

RADIAÇÃO SOLAR: CONSTRUÇÃO DO ANO DE REFERÊNCIA PARA ALGUMAS CIDADES NO BRASIL

Mario H. Macagnan - mhmac@euler.unisinos.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

Av. Unisinos, 950 - 93022-000 – São Leopoldo, RS – Brasil

Tel.: (0xx51) 590-3333 Ramal 1760 - Fax: (0xx51) 590-8172

***Resumo.** Este trabalho propõe uma metodologia para a elaboração de um Ano de Referência de radiação solar. Alguns resultados são apresentados, obtidos através da análise de uma base de dados de irradiação solar gerada a partir de dados diários medidos e publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), durante os anos de 1978 a 1988 para algumas cidades brasileiras. Os doze meses obtidos se caracterizam por apresentar a média mensal, a distribuição e a persistência significativamente semelhantes aos apresentados pela série completa. Os resultados obtidos podem ser utilizados como parâmetros de projetos e de avaliação energética em edificações.*

Palavras-chave: Dados climáticos, Radiação solar, Carga térmica

1. INTRODUÇÃO

A existência de uma base de dados climatológicos de alta qualidade, com um número elevado de observações e com grande espectro geográfico é uma necessidade real para projetistas de sistemas solares, para projeto e avaliação energética de edificações e para aqueles pesquisadores envolvidos em estudos nesta área.

No Brasil, país com vasta área territorial, a densidade de estações climatológicas é bastante reduzida, inclusive nos estados das regiões sul e sudeste, onde podemos encontrar o maior número delas em operação.

As estações pertencem, principalmente, a três organismos: a rede do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, subordinado ao Ministério da Agricultura, as redes estaduais, subordinadas às Secretarias Estaduais de Agricultura e a rede do Centro Técnico Aeroespacial, CTA, do Instituto de Aeronáutica e Espaço, IAE, subordinado ao Ministério da Aeronáutica e localizadas nos principais aeroportos brasileiros.

Os dados coletados por estas três principais redes são disponibilizados ao público de formas distintas. O INMET cobra uma taxa, por parâmetro, por ano de observação e por estação e busca estas informações nos diversos Distritos Meteorológicos de sua rede. Ou seja, as informações não são centralizadas e sua obtenção pode demorar um tempo relativamente longo. As redes das Secretarias Estaduais de Agricultura publicam, sistematicamente, os dados coletados de diversos parâmetros, em forma escrita. Geralmente estes dados são médias mensais de medidas diárias destes parâmetros.

Dentro deste cenário, fica claro a grande dificuldade encontrada pelos profissionais na hora de utilizar dados climáticos para seus projetos. Alguns trabalhos importantes nesta área foram desenvolvidos por Sattler (1989) e Goulart *et al.* (1997). Este último, utilizando dados fornecidos pelo CTA/IAE, é o trabalho mais completo realizado para cidades brasileiras, excetuando-se a análise da radiação solar, indisponível neste trabalho.

2. OBJETIVO

Neste trabalho serão apresentados resultados da análise da irradiação global diária horizontal, coletados e informatizados à partir de dados publicados pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, nos Boletins de Radiação Solar Trimestrais, cobrindo os anos de 1978 a 1988 para diferentes locais do Brasil.

O resultados serão apresentados como dias típicos representando a condição mais provável da irradiação solar para estes locais. Além disso, será possível a partir desta análise elaborar, para cada local, o Ano de Referência ou Ano Típico. Este Ano de Referência é formado por valores de irradiação solar diária de meses de diferentes anos, de forma a apresentar valores médios, distribuição e persistência significativamente semelhantes à série de longo período.

A tabela abaixo apresenta uma relação de cidades cujos dados de irradiação solar foram analisados e cujos Anos de Referência serão apresentados.

Tabela 1. Localização das estações meteorológicas analisadas e período de observação dos dados de irradiação solar.

Local	Estado	Latitude	Longitude	Altitude, m	Período
Belém	PA	01°29' S	48°28' W	4,8	05/78 a 12/87
Belo Horizonte	MG	19°56' S	43°56' W	850,2	01/79 a 03/88
Brasília	DF	15°47' S	47°56' W	1158,4	01/78 a 03/88
Curitiba	PR	25°26' S	49°16' W	923,5	01/78 a 03/88
Porto Alegre	RS	30°01' S	51°13' W	47,0	01/78 a 03/88
Rio de Janeiro	RJ	22°55' S	43°10' W	5,3	02/78 a 03/88
Salvador	BA	13°00' S	38°31' W	51,4	01/78 a 02/86
São Paulo	SP	23°30' S	46°37' W	792,1	01/78 a 12/87

3. METODOLOGIA

Uma vez informatizados, os dados de irradiação global diária horizontal foram submetidos a um teste de consistência. Obviamente, a potência do teste ficou limitada em função da inexistência de outros parâmetros meteorológicos para comparação.

Cada dado de irradiação solar foi transformado em valor de *índice de claridade da atmosfera*, K_T , definido como a relação entre a irradiação global diária em superfície horizontal e a irradiação extraterrestre diária, também horizontal. A utilização do índice de claridade é muito conveniente para quantificar a irradiação solar incidente em um determinado período de tempo. Como sua variação vai desde zero até um máximo teórico igual a um, permite conhecer o estado da atmosfera. Além disso, como foi demonstrado por Liu e Jordan (1960), o comportamento climático em um determinado lugar pode ser caracterizado pelo valor médio mensal de K_T . Na verdade, eles demonstraram que a *fração de tempo* na qual K_T é igual ou inferior a um certo valor depende diretamente, e quase exclusivamente, de seu valor médio mensal, \bar{K}_T .

Desta maneira, pode-se eliminar todos os dados cujo valor de K_T seja maior que um. Além disso, foi aplicado um controle mais restritivo, consistindo em eliminar todos os valores onde $K_T > 0,864$, de acordo com observações realizadas por Hollands e Huget (1983).

Os dados reprovados por este teste foram considerados valores nulos, não entrando nos demais cálculos. Com os dados já filtrados, foram calculadas as irradiações diárias médias mensais.

O passo seguinte foi determinar, para as séries mensais de K_T , as funções de distribuição acumulada (ou distribuição fracional de tempo). Para comparar estas funções de distribuição acumulada de cada mês, foi utilizado o teste de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Mediante um algoritmo desenvolvido por Taub (1981), foram comparadas as funções de distribuição acumuladas de duas amostras independentes. A comparação é não-paramétrica e depende exclusivamente do tamanho das amostras, N , e da diferença máxima entre elas, D_n . Para este caso, foi utilizado como hipótese nula $H_0 : F_1(x) = F_2(x)$, onde F_1 e F_2 são duas funções de distribuição acumuladas empíricas. A hipótese nula é rejeitada quando o valor de D_n se encontrar dentro da região crítica de tamanho α , de acordo com:

$$P\left(D_n > \frac{c}{\sqrt{N}}\right) = \alpha \quad (1)$$

onde o valor de c/\sqrt{N} pode ser encontrado em tabelas de valores críticos para o contraste de Kolmogorov-Smirnov, como por exemplo em Siegel (1975).

O último critério de comparação utilizado é a persistência da série de irradiação. Se considerarmos a série de dados de irradiação solar como a realização de um processo estocástico, o coeficiente de autocorrelação pode ser utilizado para determinar a dependência linear entre valores sucessivos desta série, ou seja, sua persistência. Para um processo estacionário, a função de autocorrelação é calculada como:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (2)$$

onde γ_k é a função autocovariância entre dois instantes quaisquer, para um intervalo k e γ_0 é a variância. A equação mais utilizada para o cálculo do estimador de ρ_k , r_k é, de acordo com Pankratz (1983):

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z})}{\sum_{t=1}^n (z_t - \bar{z})^2} \quad (3)$$

onde z_t e z_{t+k} são dois valores da série com um atraso k , e \bar{z} é o valor médio. A série de radiação solar não é um processo estacionário pois sua média, variância autocovariância para qualquer t , não é estável. Ao utilizar diretamente a Eq. (3) com valores de irradiação diária, uma parte do valor do coeficiente de autocorrelação de primeira ordem se deve ao ciclo anual. Para eliminar esta tendência periódica utiliza-se como variável uma série residual, z_t , dada por:

$$z_t = \frac{(K_t - \bar{K}_t)}{\sigma_{K_t}} \quad (4)$$

onde K_t é o índice de claridade diário, \bar{K}_t é o índice de claridade médio mensal e σ_{K_t} é o desvio padrão de K_t dentro de um determinado mês. Esta transformação produz uma série

com média zero e desvio padrão unitário, além de eliminar completamente a tendência, tanto na média como na variância da série original (Amato *et al.*, 1986).

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos através da aplicação da metodologia descrita anteriormente são apresentados nas Tabelas 2 a 9. Nestas tabelas são mostrados os valores diários médios mensais da irradiação solar global horizontal, juntamente com o ano do qual esta média provém. Simultaneamente, são apresentados os valores, para este mês, da irradiação global mínima e a máxima. Também apresenta o coeficiente de autocorrelação de primeira ordem.

Quando os critérios média mensal e ajuste da distribuição de frequência acumulada são atendidos, os valores da autocorrelação do mês escolhido são, geralmente, elevados. Como pode ser visto nestas tabelas, alguns valores da autocorrelação são baixos. Isto indica que o mês escolhido não representa, significativamente, o comportamento médio das séries mensais. Neste caso, o mês escolhido atendeu apenas o critério da média mensal. Isto aconteceu em poucas estações, principalmente naquelas onde havia, em determinados meses, um número muito grande de dados nulos.

Tabela 2. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Belém e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm^{-2} . r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1ª ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
ASJan	1986	4,40	1,05	9,34	0,44
Fev	1983	4,35	0,91	7,42	0,55
Mar	1986	3,98	1,38	7,88	0,02
Abr	1984	4,01	0,54	9,49	0,04
Mai	1979	4,88	1,46	6,83	0,49
Jun	1985	5,36	1,89	6,73	0,57
Jul	1981	5,33	2,63	6,85	0,10
Ago	1978	5,73	3,24	6,96	0,28
Set	1983	5,32	2,49	7,09	0,30
Out	1984	5,49	2,30	7,18	0,27
Nov	1979	5,05	2,63	8,10	0,23
Dez	1983	4,52	1,43	8,49	0,18

Os resultados para a cidade de Belém, Tab. 2, são exemplos do exposto anteriormente. Os valores dos coeficientes de autocorrelação são baixos, mostrando a dificuldade em determinar os meses de referência. Neste caso, os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, para os anos de 1978 e 1979 e os meses de outubro a dezembro, para 1978 são nulos, resultando em um número menor de meses para a análise.

As cidades mostradas nas Tab. 3 a 6, possuem dados de no mínimo 9 e máximo de 11 anos, com poucos valores nulos. Desta forma, os meses escolhidos como típicos são significativamente semelhantes ao comportamento médio das séries mensais.

Tabela 3. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Belo Horizonte e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1ª ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1981	4,50	0,66	8,58	0,67
Fev	1985	5,80	1,05	7,93	0,74
Mar	1984	4,97	1,19	6,98	0,58
Abr	1979	4,42	1,00	6,46	0,35
Mai	1983	3,68	0,62	5,39	0,55
Jun	1979	3,83	0,70	5,78	0,43
Jul	1979	4,00	0,28	5,20	0,28
Ago	1984	3,93	0,96	6,09	0,61
Set	1984	4,76	0,43	6,89	0,31
Out	1987	5,19	0,89	7,81	0,32
Nov	1984	5,44	0,71	7,95	0,52
Dez	1979	4,53	0,78	7,84	0,64

Tabela 4. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Brasília e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1ª ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1978	5,35	0,97	8,56	0,78
Fev	1986	5,82	0,88	8,37	0,73
Mar	1979	4,73	0,64	7,74	0,48
Abr	1983	5,00	1,10	7,07	0,56
Mai	1982	4,60	1,06	6,50	0,48
Jun	1985	4,94	2,11	5,73	0,49
Jul	1981	5,15	0,67	6,76	0,77
Ago	1986	5,03	0,79	7,84	0,51
Set	1987	5,27	0,73	7,38	0,67
Out	1984	5,20	0,96	8,02	0,81
Nov	1979	5,02	1,19	8,50	0,48
Dez	1986	4,78	0,76	8,22	0,70

Tabela 5. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Curitiba e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1^a ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1978	5,54	1,49	9,02	0,52
Fev	1982	4,91	0,94	8,25	0,61
Mar	1984	4,00	0,87	7,53	0,56
Abr	1984	3,44	0,56	6,34	0,20
Mai	1986	2,98	0,27	5,27	0,33
Jun	1981	2,59	0,21	5,42	0,47
Jul	1986	2,77	0,30	4,73	0,63
Ago	1982	3,23	0,41	5,95	0,29
Set	1979	3,87	0,37	7,25	0,38
Out	1979	4,59	0,60	8,35	0,31
Nov	1987	5,16	0,95	8,85	0,55
Dez	1984	5,08	0,96	9,23	0,38

Tabela 6. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Porto Alegre e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1^a ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1987	6,10	0,93	9,05	0,58
Fev	1979	5,79	0,71	8,46	0,39
Mar	1979	4,73	0,75	7,32	0,71
Abr	1981	3,78	0,30	7,55	0,53
Mai	1987	2,94	0,09	5,00	0,32
Jun	1986	2,53	0,21	4,93	0,23
Jul	1981	2,63	0,22	6,67	0,46
Ago	1986	3,11	0,12	6,53	0,56
Set	1979	3,99	0,21	8,11	0,18
Out	1978	4,92	0,39	7,94	0,25
Nov	1980	5,67	0,33	8,93	0,40
Dez	1987	6,24	0,73	9,16	0,14

A análise dos dados de irradiação para o Rio de Janeiro apresentou uma série de elementos que compravam uma baixa confiabilidade desta base de dados. O primeiro deles é o elevado número de dados que apresentaram valores de $K_T \geq 1,0$ e que, portanto, foram anulados. Também apresentaram valores de irradiação cujo K_T estava muito próximo do valor

máximo estipulado, ou seja, 0,864. Isto não permitiu a anulação destes valores, mas colocou em dúvida a calibração do instrumento de medida. Cabe ressaltar aqui que todas as estações meteorológicas ligadas ao INMET, no período considerado, usavam piranômetros Eppley modelo 8-48. Não foi indicado frequência de calibração nem escala radiométrica utilizada.

Tabela 7. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Rio de Janeiro e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1^a ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1987	5,78	0,98	11,34	0,60
Fev	1982	6,62	0,64	10,00	0,68
Mar	1978	5,49	0,78	10,75	0,54
Abr	1986	4,57	0,40	8,69	0,29
Mai	1986	3,64	0,38	7,39	0,33
Jun	1987	3,30	0,48	6,98	0,25
Jul	1986	3,21	0,18	6,75	0,26
Ago	1979	3,88	0,29	8,35	0,21
Set	1986	4,20	0,30	8,27	0,33
Out	1984	5,44	0,58	10,07	0,47
Nov	1985	5,83	0,72	10,56	0,67
Dez	1985	5,61	0,45	10,26	0,60

Tabela 8. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de Salvador e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1^a ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1978	6,07	1,04	8,75	0,56
Fev	1983	6,12	1,63	8,34	0,50
Mar	1979	5,86	0,72	7,87	0,56
Abr	1979	4,67	0,63	8,61	0,36
Mai	1985	4,18	0,81	9,95	0,33
Jun	1980	4,08	0,84	5,65	0,42
Jul	1981	4,00	1,50	6,02	0,17
Ago	1981	5,02	2,12	7,29	0,46
Set	1978	5,32	0,68	8,10	0,38
Out	1982	5,72	0,67	9,23	0,30
Nov	1985	5,39	0,59	8,28	0,14
Dez	1984	6,77	1,14	9,72	0,41

Tabela 9. Valores de irradiação global horizontal diária média mensal, \bar{H} , do Ano de Referência, para a cidade de São Paulo e o ano do qual provém. H_{min} e H_{max} são os valores mínimo e máximo, respectivamente, da irradiação dentro deste mês. Todos os valores em kWhm⁻². r_1 é o coeficiente de auto correlação de 1ª ordem.

Mês	Ano	\bar{H}	H_{min}	H_{max}	r_1
Jan	1985	4,70	0,76	9,08	0,61
Fev	1983	4,72	0,53	7,79	0,54
Mar	1983	3,91	0,53	9,55	0,45
Abr	1980	3,85	0,26	6,14	0,41
Mai	1986	3,10	0,40	5,15	0,26
Jun	1983	2,61	0,35	4,48	0,60
Jul	1981	3,16	0,37	4,88	0,45
Ago	1982	3,64	0,28	5,76	0,36
Set	1986	4,03	0,23	6,61	0,58
Out	1979	4,60	0,58	7,72	0,47
Nov	1985	5,19	0,76	8,29	0,74
Dez	1981	4,80	0,63	8,26	0,46

Complementando esta análise, se apresenta nas Figuras 1 a 4 a *fração de tempo* na qual o valor da irradiação global diária horizontal, H , se encontra abaixo de um dado valor, para o verão. Para esta representação, o verão foi considerado composto pelos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março. Com estas figuras podem ser obtidos os níveis de frequência de ocorrência de irradiação solar.

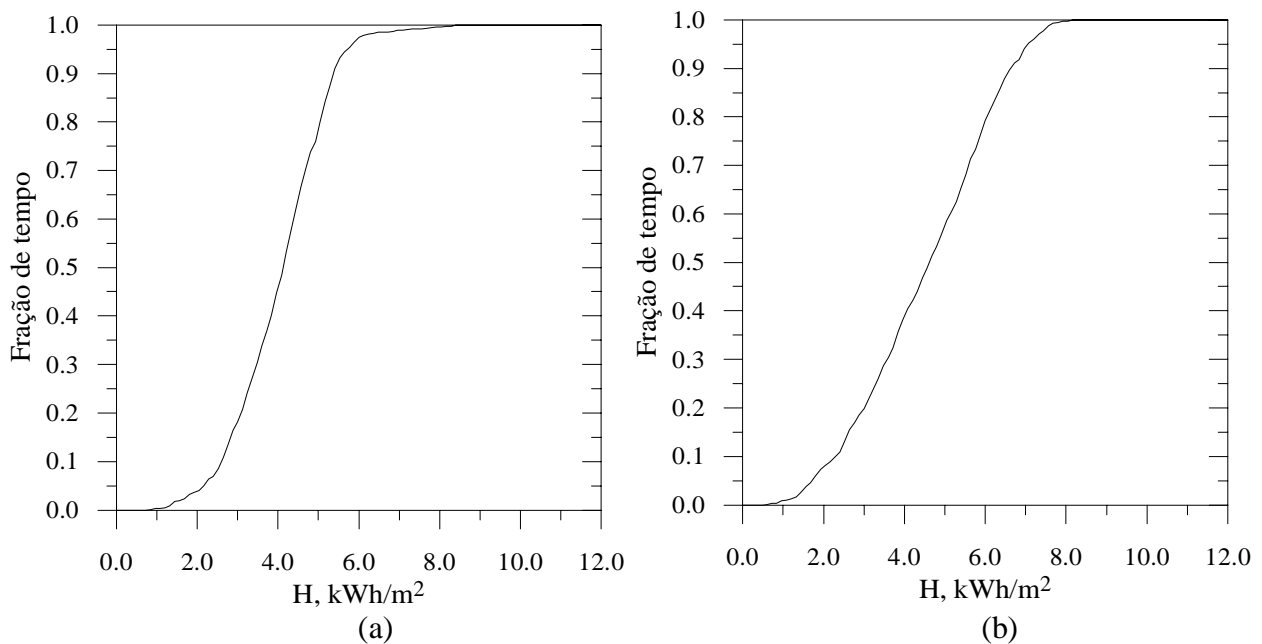


Figura 1. *Fração de tempo* na qual o valor da irradiação global diária, H , em kWhm⁻² se encontra abaixo de um dado valor para: a) Belém e b) Belo Horizonte. Caso do verão.

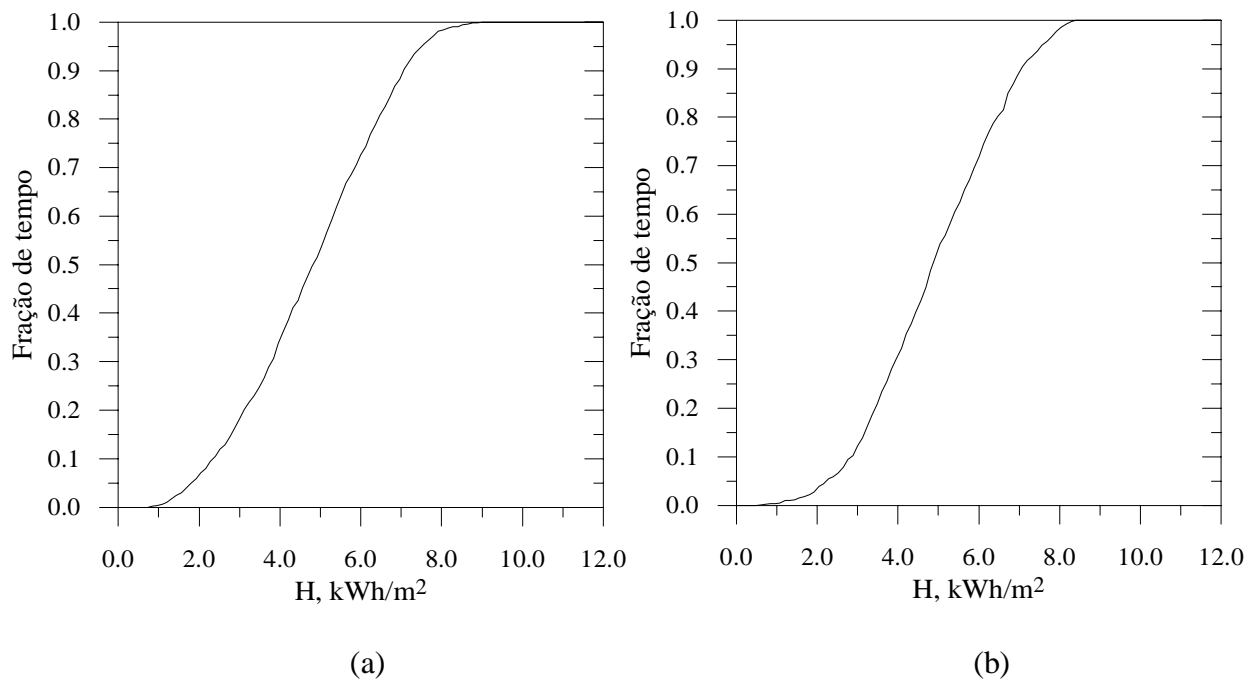


Figura 2. *Fração de tempo* na qual o valor da irradiação global diária, H , em kWhm^{-2} se encontra abaixo de um dado valor para: a) Brasília e b) Curitiba. Caso do verão.

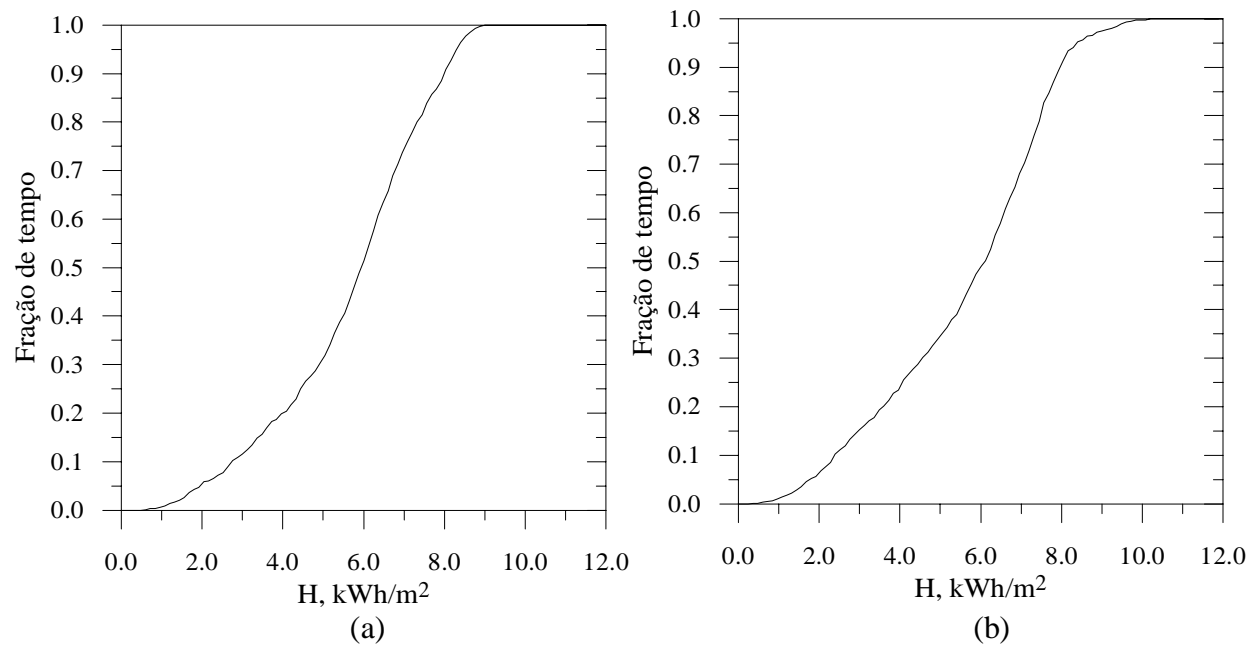


Figura 3. *Fração de tempo* na qual o valor da irradiação global diária, H , em kWhm^{-2} se encontra abaixo de um dado valor para: a) Porto Alegre e b) Rio de Janeiro. Caso do verão.

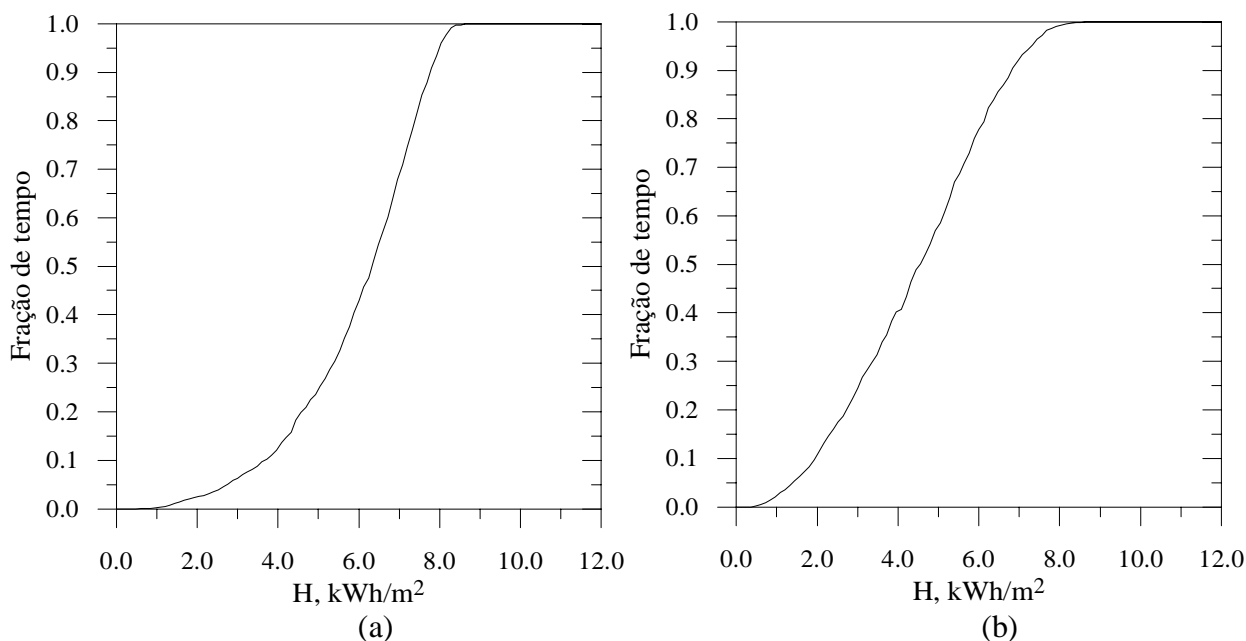


Figura 4. *Fração de tempo* na qual o valor da irradiação global diária, H , em kWhm^{-2} se encontra abaixo de um dado valor para: a) Salvador e b) São Paulo. Caso do verão.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia para a elaboração do Ano de Referência de radiação solar, baseado em critérios estatísticos, tais como média mensal, distribuição acumulada e coeficiente de autocorrelação. Obviamente, o resultado final é prejudicado pelo baixo número de anos de dados medidos de irradiação para cada local. O que pode ser garantido é que, em função do material disponível, os doze meses escolhidos são os mais representativos do comportamento da série de dados de irradiação solar, e que a média anual destes meses escolhidos é significativamente igual à serie total. Os Anos de Referência completos, com valores diários de irradiação global podem ser obtidos diretamente com o autor.

REFERÊNCIAS

- Amato, U., Andretta, A., Bartoli, B., Coluzzi, B., Cuomo, V., Fontana, F. e Serio, C., 1986, Markov processes and Fourier analysis as a tool to describe and simulate daily solar irradiance, *Solar Energy*, vol. 37, pp. 179-194.
- Goulart, S., Lamberts, R. e Firmino, S., 1997, Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras, Florianópolis, Núcleo de Pesquisa em Construção, UFSC.
- Hollands, K.G.T. e Juget, R.G., 1983, a probability density function for the clearness index, with applications, *Solar Energy*, vol.30, pp.195-209.
- Liu, B.Y.H. e Jordan, R.C., 1960, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, *Solar Energy*, vol. 4, pp.1-19.
- Pankratz, A., 1983, *Forecasting with univariate Box-Jenkins models*, John Wiley, New York.
- Sattler, M., 1989, *Dias climáticos típicos para o projeto térmico de edificações em Porto Alegre*, CIENTEC, Porto Alegre.
- Siegel, S, 1975, *Estatística não paramétrica*, McGraw-Hill, São Paulo.
- Taub, T.W., 1981, A computer program for the two-sample Kolmogorov-Smirnov test. *Journal of Quality Technology*, vol 13, pp.139-142.