticos (DMQ), para os meses de novembro e julho para as localidades analisadas. Os valores de DMQ são compatíveis com erros associados a medição de radiação solar com piranômetro do tipo LICOR : erro de calibração é de 5% e que pode sofrer uma deriva de 2% ao ano. Os modelos apresentaram desempenhos semelhantes, ajustando-se melhor às séries experimentais do mês de novembro, período de maior incidência da irradiação solar na região.

Tabela 3 – Comparação entre as séries calculadas e experimentais da irradiação solar diária.

Localidade / Mês	DMQ			Localidade / Mês	DMQ		
	PMC	FBR	Desvio		Novembro	PMC	FBR
Araripina	12,3%	12,0%	-0,3%	Araripina	12,3%	12,3%	0,0%
Arcoverde	15,6%	15,7%	0,1%	Arcoverde	10,4%	10,5%	0,1%
Floresta	17,3%	17,0%	-0,3%	Floresta	9,4%	9,6%	0,2%
Ouricuri	20,2%	23,2%	3,0%	Ouricuri	10,0%	10,4%	0,4%
Petrolina	13,2%	12,6%	-0,6%	Petrolina	13,9%	13,9%	0,0%
S. Maria Boa Vista	13,3%	13,5%	0,2%	S. Maria Boa Vista	11,6%	11,6%	0,0%
Serra Talhada	17,2%	16,6%	-0,6%	Serra Talhada	9,9%	9,5%	-0,4%
<b>Média</b>	<b>15,6%</b>	<b>15,8%</b>	<b>0,2%</b>	<b>Média</b>	<b>11,1%</b>	<b>11,1%</b>	<b>0,0%</b>

As reprodutibilidades dos dois modelos de RNA em relação a variabilidade diária das séries experimentais nas localidades de Araripina e Santa Maria da Boa Vista, podem ser visualizadas nas Figs. 7 a 10.

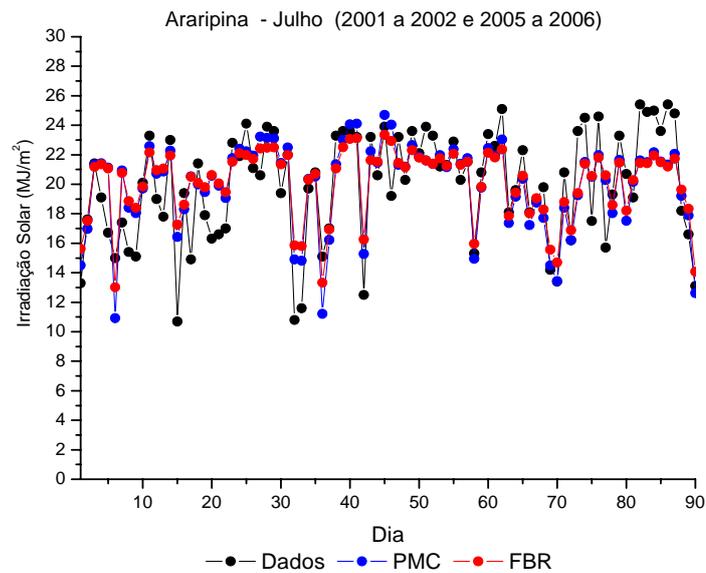


Figura 7 - Séries experimentais e sintéticas para julho em Araripina.

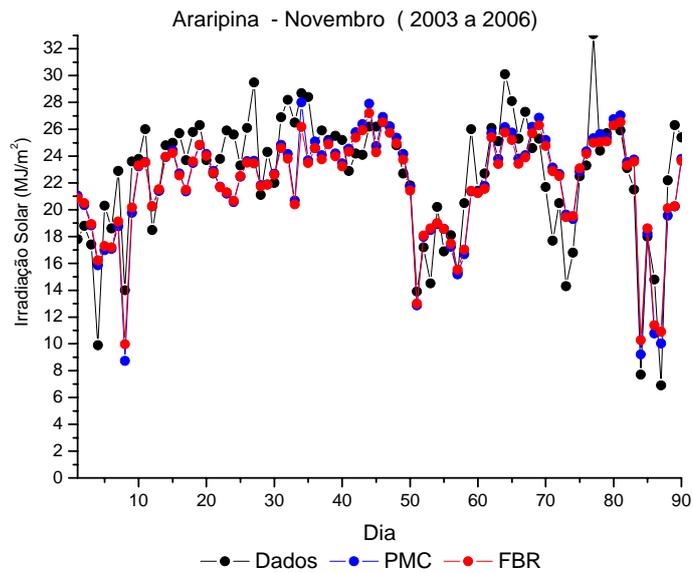


Figura 8 - Séries experimentais e sintéticas para novembro em Araripina.

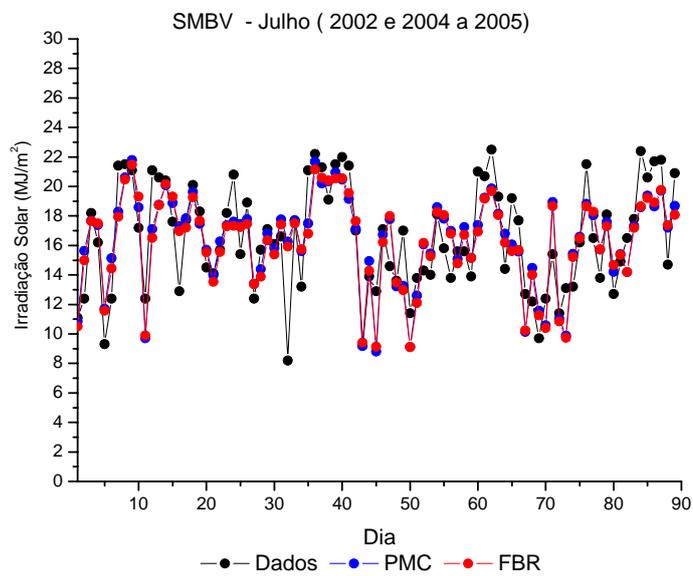


Figura 9 - Séries experimentais e sintéticas para julho em Santa Maria da Boa Vista

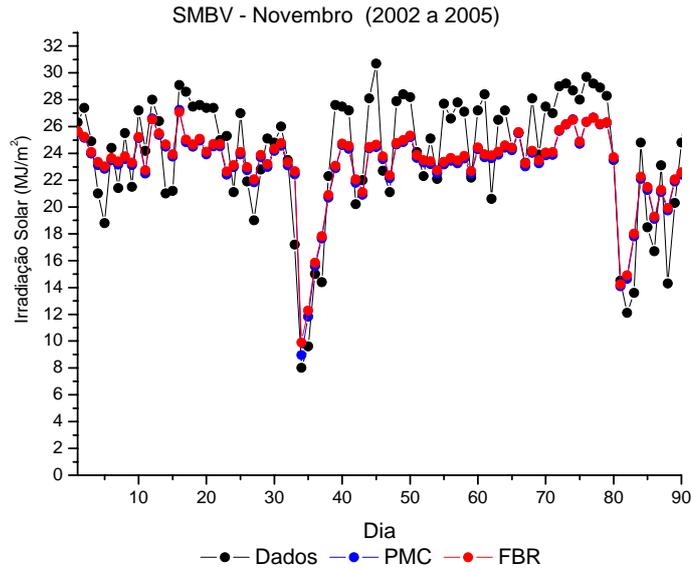


Figura 10 - Séries experimentais e sintéticas para Novembro em Santa Maria da Boa Vista

A Tab. 4 mostra os valores diários médios mensais da irradiação solar global estimados e medidos. A eficiência dos modelos foi verificada comparando os desvios das médias na região, que resultaram apenas 2% e 1% para os meses de julho e novembro respectivamente.

Tabela 4 – Comparações entre os valores diários médios mensais da irradiação solar estimados e experimentais

Localidade	Médias diárias mensais (MJ/m <sup>2</sup> )					
	julho			novembro		
	Dados	PMC	FBR	Dados	PMC	FBR
Araripina	19,7	19,3	19,5	22,3	21,8	21,3
Arcoverde	17,2	17,2	17,5	26,1	25,8	25,5
Floresta	16,7	16,3	16,1	23,6	23,6	23,8
Ouricuri	16,3	18,5	19,1	22,3	22,3	22,5
Petrolina	17,3	18,0	17,4	22,7	22,5	22,3
SMBV	16,5	16,4	16,2	24,3	23,0	23,1
Serra Talhada	17,3	17,5	17,9	23,7	24,5	24,1
<b>Média na região</b>	<b>17,3</b>	<b>17,6</b>	<b>17,7</b>	<b>23,6</b>	<b>23,4</b>	<b>23,2</b>
<b>Desvio</b>		<b>2%</b>	<b>2%</b>		<b>-1%</b>	<b>-1%</b>

Finalmente na Tab. 5 estão mostrados os valores do coeficiente de auto correlação parcial de primeira ordem ( $\phi_1$ ) das séries temporais, experimentais e calculadas. Nenhum dos modelos mostrou-se capaz de reproduzir satisfatoriamente  $\phi_1$ , apresentando desvios elevados em relação às séries experimentais.

Tabela 5 – Comparação entre os coeficientes de auto correlação parcial de primeira ordem estimados e experimentais

Localidade	Coeficiente de auto correlação parcial ( $\phi_1$ )	
	julho	novembro

	Dados	PMC	FBR	Dados	PMC	FBR
<b>Araripina</b>	0,28	0,52	0,54	0,55	0,61	0,62
<b>Arcoverde</b>	0,26	0,48	0,44	0,39	0,48	0,47
<b>Floresta</b>	0,34	0,43	0,49	0,43	0,75	0,76
<b>Ouricuri</b>	0,27	0,49	0,41	0,39	0,57	0,61
<b>Petrolina</b>	0,28	0,55	0,57	0,51	0,64	0,65
<b>SMBV</b>	0,37	0,42	0,46	0,61	0,62	0,61
<b>Serra Talhada</b>	0,46	0,28	0,24	0,51	0,51	0,47
<b>Média da região</b>	<b>0,32</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>0,48</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>
<b>Desvio</b>		<b>29%</b>	<b>29%</b>		<b>25%</b>	<b>25%</b>

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo demonstra a aptidão das RNA do tipo PMC e FBR para fornecerem dados de entrada para simulação de sistemas solares submetidos a regime de longo prazo, pois, quando da comparação das séries geradas com as séries experimentais verificou-se que, além de produzir desvios médios quadráticos (de 16% e 11%, para os meses de julho e novembro respectivamente) dentro da faixa dos erros instrumentais, os dois tipos de redes demonstraram capacidade para reproduzir as médias diárias mensais da região com desvios de 2% para julho e de 1% para o mês de janeiro.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco ( CHESF) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio ao projetos de pesquisas em energia solar que propiciaram meios materiais e ambiente científico para a realização dessa pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- Adnan,S.; Erol,A.; Mehemet,O.; Galip,E.K. 2004. Use of artificial neural networks for mapping of solar potential in Turkey, *Applied Energy*, 77,pp. 273–286.
- Al-Alawi, S. M. & Ai-Hinai, H. A. 1998. An ANN-based approach for predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation. *Renewable Energy*, Vol. 14,1-4, pp. 199-204.
- Atsu, S. S.D.; Joseph, A. J.; Ali Al – Lawati . 2002. Solar radiation estimation using artificial neural networks. *Solar Energy*, 71,pp. 307-319.
- Haykin, S. , 2004, *Redes Neurais. Princípios e práticas*. Bookman,Porto Alegre.
- Mellit,A.; Benghanem,M.; Hadj,A.A.;Guessoum, A. 2005. 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*.
- Mohandes , M.; Balghonaim, A.; Kassas, M.; Rehman, S.; Halawani,T. O. 2000. Use of radial basis functions for estimating monthly mean daily solar radiation. *Solar Energy*, 68, 2, pp.161–168,(2000).
- Siqueira, A. N.; Tiba, C.; Fraidenraich, N. 2007. Geração de séries sintéticas da irradiação solar diária em localidades brasileiras por meio de redes neurais artificiais . I Congresso Brasileiro de Energia Solar. ICBENS. Fortaleza - Ceará.
- Siqueira, A. N.; Tiba, C.; Fraidenraich, N. 2007. Interpolação espacial da irradiação solar diária, mediante redes neurais artificiais, em localidades do sertão de Pernambuco - Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.11, p.11-1 - 11-7.
- Siqueira, A. N.; Tiba, C.; Fraidenraich, N.2006. Geração da irradiação solar diária, mediante redes neurais artificiais. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. , v.10, p.11-107/147 - 11-113.

## **MULTIPLE LAYER PERCEPTRON (MLP) AND THE RADIAL BASE FUNCTION (RBF) ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR GENERATION OF DAILY SOLAR IRRADIATION SERIES.**

**Abstract.** *In this work the performance of two types of artificial neural network (ANN) were compared for generation of daily solar irradiation synthetic series, the networks of multiple layer perceptron type (MLP) and the radial base function type (RBF). The synthetic series generated from this methodology can be used in modern simulation procedures and evaluation of solar systems that use the solar irradiation series simultaneously with other variable meteorological series as environmental temperature and wind speed. Besides the geographical variables and the daily global solar irradiation of localities situated in a determined neighborhood, only thermic amplitude and minimum humidity, variables that are easily available in conventional meteorological stations were used as entries. The data were measured between 2000 and 2006 in seven semi-arid tropical climate Brazilian localities, situated in the Pernambuco Sertão. The estimates were carried out for the months of July and November, which correspond to the minimum and maximum periods of solar irradiation incidence in the region. For each locality, the series was estimated from base instruction founded on the experimental sequences in relation to the other six localities. The comparison of the series generated with the experimental series showed that the mean square deviations are 16% and 11%, for the months of July and November, respectively. Both the networks demonstrated the capacity for reproducing the daily monthly means of the region with deviations of 2% for July and 1% for the month of January, Thus, demonstrating the aptitude for producing daily solar irradiation synthetic series, for long term simulation of solar systems. No significant differences were verified between the two types of ANN concerning the better performance of one model in relation to the other.*

**Key words:** *ANN, daily solar irradiation, multiple layer perceptron (MLP), radial base function (RBF), long term solar system simulation*