



**III ENCONTRO NACIONAL
I ENCONTRO LATINO-AMERICANO**
Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

ELABORAÇÃO DE SOFTWARE SERVIDOR DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO

ARNO KRENZINGER

e

MARIO HENRIQUE MACAGNAN

Laboratório de Energia Solar
Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Sarmento Leite, 425
90.050-170 Porto Alegre - RS - BRASIL

RESUMO

Neste trabalho se apresentam os modelos, utilizados e os resultados possíveis de se obter com um programa de computador elaborado para calcular a radiação solar incidente em planos de qualquer inclinação e orientação. O programa RADIAÇÃO SOLAR é uma aplicação Windows e sua interface gráfica auxilia o usuário a introduzir um mínimo de informações requeridas. Os resultados médios ou estocásticos de radiação horária podem ser transferidos a outros aplicativos ou simplesmente impressos ou gravados em arquivos.

ABSTRACT

This paper presents the models comprised and the results that can be obtained using a computer program performed for calculating the incoming solar radiation at any tilt and azimuthal surface orientation. The software RADIACAO SOLAR is a Windows application and its graphical interface helps user to input the few required informations. The stochastic or averaged hourly radiation results can be transferred to other applications or only printed or recorded into a file.

PALAVRAS CHAVES

Energia solar, radiação solar; dimensionamento, e simulação

1. INTRODUÇÃO

Para estudar o comportamento térmico de um ambiente construído é fundamental conhecer inicialmente as condições externas: temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente. A temperatura e a umidade do ar exterior são grandezas que devem ser aceitas sem possibilidade de modificações. A radiação solar, entretanto, pode ser evitada ou aproveitada com mais potência através de dispositivos de sombreamento, revestimentos exteriores, janelas e as adequadas orientações e inclinações de paredes e telhados. Por este motivo e pela importância de sua contribuição na carga térmica de um ambiente construído sua estimativa deve ser aprimorada ao máximo.

A intensidade da radiação solar é tradicionalmente medida no plano horizontal sendo estes dados importantes para a agricultura. Já para o aproveitamento energético da radiação solar, interessam dados também sobre superfícies inclinadas em diferentes ângulos e orientações. Por sorte existem procedimentos de cálculo que permitem, com boa precisão, transformar dados de radiação em superfície horizontal em dados de radiação sobre superfícies inclinadas. Estes procedimentos envolvem distribuir os dados ao longo do dia para que se possa analisar a direção de origem da radiação, fundamental no cálculo da transformação de dados horizontais em inclinados. Sucede automaticamente uma enfadonha e trabalhosa repetição de cálculos geométricos e analíticos

que, se elaborados manualmente, certamente levam a erros e ao esgotamento do operador. Em casos como este é evidente a importância do uso de computadores que pode, além de aliviar a rotina do projetista, permitir que usuários com muito menos experiência possam obter resultados satisfatórios com facilidade, desde que operando os programas a partir de interfaces ditas "amigáveis".

2. RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA EM MÉDIA MENSAL

Um dos valores mais utilizados em dimensionamento é o valor da radiação global diária em média mensal para cada um dos doze meses do ano. Dependendo do objeto e do refinamento necessário no dimensionamento, este número é utilizado diretamente ou fracionado nas parcelas horárias correspondentes. O procedimento seguido, em geral, é o estudo de apenas um dia de cada mês, considerado dia típico, esperando-se que este dia represente a média de todo o mês. A escolha da data que corresponde ao dia típico de cada mês recai sobre o dia em que a radiação extraterrestre coincide numericamente com a média mensal da radiação extraterrestre para o mês em questão.

Nos lugares onde se realizam medidas da radiação solar horizontal de vários anos, o dado utilizado provém diretamente das médias destas medidas. Na falta das mesmas em geral se utilizam medidas de insolação através do termoheliógrafo, uma esfera de vidro que carboniza uma folha de papel indicando o número total de horas de brilho de sol ocorridas durante o dia. Neste caso, a forma de estimar a radiação diária em média mensal, $\langle H \rangle$, é a utilização da fórmula de Angstrom que correlaciona linearmente a razão entre o número de horas de sol e o comprimento do dia em horas com o índice de transparência da atmosfera. Este número, o índice de transparência, (também chamado índice de claridade) tem sido muito importante em todos os modelos. Ele indica a razão entre a radiação incidente na superfície da Terra e a radiação incidente fora da atmosfera (extraterrestre). Dependendo do intervalo de tempo considerado utilizam-se as notações: $\langle Kt \rangle$ para índice de transparência médio mensal, Kt para diário, kt para horário e, neste trabalho, k_t^m para o índice de transparência horário médio.

No ambiente do programa de computador objeto deste trabalho, a informação da radiação global diária em média mensal, juntamente com a informação da latitude são dados mínimos para realizar qualquer tarefa. No caso do lugar em análise estar incluído no banco de dados incorporado, basta selecionar o nome da estação.

3. RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA SEQUENCIAL

No caso de se pretender analisar o comportamento da instalação, através de simulação do sistema por computador, é essencial que os dados meteorológicos (especialmente a radiação solar) sejam compatíveis com seqüências de dados que efetivamente podem ocorrer. Na prática não ocorrem seqüências de trinta dias iguais ao dia típico e portanto deve-se recorrer a outros métodos para distribuir os dados mais de acordo com a natureza.

Obviamente, havendo medidas de seqüências diárias de radiação no lugar a ser analisado por períodos suficientemente longos, esta será a melhor fonte de dados. Na falta destes, entretanto, é possível estimar seqüências de radiação solar diária por vários métodos, destacando-se o método das Matrizes de Transição de Markov (MTM), proposto por Aguiar e Collares-Pereira (1988) e analisado em comparação com outros por Krenzinger e Macagnan (1988) e Macagnan (1989). Nenhum dos métodos existentes consegue ser simultaneamente independente de dados particulares do lugar (além de $\langle H \rangle$) e reproduzir com fidelidade todas as características estatísticas. Em particular, o método MTM proporciona a possibilidade de sintetizar seqüências de radiação diária tendo como único dado de entrada a série de 12 valores mensais de $\langle H \rangle$. O método utiliza uma biblioteca de matrizes, uma para cada intervalo de $\langle Kt \rangle$. Nestas matrizes cada elemento (i,j) representa a probabilidade de um valor de Kt mudar de um estado i para um estado j . Numa análise aplicada à simulação de sistemas fotovoltaicos, Gonçalves (1992) demonstrou que apesar dos dados sintetizados reproduzirem com boa fidelidade a distribuição de Kt , em algumas cidades o número de dias consecutivos com pouco sol não concorda com as seqüências reais. Mesmo assim, certamente é melhor utilizar estes dados, com uma boa chance de "darem certo", que considerar todos os dias do mês iguais ou com uma distribuição arbitrária.

4. DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA MÉDIA

A partir dos dados diários de radiação a distribuição horária é realizada tradicionalmente através de fatores que reproduzem os valores esperados para a fração horária da radiação diária considerada. Estes fatores, apresentados primeiramente por Liu e Jordan (1960) e revistos por Collares-Pereira e Rabl (1979) permitem calcular a média da radiação incidente em cada hora, a partir da fração horária rt :

$$rt = \frac{\pi}{24} [A + B \cos(\omega)] \left[\frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \omega_s \cos \omega_s} \right] \quad (1)$$

onde ω é o ângulo horário, ω_s é o ângulo do por-do-sol e A e B são dados por:

$$\begin{aligned} A &= 409 + 5016 \sin(\omega_s - \frac{\pi}{3}) \\ B &= 6609 - 4767 \sin(\omega_s - \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

O produto de rt pelo valor da radiação global diária resulta na radiação solar recebida (em média) na hora centralizada em ω . Dividindo este valor pela radiação extraterrestre horária I_0 calculada para a mesma hora, obtém-se o índice de transparência da atmosfera esperado em média, k_t^m . Com um método similar se estima a fração difusa da radiação horária pela equação:

$$rd = \frac{\pi}{24} \left[\frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) - \omega_s \cos \omega_s} \right] \quad (3)$$

Como acima, o produto de rd pelo valor da radiação difusa diária resulta na radiação solar difusa recebida (em média) naquela hora.

5. DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA ESTOCÁSTICA

Muito poucos são os lugares no mundo onde se registram medidas sequenciais de radiação solar horária. Sempre que estas medidas existam em número suficiente, é recomendável sua utilização para simular com dados do passado o comportamento futuro de uma instalação ou edificação.

Um ambiente sem ar condicionado e sob a influência da radiação solar incidente, apresenta um comportamento térmico muito diferente se ao longo do dia a radiação solar se distribuir conforme a média (sem variações fortes) em comparação com a realidade em um dia parcialmente nublado. Apesar do resultado médio apresentar um ambiente confortável, o mesmo poderia ter sofrido alterações de temperatura de forma que o conforto instantâneo ao longo do dia (que é na verdade o único que existe), não fosse efetivo em todo o período. Para estas simulações detalhadas são essenciais dados horários plausíveis que possam representar os picos de radiação solar em vez de simplesmente ignorar a existência dos mesmos.

O modelo utilizado no programa (Krenzinger 1994) baseia-se na representação da radiação solar horária por um desvio aleatório δ sobre o índice de transparência da atmosfera médio (k_t^m), modulado pelos valores do índice de transparência diário K_t . Quanto mais próximo estiver o K_t de seu valor máximo, menor será a componente aleatória. O mesmo ocorre quando K_t se aproxima do mínimo valor. Como envoltória universal se utilizam duas parábolas opostas centradas no valor $K_t=0,4$ e com amplitude de 0,25. A forma destas parábolas cruzadas, lembrando um peixe, acabou por dar nome ao modelo: "modelo do peixe".

$$k_t = k_t^m + 2[rnd - 0.5][2(K_t - 0.4)^2 - 0.25] \quad (4)$$

onde rnd é um número aleatório uniformemente distribuído.

6. RADIAÇÃO SOLAR DIRETA EM SUPERFÍCIE INCLINADA

Uma vez contando com a radiação horizontal distribuída de hora em hora ao longo de cada dia, é possível seguir o cálculo para determinar a radiação incidente em um plano inclinado. Em aplicações térmicas sobre objetos de elevada capacidade calorífica, como é o caso de edificações, o intervalo horário é suficiente para representar a sequência de radiação e se costuma calcular a irradiância no instante do meio da hora em estudo e logo assumir que esta seja constante ao longo daquela hora. A transformação do valor da irradiância global horizontal "G" em inclinada "G_r" é diretamente dependente das direções envolvidas e como a radiação global provém de todas as direções do céu de forma anisotrópica é importante separar diferentes componentes direcionais. A separação mais tradicional é entre a irradiância direta "B" (aquela que incide no objeto proveniente da direção que une o objeto ao sol) e a irradiância difusa "D" (aquela que incide no objeto depois de sofrer reflexões ou espalhamento na atmosfera ou no entorno do objeto). Objeto de estudo por vários pesquisadores, a fração difusa

da radiação global pode ser encontrada por relações empíricas como a que se utiliza no software, de Erbs et alii (1982)

$$\frac{D}{G} = 0.9511 - 0.1604k_t + 4.388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4 \quad (5)$$

se $22 < k_t < 8$

$$\frac{D}{G} = 1 - 0.09k_t \quad (6)$$

se $k_t < 22$ e

$$\frac{D}{G} = 0.165 \quad (7)$$

se $k_t > 8$. Naturalmente, se obtém também a parcela direta da diferença $B - G - D$.

Como os raios da radiação direta são paralelos, se obtém B_i primeiro dividindo B pelo co-seno do ângulo de azimute e logo multiplicando pelo co-seno do ângulo de incidência dos raios solares na superfície inclinada:

$$B_i = B \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (8)$$

7. RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM SUPERFÍCIE INCLINADA

A outra parte da radiação solar, a radiação difusa, é por sua vez subdividida entre a radiação difusa proveniente do céu e a radiação difusa proveniente da reflexão do solo. A parcela refletida pelo solo pode ser muito importante em superfícies de grande inclinação ou em superfícies que tem planos refletores não horizontais no seu entorno. Rigorosamente esta radiação também é não isotrópica, depende da direção da radiação direta e das características de reflexão das superfícies refletoras (ou solo). No entanto é bastante comum assumir que o entorno seja plano e horizontal e que as características refletoras deste solo sejam isotrópicas. Assim sendo, a parcela a contribuir com a reflexão sobre a superfície é dada pelo fator de visão do plano horizontal, pela refletividade ρ e pela irradiância global incidente:

$$D_s = G \rho_s \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (9)$$

A radiação difusa proveniente do céu é tanto mais isotrópica quanto mais encoberto estiver o dia. Dias de céu limpo ou parcialmente nublado apresentam uma distribuição espacial da radiação difusa realmente muito complexa. Vários modelos foram publicados para estimar a radiação difusa em superfície inclinada, e o programa "Radiação Solar" oferece como opção as quatro alternativas abaixo, entre as quais se encontra o modelo de Perez, que tem sido referido como o mais fidedigno à dados medidos. Todos estes modelos assumem também que o entorno do objeto de estudo seja plano e desimpedido. Correções especiais deverão ser executadas externamente se houver bloqueio por vegetação ou outros elementos.

Modelo Isotrópico - Liu e Jordan (1961):

$$D_i = D \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + D_s \quad (10)$$

Modelo de Klucher (1979):

$$D_i = D(1 + \xi \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z)(1 + \xi \sin^3(\frac{\beta}{2}))(\frac{1 + \cos \beta}{2}) + D_s \quad (11)$$

Modelo de Hay & McKay (1985):

$$D_i = D(\kappa \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}) + (1 - \kappa)(\frac{1 + \cos \beta}{2}) + D_s \quad (12)$$

Modelo de Perez (1987):

$$D_i = D \left[(1 - F1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F1 \frac{\cos \chi}{\cos \theta_z} + F2 \sin \beta \right] + D_s \quad (13)$$

sendo

$$\begin{aligned} F1 &= Fac11 + B_r Fac12 + \theta_z Fac13 \\ F2 &= Fac21 + B_r Fac22 + \theta_z Fac23 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{D + I}{D} \quad (15)$$

$$B_r = \frac{D \cdot m}{I_0} \quad (16)$$

$$\chi = \min \left[\theta, \frac{\pi}{2} \right] \quad (17)$$

onde m é a massa de ar e os coeficientes Fac_{ij} são relacionados com ε pela Tabela 1.

Tabela 1. Valores dos coeficientes Fac_{ij} em função de ε para o modelo de Perez.

ε	1 - 1.056	1.0561 - 1.253	1.2531 - 1.586	1.5861 - 2.134	2.1341 - 3.23	3.231 - 5.98	5.981 - 10.08	> 10.08
Fac 11	-.042	.261	.481	.825	1.102	1.226	1.367	.978
Fac12	.55	.559	.46	.187	-.299	-.451	-.838	-.812
Fac13	-.044	-.243	-.354	-.532	-.586	-.617	-.655	-.393
Fac21	-.12	-.019	.077	.172	.35	.444	.431	.335
Fac22	.138	.083	.006	-.05	-.398	-.949	-1.75	-2.16
Fac23	-.034	-.081	-.116	-.151	-.171	-.073	.094	.186

8. BANCO DE DADOS

Para dar início ao procedimento é necessário dar entrada aos valores de radiação sobre superfície horizontal em média mensal. Estes dados por si só já são difíceis de serem obtidos. Quando não se encontram dados confiáveis de radiação solar do lugar da aplicação é possível buscar uma estação meteorológica ao mesmo tempo mais próxima e de um lugar com igual altitude, clima e vegetação. Dados de insolação de várias estações meteorológicas do Brasil foram compilados pela OLADE (Organização Latino Americana de Energia) e transformados em dados de radiação solar estimada. Estes (entre outros dados do Mundo inteiro) foram introduzidos em um arquivo (formato MS-EXCEL for MAC) por integrantes da University of Massachusetts Lowell (USA) que por sua vez foi adaptado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS para o uso deste programa, em formato MS-Access(PC).

9. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A soma das parcelas B_i e D_i resulta na informação oferecida pelo software, ou seja, a radiação estimada como incidente sobre uma superfície de qualquer orientação no período de uma hora. Estes dados podem a partir de então ter diferentes aplicações e por isto o software prevê diferentes formas de apresentação dos mesmos.

9.1 Apresentação Gráfica. Os dados horários podem ser apresentados em gráficos para estudo, comparação e análises sem sair do ambiente do programa. É possível optar entre gráficos de barras ou gráficos de linhas que são gerados na moldura apropriada do formulário de trabalho. Podem também ser ampliados (botão superior) para exame mais detalhado. O botão inferior da barra de botões ao lado serve para acionar resultados em forma de tabelas, que também podem ser ampliadas com o botão superior. Quando o gráfico solicitado representa um dia único, a abscissa será o tempo expresso em horas, seja para um dia típico como o gráfico de barras abaixo, ou para um dia específico como o apresentado a direita (linha).

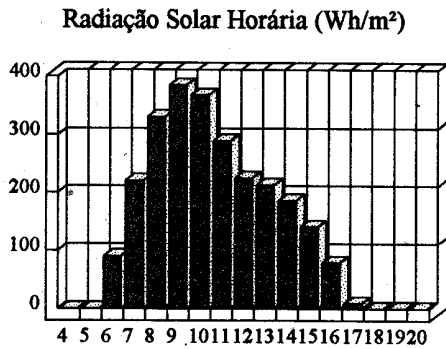


Figura 1. Dia típico de abril para Porto Alegre. Parede vertical - fachada Leste

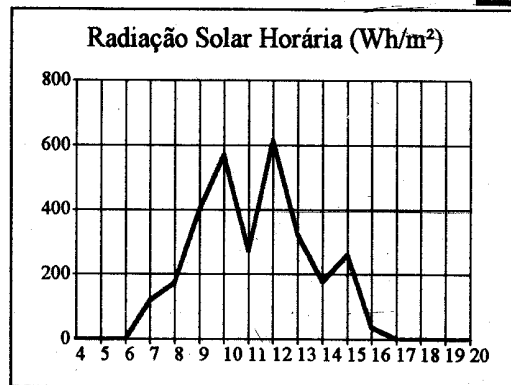
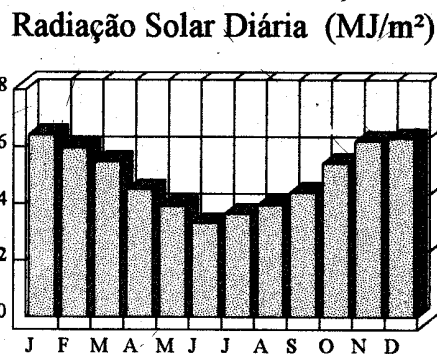


Figura 2. Dia estocástico do mes de maio para Curitiba. Direção Norte - superfície inclinada a 40 graus

Figura 3. Ao lado um gráfico da distribuição ao longo do ano da radiação solar incidente em Blumenau para parede vertical orientada a Oeste, dados em MJ/m².dia



9.2 Apresentação em Tabelas. Para aproveitar os resultados dos modelos em aplicações efetivas é importante utilizar uma base quantitativa, fornecida pela tabela. O número de colunas da tabela é automático, dependendo da opção anterior entre trabalho com dia específico ou dias típicos de todo o ano (dados médios). Utilizando os botões SALVAR, COPIAR ou IMPRIMIR se pode transferir o resultado da moldura (gráfico ou tabela) respectivamente para um arquivo, para a área de transferência (clipboard) do Windows ou para uma impressora. A opção de cópia é provavelmente a mais útil, uma vez que é possível recuperar os dados de uma tabela em qualquer aplicativo *for Windows* e dar prosseguimento ao trabalho a realizar numa planilha eletrônica, por exemplo.



10. JANELA DE OPÇÕES

A janela de opções (Figura 4), acionada pela barra de menu permite escolher o modelo de radiação difusa, o tipo de impressora para os gráficos, a unidade de energia a utilizar e o valor do albedo do solo. As modificações nesta janela desativam a apresentação dos resultados anteriores, sendo necessário voltar a selecionar o modo de visualização de resultad

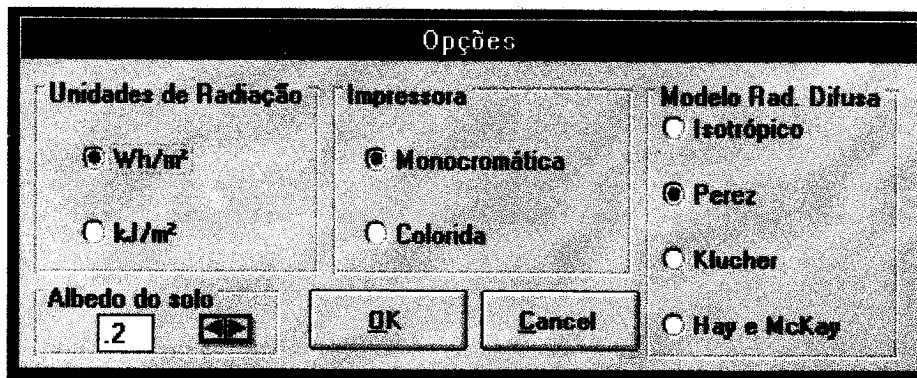


Figura 5. Janela de opções.

11. CONCLUSÕES E FUTURO APERFEIÇOAMENTO

O software apresentado é parte integrante de um pacote de programas muito mais abrangente: o SOLARCAD. Este pacote está sendo elaborado pelos integrantes do Laboratório de Energia Solar para auxiliar projetos de sistemas de energia solar térmica e fotovoltaica e realizar simulações detalhadas de diversas instalações. Destes programas o primeiro que atinge um status de "pronto" é o Radiação Solar que está sendo apresentado em sua versão 1.0 através deste trabalho.

O programa já está se demonstrando muito útil pela facilidade com que se obtém os resultados desejados em utilizações acadêmicas no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS. Sua distribuição livre tem por objetivo ao mesmo tempo divulgar conhecimentos sobre energia solar e permitir uma melhora de qualidade nos projetos de sistemas. Como prosseguimento em versões futuras, além do natural depuramento de algum possível erro que venha a ser detectado ou da incorporação de alguma sugestão de melhoria de operação, pretende-se introduzir ferramentas para considerar sombreamento parcial, cálculo de projeções de sombras e efeitos de superfícies refletoras nas proximidades do objeto.

AGRADECIMENTOS

O projeto SOLARCAD é um projeto integrado de pesquisa com apoio financeiro do CNPq. Os autores são bolsistas do CNPq.

REFERÊNCIAS

1. AGUIAR, R.J. e COLLARES-PEREIRA, M. Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov Transition Matrices. *Solar Energy*, 40(3): 269-79, 1988.
2. COLLARES-PEREIRA, M. e RABL, A. The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, 22(2): 155-164, 1979.
3. ERBS, D.G.; KLEIN, S.A. e DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28(4): 293-302, 1982.
4. GONÇALVES, S.W. *Comparação entre métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos por simulação*. Tese de Mestrado, Porto Alegre, PROMEC-UFRGS, 1992. 63p.
5. HAY, J.E. e MCKAY, D.C. Estimating solar irradiance on inclined surfaces: a review and assessment of methodologies. *Int. J. Solar Energy*, 3: 203-40, 1985.

6. KLUCHER, T.M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, **23**(2): 111-4, 1979.
7. KRENZINGER, A. e MACAGNAN, M.H. Estudo comparativo de diferentes modelos de geração de séries de radiação solar. *Anais do II Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Aguas de Lindoia, SP, 1988. p389-92.
8. KRENZINGER, A. Modelo do peixe: sequencias horárias de radiação solar. *Anais do V Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, São Paulo, SP, 1994. p439-44.
9. LIU, B.Y.H e JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, **4**(3): 1-19, 1960.
10. LIU, B.Y.H e JORDAN, R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the ecuator. *ASHRAE Journal* **3**, 53-9, 1961.
11. MACAGNAN, M.H. *Estudo de modelos de sintetização de dados de radiação solar*. Tese de Mestrado, Porto Alegre, PROMEC-UFRGS, 1989. 104p.
12. PEREZ, R.; SEALS, R; INEICHEN, P.; STEWART, R. e MENICUCCI, D. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, **39**(3): 221-31, 1987.