



## **RECONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR E HORAS DE BRILHO SOLAR PARA A CIDADE DE RIO DE JANEIRO \***

Prof. Oscar D. Corbella, Ph.D. \*\*  
DTC - Departamento de Tecnologia da Construção  
FAU - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo  
UFRJ - Universidade Federal de Rio de Janeiro / Fax: 021 - 280.87.40

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma análise dos dados oficiais de radiação solar global diária, em plano horizontal, e de horas de sol diárias, para o Rio de Janeiro, de 1978 a 1989. As medições realizadas durante esse período apresentavam muitas lacunas e erros. Portanto, foram excluídos do conjunto 42 meses e mais de 200 dados individuais fora de correlação ou que não eram coerentes com outros dados meteorológicos. Com os dados restantes estabeleceu-se uma correlação tipo Angstrom, gerando-se os outros. Os resultados formam um conjunto completo e consolidado de dados de radiação solar e horas de sol para estes 12 anos.

### **ABSTRACT**

In this paper we analyse officially measured solar energy data, on horizontal plane and sunshine-hours data for Rio de Janeiro City, for a twelve years period (1978-1989). Using an Angstrom correlation between the two sets, it was possible to complete all days and months with misleading data, in order to build a consolidated group of solar energy and sunshine-hours data. More than 200 individual data and 42 full month were rejected and reconstructed. Mean values for each month and their evolution over the period are shown in tables and graphs.

### **PALAVRAS CHAVE**

Energia solar, Horas de sol, Rio de Janeiro, 1978-1989

### **INTRODUÇÃO**

Dados de energia solar e horas de brilho solar (também chamado entre nós de Insolação) são indispensáveis para projetos de arquitetura bioclimática, tanto quanto para projetos de sistemas de ar condicionado, de utilização de energia solar para aquecimento de água ou para

(\*) Este trabalho apresenta partes de uma pesquisa financiada parcialmente pelo CNPq (Projeto 500373/90-6)

(\*\*) Pesquisador bolsista do CNPq Cat. IA.

sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade. O conjunto de dados deve ser completo, organizado, fidedigno, e ter sido medido durante um longo período de tempo. Dessa forma além de sua utilidade prática, constituirá uma base para gerar, via modelos matemáticos, a divisão dos dados em radiação direta e difusa, e valores da luminosidade do céu.

Este trabalho analisa dados de radiação solar global diária, em plano horizontal, e de horas de brilho solar diárias, medidas na cidade de Rio de Janeiro durante o período 1978 a 1989. Os dados são oficiais, sendo levantados pela Sexta Divisão do INEMET, sito na cidade do Rio de Janeiro, sendo medidos, os dados de radiação solar, com um piranômetro Eppley (Modelo 8-48) e, os de brilho solar, com um heliógrafo Campbell-Stokes. Os dados de energia solar foram publicados nos Boletins de Radiação Solar do CERAS/INEMET (CERAS/INEMET, 1978-1989) e os de horas de sol foram registrados como "Mapas" (folhas de registro)(VI DEMET, 1978-1989) e publicados somente como valores médios sobre períodos de 30 anos, sendo os valores aqui utilizados extraídos diretamente dos Mapas originais, o que foi possível pela permissão do VI DEMET. A estação meteorológica estava localizada a 22° 55' de latitude Sul, 43° 10' de longitude Leste e 5,32 m sobre o nível do mar.

É interessante sublinhar que não se tem dados oficiais de energia solar antes de 1978 e também não após 1988, ou seja, que este trabalho analisa a totalidade dos dados medidos (10 anos e um mês), e até que não se tenha uma decisão oficial em contrario colocando outra estação a medir, não teremos outros dados oficiais do Rio de Janeiro.

Existem outros trabalhos que realizam análises de dados medidos de radiação solar para o Rio de Janeiro: Hackenberg (HACKENBERG, 1984) reuniu dois anos de medições na COPPE/UFRJ, Cavalcanti (CAVALCANTI, 1991) apresenta quatro anos de medições feitas no CEPEL/ELETOBRAS, Souza Nunes et al. (SOUZA NUNES et al., 1979), apresenta uma reconstrução dos dados usando horas de brilho solar e a correlação de Bennett. Este trabalho pretende ser uma análise mais ampla e profunda de um período muito mais longo e baseado na totalidade dos dados oficiais.

Os dados que analisamos, chegaram a nossas mãos incompletos e mostrando muitas vezes contradições fragrantemente entre as horas de brilho solar e os dados de radiação. Então, a análise, correção e complementação dos dados constitui uma parte importante do trabalho, o que senão seria somente uma mera classificação de dados experimentais. Os dados que faltavam ou que estavam errados foram reconstruídos, mudados ou ajustados, observando-se a concordância entre eles, propondo uma primeira correlação tipo Angstrom, e/ou pela relação com outros dados meteorológicos como nebulosidade, visibilidade, precipitação umidade relativa e temperatura, do mesmo dia ou observando a evolução dos parâmetros nos dias vizinhos.

Os dados consolidados para o período completo de 12 anos são mostrados na Tabela 1 e nas figuras 1 e 2. Os parâmetros da correlação são mostrados na Tabela 2 e as figuras 3 a 8 mostram os dados de radiação solar para cada mês do ano. As matrizes nas quais constam todos os dados diários consolidados, para os 12 anos, e o critério usado para cada correção, aparecerão como uma publicação interna da UFRJ, e estão a disposição de aqueles interessados em realizar outros estudos estatísticos.

## CORRELAÇÃO E CORREÇÃO DOS DADOS

Para correlacionar os dados de horas de brilho solar e a energia solar foi utilizada uma equação de regressão do tipo Angstrom, usando-se valores individuais registrados durante 102 meses. Utilizou-se a equação a seguir:

$$H = H_o \cdot [a + b (n/N)]$$

onde  $H$  = radiação solar diária, medida em plano horizontal, ( $\text{kJ/m}^2\text{dia}$ ),  
 $H_o$  = radiação solar diária extraterrestre, em plano horizontal, ( $\text{kJ/m}^2\text{dia}$ ),  
 $n$  = horas de brilho solar, (h/dia),  
 $N$  = duração do dia, (h/dia).

"a" e "b" são os coeficientes da correlação, determinados por quadrados mínimos, usando as fórmulas a seguir:

$$b = \{M \cdot \sum_i [(H/H_o) \times (n/N)]_i - \sum_i (H/H_o)_i \times \sum_i (n/N)_i\} / \{M \cdot \sum_i (n/N)_i^2 - [\sum_i (n/N)_i]^2\}$$
$$a = [\sum_i (H/H_o) - b \cdot \sum_i (n/N)] / M$$

onde o subscrito "i" indica o dia, indo de 1 até M, sendo "M" o número de dias no mês estudado. A radiação solar diária extraterrestre foi calculada por meio das expressões matemáticas que aparecem usualmente na literatura (Veja-se, por exemplo, a eq. 1.8.3, do livro de DUFFIE e BECKMAN, 1980).

Os valores de n e H foram extraídos de dados medidos de nove meses de janeiro (1979, 1980 e de 1982 até 1988), também nove meses de diferentes anos para fevereiro, março, junho, julho, agosto e setembro, oito meses para abril, maio, outubro e novembro e sete meses para dezembro. Desta forma foram estabelecidos 24 parâmetros "a" e "b", correspondentes aos 12 meses do ano. O primeiro par de valores que foi obtido, foi usado para preencher os valores que faltavam ou corrigir os erros. Os valores médios finais dos parâmetros, obtidos por iteração, foram usados para gerar os 42 meses sem dados ou com dados errados quase todos os dias.

## ANÁLISE CRÍTICA DOS VALORES CONSOLIDADOS

Foram recolhidos dados de horas de brilho solar durante um longo período: Das primeiras décadas deste século até janeiro de 1990, quando pararam os registros. Os dados de energia solar foram recolhidos de fevereiro de 1978 até março de 1988, quando as medidas pararam. Foi considerado, então que seria útil sobrepor os períodos, estendendo-os até cobrir as últimas medições, abarcando um período de 12 anos. Então, dos 144 meses estudados (janeiro de 1978 até dezembro de 1989), 21 meses (no período de março de 1978 a março de 1988) foram reconstruídos porque ou faltavam grande parte deles, ou a maioria estavam errados, e outros 21 meses foram construídos por não terem registros. Em resumo, do 100% dos dados consolidados, aproximadamente 30% foi reconstruído teoricamente.

Além disso, aproximadamente 200 dados individuais (de um total de quase 7500) foram modificados por estar totalmente fora de correlação, ou em contradição com as indicações de outros parâmetros meteorológicos, o que significa uma intervenção em aproximadamente 3% dos dados, o que faz sentido para este tipo de dados cujo controle de qualidade final não é

muito estrito. Como já foi indicado, o critério para a modificação dos valores foi a coerência com outros dados meteorológicos, primeiro com a nebulosidade e precipitação, e posteriormente com a variação da temperatura do ar, a umidade relativa e a visibilidade. Os detalhes de cada correção aparecem na publicação interna mencionada.

Os erros cometidos na reconstrução podem ser equacionados da seguinte maneira: assume-se que o máximo erro experimental (casual) na determinação de "n" é da ordem de 10% e de 2% para a energia solar "H". Como os valores médios de "a" e "b" foram calculados a partir dos de "n" e "H" por quadrados mínimos, o máximo erro propagado é da ordem de  $10^{-4}$ . Então, o maior erro nos valores individuais reconstruídos de H é

$$\Delta H/H_o = (\Delta H/H) \cdot (H/H_o) \sim \Delta H/H_o = \Delta a + \Delta b \cdot (n/N) + b \cdot \Delta n/N \sim b \cdot (\Delta n/n) \cdot (n/N) \sim \sim 0.6 \times 0.1 \times 0.9 \sim 5\%$$

isto é, o dobro do erro experimental. Assumindo isso, o erro nos valores médios mensais calculado é da ordem dos valores médios extraídos dos dados experimentais, isto é, 0,1% para os valores de H e 0,5% para os de n.

## CONCLUSÃO

Dados consolidados de média diária de energia solar em plano horizontal para o Rio de Janeiro estão agora disponíveis. Os dados oficiais que eram incompletos e contraditórios foram trabalhados tornando-se um conjunto auto consistente e fiável. O conjunto apresentado aqui se constitui numa ferramenta indispensável para projetos arquitetônicos com consciência do meio ambiente e para projetos de utilização de energia solar. Merece salientar-se que as primeiras tentativas de incorporar o conhecimento da interação entre o sol e os edifícios foram realizadas faz mais de 50 anos, mas que até agora não se dispunha de dados confiáveis de energia solar.

É interessante notar que a energia solar disponível no Rio de Janeiro é de 16.580 kJ/m<sup>2</sup> dia ou 4,60 kWh/m<sup>2</sup> dia, como média anual. Os valores médios acumulados são: 2.046 horas de brilho solar por ano e 6.050 kWh de energia solar por metro quadrado e por ano.

O conhecimento dos valores médios dos parâmetros "a" e "b" permite usá-los em outra importante tarefa: eles podem gerar dados de energia solar para outras cidades de Estado do Rio de Janeiro que possuam registros de horas de brilho solar. Como existem 16 estações nestas condições, o conjunto de 24 parâmetros apresentados aqui constituem uma base para um futuro mapeamento da energia solar no Estado. Por outro lado, além de sua utilidade específica, o conjunto apresentado serve também de base para a geração de outros dados úteis, tais como dados de radiação direta e difusa, assim como valores de luminosidade do céu.

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao VI Distrito do INEMET, pela permissão para copiar os dados registrados e não publicados, e a quatro estudantes da UFRJ, M. C. Nascimento, M. L. B. Coelho, A. L. Wirz e P. F. da Silva, bolsistas de iniciação científica do CNPq e/ou da UFRJ, que colaboraram ativamente em parte da digitação dos dados utilizados.

## REFERÊNCIAS

1. CAVALCANTI, Evandro C., Analysis of Experimental Solar Radiation Data for Rio de Janeiro, Brazil, Solar Energy Vol. 47, No. 3, pp. 231-235, 1991.
2. CERAS/INEMET, Boletim de Radiação Solar, Período 1978-1988. Ministério de Agricultura, Brasília, Brasil.
3. DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York, 1980.
4. HACKENBERG, Cirus M., Medições de Radiação Solar no período 1980-1982, "ProjetoCOARES-1.1", COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1984.
5. SOUZA NUNES, G. S. de, BUHILD, André, R.G., LEITE VIANELLO, R. e SILVA MARQUES V. de, Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil, Rev. Bras. de Armazenagem, Vol. 4, No.2, pp. 5-30, Viçosa, Brasil, 1979.
6. VI DEMET, "Mapas de Observações Meteorológicas". Período de 1978 a 1989.

**TABELA 1. MÉDIAS MENSAIS CONSOLIDADAS-"n" e "H"- PERÍODO 1978-1989**

	Horas de Brilho Solar horas/dia		Radiação Solar kJ/m2dia		Radiação Solar kWh/m2dia			
	<N>	<n>	<Ho>	<H>	<Ho>	<H>	<Hmx>	Hmxa
JAN.	13.23	6.02	41,802.67	20,758.32	11.61	5.77	8.52	9.09
FEV.	12.76	6.79	39,573.61	21,374.13	10.99	5.94	8.01	9.06
MAR.	12.14	6.29	35,467.83	19,094.15	9.85	5.30	7.54	8.33
ABR.	11.46	5.60	29,873.35	15,279.19	8.30	4.24	6.18	6.57
MAI	10.90	5.46	24,866.09	13,063.62	6.91	3.63	5.17	5.74
JUN.	10.62	5.49	22,405.12	12,189.04	6.22	3.39	4.82	6.05
JUL.	10.75	5.74	23,446.70	12,689.71	6.51	3.52	4.85	5.86
AGO.	11.23	5.70	27,618.03	14,081.20	7.67	3.91	5.82	7.18
SET.	11.90	4.40	33,134.15	14,455.48	9.20	4.02	6.56	8.27
OUT.	12.58	5.12	38,027.14	17,465.29	10.56	4.85	7.53	8.13
NOV.	13.13	5.56	41,079.39	19,465.51	11.41	5.41	8.25	8.74
DEZ.	13.39	5.10	42,255.82	18,992.33	11.74	5.28	8.35	8.89
M.An	<n>m. a. = 5.61		<H>m.a. = 16,575.66		<H>m.a. = 4.60			
Total Anual								
<n>t.a = 2046 h/a			<H>t.a. = 6050 MJ/m2a = 1681kWh/m2a					

**TABELA 2. VALORES MÉDIOS DOS COEFICIENTES DA CORRELAÇÃO**

Coefic.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
a	0.237	0.273	0.261	0.241	0.262	0.267	0.262	0.217	0.215	0.221	0.230	0.229
b	0.575	0.506	0.537	0.556	0.527	0.538	0.524	0.584	0.606	0.585	0.575	0.582

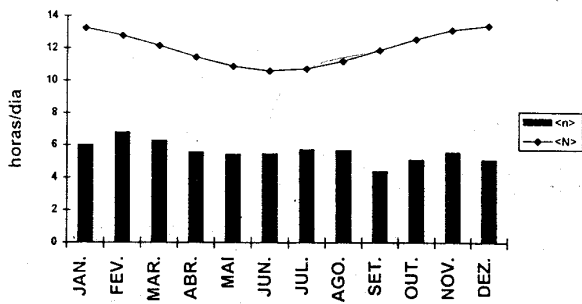


FIGURA 1. MÉDIAS MENSAIS DE HORAS DE BRILHO SOLAR

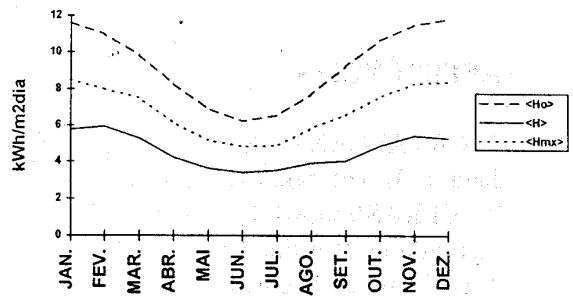


FIGURA 2 - MÉDIAS MENSAIS DE ENERGIA SOLAR

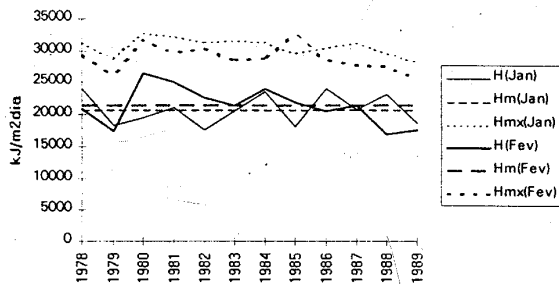


FIGURA 3 - JANEIRO E FEVEREIRO

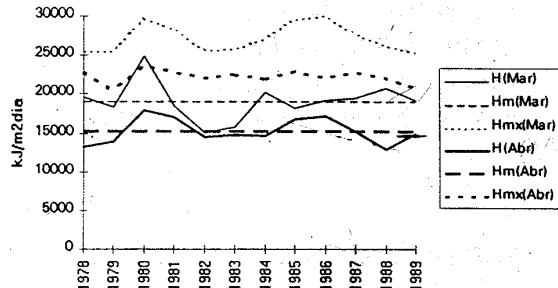


FIGURA 4 - MARÇO E ABRIL

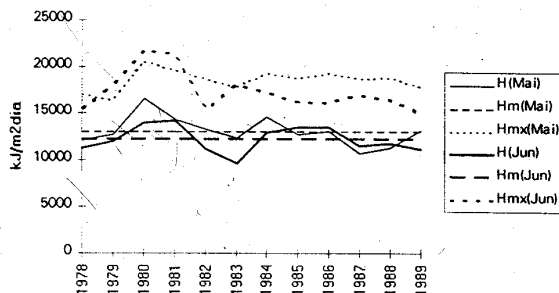


FIGURA 5 - MAIO E JUNHO

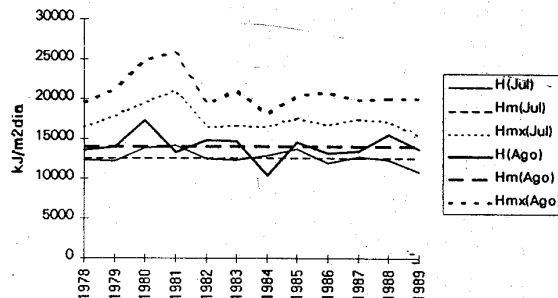


FIGURA 6 - JULHO E AGOSTO

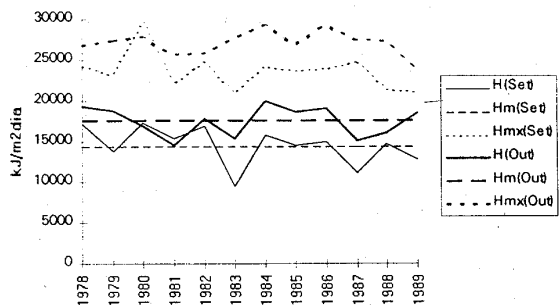


FIGURA 7 - SETEMBRO E OUTUBRO

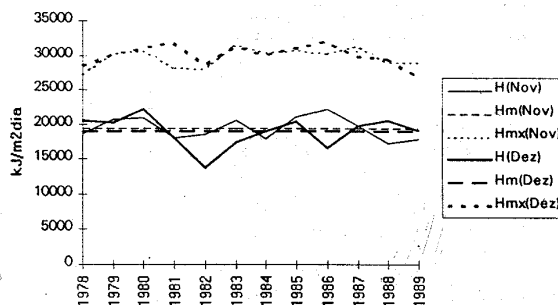


FIGURA 8 - NOVEMBRO E DEZEMBRO