

## RADIASOL2

# SOFTWARE PARA SINTETIZAR DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR

**Arno Krenzinger** – arno.krenzinger@ufrgs.br

**Rodrigo Carvalho Bugs** – rbugs@terra.com.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar/PROMEC

**Resumo.** Tendo em vista a importância cada vez maior de se conhecer o comportamento seqüencial da radiação solar incidente em equipamentos de conversão, foram estudados e desenvolvidos métodos para sintetizar dados meteorológicos com o uso de computadores. Este trabalho apresenta a consolidação dos métodos utilizados no LABSOL da UFRGS através da implementação do software RADIASOL2. Este programa de computador realiza a geração dos dados de irradiação solar em seqüências horárias para superfície horizontal e para superfícies inclinadas com qualquer orientação. O trabalho apresenta um resumo dos modelos matemáticos utilizados e as interfaces gráficas desenvolvidas para o programa, as quais facilitam o trabalho dos usuários, permitindo a visualização e a exportação dos resultados para posterior utilização com outros aplicativos.

**Palavras-chave:** Radiação solar, Sintetização de dados, Seqüências meteorológicas.

## 1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis voltam a apresentar importância no cenário mundial, desta vez impulsionadas pela preocupação universal dos efeitos causados pela emissão de gases oriundos da utilização dos combustíveis fósseis. Entre as energias renováveis a energia solar é uma opção sempre considerada, principalmente devido à sua distribuição razoavelmente uniforme, permitindo sua utilização praticamente em todos os lugares do mundo.

Os equipamentos de conversão de energia solar na forma de energia necessária não são baratos e, por isto, é importante ter um dimensionamento adequado para cada instalação. Isto é verdade tanto para sistemas de conversão térmica quanto para sistemas de conversão fotovoltaica, apesar de que o custo dos equipamentos fotovoltaicos faz com que o dimensionamento deva ser mais preciso neste caso. Uma das técnicas mais precisas de dimensionamento de sistemas de conversão de energia solar é a simulação do equipamento em operação. Se a simulação for fidedigna é possível extrair muitos resultados. Além de déficit e/ou excedente de energia e demais cálculos de falhas e benefícios daquela proposição, uma simulação detalhada é capaz de identificar as origens de defeitos e erros de projeto nas instalações, ou ainda investigar os efeitos de substituir certos componentes determinados para observar as conseqüências desta substituição ao longo do tempo.

Com as facilidades trazidas pela utilização de microcomputadores, hoje é essencial procurar meios de fazer uma simulação detalhada sobre instalações de grande porte antes de iniciar a construção do sistema. O LABSOL (Laboratório de Energia Solar da UFRGS) tem dedicado parte de seus esforços de pesquisa na implementação programas de simulação, e com isto foram identificados pontos críticos nestas simulações, entre os quais se destacam a incerteza na descrição do consumo da energia final (perfil de consumo) e a falta de dados meteorológicos em seqüências horárias para permitir uma simulação mais realista.

Com base nesta última dificuldade, o LABSOL investiu na pesquisa de métodos para fornecer dados horários de radiação solar que fossem estatisticamente representativos das distribuições de radiação solar observada. Ao longo de vários anos as técnicas estudadas foram aperfeiçoadas e finalmente consolidadas no software RADIASOL2 que proporciona ao usuário a possibilidade de gerar planilhas de dados meteorológicos que poderão ser utilizados em programas de simulação e de dimensionamento, além de permitir a observação imediata dos efeitos causados pela orientação dos planos receptores da radiação solar.

## 2. RADIASOL E IRRADIAÇÃO HORÁRIA MÉDIA

A primeira versão do programa RADIASOL visava atender a demanda de profissionais de engenharia e arquitetura a encontrar dados para a radiação solar média incidente em planos de orientação qualquer. Neste programa os dados de irradiação solar em média mensal eram utilizados para estimar a irradiação esperada para um único dia que, comparados com a irradiação solar extraterrestre do mesmo dia geravam a fração conhecida como índice de limpidez  $K_t$  (clearness index), uma espécie de transmissividade diária da atmosfera, conforme indica a Eq. (1), onde  $H$  e  $H_o$  representam respectivamente a irradiação solar diária em um plano horizontal e a irradiação solar diária extraterrestre em um plano paralelo.

$$K_t = H / H_o \quad (1)$$

$H_o$  pode ser obtido através da Eq. (2), em J/m<sup>2</sup>,

$$H_o = \frac{24}{\pi} 3600 I_{sc} E_o [\omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s)] \quad (2)$$

onde  $E_o$  é a correção da excentricidade da órbita da Terra,  $I_{sc}$  é a constante solar ( $I_{sc}=1367$  W/m<sup>2</sup>)  $\phi$  é a Latitude,  $\delta$  é a declinação e  $\omega_s$  é o ângulo horário do pôr-do-sol obtido pela Eq. (3)

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan \delta \tan \phi] \quad (3)$$

Collares-Pereira e Rabl (1979) propuseram a correlação da Eq. (4) para determinar, a partir do  $Kt$ , para valores de  $Kt$  entre 0,17 e 0,75, a fração difusa da irradiação diária, isto é, a relação entre a irradiação solar diária difusa  $H_d$  e a irradiação solar diária total  $H$ . Para valores de  $Kt$  entre 0,75 e 0,8 a fração seria (0,632-0,54 $Kt$ ), para valores de  $Kt$  acima de 0,8 a fração seria 0,2 e para valores de  $Kt$  abaixo de 0,17 a fração seria 0,99.

$$H_d/H = 1,188 - 2,272 Kt + 9,473 Kt^2 - 21,856 Kt^3 + 14,648 Kt^4 \quad (4)$$

Este conjunto de equações bastante utilizado nos estudos de energia solar mostra que a partir de um valor de  $Kt$  e da latitude do local e do dia do ano pode-se obter uma estimativa dos valores de irradiação diária total  $H$ , irradiação diária difusa  $H_d$  e também a irradiação diária direta, pois  $H_b = H - H_d$ .

Partindo dos dados de radiação solar diária é possível determinar dados esperados em média para a radiação solar horizontal horária  $I$ , para um determinado ângulo horário  $\omega$ , ainda segundo Collares-Pereira e Rabl (1979), conforme a Eq. (5)

$$I = H \frac{\pi[a+b \cdot \cos(\omega)][\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{24[s \cdot \pi(\omega_s) - \omega_s \cos(\omega_s)]} \quad (5)$$

onde  $a$  e  $b$  são dados por

$$a = 0,409 + 0,5016 * \sin(\omega_s - 60 * \pi / 180) \quad (6)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 * \sin(\omega_s - 60 * \pi / 180) \quad (7)$$

e  $\omega$  pode ser definido a partir da hora solar ( $HS$ ) por  $\omega = 12 (HS - 12) / \pi$

A irradiação horária difusa, por sua vez, pode ser determinada, em média, pela Eq. (8)

$$I_d = H_d \frac{\pi[\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{24[s \cdot \pi(\omega_s) - \omega_s \cos(\omega_s)]} \quad (8)$$

Para um plano inclinado, a irradiação horária direta  $I_{bT}$  pode ser determinada conhecendo o ângulo médio de incidência na superfície, segundo a Eq. (9),

$$I_{bT} = I_b \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \quad (9)$$

onde o ângulo de incidência  $\theta_s$  e o ângulo de zênite  $\theta_z$  são obtidos respectivamente pelas equações (10) e (11)

$$\cos \theta_s = \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (10)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (11)$$

A irradiação horária difusa inclinada é calculada com o modelo de Perez et al. (1988), que por ter sua descrição muito longa, não será reproduzido neste trabalho, mas pode ser obtido na citada referência.

### 3. DADOS ESTOCÁSTICOS DE IRRADIAÇÃO DIÁRIA

Partindo do valor de radiação média mensal é possível estimar seqüências de radiação solar diária por vários métodos, sendo um dos principais 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). O método MTM possibilita a sintetização de seqüências de radiação diária tendo como único dado de entrada a série de 12 valores médios mensais de radiação.

Para construir as Matrizes foram utilizados dados de radiação solar de várias localidades Macagnan (1989). Nas matrizes cada elemento representa a probabilidade de um valor de  $Kt$  mudar do estado  $i$  para o estado  $j$ . Estes dados foram utilizados para selecionar a correlação observada entre os valores de  $Kt$  em dias adjacentes. Separados por

valores médios mensais de  $K_t$ , os valores de  $K_t$  diário para o período em observação foi dividido em  $n$  intervalos iguais (estados) e foi avaliada a probabilidade  $P_{ij}$  de que, se  $K_t$  tem um certo valor um dia, correspondente ao estado  $i$ , no dia seguinte tenha um valor correspondente ao estado  $j$ . Cada matriz quadrada, de  $n$  por  $n$  elementos contém a memória do que aconteceu no intervalo de tempo de vários anos e descreve a possibilidade de acontecer qualquer transição de um valor para o próximo. Como o valor da radiação precisa estar necessariamente em um dos estados possíveis no próximo dia, é preciso que, para cada linha da matriz,  $\sum_i P_{ij} = 1$ .

Macagnan (1989) construiu 20 matrizes com os intervalos de  $K_t$  médio mensal exibidos na Tabela 1. Cada matriz tem também associado um valor de  $K_t$  mínimo e um valor de  $K_t$  máximo.

Tabela 1 Intervalos de  $\langle K_t \rangle$  para cada matriz MTM do programa.

M	de	até	M	de	até	M	de	até	M	De	até
1	0	0,30	6	0,40	0,42	11	0,50	0,52	16	0,60	0,62
2	0,30	0,34	7	0,42	0,44	12	0,52	0,54	17	0,62	0,64
3	0,34	0,36	8	0,44	0,46	13	0,54	0,56	18	0,64	0,66
4	0,36	0,38	9	0,46	0,48	14	0,56	0,58	19	0,66	0,70
5	0,38	0,40	10	0,48	0,50	15	0,58	0,60	20	0,7	1

O procedimento de extração das seqüências de radiação solar partindo das matrizes de Transição de Markov, e dos valores médios mensais de  $\langle K_t \rangle$ , inclui selecionar a matriz correspondente ao dado inicial (que é o  $\langle K_t \rangle$  dado) escolher um estado  $i$  para o dia inicial e depois gerar computacionalmente um numero aleatório  $R$  entre 0 e 1. Os elementos  $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ij}$  são somados até que a soma seja maior que  $R$ , determinando-se  $j$ , que será o próximo estado de  $K_t$ . Os valores de  $j$  vão sendo armazenados em seqüência até obter uma série com 30 ou 31 valores. Este procedimento se repete 100 vezes e são calculas 100 valores médios de  $\langle K_t \rangle$ , sendo selecionado o conjunto que for mais parecido em média ao dado inicial. Todo este procedimento também se repete para os outros 11 meses do ano.

As seqüências de dados de radiação solares diárias sintetizadas utilizando o método descrito foram recentemente testadas comparando novos dados de referência medidos (Alves, 2007), apresentando um ótimo resultado.

#### 4. DADOS ESTOCÁSTICOS DE IRRADIAÇÃO HORÁRIA

A Eq. (5) mostra um método de obter-se a irradiação horária média ao longo de um dia. Utilizando este valor de  $I$  para a irradiação horária e calculando o valor da irradiação solar extraterrestre horária  $I_0$ , o índice de limpidez horário seria conforme a Eq. (12)

$$k_{Tm} = \frac{I}{I_0} \quad (12)$$

Os valores esperados médios, no entanto, não representam os dias reais. Seguindo este procedimento, todos os dias têm uma distribuição de irradiação horária seguindo a forma de um cosseno, fugindo do efeito de seqüências de horas com nuvens e com céu limpo. O método utilizado para produzir uma seqüência de dados horários mais plausível é misturar os valores médios de  $k_{Tm}$  com uma componente aleatória, que seja importante em dias com  $K_t$  diário intermediário e que seja pouco significativa em dias com  $K_t$  muito alto ou muito baixo. A partir de uma série de observações de dados medidos obteve-se um procedimento empírico apresentado em Krenzinger (1994) e reproduzido na Eq. (13). Por este procedimento, sempre que  $K_t$  estiver entre 0,1 e 0,75, calcula-se o índice de limpidez horário como

$$k_T = k_{Tm} + \lambda(0,25 - 2[K_t - 0,4]^2) \quad (13)$$

onde  $\lambda$  é um número aleatório de distribuição uniforme no intervalo  $-1 < \lambda < 1$ . Caso o valor de  $K_t$  esteja fora deste intervalo, o comportamento adotado é como se  $\lambda$  fosse zero, isto é,  $k_T = k_{Tm}$  e sempre  $I$  é recuperado pelo produto  $k_T I_0$ .

Assim como no caso da sintetização dos dados diários, o resultado é criticado e polido para evitar algum valor espúrio e absurdo que poderia ocorrer. Este método também foi validado por comparação com dados medidos em diferentes lugares (Krenzinger e Rauter, 1998).

Uma seqüência horária de dados também passa pelos mesmos procedimentos de cálculo de irradiação sobre superfície inclinada, mas para a separação de direta e difusa a Eq. (8) já não tem valor, sendo então utilizadas correlações observadas com dados de irradiação horária medida, como a de Erbs et al (1982) apresentada na Eq. (14) para  $k_T$  entre 0,22 e 0,8. Para  $k_T$  menor que 0,22 considera-se  $I_d = I(1 - 0,09 k_T)$  e para  $k_T$  maior que 0,8 considera-se  $I_d = 0,165$ .

$$I_d = I[0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4] \quad (14)$$

#### 5. PROGRAMA RADIASOL 2

Atendendo à demanda por um software que utilizasse uma interface de mapa para chegar ao local de onde se necessitasse estudar a radiação solar, foi preparado o programa chamado RADIASOL2 que substitui o programa

RADIASOL realizando tarefas similares, mas a partir dos dados sintetizados pelos mecanismos citados para obtenção de dados estocásticos de irradiação solar diária e horária.

O programa RADIASOL2 permite ao usuário selecionar o local e o método de obtenção dos dados climáticos médios. Na primeira versão do RADIASOL 2 foram contemplados apenas localidades e áreas do território brasileiro e há três opções para entrar com os dados iniciais: digitar dados obtidos de uma fonte confiável, obter dados por interpolação dos dados do banco de dados embutido no programa e obter dados a partir dos mapas disponibilizados pelo projeto SWERA.

Uma segunda versão estende a possibilidade de utilizar os dados do projeto SWERA para toda a América Latina, além, evidentemente de ser permitido inserir dados digitando-os para cada localidade. É importante salientar que o RADIASOL 2 (assim como o programa original Radiasol) não é um programa fonte de dados meteorológicos ou climáticos, apenas ajuda a lidar com dados que o próprio usuário deve inserir no programa. Apenas para facilitar a utilização enquanto o usuário ainda não dispõe dos dados mais específicos, o programa disponibiliza dados em média mensal para permitir a sintetização das sequências.

Para mostrar os dados de irradiação em média mensal sobre um plano inclinado, diferentemente do programa original Radiasol que utilizava a radiação média dada pela Eq.(5), o RADIASOL 2 faz a média dos dados estocásticos obtidos de forma horária, mantendo coerência entre os dados sequenciais e os dados médios, mas permitindo certas assimetrias na distribuição horária média ao longo do dia.

Os dados horários são sintetizados ao longo de um ano, tentando fazendo com que a média de irradiação para cada mês seja parecida com a média mensal utilizada para alimentar o programa. Desta forma os dados devem ser encarados como dados típicos, e não extremos. Isto porque os dados médios inseridos para dar início à sintetização em geral correspondem à uma média de vários anos e não uma média mensal referida a apenas um ano.

A Fig. 1 mostra a interface da seleção de um estado do Brasil para inicial o programa RADIASOL 2. Arrastando o mouse pelo mapa é possível ver uma estimativa das diferenças climáticas. Clicando em um círculo vermelho se seleciona um dos estados dos território brasileiro ( e/ou um país da América Latina na versão em preparação).

A Fig. 2 mostra a interface com o estado brasileiro da Bahia, que foi selecionado. Os pontos representam localidades que constam do banco de dados, podendo-se inserir novas localidades, ou editar os dados a qualquer momento. Para inserir uma nova localidade basta clicar em qualquer ponto do mapa (para identificar as coordenadas) e depois no botão *Entrada Manual de Dados*. Selecionando a cidade de Salvador e clicando em *CONFIRMAR*, são gerados os dados sequenciais e apresentados em gráfico em função do tempo, conforme exhibe a Fig. 3. Este gráfico pode ser examinado com facilidades de diversas modalidades de *ZOOM* e deslocamento vertical e horizontal. Também é possível alternar entre dados de radiação solar e temperatura ambiente.

Na parte inferior da imagem apresentada na Fig. 3 aparecem opções de continuidade do programa. Uma delas é a opção de gráficos de barras, que permite realizar médias mensais diárias e horárias. Ao selecionar esta opção, uma janela como a que aparece na Fig. 4 é exibida.

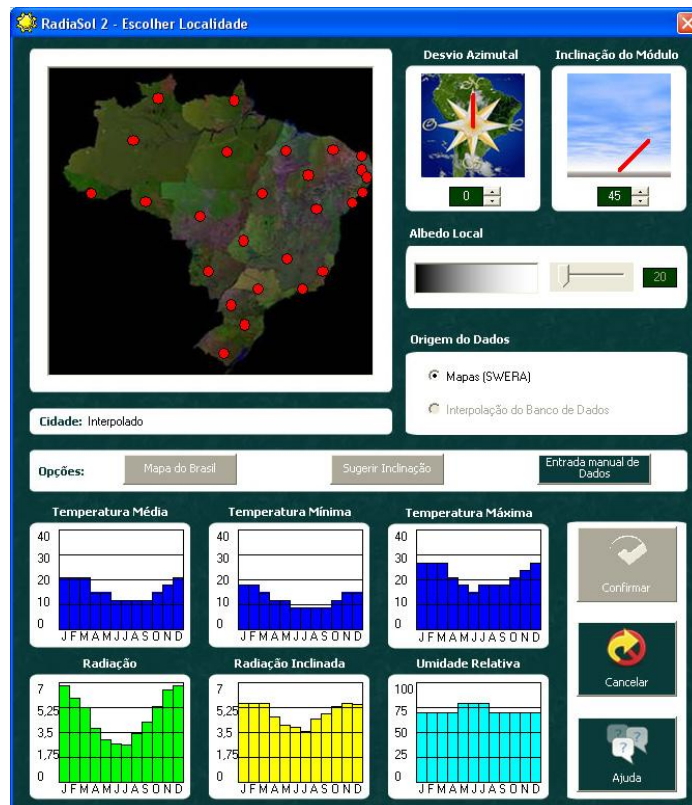


Figura. 1 Interface da seleção do estado do Brasil no programa RADIASOL 2.

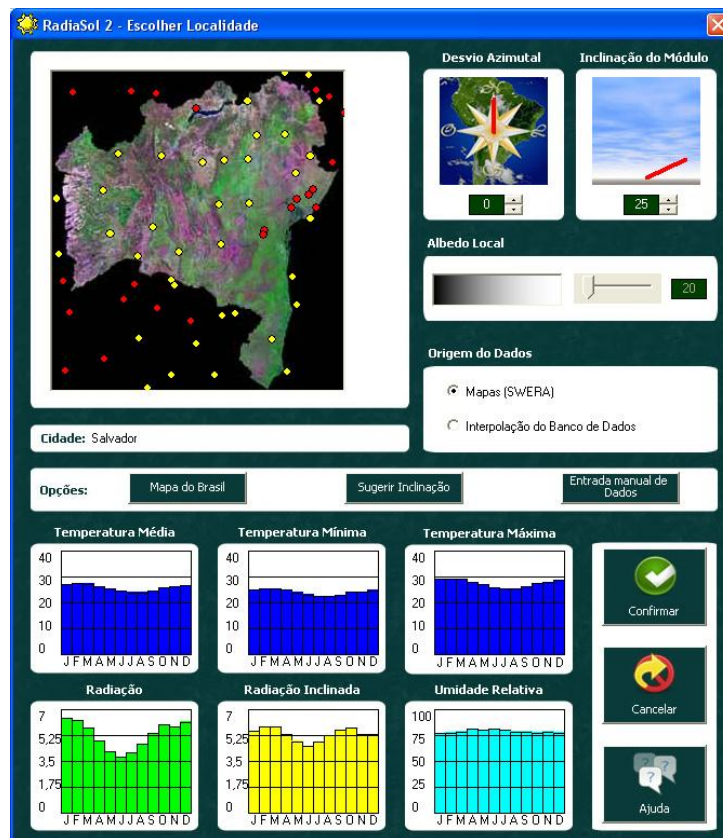


Figura. 2 Interface de seleção da localidade e orientação.

No caso da Fig. 4. são apresentados dados diários em média mensal para cada mês do ano, mas selecionando um determinado mês se visualizam os dados de cada componente organizados (Fig. 5) como média horária ao longo de um dia.



Figura. 3 Gráfico sequencial de dados de irradiação horária.

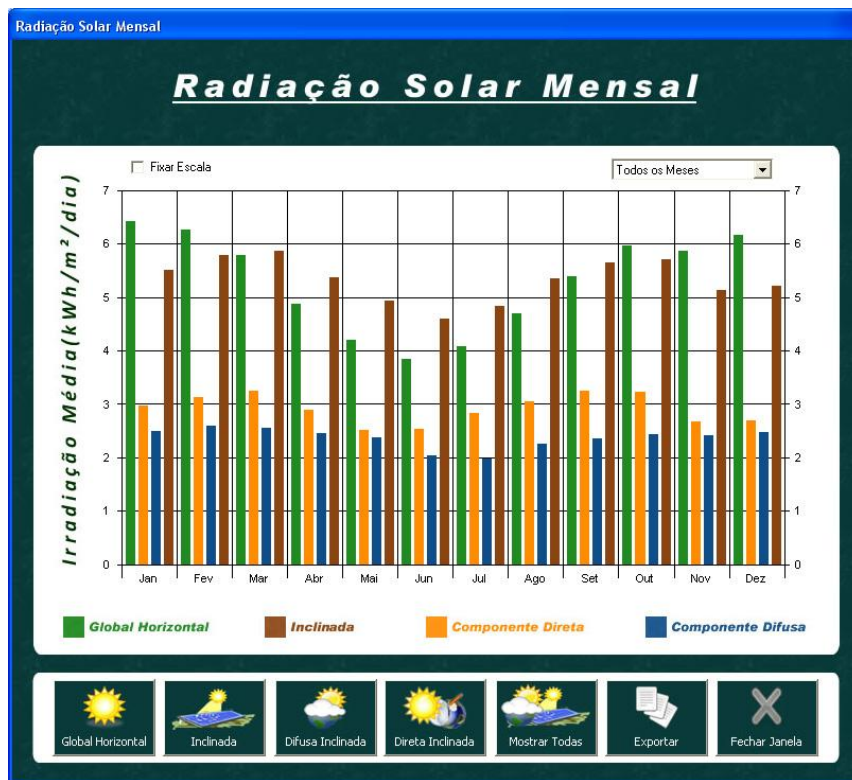


Figura. 4 Gráfico da irradiação diária em média mensal.

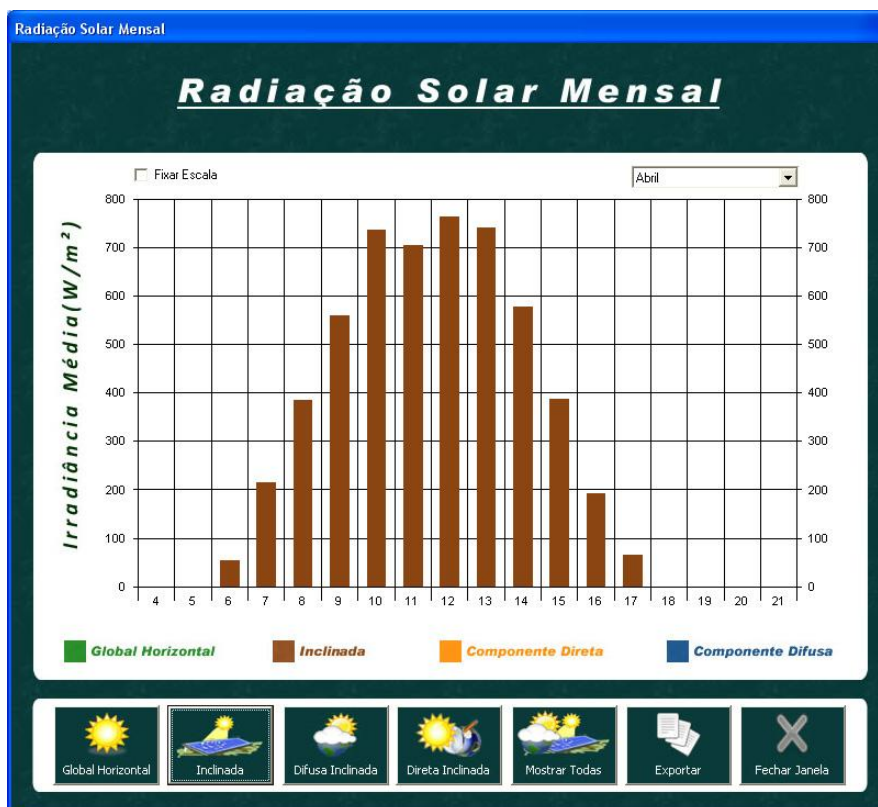


Figura. 5 Gráfico da irradiação horária em média mensal.

Os dados exportados podem ser utilizados pelo usuário em outros programas ou planilhas de cálculo comerciais, já que são gravados em formato acessível como dados separados por vírgula.

O programa RADIASOL2 também sintetiza dados horários de seqüências de temperatura ambiente, mas este tema foge do escopo do presente trabalho, sendo que a metodologia utilizada está completamente descrita por Krenzingere Farenzena (2003).

O programa RADIASOL2 pode ser obtido por “download” gratuito a partir do site [www.solar.ufrgs.br](http://www.solar.ufrgs.br).

## 6. CONCLUSÕES

Como os valores de dados esperados em média para a irradiação solar distribuída ao longo das horas dos dias não conseguem reproduzir um grande número de situações quando utilizados em simulações computacionais, o LABSOL – UFRGS adaptou métodos existentes e desenvolveu novos métodos para a sintetização de seqüências de dados. Estes modelos já foram testados anteriormente com ótimos resultados.

Neste trabalho foram apresentados de forma compacta tanto os modelos utilizados quanto aspectos do desenvolvimento de um novo software (RADIASOL2) para gerar os dados estocásticos e manipular os mesmo dados em gráficos, dividindo as componentes direta e difusa e calculando a irradiação horária e mensal incidente sobre superfícies inclinadas de orientação qualquer.

O programa RADIASOL2 mostrou ser muito útil para diversos níveis de aplicações e já tem sido utilizado principalmente por pesquisadores que atuam na área de energia solar.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil) através de recursos concedidos diretamente ao Laboratório de Energia Solar da UFRGS e pela vinculação com o Instituto de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia *INCT-EREEA*.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar R. J., Collares-Pereira, M. and Conde, J. P., 1988., “A Simple Procedure for the Generation of Sequences of Daily Radiation Values Using Markov Transition Matrices”, *Solar Energy*, 40, 3, pp 269 – 279.
- Alves, P. E., 2007, Relatório de Bolsa de Iniciação Tecnológica Industrial- Laboratório de Energia Solar - UFRGS
- Collares-Pereira, M., Rabl, A., 1979. "The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values". *Solar Energy*, 22:155-164.
- Erbs, D. G., Klein, S.A., Duffie, J. A., 1982, Estimation of the diffuse radiation Fraction of Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, *Solar Energy* 28, 13
- Krenzinger, A. e Farenzena, D., 2003, “Synthesizing Sequences of Hourly Ambient Temperature Data”, 17 International Congress of Mechanical Engineering (17 COBEM), São Paulo.
- Krenzinger, A., 1994, “Seqüências Horárias de Radiação Solar”, ProceedingsV Encontro Nacional de Ciências Térmicas (V ENCIT), São Paulo.
- Krenzinger, A., Macagnan, M.H., 1988. "Estudo Comparativo de diferentes Modelos de Geração de Séries de Radiação Solar". Anais do II Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Águas de Lindóia (SP), pp 389-392.
- Krenzinger, A., 1994, “Seqüências Horárias de Radiação Solar”, ProceedingsV Encontro Nacional de Ciências Térmicas (V ENCIT), São Paulo.
- Krenzinger, A.e Rauter, R., 1998, “Correlação entre a Distribuição de radiação Solar Horária e Radiação Solar Diária”, Feira e Congresso de Ar Condicionado, refrigeração, aquecimento e Ventilação do Mercosul (MERCOFRIO 98), Porto Alegre.
- Macagnan, M. H., 1989. “Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. "A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces". *Solar Energy*, Vol 39, N°4, pp. 221-231.

## RADIASOL2

### A SOLAR RADIATION DATA SYNTHESIZING SOFTWARE

**Abstract.** Taking into account the importance in the knowing of the behavior of the sequential solar radiation incident at conversion equipments, meteorological data computer synthesizing methods were studied and developed. This work presents the consolidation of the methods used at LABSOL of UFRGS through the implementation of the software RADIASOL2. This computer program performs data generation with output in the form of hourly solar irradiation at horizontal and at arbitrarily orientated tilted surfaces. The paper presents an overview of the main used mathematical models and the graphical interfaces developed for the software, which make easier the users work, allowing the visualization and the exportation of the results to a post-processing with external application software.