



DETERMINAÇÃO DE UM FATOR DE CORREÇÃO PARA A RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA MEDIDA COM ANEL DE SOMBREAMENTO

Samuel L. de Abreu

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário - CP 476 - Trindade
88040 - 900 – Florianópolis – SC – Brasil

Sergio Colle

Anand P. Almeida

***Resumo.** Estações solarimétricas em geral realizam medições da radiação solar difusa utilizando anéis de sombreamento, devido ao fato desses equipamentos serem mais baratos e de operação mais simples que discos rastreadores de sombreamento. Todavia o erro sistemático associado a medição com anel pode ser minimizado pela correção com fator adequado, o que tem sido objeto de diversos estudos desenvolvidos. O presente trabalho apresenta uma comparação entre algumas correlações existentes com base em dados coletados na estação do LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.*

***Palavras-chave:** Energia solar, Medição da radiação solar, Radiação solar difusa*

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do conhecimento do potencial energético solar, bem como implicações da radiação solar incidente sobre o clima fez com que se tornasse freqüente a operação de estações com medição contínua à longo prazo. Historicamente os dados eram coletados em redes de heliógrafos, onde era medido apenas o número de horas de insolação diária. Esta informação porém mostrou-se limitada, em decorrência da crescente necessidade de dados de superfície, para validar modelos físicos e estatísticos mais precisos de cálculo de radiação incidente na superfície, a exemplo dos modelos relatados em Pinker e Erwing (1985), Stuhlmann *et al.* (1990) e Pereira *et al.* (1996). Uma estação solarimétrica básica deve atualmente possuir pelo menos um radiômetro para medição de radiação global e outro para medição de radiação difusa.

A classificação das estações solarimétricas hoje existentes é definida pelo número e qualidade das variáveis meteorológicas. Essa classificação abrange desde estações com medição da radiação global, até estações capazes de medir espectralmente a radiação na superfície e na atmosfera. A estação em operação no LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina –

Florianópolis (27°36'S, 48°30'O), coleta dados de radiação global, difusa, direta (com pirheliômetro) e radiação de onda longa (com pirgeômetro). No sentido de garantir a continuidade e a qualidade dos dados, a radiação difusa é medida com disco rastreador e anel, de acordo com as recomendações da BSRN – Baseline Surface Radiation Network / WMO, organização integrada pelo LABSOLAR, com o objetivo de monitorar o clima a longo prazo. Os dados coletados possibilitam a avaliação estatística das diferenças de medição, para diferentes estações e vários anos de operação. Os piranômetros em operação rastreiam um pirheliômetro Eppley NIP, o qual foi calibrado contra um radiômetro de cavidade Hickey-Frieden do CMDL/NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration – USA.

As demais estações pertencentes a rede controlada pelo LABSOLAR no estado de Santa Catarina, possuem apenas radiômetros para medição da radiação global e difusa com anel de sombreamento. Nesse caso, torna-se necessário corrigir os dados de radiação difusa medidos com anel, de maneiras a compensar o erro sistemático causado pela obstrução de parte do hemisfério visível pelo anel de sombreamento.

Existem vários métodos para calcular o fator de correção para a radiação difusa medida com anel, dentre os quais destacam-se aqueles propostos nos trabalhos de Drummond (1956), Kasten *et al.* (1983), Dehne (1984), LeBaron *et al.* (1990) e mais recentemente Battles *et al.* (1995). O presente trabalho reporta resultados obtidos do estudo dos fatores propostos nas referências citadas, com base em dados coletados entre 1994 e 1998, totalizados em cada dois minutos.

2. CORRELAÇÕES ANALISADAS

O fator de correção proposto por Drummond (1956), pressupõe uma correção isotrópica da radiação difusa, de acordo com as equações que seguem.

$$f_D = 1 / (1 - X) \quad (1)$$

onde X representa a fração do hemisfério coberta pelo anel, expressa por

$$X = \frac{2b}{\pi r} \cos^3 \delta \left(\frac{\pi}{180} \psi_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \psi_0 \right) \quad (2)$$

sendo b a largura do anel, r o seu raio, δ a declinação do dia, ψ_0 o ângulo de azimute ao nascer do sol e ϕ a latitude do local.

Este modelo leva em consideração apenas fatores geométricos, apresentando o mesmo valor ao longo do dia. Nenhuma anisotropia da radiação difusa, decorrente da variação da posição do sol ao longo do dia, ou da cobertura de nuvens é levada em consideração.

O modelo proposto por Dehne (1984), baseado no modelo de Kasten *et al.* (1983), adiciona à correlação do último autor uma parcela que considera a transmitância da radiação direta da atmosfera. A correlação proposta é a seguinte:

$$f_{DKB} = a + b (I_d / I)^3 + c \delta + d (1 / \tau^*) \quad (3)$$

onde I é a radiação global incidente na superfície horizontal [W/m²], δ é a declinação solar do dia [graus] e τ^* é o fator de transmitância da radiação direta expresso por:

$$\tau^* = \log(I_0 / (I - I_d)) \quad (4)$$

onde I_0 é a radiação extraterrestre na superfície horizontal [W/m²] e I_d é a radiação difusa medida com anel [W/m²].

O último fator de correção analisado é proposto por Battles *et al.* (1995). Esse fator é baseado no modelo de LeBaron *et al.* (1990) e é expresso pela equação:

$$f_B = a f_D + b \log \Delta + c \log \varepsilon + d e^{-1/\cos\theta_z} \quad (5)$$

Na expressão acima, f_D é o fator de correção isotrópico de Drummond (1956), que corresponde a parcela geométrica, Δ e ε correspondem respectivamente a brilhância e a limpidez do céu e $e^{-1/\cos\theta_z}$ corresponde a parcela de correção devida ao ângulo de zênite do sol θ_z . Δ e ε são expressos pelas equações que seguem:

$$\Delta = I_d / I_0 \cos \theta_z \quad (6)$$

$$\varepsilon = (I_d + I_{bn}) / I_d \quad (7)$$

onde I_{bn} é a radiação direta normal [W/m²].

A radiação difusa corrigida é expressa pela expressão que segue:

$$I_{dc} = f \times I_d \quad (8)$$

As constantes a , b , c e d são determinadas, minimizando-se a soma dos quadrados dos resíduos correspondentes a diferença entre I_{dc} expresso pela Eq. (8) e os valores medidos.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADO

Os dados coletados e utilizados para o cálculo das constantes das correlações apresentadas são medidos a cada dois segundos e totalizados a cada dois minutos. Os radiômetros utilizados tanto para medição da radiação global como para radiação difusa são piranômetros Kipp & Zonen CM11.

Os dados foram qualificados pelos critérios da BSRN e selecionados de sorte que os dados espúrios ou de baixa confiabilidade foram descartados. Os dados oriundos de situações caracterizadas pelo desalinhamento do disco ou anel de sombreamento foram criteriosamente analisados.

O fator proposto por Drummond (1956) não necessita da determinação de constante alguma.

Para a correlação de Dehne (1984) resultou a seguinte equação:

$$f_{DKB} = 1,15017 - 0,0772317 (I_d / I)^3 - 0,000960871 \delta - 6,78397 \times 10^{-8} (1/\tau^*) \quad (9)$$

enquanto que para a correlação de Battles *et al.* (1995) resultou o seguinte:

$$f_B = 1,03489 f_D + 0,0182692 \log \Delta + 0,0283739 \log \varepsilon - 0,00840968 e^{-1/\cos\theta_z} \quad (10)$$

Os valores das constantes calculadas para a equação de Dehne (1984) são próximos daqueles encontrados por Kasten *et al.* (1983), 1,148, -0,142 e -0,00118 para as constantes a ,

b e c respectivamente. Este fato sugere que a equação de Dehne (1984) possa ter validade para diferentes latitudes do hemisfério sul. Deve-se observar que a constante d da correlação de Dehne (1984) é relativamente pequena, sugerindo que o termo da transmitância da Eq. (9) possa ser desconsiderado, o que é comprovado numericamente. Por outro lado os valores encontrados por Battles *et al.* (1995) são 1,245, 0,522, 0,230 e 0,322 para a , b , c e d respectivamente, valores consideravelmente distintos daqueles ajustados aos dados de Florianópolis.

A comparação entre os dados medidos utilizando o disco de sombreamento, com os dados medidos utilizando o anel de sombreamento, sem correção e corrigidos com os fatores analisados, são mostrados a seguir. Os histogramas de frequência de erro e os valores do erro médio quadrático RMSE e erro sistemático (bias) MBE são também apresentados.

A Fig. 1 mostra a comparação entre a radiação difusa medida com os valores medidos sem a correção. As Fig. 2 - 4 mostram a comparação entre a radiação difusa totalizada medida e corrigida. As Fig. 1 - 4 mostram também a reta que correlaciona a distribuição dos dados. Nas Fig. 3 e 4 essa reta praticamente coincide com a reta diagonal.

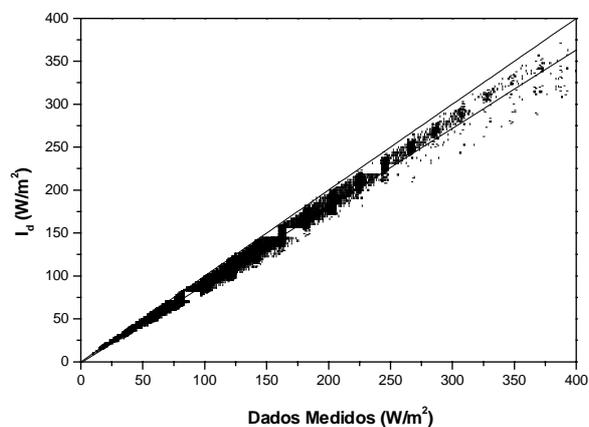


Figura 1 – Gráfico comparativo entre os valores de radiação difusa reais e medidos com anel de sombreamento sem correção.

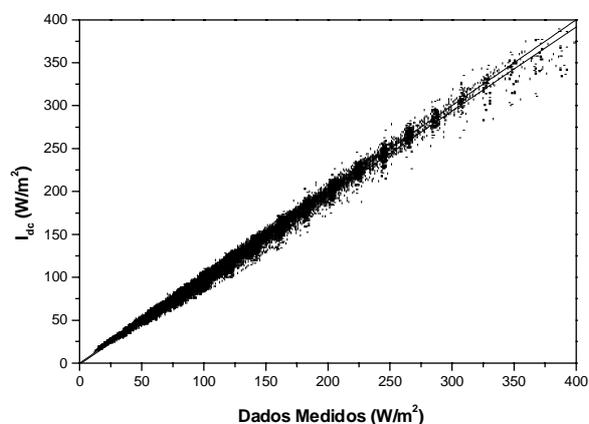


Figura 2 – Gráfico comparativo entre os valores de radiação difusa reais e corrigidos, utilizando-se a correlação de Drummond (1956).

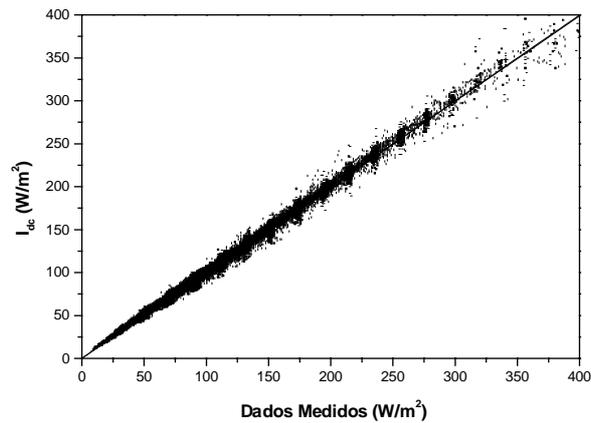


Figura 3 – Gráfico comparativo entre os valores de radiação difusa reais e corrigidos, utilizando-se a correlação de Battles *et al.* (1995).

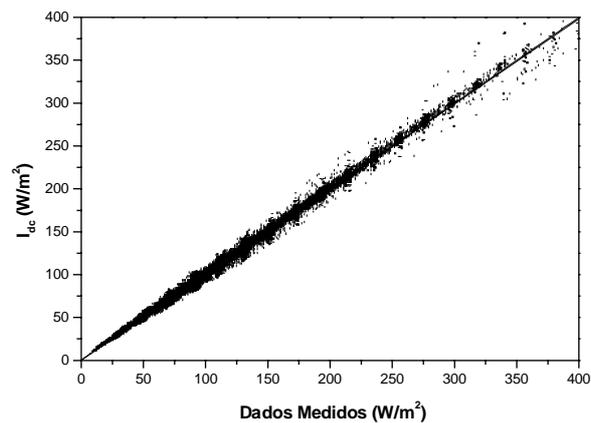


Figura 4 – Gráfico comparativo entre os valores de radiação difusa reais e corrigidos, utilizando a correlação de Dehne (1984).

A Fig. 5 mostra a necessidade de corrigir os dados medidos com o anel de sombreamento. A Fig. 6 ilustra o fato de que a correlação isotrópica resulta em um erro sistemático no sentido de subestimar os valores corrigidos, devido ao fato da parcela anisotrópica da radiação difusa ter sido desprezada. As Fig. 7 e 8 exibem uma distribuição normal centrada na origem, o que corresponde a um pequeno erro sistemático e um erro médio quadrático igualmente pequeno.

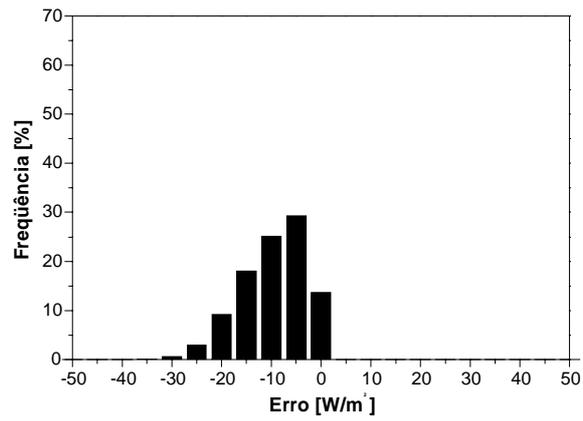


Figura 5 – Histograma de frequência de erros para os dados medidos sem correção.

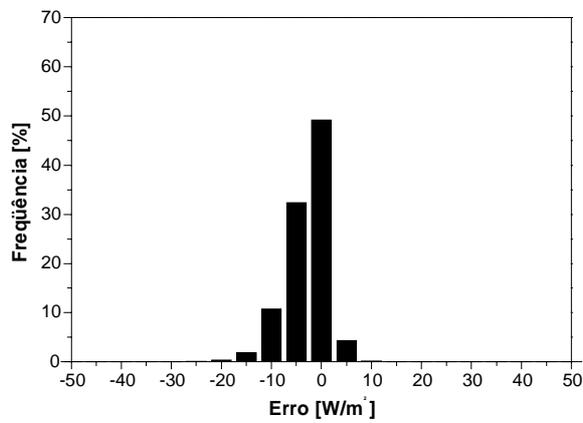


Figura 6 – Histograma de frequência de erros para os dados corrigidos isotropicamente.

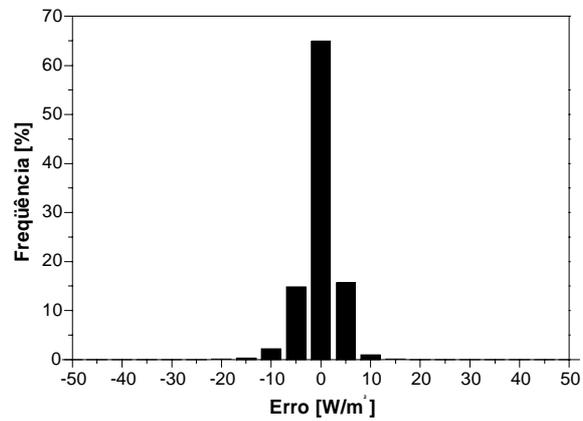


Figura 7 – Histograma de frequência de erros para os dados corrigidos utilizando o fator de Battles *et al.* (1995).

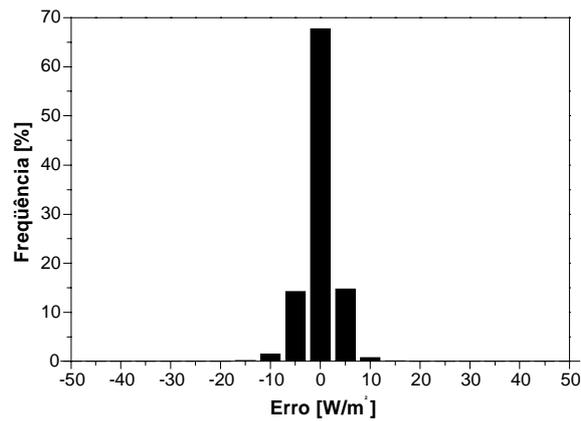


Figura 8 – Histograma de frequência de erros para os dados corrigidos utilizando o fator de Dehne (1984).

A Tabela 1 mostra os valores numéricos dos erros RMSE e MBE para as diferentes correlações analisadas e utilizando a correlação de Dehne (1984) para corrigir dados horários.

Tabela 1. Comparação entre os valores de RMSE e MBE obtidos com os diversos tipos de fatores de correção.

Tipo de fator	RMSE[W/m²]	MBE[W/m²]
Sem correção	11,95	-9,79
Drummond (1956)	5,34	-2,90
Battles <i>et al.</i> (1995)	3,71	-0,11
Dehne (1984)	3,31	-0,09
Dehne (1984) (horário)	3,45	2,67

Os valores do RMSE e MBE correspondentes às correlações de Battles *et al.* (1995) e Dehne (1984), são aproximadamente iguais e bem menores que os erros correspondentes a correlação isotrópica. A correlação de Dehne (1984) se afigura como melhor, tanto em termos dos erros, quanto da generalidade.

A maioria das estações solarimétricas fornece dados horários dos valores de radiação, enquanto as correlações desenvolvidas utilizaram dados de dois em dois minutos. Para testar a validade da utilização das correlações para dados horários, utilizou-se a correlação de Dehne (1984) e dados horários calculados a partir dos mesmos dados de dois em dois minutos utilizados na determinação da correlação. Os valores do RMSE e MBE para esse caso são também mostrados na Tabela 1, a Fig. 9 mostra o histograma de frequência de erros encontrado para essa comparação. Observa-se que houve um aumento do MBE, porém os resultados do RMSE mantiveram-se praticamente iguais.

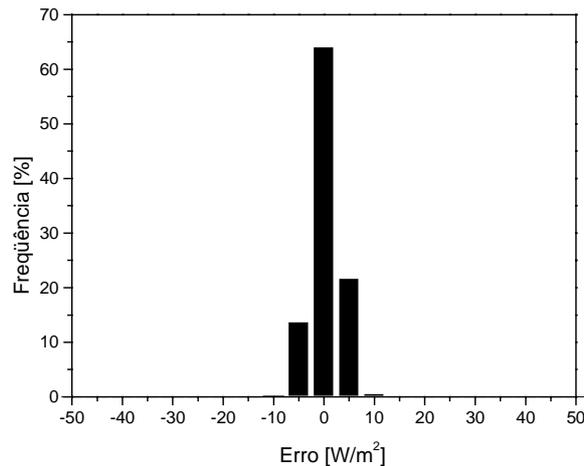


Figura 9 – Histograma de frequência de erros para os dados horários corrigidos utilizando o fator de Dehne (1984).

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta novos coeficientes para os fatores de correção de Battles *et al.* (1995) e Dehne (1984). Os valores das constantes da correlação de Battles *et al.* (1995) não são válidos para Florianópolis, o que demonstra não ser aquela correlação válida para o hemisfério sul.

As constantes aqui apresentadas são mais representativas que as constantes exibidas nos trabalhos citados, uma vez que 90.000 dados distribuídos em um período de quatro anos foram utilizados.

A utilização da correlação de Dehne (1984) com as constantes do presente trabalho para corrigir dados horários de radiação difusa foi eficiente. Os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos de dois em dois minutos, o que indica a validade da correlação para essas estimativas.

Agradecimentos

Os autores do presente trabalho agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro sob a forma de bolsas, à Organização Mundial de Meteorologia que através do programa BSRN dá suporte ao funcionamento da Estação Solarimétrica de Florianópolis e ao Eng. Sylvio Luiz Mantelli Neto pela colaboração no fornecimento dos dados utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Battles, F. J., Olmo, F. J. e Alados-Arboledas, L., 1995, On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements, *Solar Energy*, vol. 54, n. 2, pp. 105-114.
- Dehne, K., 1984, Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula, Report n. 15 World Meteorological Organization, Geneva, Suíça.
- Drummond, A. J., 1956, On the measurement of sky radiation, *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.* 7, pp. 413-436.
- Iqbal, M., 1983, *An introduction to solar radiation*, Academic Press.

- Kasten, F., Dehne, K. e Brettschneider, W., 1983, Improvent of measurement of diffuse solar radiation, Solar radiation data, Series F, 2, pp. 221-225. D. Reidel, Dorbrecht, Alemanha.
- LeBaron, B. A., Michalski, J. J. e Perez, R., 1990, A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions, Solar Energy, vol. 44, n. 5, pp. 249-256.
- Pereira, E. B., Abreu, S. L., Stuhlamann, R. Rieland, M. e Colle, S., 1996, Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of METEOSAT satellite data, Solar Energy, vol. 57, n. 2, pp. 125-132.
- Pinker, R. T. e Erwing, J., 1985, Modeling surface solar radiation: model formulation and validation, Journal of Climate and Applied Meteorology, vol. 25, pp. 389-401.
- Rawlings, F. e Readings, C. J., 1986, The shade ring correction for measurements of diffuse irradiance under clear skies, Solar Energy, vol. 37, n. 6, pp. 407-416.
- Stuhlmann, R., Rieland, M. e Raschke, E., 1990, An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data, Journal of Applied Meteorology, vol. 29, n. 7, pp. 586-603.

DETERMINATION OF A CORRECTION FACTOR FOR THE DIFFUSE SOLAR RADIATION MEASURED WITH A SHADE RING DEVICE

***Abstract.** Ground stations worldwide usually perform the measurement of diffuse solar radiation at the surface by using shade-ring devices. These devices are considerably cheaper than the manually or motor-driven shade-disk. The shade-ring measurement usually underestimate the diffuse solar radiation by an average error of 10%, so that a correction factor is used in order to correct the shade-ring derived data. The present work is concerned with the analysis of three correlations reported in the technical literature. The study is limited to the ground station of Florianópolis.*

***Keywords:** Solar energy, Solar radiation measurements, Diffuse solar radiation*