

GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DA IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM LOCALIDADES BRASILEIRAS POR MEIO DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

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

Chigueru Tiba - tiba@ufpe.br

Naum Fraidenraich - naumf@uol.com.br

Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU, CEP 50.740-540, Recife, Pernambuco, Brasil
Phone:+5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250

1.3 Sequências de Dados

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 e entre janeiro de 1998 a junho de 2006 para Pelotas, Rio Grande do Sul. Nas duas localidades os resultados referentes às estimativas da irradiação solar diária, demonstraram um bom desempenho das RNA com ou sem a utilização de horas de insolação experimental como entrada. Para a localidade de Ilha-Solteira, no primeiro caso com horas de insolação experimental, as estimativas obtidas para os valores diários de 11 meses apresentaram um RMSE (root mean square error) $\leq 16.0\%$ sendo que destes 09 meses resultaram $RMSE \leq 12.2\%$. No segundo caso, sem horas de insolação experimental, os 11 meses apresentaram um $RMSE \leq 19.5\%$ sendo que 06 meses com $RMSE \leq 15.6\%$. Obteve-se ainda, para Ilha Solteira, 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. Com relação à Pelotas no primeiro caso, as estimativas obtidas para os valores diários de 06 meses apresentaram um RMSE, $\leq 12.8\%$. No segundo caso, os 06 meses apresentaram um $RMSE \leq 20.6\%$ sendo que 03 meses com $RMSE \leq 17.4\%$. Obteve-se ainda, os RMSE relativos aos valores médios mensais da irradiação solar de 6.5%, com dados de insolação, e 7.6% somente com a insolação teórica, para Pelotas.

Palavras chave: Redes neurais artificiais, Irradiação solar diária, Séries temporais sintéticas

1. 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 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 duas localidades: Ilha Solteira, localizada no estado de São Paulo e Pelotas no estado do Rio grande do Sul.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados

Ilha Solteira

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/m²dia), velocidade do vento (m/s), precipitação pluviométrica (mm) e horas de brilho do Sol (h/dia).

Pelotas

Os dados foram coletados durante o período de janeiro de 1988 a dezembro de 2006 na localidade de Pelotas, Rio Grande do Sul (Latitude 31° 52' 00" S e Longitude: 52° 21' 24" W), na estação agroclimatológica de Pelotas, operada através do convênio EMBRAPA / UFPel / INMET. O conjunto de dados refere-se às séries temporais medidas simultaneamente das seguintes variáveis meteorológicas diárias: temperaturas máxima, média e mínima (°C), umidade relativa do ar (%), irradiação global diária incidente em uma superfície horizontal (cal.cm⁻².dia⁻¹), velocidade média do vento (ms⁻¹), precipitação pluviométrica (mm), evaporação (mm) e horas de brilho do Sol (h.dia⁻¹).

Vale a pena destacar que nas duas estações agroclimatológicas analisadas 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. Além das variáveis citadas anteriormente foram acrescentadas ao conjunto de dados a amplitude diária da temperatura e o número teórico de horas de brilho do Sol.

2.2 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 série 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 1) utilizou-se todas as variáveis disponíveis para realização das estimativas da irradiação e no segundo (modelo 2) 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, HAYKIN (2004). Na Fig. 1, está representada a estrutura deste tipo de rede.

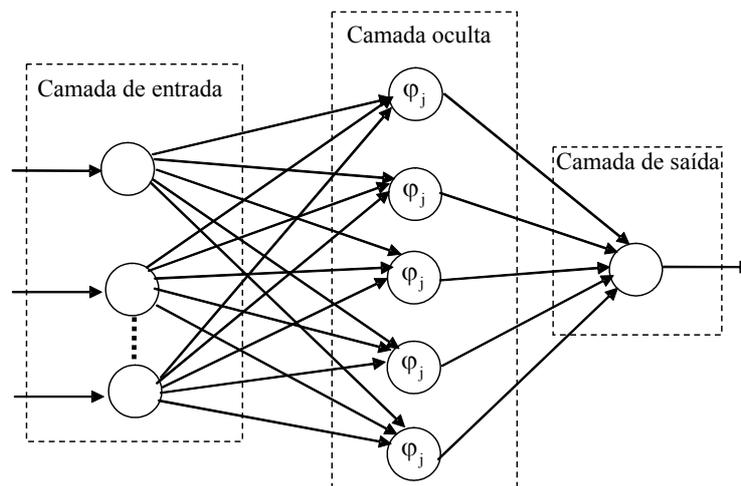


Figura 1: Rede Neural PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas).

Nas redes neurais do tipo PMC, Fig. 1, a ativação dos neurônios nas camadas oculta e de saída foi dada pela função de ativação do tipo sigmóide (φ_i).

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 Tab. 1 e Tab. 2. 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.

Tabela 1: Descrição dos conjuntos utilizados para os dados mensais em Ilha Solteira.

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
Mai	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 2: Descrição dos conjuntos utilizados para os dados mensais em Pelotas.

Mês	Conjunto de treinamento	Conjunto de validação	Conjunto de teste
Janeiro	jan 98 a jan 04	jan05	jan06
Fevereiro	fev98 a fev00 e fev02 a fev04	fev05	fev06
Março	mar98 a mar04	mar05	mar06
Abril	abr98 a abr04	abr05	abr06
Mai	mai98 a mai04	mai04	mai06
Junho	jun98 a jun04	jun04	jun06

Na Tab. 3 e na Tab. 4, estão representadas as arquiteturas utilizadas pelos dois modelos de RNA desenvolvidos durante a realização do presente estudo.

Tabela 3: Arquitetura das redes neurais utilizadas em Ilha Solteira

Camadas	Modelo 1	Modelo 2
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 4: Arquitetura das redes neurais utilizadas em Pelotas

Camadas	Modelo 1	Modelo 2
Entrada	(11 Neurônios) temperaturas: máxima, mínima e média evaporação umidade relativa irradiação global diária velocidade do vento precipitação pluviométrica horas de brilho do Sol (experimental) amplitude da temperatura horas de brilho do Sol (teórica)	(10 Neurônios) temperaturas: máxima, mínima e média evaporação umidade relativa irradiação global diária velocidade do vento precipitação pluviométrica amplitude da temperatura horas de brilho do Sol (teórica)
Ocultas	20 neurônios para fevereiro e 25 para os demais meses.	20 neurônios para fevereiro e 25 para os demais meses.
Saída	(01 Neurônio)	(01 Neurônio)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 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 1 e 2, para as duas localidades, estão representados na Fig. 5 e na Fig. 6.

Tabela 5: Variação do RMSE de acordo com o conjunto de teste para Ilha Solteira.

Modelo 1				Modelo 2			
mês	Treinamento	Validação	Teste	mês	Treinamento	Validação	Teste
Janeiro	jan 01 e jan 03	jan/04	jan/05	Janeiro	jan 01 e jan 03	jan/04	jan/05
	8.2%	5.7%	24.6%		8.1%	8.5%	36.7%
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 6: Variação do RMSE de acordo com o conjunto de teste para Pelotas.

Modelo 01				Modelo 02			
mês	Treinamento	Validação	Teste	mês	Treinamento	Validação	Teste
Janeiro	jan98 a 04	jan/05	jan/06	Janeiro	jan98 a 04	jan/05	jan/06
	10.61%	7.25%	10.61%		14.53%	13.47%	18.84%
Fevereiro	98a00;02a04	fev/05	fev/06	Fevereiro	98a00;02a04	fev/05	fev/06
	11.25%	18.09%	12.81%		16.25%	25.76%	16.06%
Março	mar 98 a 04	mar/05	mar/06	Março	mar 98 a 04	mar/05	mar/06
	13.42%	11.13%	8.60%		17.79%	15.75%	14.31%
Abril	abr 98 a 04	abr/05	abr/06	Abril	abr 98 a 04	abr/05	abr/06
	15.11%	15.73%	11.43%		22.32%	24.00%	17.37%
Mai	mai 98 a 04	mai/05	mai/06	Mai	mai 98 a 04	mai/05	mai/06
	17.07%	20.42%	12.71%		24.45%	31.20%	20.62%
Junho	jun98 a 04	jun/05	jun/06	Junho	jun98 a 04	jun/05	jun/06
	22.10%	25.38%	12.03%		30.91%	27.86%	20.45%

Para Ilha Solteira verificou-se que de uma maneira geral as redes demonstraram um bom desempenho, com exceção do mês de janeiro. No modelo 1 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 2 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, nesta localidade, 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).

Também ficou constatado o bom desempenho dos modelos para Pelotas. No modelo 1, as estimativas obtidas para 6 meses apresentaram um RMSE, $\leq 12,8\%$. No caso do modelo 2, os 6 meses apresentaram um RMSE $\leq 20,6\%$ sendo que 03 meses com $RMSE \leq 17,4\%$.

As visualizações das séries geradas pelos dois modelos para os meses de julho de 2005 e dezembro de 2005 (Ilha Solteira) e para Janeiro de 2006 e Junho de 2006 (Pelotas) encontram-se representadas nas Fig. 2 a Fig. 5. Conforme podem ser vistos tanto o modelo 1 como o modelo 2 demonstraram boa capacidade de acompanhamento das variabilidades das séries experimentais.

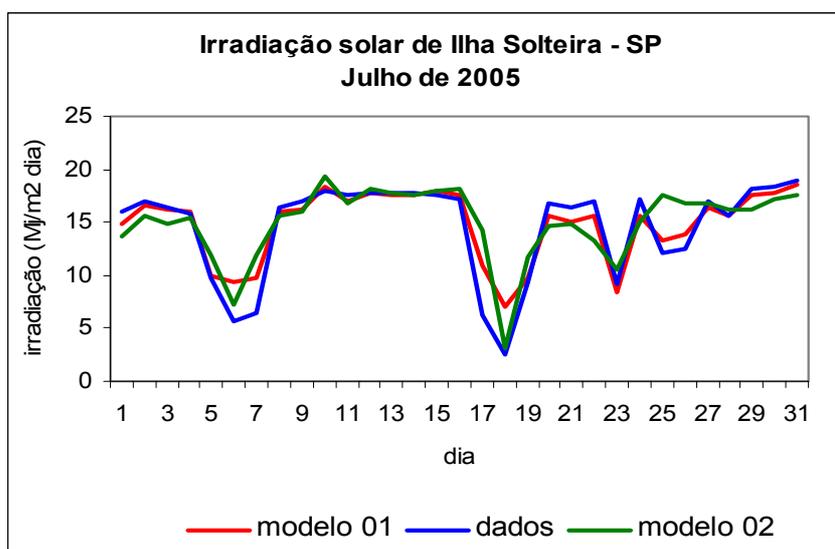


Figura 2: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para julho de 2005 – Ilha Solteira

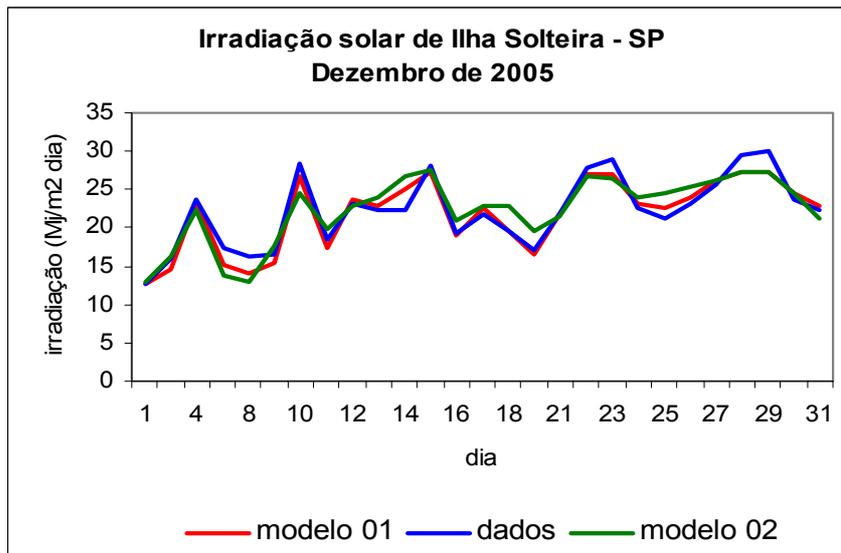


Figura 3: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para dezembro de 2005 – Ilha Solteira

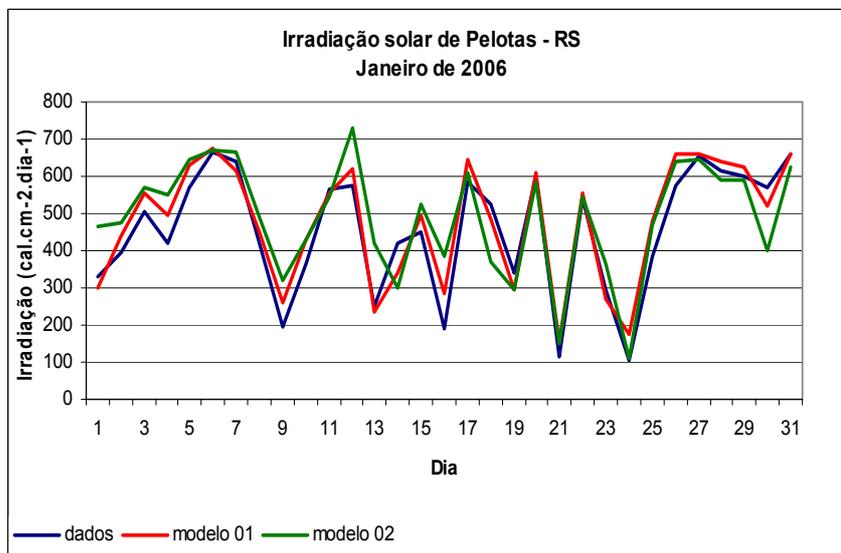


Figura 4: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para Janeiro de 2006 – Pelotas

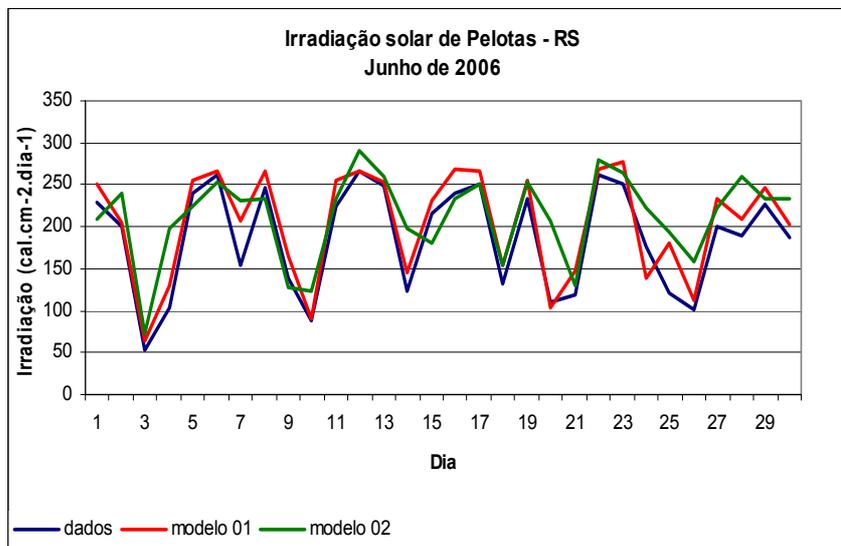


Figura 5: Séries sintéticas e experimentais da irradiação para Junho de 2006 – Pelotas

3.2 Resultados mensais da irradiação solar

Para facilitar a análise da viabilidade do uso dos modelos apresentados, para simulação e avaliação a longo prazo de sistemas solares, estão apresentadas na Tab. 7 e na Tab. 8 os valores obtidos para os RMSE, em relação aos valores médios experimentais do ano de 2005, das seguintes medidas descritivas das séries mensais: irradiação média diária (\bar{h}), mediana (M_d), desvio padrão da irradiação (σ_h), irradiação solar mínima (h_{\min}), irradiação solar máxima (h_{\max}) e irradiação acumulada mensal (Acumulado).

Tabela 7: RMSE, em relação aos valores experimentais do ano de 2005 para Ilha Solteira

Variável	RMSE (modelo 01)	RMSE (modelo 02)
\bar{h}	4.3 %	5.9%
M_d	6.2%	9.5%
σ_h	14.6%	15.0%
h_{\min}	25.4%	42.0%
h_{\max}	5.7%	6.5%
Acumulado	5.1%	7.0%

Tabela 8: RMSE, em relação aos valores experimentais de janeiro a junho de 2006 para Pelotas

Variável	RMSE (modelo 01)	RMSE (modelo 02)
\bar{h}	6.4%	7.6%
M_d	8.1%	6.8%
σ_h	16.6%	22.3%
h_{\min}	44.3%	54.5%
h_{\max}	4.5%	7.7%
Acumulado	6.3%	7.6%

A partir dos resultados acima, verificou-se que, com exceção dos valores estimados para a irradiação mínima, de uma maneira geral a metodologia apresentou um bom desempenho para as duas localidades. No caso da média e dos valores acumulados, principais medidas utilizadas no estudo da viabilidade do uso das RNA para simulação e avaliação a longo prazo de sistemas solares, os modelos permitiram a realização de estimativas muito próximas dos valores reais. Na Fig. 5 e na Fig. 7 estão representados esses resultados para o caso da média.

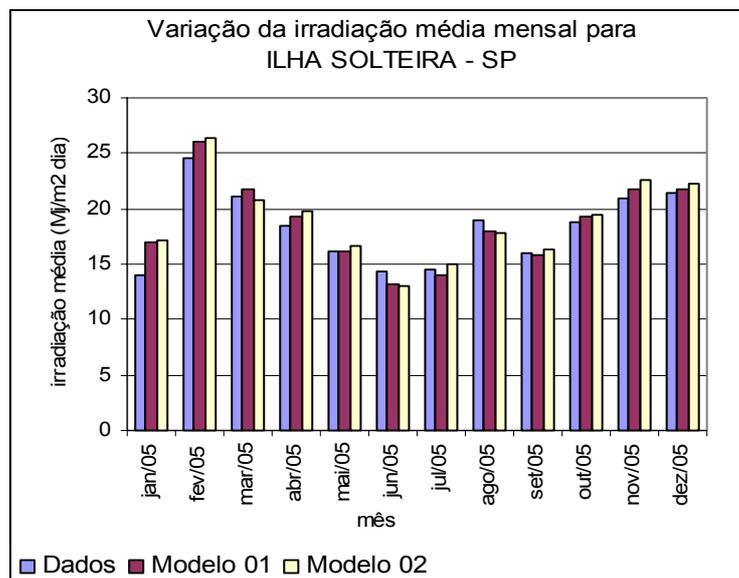


Figura 6 : Variação da irradiação média mensal para Ilha Solteira

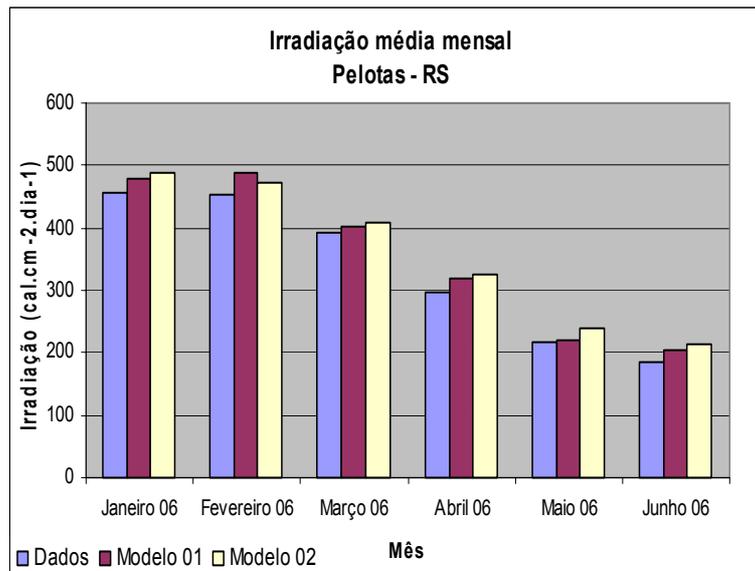


Figura 7 : Variação da irradiação média mensal para Pelotas

4 CONCLUSÕES

Apesar dos problemas referentes às estimativas dos valores mínimos, 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 1 sempre apresentou uma performance superior ao modelo 2, como era de se esperar. Apesar disso, os resultados obtidos com o modelo 2 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 as localidades de Ilha Solteira e Pelotas, a partir de registros de outras variáveis meteorológicas.

REFERÊNCIAS

- FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP disponível em < <http://www.agr.feis.unesp.br/sensor.ilha.htm> > Acesso em 20 julho 2006.
- Haykin, S. 2001. Redes Neurais. Princípios e práticas. Bookman, Porto Alegre, reimpressão 2004.
- Hontoria, L.; Aguilera, J.; Zufiria, P. 2002. Generation of hourly irradiation synthetic series using the neural network multilayer perceptron. Solar Energy, 72, 5, pp.441–446.
- 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, pp. 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, pp. 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 and between January, 1998 and June, 2006 in the locality of Pelotas, Rio Grande do Sul. To the two localities the results, referring to the estimates of daily solar irradiation, demonstrate a good performance of the ANN with or without the use of experimental isolation hours as input.

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