

ANÁLISE DE DIFERENTES MODELOS DE RADIAÇÃO SOLAR NA APLICAÇÃO DO MÉTODO F-CHART**Gonçalves R.S.¹, Palmero-Marrero, A.I.² e Oliveira A.C.³**

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of Maranhão - Brazil, soeiro@ifma.edu.br
^{2,3} CIENER/INEGI, Universidade do Porto - FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal, apalmero@fe.up.pt²; acoliv@fe.up.pt³

<https://doi.org/10.34637/cies2020.12056>

RESUMO

Neste trabalho é efetuada uma análise de diversos modelos para a previsão da radiação na superfície inclinada de coletores solares, aplicados a um sistema de aquecimento de água doméstica e aquecimento ambiente por pavimento radiante, utilizando o método f-chart. O principal objetivo foi analisar a fração solar mensal obtida utilizando modelos selecionados e usando como ferramenta o software Softsun, criado pelos autores deste artigo. Os modelos selecionados foram: Liu and Jordan, Badescu, Reindl, HDKR e Bugler. As variáveis do sistema de estudo (cargas de aquecimento, características do coletor solar térmico, dados climáticos da cidade escolhida – Lisboa, consumos, etc.) foram introduzidas no software Softsun (Gonçalves *et al.*, 2019), obtendo-se a fracção solar mensal. Os resultados foram analisados estatisticamente através da análise de variância ANOVA e o teste de Turkey aplicados aos dados da radiação solar incidente na superfície inclinada, calculadas a partir dos diversos modelos citados, e da respectiva fração solar mensal obtida. Os resultados indicaram que não há diferença significativa, a um nível de significância de 5% em ambos, i.e., radiação solar incidente e fração solar mensal.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação solar, Método f-chart, Estatística, Softsun

INTRODUÇÃO

O método f-chart é um método de cálculo que fornece o desempenho do sistema térmico a longo prazo. Permite estimar a fração da carga de aquecimento que será suprida pela energia solar num dado sistema de aquecimento solar. O cálculo da fração solar mensal é feito através de correlações que relacionam variáveis adimensionais do sistema de aquecimento, correlações que são o resultado de simulações de centenas de sistemas térmicos práticos, sob certas faixas de parâmetros práticos e apropriados. As variáveis adimensionais são designadas por X e Y, em que X relaciona as perdas mensais no coletor com a carga mensal de aquecimento e Y relaciona a energia mensal absorvida no coletor com a carga mensal de aquecimento.

Este método requer basicamente, para previsão do desempenho a longo prazo do sistema térmico, de variáveis de entrada como a área coletora, tipo de coletor e suas características de rendimento térmico, capacidade de armazenamento, taxas de escoamento do fluido de trabalho, carga de aquecimento, dimensão do permutador de calor. Entretanto, a energia mensal absorvida no coletor depende fortemente, além dos parâmetros do coletor, da radiação incidente na sua superfície inclinada, sendo que a sua previsão é feita usualmente a partir de modelos teóricos, disponíveis na literatura, que utilizam dados da radiação incidente na superfície horizontal, normalmente disponíveis em bases de dados meteorológicas de diversos países. Neste contexto, o presente trabalho avalia o desempenho do método f-chart sob o ponto de vista da previsão da radiação na superfície inclinada a partir de cinco modelos clássicos da literatura, a saber: Liu and Jordan (Liu and Jordan, 1960), Badescu (Badescu, 2002), Reindl (Reindl *et al.*, 1990), HDKR (Shukla *et al.*, 2015) e Bugler (Bugler, 1977); faz-se uma análise estatística dos resultados obtidos no cálculo da radiação média mensal incidente e no desempenho a longo prazo (fração solar) do sistema térmico em estudo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta secção são descritos, de forma sucinta, os modelos teóricos utilizados para a previsão da radiação na superfície inclinada do coletor solar, os quais estão inseridos como uma rotina dentro do fluxograma de cálculo da fração solar do referido software Softsun. Em geral, a radiação na superfície inclinada é a soma das componentes radiação direta (\bar{H}_b), radiação refletida (\bar{H}_r) e radiação difusa (\bar{H}_d), como mostra a equação (1).

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b + \bar{H}_r + \bar{H}_d \quad (1)$$

Das três componentes citadas, apenas a radiação difusa apresenta diferenças na expressão a ser inserida na equação (1) para cálculo da radiação total \bar{H}_T . A radiação difusa é fortemente variável e difícil de se prevêr, sendo função das condições meteorológicas, nebulosidade e índice de claridade. A radiação difusa é composta das parcelas: isotrópica, circumsolar e a horizontal brilhante. A componente da radiação isotrópica é a fração recebida uniformemente do céu como um todo. A componente da radiação circumsolar é a fração recebida de fora da dispersão solar e da secção concentrada do céu em torno do Sol (Windén, 2009). A componente da radiação horizontal brilhante é a fração concentrada próximo do horizonte e é mais óbvia em dias de céu claro (Robison and Stone, 2004). Diante deste contexto, os modelos para previsão da radiação na superfície inclinada são classificados como de céu isotrópico e anisotrópico. Os modelos de Liu and Jordan (Liu and Jordan, 1960) e de Badescu (Badescu, 2002) consideram apenas a componente isotrópica na parcela difusa, e, portanto, são ditos isotrópicos, equações (2) e (3). Os modelos de Reindl (Reindl *et al.*, 1990) e HDKR (Shukla *et al.*, 2015) consideram as três componentes da fração difusa, i.e., isotrópica, circumsolar e horizontal brilhante equações (4), (5). Bugler (Bugler, 1977) sugeriu que o termo anisotrópico da radiação difusa deveria ser acomodado através de uma componente adicional na região circumsolar, e assumiu que o componente adicional do feixe seja de 5 % do feixe direto, equação (6).

O Modelo de Liu and Jordan

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) R_b + \bar{H} \rho_g \frac{(1 - \cos\beta)}{2} + \bar{H} \frac{\bar{H}_d (1 + \cos\beta)}{\bar{H}} \quad (2)$$

O Modelo de Badescu:

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) R_b + \bar{H} \rho_g \frac{(1 - \cos\beta)}{2} + \bar{H} \frac{\bar{H}_d (3 + \cos 2\beta)}{\bar{H}} \quad (3)$$

O Modelo de Reindl:

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{H}_b + \bar{H} \rho_g \frac{(1 - \cos\beta)}{2} + \bar{H} \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left\{1 - A\right\} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \left[1 + \sqrt{\frac{\bar{H}_b}{\bar{H}_g}} \operatorname{sen}^3 \frac{\beta}{2}\right] + A \bar{R}_b \quad (4)$$

O Modelo de HDKR:

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{H}_b + \bar{H} \rho_g \frac{(1-\cos\beta)}{2} + \bar{H} \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left\{1 - A\right\} \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \left[1 + \text{sen}^3 \frac{\beta}{2}\right] \quad (5)$$

O Modelo de Bugler:

$$\bar{H}_\beta = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{H}_b + \bar{H} \rho_g \frac{(1-\cos\beta)}{2} + \bar{H}_d \left[\left(1 - 0.05 \frac{\bar{H}}{\bar{H}_d}\right) \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + 0.05 \frac{\bar{H}}{\bar{H}_d}\right] \quad (6)$$

TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A análise estatística é baseada no teste de hipótese, em que as hipóteses nula, H_0 , e alternativa, H_1 , são formuladas como:

H_0 - os dados ou populações são iguais,

H_1 - os dados ou populações são diferentes

O inverso da função de Fischer, F_o , dada por $F_o = f_{inv}(\alpha, a - 1, N - a)$ é calculada e comparada a (MSR/MSE) , em que MSR é a média do quadrado da regressão com “a-1” graus de liberdade, MSE é a média do quadrado do erro com “N- a” graus de liberdade. Caso $(MSR/MSE) > F_o$ a hipótese nula é rejeitada, significando que as populações são diferentes para um dado nível de significância α ; caso contrário as populações são iguais; F_o é calculada para um intervalo de confiança $(1 - \alpha) = 0.95$; “a” é o número de grupos, e “N” o número total de observações (Montgomery, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 é apresentado o menu principal do software Softsun, e na Figura 2 o submenu de entrada para o método f-chart. Nela aparecem os dados de simulação para o cálculo do desempenho do sistema de aquecimento de água doméstica e aquecimento ambiente por pavimento radiante, simulados para cada um dos cinco modelos de previsão referidos anteriormente.



Fig. 1. Menu inicial do Software Softsun

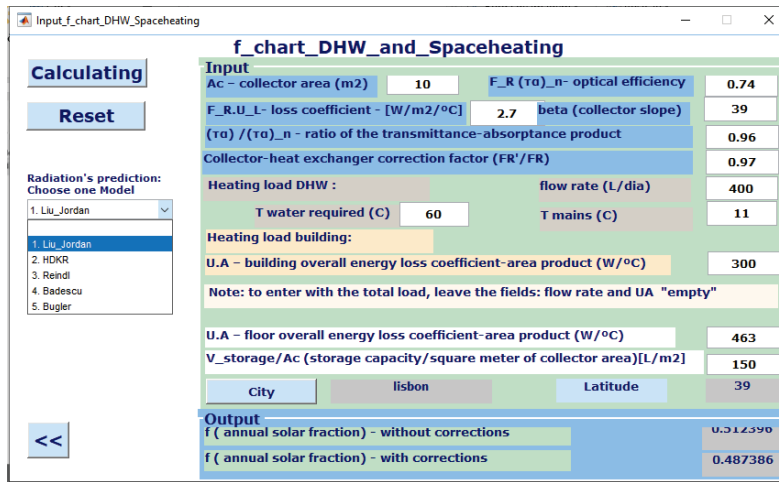


Fig. 2. Um exemplo de submenu do Software Softsun, onde se introduzem os dados de entrada do sistema selecionado

A Figura 3 mostra a radiação mensal na superfície inclinada utilizando os diferentes modelos. Depois de calcular a radiação incidente na superfície inclinada do coletor, segundo os referidos cinco modelos de previsão da radiação, foi calculada a fração solar mensal através do método f-chart. Figura 4 mostra a fração solar mensal para os diferentes modelos selecionados.

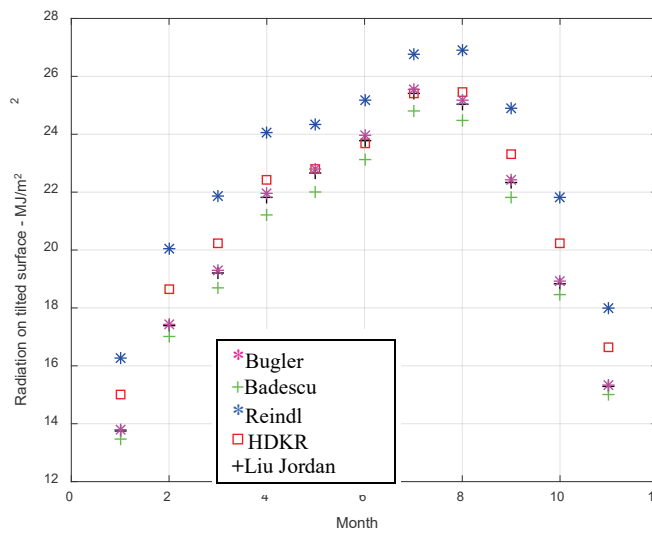


Fig. 3. Radiação mensal na superfície inclinada utilizando os diferentes modelos

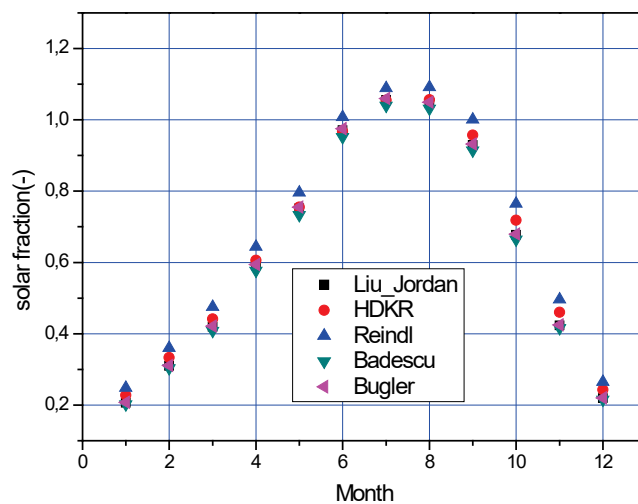


Fig. 4. Fração solar mensal com os diferentes modelos

A partir destes resultados, foi aplicada a análise de variância – ANOVA, tanto da radiação na superfície inclinada, como da fração solar, Tabela 1 e 2. Em complemento utilizou-se o teste de Turkey para comparação dos referidos pares dos dados de radiação na superfície inclinada e aos pares da fração solar.

Table 1 – Tabela ANOVA para a radiação na superfície inclinada.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	F_o	Prob> F_o
Radiação	5,4872E9	4	1,3718E9	0,82291	0,51621
Erro	9,1685E10	5	1,6670E9		
TOTAL	9,7172E10	59			

Table 2 – Tabela ANOVA para a fração solar.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	F_o	Prob> F_o
Radiatiação	0,04226	4	0,01057	0,10072	0,98176
Erro	5,76996	55	0,10491		
TOTAL	5,81222	59			

Face aos resultados apresentados e as análises estatísticas realizadas, conclui-se que tanto a radiação solar incidente na superfície inclinada quanto a fração solar mensal calculada usando os diferentes modelos, indicam que não há diferença significativa, a um nível de significância de 5%.

CONCLUSÃO

Foi realizada uma análise dos modelos de previsão da radiação, Liu and Jordan (Liu and Jordan, 1960), Badescu (Badescu, 2002), Reindl (Reindl *et al.*, 1990), HDKR (Shukla *et al.*, 2015) e Bugler (Bugler, 1977) e suas implicações no método f-chart para previsão do desempenho do sistema a longo prazo. Resultados de simulações através do software Softsun, criado pelos autores deste artigo, indicaram que tanto na radiação solar incidente na superfície inclinada do coletor solar, como na fração solar mensal calculada usando os diferentes modelos, e analisados estatisticamente através da análise de variância ANOVA e o teste de Turkey, não há diferença significativa, a um nível de significância de 5%, sendo portanto indiferente a utilização de um qualquer dos modelos analisados, para o resultado final do desempenho do sistema a longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFMA e a FAPEMA pelo financiamento do estudo pos-doutoral do primeiro autor. Este trabalho foi desenvolvido com o suporte da FCT através do contrato com a unidade LAETA (ref. Projeto: UIDB/50022/2020).

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

REFERÊNCIAS

- Badescu V., 2002. A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global irradiance. *Theoretical and Applied Climatology*, 72, 127-136. <https://doi.org/10.1007/s007040200017>
- Bugler, J.W., 1977. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. *Solar Energy* 19, 477–491.
- Gonçalves R.S., Palmero-Marrero Ana I., Oliveira Armando C., 2020. Educational solar energy tool in Matlab environment. *Energy Reports*, 6 (1), February 2020, 490-495. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.013>
- Shukla K.N., Saroj Rangnekar, K. Sudhakar, 2015. Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India. *Energy Reports*, Vol. 1, 96-103.
- Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C., 1960. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1.
- Reindl, D.T., Beckman, W. A. and Duffie, J. A., 1990. Diffuse Fraction Correlations. *Solar Energy*, 45, 1.
- Windén, J., 2009, Distributed photovoltaic in the Swedish energy system. Model development and simulation (Licentiate thesis), Uppsala University Sweden pp. 1-89.
- Robinson, D., Stone, A., 2004. Solar radiation modeling in the urban context. *Sol. Energy* 77 (3), 295-309.
- Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, Inc, New York, 2001.