

## GERAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA, MEDIANTE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

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 estudo propõe a utilização das redes neurais artificiais (RNA) para gerar séries sintéticas da irradiação solar diária, utilizando séries temporais referentes a um conjunto de variáveis meteorológicas. Após a fase de treinamento, quando a rede aprende a influência de cada variável na irradiação, foi possível estimar a realização estocástica referente à série temporal experimental da irradiação em um outro período utilizando as demais variáveis disponíveis. Os dados utilizados foram coletados entre janeiro de 2000 e dezembro de 2005 na localidade de Ilha Solteira, São Paulo. Os resultados, referentes às estimativas para 2005, demonstraram um bom desempenho das RNA com ou sem a utilização de horas de insolação experimental como entrada. No primeiro caso as estimativas obtidas para os valores diários de 11 meses apresentaram um RMSE, em relação à média mensal,  $\leq 16.0\%$  sendo que destes 9 meses resultaram  $\text{RMSE} \leq 12.2\%$ . No segundo caso os 11 meses apresentaram um  $\text{RMSE} \leq 19.5\%$  sendo que 6 meses com  $\text{RMSE} \leq 15,6\%$ . Obteve-se ainda, os RMSE relativos aos valores médios mensais da irradiação solar de 4.3%, com dados de insolação, e 5.9% somente com a insolação teórica.

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

### INTRODUÇÃO

O conhecimento da radiação solar disponível em uma determinada localidade, em um determinado período de tempo, é muito importante para uma diversidade de áreas tecnológicas tais como agropecuária, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e particularmente para uma tecnologia inovadora como a energia solar. Os requisitos necessários para o desenvolvimento sustentável desta tecnologia tais como, fatores econômicos e confiabilidade dos sistemas instalados, podem ser alcançados na medida em que se conheça precisamente o recurso solar disponível.

Em um trabalho recente, Tiba et al (2001) fez um levantamento das informações solarimétricas terrestres existentes no Brasil, e mostrou que a principal deficiência refere-se à grande escassez de informações solarimétricas 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 podemos destacar a geração de séries temporais sintéticas da irradiação solar diária. Tais séries talvez nunca ocorram na realidade mas refletem as diversas realizações possíveis, mantendo as principais características estatísticas das séries históricas, permitindo a representação de suas variabilidades. Assim sendo, o conhecimento dessas séries viabiliza a simulação de sistemas solares submetidos a regime estocástico diário e a avaliação de desempenho dos sistemas solares a longo prazo.

O cálculo da irradiação solar pode ser considerada um problema clássico a ser abordado por RNA pelas seguintes considerações: a) robustez, devido a sua capacidade de manejar bem as seqüências temporais da irradiação solar com falhas (é freqüente a ocorrência de falhas nas seqüências temporais medidas); b) O sistema climático no qual está inserido a irradiação solar é complexo, imprecisamente definido e tem muitos parâmetros físicos inter relacionados; c) Existem uma quantidade muito grande 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 é muito recente e tem sido utilizado basicamente em escala mensal. Dentre os poucos casos que utilizam outra base de tempo pode-se destacar os trabalhos desenvolvidos por HONTORIA et al (2002) e por REDDY e RANJAN (2003), para a estimação da irradiação solar em escala horária e o de TYMVIOS et al (2005), em escala diária. Esses trabalhos apresentam como principal característica a utilização da interpolação temporal para realização das estimativas. No presente estudo pretende-se ampliar estas experiências e testar a RNA como uma ferramenta de geração de séries temporais sintéticas da irradiação solar diária para a localidade de Ilha Solteira, localizada no estado de São Paulo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados durante o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005 na localidade de Ilha Solteira-SP (Latitude 20° 25' 23,5" S e Longitude: 51° 21' 12,6" W), pelo Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. O conjunto de dados refere-se às séries temporais medidas simultaneamente das seguintes variáveis meteorológicas diárias: temperaturas máxima, média e mínima (°C), umidades máxima, média e mínima (%), irradiação global diária incidente em uma superfície horizontal (MJ/m<sup>2</sup>/dia), velocidade do vento (m/s), precipitação pluviométrica (mm) e horas de brilho do Sol (h/dia). Nesta estação a irradiação global diária foi medida com um piranômetro LI-200X da LICOR e as horas de brilho do Sol com um heliógrafo Campbell-Stokes (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2006).

Além das variáveis citadas anteriormente foram acrescentadas ao conjunto de dados a amplitude diária da temperatura ( $T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$ ) e o número teórico de horas de brilho do Sol.

### Redes neurais artificiais

Neste trabalho adotou-se a abordagem da interpolação temporal, onde a aprendizagem da correlação existente entre a irradiação solar e algumas variáveis meteorológicas é feita pela inserção de um sub-conjunto da serie temporal experimental de uma localidade. Utilizando o sub-conjunto complementar foi possível estimar a realização estocástica referente à série temporal experimental da irradiação em um outro período a partir das demais variáveis disponíveis.

Durante o desenvolvimento dos estudos foram realizadas estimativas da irradiação solar diária a partir de dois modelos distintos, no primeiro (modelo 01) utilizou-se todas as variáveis disponíveis para realização das estimativas da irradiação e no segundo (modelo 02) a variável referente às horas de brilho do Sol foi excluída do conjunto. Ambos os modelos utilizam 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 01, está representada a estrutura deste tipo de rede.

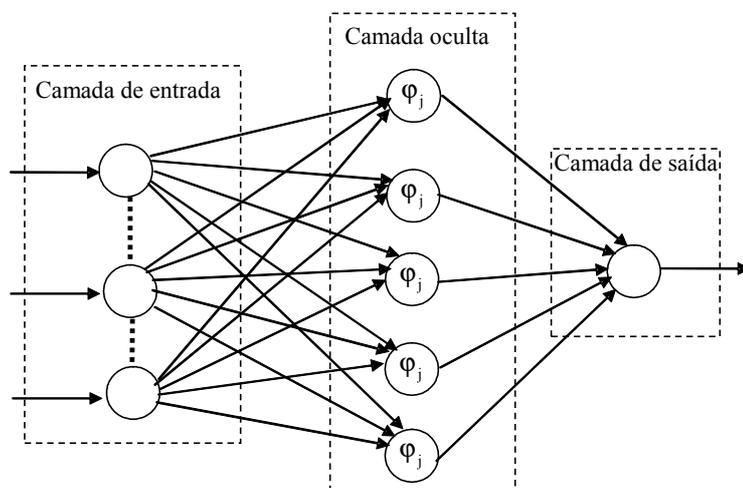


Figura 01: Rede Neural PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas).

Nas redes neurais do tipo PMC, figura 01, 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 ( $d_k(n)$ ), ver figura 02.

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.

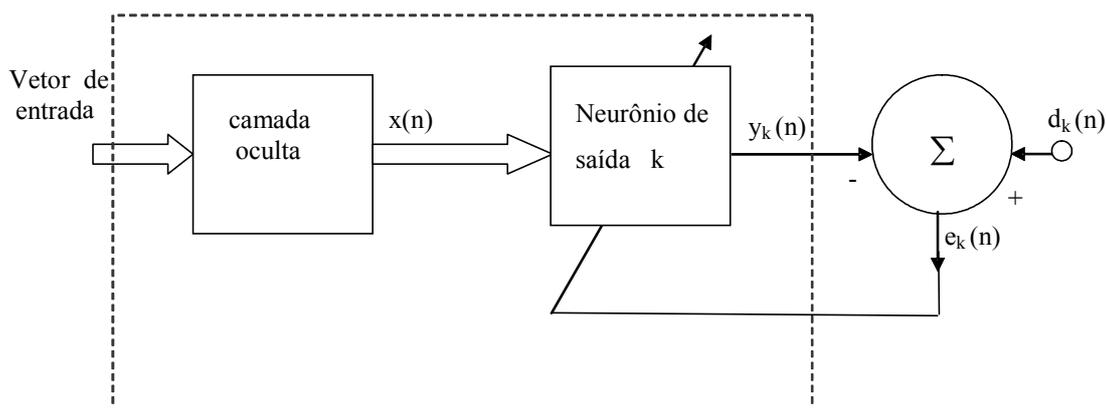


Figura 02: Diagrama de uma rede PMC treinada com a aprendizagem supervisionada

### Desenvolvimento dos modelos

Considerando a importância do caráter sazonal das variáveis meteorológicas, os meses foram analisados individualmente. Cada conjunto de dados mensais foi dividido em três subconjuntos distintos: treinamento, validação e teste conforme a tabela 01. Como pode ser visto os conjuntos de treinamento apresentam descontinuidades decorrentes da ausência de valores relativos às horas de brilho do Sol, para alguns meses do período.

Mês	Conjunto de treinamento	Conjunto de validação	Conjunto de teste
Janeiro	janeiro 01 e janeiro 03	janeiro 04	janeiro 05
Fevereiro	fevereiro 03	fevereiro 04	fevereiro 05
Março	março 00 e março 03	março 04	março 05
Abril	abril 00 e abril 03	abril 04	abril 05
Maio	maio 00 e maio 03	maio 04	maio 05
Junho	junho 00 e junho 03	junho 04	junho 05
Julho	julho 00, julho 01 e julho 03	julho 04	julho 05
Agosto	agosto 00 e agosto 03	agosto 04	agosto 05
Setembro	setembro 00 e setembro 03	setembro 04	setembro 05
Outubro	outubro 00 e outubro 03	outubro 04	outubro 05
Novembro	novembro 00 a novembro 03	novembro 04	novembro 05
Dezembro	dezembro 00 e dezembro 03	dezembro 04	dezembro 05

Tabela 01: Descrição dos conjuntos utilizados para os dados mensais.

A seguir, na tabela 02, estão representadas as arquiteturas utilizadas pelos dois modelos de RNA desenvolvidos durante a realização do presente estudo.

Camadas	Modelo 01	Modelo 02
Entrada	(12 Neurônios) temperaturas: máxima, mínima e média umidades: máxima, mínima e média irradiação global diária velocidade do vento precipitação pluviométrica horas de brilho do Sol (experimental) amplitude da temperatura horas de brilho do Sol (teórica)	(11 Neurônios) temperaturas: máxima, mínima e média umidades: máxima, mínima e média irradiação global diária velocidade do vento precipitação pluviométrica amplitude da temperatura horas de brilho do Sol (teórica)
Oculto	03 neurônios para fevereiro, 09 para julho e 06 para os demais meses.	03 neurônios para fevereiro, 09 para julho e 06 para os demais meses.
Saída	(01 Neurônio) irradiação global diária (estimada)	(01 Neurônio) irradiação global diária (estimada)

Tabela 02: Arquitetura das redes neurais utilizadas no estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Resultados diários da irradiação solar

Após a realização do treinamento e da validação da RNA foram efetuadas estimativas referentes às realizações estocásticas das séries correspondentes à irradiação experimental diária de cada mês. Os valores obtidos para os RMSE respectivos aos modelos 01 e 02 estão representados na tabelas 03.

Modelo 01				Modelo 02			
mês	Treinamento	Validação	Teste	mês	Treinamento	Validação	Teste
Janeiro	jan 01e jan 03	jan/04	jan/05	Janeiro	jan 01e jan 03	jan/04	jan/05
	8.2%	5.7%	<b>24.6%</b>		8.1%	8.5%	<b>36.7%</b>
Fevereiro	fev03	fev/04	fev/05	Fevereiro	fev03	fev/04	fev/05
	3.7%	10.3%	12.1%		11.5%	15.0%	13.4%
Março	mar 00 e 03	mar/04	mar/05	Março	mar 00 e 03	mar/04	mar/05
	12.1%	4.5%	5.0%		16.0%	9.8%	7.2%
Abril	abr 00 e 03	abr/04	abr/05	Abril	abr 00 e 03	abr/04	abr/05
	7.0%	8.9%	7.1%		12.6%	16.3%	12.5%
Maio	mai 00 e 03	mai/04	mai/05	Maio	mai 00 e 03	mai/04	mai/05
	9.3%	11.6%	6.1%		15.9%	19.1%	14.2%
Junho	jun00 e 03	jun/04	jun/05	Junho	jun00 e 03	jun/04	jun/05
	6.5%	3.3%	2.8%		10.5%	16.1%	15.4%
Julho	jul 00 01 e 03	jul/04	jul/05	Julho	jul 00 01 e 03	jul/04	jul/05
	11.6%	5.7%	11.0%		10.9%	13.8%	17.1%
Agosto	ago 00 e 03	ago/04	ago/05	Agosto	ago 00 e 03	ago/04	ago/05
	14.5%	10.6%	13.5%		19.0%	13.4%	15.6%
Setembro	set 00 e 03	set/04	set/05	Setembro	set 00 e 03	set/04	set/05
	15.5%	12.3%	16.0%		17.6%	19.5%	19.0%
Outubro	out 00 e 03	out/04	out/05	Outubro	out 00 e 03	out/04	out/05
	9.4%	13.7%	8.3%		11.8%	18.7%	19.6%
Novembro	nov 00 a 03	nov/04	nov/05	Novembro	nov 00 a 03	nov/04	nov/05
	9.1%	10.9%	12.2%		11.4%	21.5%	18.6%
Dezembro	dez 00 e 03	dez/04	dez/05	Dezembro	dez 00 e 03	dez/04	dez/05
	8.9%	7.2%	6.1%		12.0%	13.0%	9.8%

Tabela 03: Variação do RMSE de acordo com o conjunto de teste.

De uma maneira geral as redes demonstraram um bom desempenho, com exceção do mês de janeiro. No modelo 01 todos os demais 11 meses apresentaram um RMSE, em relação à média mensal, menores ou iguais a 16.0% sendo que destes 9 meses apresentam  $RMSE \leq 12,2\%$ . No caso do modelo 02 os 11 meses apresentaram um RMSE menores ou iguais a 19.6% sendo que 6 meses com  $RMSE \leq 15,6\%$ .

Quanto as causas que não permitiram um bom desempenho dos modelos para estimativas referentes à janeiro de 2005 verificou-se a existência de inconsistências nos dados experimentais daquele mês, por exemplo a ocorrência de 14 dias consecutivos com número de horas de brilho de Sol constantes e iguais a zero. Por outro lado deve-se ressaltar os bons ajustes dos modelos, em relação aos conjuntos de treinamento (janeiro de 2000 e janeiro de 2003) e validação (janeiro de 2004), com RMSE respectivos de **8.2% e 5.7%** (modelo 01) e de **8.1% e 8.5%** (modelo 02).

As visualizações das séries geradas pelos dois modelos para os meses de julho de 2005 e dezembro de 2005 encontram-se representadas nas figuras 03 e 04. Conforme podem ser vistos tanto o modelo 01 como o modelo 02 demonstraram boa capacidade de acompanhamento das variabilidades das séries experimentais. Os RMSE, relativos a média mensal, são respectivamente 11.0% e 17.1% para o mês de julho e de 6.1% e 9.8% para o mês de dezembro.

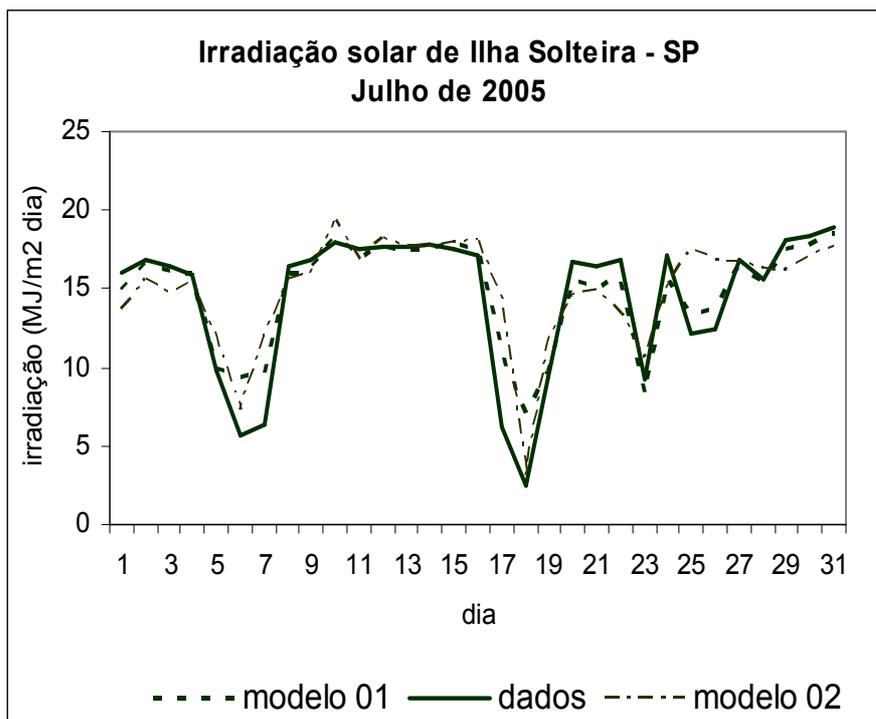


Figura 03: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para julho de 2005 – Ilha Solteira

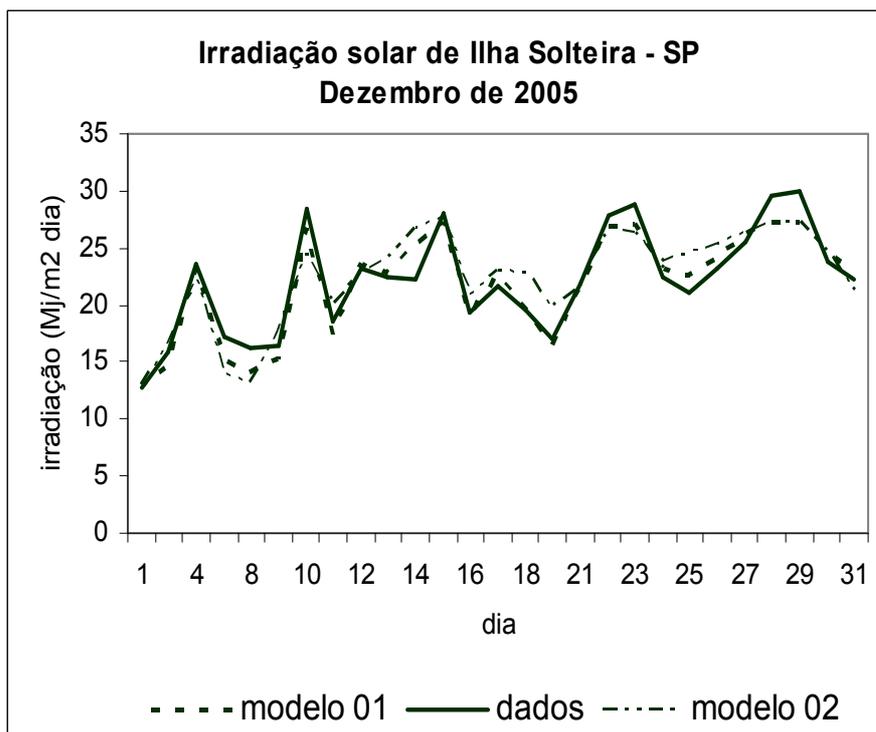


Figura 04: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para dezembro de 2005 – Ilha Solteira

#### Resultados mensais da irradiação solar

Nas tabelas 04 e 05 os seguintes parâmetros descritivos das séries mensais: irradiação média diária ( $\bar{h}$ ), mediana ( $M_d$ ), desvio padrão da irradiação ( $\sigma_h$ ), irradiação solar mínima ( $h_{\min}$ ), irradiação solar máxima ( $h_{\max}$ ) e irradiação acumulada mensal (Acumulado) são apresentados. As medidas são correspondentes às séries históricas (conjunto de treinamento), séries de teste (ano de 2005) e série estimada para 2005 (\*).

Descritiva (MJ/m <sup>2</sup> dia)	Mês											
	jan/05	fev/05	mar/05	abr/05	mai/05	jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05
$\bar{h}$ (histórico)	21.47	23.45	18.56	18.87	15.88	13.55	13.55	16.90	18.22	21.94	23.60	22.98
$\bar{h}$ (2005)	14.09	24.50	21.11	18.44	16.13	14.40	14.55	18.92	16.00	18.87	20.93	21.40
$\bar{h}^*$	16.93	25.98	21.70	19.33	16.11	13.22	14.08	17.96	15.88	19.28	21.76	21.83
Md (histórico)	21.20	23.10	19.70	21.30	17.60	12.80	12.80	18.95	20.35	23.75	25.20	24.00
Md (2005)	12.70	25.55	23.00	19.95	17.70	16.20	16.70	19.70	18.25	20.80	21.70	22.20
Md *	18.03	27.25	23.92	20.82	17.84	14.22	14.90	18.13	18.92	20.57	23.05	22.92
$\sigma_h$ (histórico)	6.17	4.31	5.51	4.86	3.76	3.33	3.33	5.23	6.12	5.85	5.72	5.95
$\sigma_h$ (2005)	6.70	3.26	4.98	4.40	4.56	3.63	4.51	2.59	5.95	5.97	6.39	5.39
$\sigma_h^*$	5.77	2.64	5.15	3.75	4.34	2.46	3.18	1.85	5.93	5.91	6.23	4.65
h mín(histórico)	3.20	13.60	4.50	6.30	0.20	3.20	3.20	1.70	2.10	5.70	7.90	8.00
h mín(2005)	5.00	15.40	8.90	4.50	3.50	5.00	2.50	11.90	3.30	4.10	3.00	9.10
h mín*	4.27	17.34	8.26	7.09	1.96	6.34	2.77	12.11	3.45	5.37	3.80	12.62
h máx(histórico)	31.50	30.60	26.00	23.10	19.00	18.08	18.08	22.50	25.30	28.39	30.41	31.11
h máx(2005)	28.00	29.51	28.00	22.80	20.40	17.10	18.90	21.70	23.70	25.90	29.60	29.99
h máx*	24.67	27.68	26.59	23.16	19.10	15.77	17.97	21.06	22.66	25.91	27.94	27.30
Acumulado(histórico)	665.53	656.49	575.45	565.96	492.38	406.40	419.95	523.75	546.70	680.03	708.10	712.39
Acumulado(2005)	436.80	686.00	612.10	553.20	500.00	432.10	450.90	586.60	480.00	585.00	627.89	620.49
Acumulado*	524.79	727.40	629.17	579.85	499.32	396.51	436.55	556.62	476.40	597.66	652.88	676.88

Tabela 4 : Estatísticas descritivas obtidas para o modelo 01.

Descritiva (MJ/m <sup>2</sup> dia)	Mês											
	jan/05	fev/05	mar/05	abr/05	mai/05	jun/05	jul/05	ago/05	set/05	out/05	nov/05	dez/05
$\bar{h}$ (histórico)	21.47	23.45	18.56	18.87	15.88	13.55	13.55	16.90	18.22	21.94	23.60	22.98
$\bar{h}$ (2005)	14.09	24.50	21.11	18.44	16.13	14.40	14.55	18.92	16.00	18.87	20.93	21.40
$\bar{h}^*$	17.12	26.44	20.76	19.76	16.57	13.00	14.97	17.81	16.30	19.48	22.56	22.33
Md(histórico)	21.20	23.10	19.70	21.30	17.60	12.80	12.80	18.95	20.35	23.75	25.20	24.00
Md (2005)	12.70	25.55	23.00	19.95	17.70	16.20	16.70	19.70	18.25	20.80	21.70	22.20
Md *	18.19	27.67	22.90	21.85	17.79	14.00	15.67	17.51	19.56	19.98	26.00	22.96
$\sigma_h$ (histórico)	6.17	4.31	5.51	4.86	3.76	3.33	3.33	5.23	6.12	5.85	5.72	5.95
$\sigma_h$ (2005)	6.70	3.26	4.98	4.40	4.56	3.63	4.51	2.59	5.95	5.97	6.39	5.39
$\sigma_h^*$	5.71	2.66	4.75	4.65	3.45	3.14	3.42	2.31	6.28	5.08	5.86	4.36
h mín(histórico)	3.20	13.60	4.50	6.30	0.20	3.20	3.20	1.70	2.10	5.70	7.90	8.00
h mín(2005)	5.00	15.40	8.90	4.50	3.50	5.00	2.50	11.90	3.30	4.10	3.00	9.10
h mín*	6.59	18.49	8.49	5.47	6.75	4.17	3.07	11.05	3.23	7.60	8.58	12.94
h máx(histórico)	31.50	30.60	26.00	23.10	19.00	18.08	18.08	22.50	25.30	28.39	30.41	31.11
h máx(2005)	28.00	29.51	28.00	22.80	20.40	17.10	18.90	21.70	23.70	25.90	29.60	29.99
h máx*	25.89	27.97	24.84	24.03	20.01	16.46	19.39	21.16	22.02	26.12	27.71	27.56
Acumulado(histórico)	665.53	656.49	575.45	565.96	492.38	406.40	419.95	523.75	546.70	680.03	708.10	712.39
Acumulado(2005)	436.80	686.00	612.10	553.20	500.00	432.10	450.90	586.60	480.00	585.00	627.89	620.49
Acumulado*	530.69	740.21	643.48	592.82	513.64	390.07	464.07	551.98	488.87	603.75	676.75	692.34

Tabela 05 : Estatísticas descritivas obtidas para o modelo 02.

A análise dos resultados acima, excluindo-se os resultados relativos ao mês de janeiro (pelos motivos anteriormente expostos), permitem as seguintes conclusões: a) no caso de valores da média e dos valores acumulados da irradiação solar os modelos permitiram a realização de estimativas muito próximas dos valores reais para 2005. Foram obtidas para os modelos 01 e 02 valores do RMSE, respectivos de 4.3 % e 5.9%; b) Em relação ao valor acumulado médio anual, da irradiação solar (557.66 MJ/m<sup>2</sup> mês), os RMSE resultaram 5.1% (modelo 01) e 7.0% (modelo 02); c) no caso da mediana não foram percebidas diferenças significativas, para os dois modelos em relação aos dados experimentais, os RMSE respectivos de 6.2% e 9.5%, demonstrando o bom desempenho da metodologia no que se refere à separatriz que divide o conjunto de dados ordenados em duas partes iguais; d) quanto ao desvio padrão, os valores máximos e os valores mínimos ficou comprovada a existência de tendências sistemáticas em relação a 2005, mais evidentes no modelo 01: desvios padrões

sub-estimados (RMSE respectivos de 14.6% e 15.0%), valores mínimos super estimados com RMSE de 25.4% (modelo 01) e 42.0%(modelo 02) e valores máximos sub estimados (RMSE respectivos de 5.7% e 6.5%).

## CONCLUSÕES

Apesar dos problemas referentes às estimativas do desvio padrão, e dos valores mínimos e máximos, de uma maneira geral os dois modelos apresentaram um bom desempenho demonstrando a viabilidade da metodologia para simulação e avaliação a longo prazo de sistemas solares. Quanto a comparação dos desempenhos, o modelo 01 sempre apresentou uma performance superior ao modelo 02, como era de se esperar. Apesar disso, os resultados obtidos com o modelo 02 demonstraram que mesmo sem o conhecimento medido das horas de brilho de Sol é possível estimar a irradiação, de forma satisfatória, a partir de outras variáveis normalmente mais disponíveis. Finalmente, o presente estudo confirma a viabilidade do uso das RNA para a realização de estimativas da irradiação solar diária para a localidades de Ilha Solteira, a partir de registros de outras variáveis meteorológicas.

## 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

- Aguiar R. J.; Collares-Pereira M; Conde J. P. (1988). Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Solar Energy* 40, 3, 269–279.
- Al-alawi S. M. e Ai-hinai H. A. (1998). An ANN-based approach for predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation. *Renewable Energy* 14, 4, 199-204.
- Atsu S. S.D.; Joseph A. J.; Ali Al – Lawati (2002). Solar radiation estimation using artificial neural networks. *Solar Energy*, 71, 307-319.
- FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP disponível em < <http://www.agr.feis.unesp.br/sensor.ilha.htm> > Acesso em 20 julho 2006.
- Graham V. A.; Hollands K. G. T.; Unny T. E. (1988). A time series model for  $K_t$  with application to global synthetic weather generation. *Solar Energy* 40, 2, 83–92.
- Haykin S. (2001). *Redes Neurais Princípios e Práticas*, reimpressão 2004. Bookman, Porto Alegre.
- Hontoria L.; Aguilera J.; Zufiria P. (2002). Generation of hourly irradiation synthetic series using the neural network multilayer perceptron. *Solar Energy* 72, 5, 441–446.
- 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* 79, 5, 469-482.
- 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, 161–168.
- Reddy K.S. e Rajan M. (2003). Solar resource estimation using artificial neural networks and comparison with other correlation models. *Energy conversion and management* 44, 2519-2530.
- Tiba C.; Fraindenraich N.; Grossi H.; Lyra F. (2001). *Atlas solarimétrico para localidades brasileiras*. Editora Universitária UFPE, Recife.
- Tymvios F.S.; Jacovides C.P.; Michaelides S.C.; Scouteli C. (2005). Comparative study of Angstrom's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation. *Solar Energy*, 78, 752-762.

## ABSTRACT

This study proposes the use of artificial neural networks (ANN) to generate a synthetic series of daily solar irradiation, by using a temporal series in regard to a group of meteorological variables. After training phase, when the network learns how to influence each variable in the irradiation, it was possible to estimate the stochastic allocation in regard to an experimental temporal series of irradiation in another period by using the other available variables. The data used were collected between January, 2000 and December, 2005 in the locality of Ilha Solteira, São Paulo. The results, referring to the estimates for 2005, demonstrate a good performance of the ANN with or without the use of experimental isolation hours as input. In the first case the estimates obtained for daily values over 11 months presented a RMSE, in relation to the monthly mean of,  $\leq 16.0\%$  being that those for 9 months resulted in a RMSE of  $\leq 12.2\%$ . In the second case the 11 months presented a RMSE of  $\leq 19.5\%$  being that for 06 months there was a RMSE of  $\leq 15.6\%$ . Still the RMSE were obtained relative to monthly mean solar irradiation values of 4.3%, with isolation data, and 5.9% only with theoretic isolation.

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