

# MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO GLOBAL EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE INSOLAÇÃO E DA RADIAÇÃO DIFUSA EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE ( $\bar{K}_T$ ) PARA A CIDADE DE BRASÍLIA

Lucas Douglas Nóbrega Coelho – lucasdouglasfga@gmail.com  
Mario Benjamin Baptista de Siqueira – mariosiqueira@unb.br  
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** O conhecimento da disponibilidade temporal da radiação solar em determinada região é indispensável para qualquer projeto que envolva energia solar, pois para um bom dimensionamento de um conjunto gerador é fundamental o conhecimento local da radiação. Devido ao alto custo das medições de radiação solar, em virtude dos equipamentos de instrumentação, os modelos de estimativa da radiação solar em função de dados mais fáceis de serem medidos se tornaram uma alternativa viável e confiável. O trabalho apresenta um modelo para a estimativa da radiação global média mensal em função da razão de insolação ( $\bar{n}/\bar{N}$ ) e do índice de claridade ( $\bar{K}_T$ ) utilizando uma equação de Angström-PreScott e um modelo para a estimativa da radiação difusa ( $\bar{H}_d$ ) a partir de uma correlação polinomial entre  $\bar{K}_T$  e  $\bar{H}_d$ . Na modelagem realizada, utilizou-se dados de um período de três anos (2011 a 2013) do banco de dados do SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) e do InMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A validação dos modelos foi realizada entre a confrontação dos resultados estimados com dados reais para o ano de 2014 e com resultados da literatura, além da análise estatística dos indicativos RMSE (erro médio quadrático), MBE (desvio das médias),  $r^2$  (coeficiente de determinação) e  $d$  de Willmott. Os parâmetros estatísticos analisados mostram que ambos os modelos de estimativa (radiação global ou difusa) possuem uma boa concordância com valores reais. Os resultados obtidos são próximos de resultados encontrados a partir de modelos da literatura.

**Palavras-chave:** Instrumentação, Radiação, Estimativa.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes energéticas vem se tornando uma das missões mais difíceis, porém necessárias dos últimos anos, uma vez que grande parte da energia consumida é proveniente de combustíveis fósseis, fonte esta finita. O Brasil, apesar de possuir uma matriz energética privilegiada, todavia conta com uma importante participação da fonte hídrica, procura diversificar as fontes para não ficar tão vulnerável as variabilidades climáticas que se apresentaram nos últimos anos, é o caso do investimento no desenvolvimento das tecnologias que envolvem as fontes renováveis.

Sendo a energia proveniente do Sol praticamente inesgotável e com efeito direto ou indireto sobre todos os fenômenos físicos e biológicos que ocorrem na superfície do planeta, para seu melhor aproveitamento, torna-se importante o conhecimento de sua disponibilidade temporal em determinada região.

Embora a radiação solar na superfície terrestre possa ser medida diretamente por intermédio de instrumentos, como o piranômetro, o elevado custo tanto para instalação quanto para manutenção, principalmente quando se tem interesse nas componentes da radiação difusa e direta, tem dificultado essas medições na maior parte do mundo. Assim diversas pesquisas estão direcionadas ao desenvolvimento de modelos para sua estimativa levando em conta parâmetros mais fáceis de serem obtidos como horas de insolação, latitude, longitude, e outros.

Para que a energia solar possa ser aproveitada com eficiência é necessário que esta seja estimada com certa margem de segurança (Souza *et al.*, 2005). Os modelos de estimativa são uma alternativa de grande importância, pois podem ser utilizados em projetos de simulação da radiação solar em outros locais de características climáticas similares. Os modelos de estimativa podem ser de dois tipos: estatísticos e físicos. Os modelos do primeiro tipo são mais simples, pois a radiação global ou número de horas de brilho solar são medidos diariamente em estações meteorológicas as quais tem boa cobertura tanto espacial quanto temporal. Já os modelos físicos, simulam os processos mecanicamente, no entanto necessitam de informações a respeito de diversos parâmetros atmosféricos de menor disponibilidade, como é o caso da concentração de ozônio, aerossóis, gases, e outros (Alados *et al.*, 2000), alguns deles, de difícil obtenção.

A equação de regressão de Angström-PreScott que relaciona de forma empírica a razão de radiação e razão de insolação tem sido o método estatístico mais empregado com esse fim (Liu e Jordan, 1960; Dehne, 1984; Sousa *et al.*, 2005; Soares *et al.*, 2004), tendo em vista que o número de horas de insolação pode ser obtido com equipamento de menor custo e por isso é um dado disponível em maior número.

A divisão da radiação solar global em suas componentes, radiação difusa e radiação direta, bem como o conhecimento destas, são de grande interesse para a estimativa do desempenho em longo prazo de sistemas que se utilizam de concentradores solares. Além disso, o conhecimento da radiação difusa por meio de métodos de estimativa

que correlacionam esta componente com outra componente, ou com parâmetros meteorológicos, é de grande relevância para projetos na área, devido à dificuldade em sua caracterização em virtude do alto custo dos instrumentos.

Assim, objetivou-se no trabalho a parametrização de um modelo local de estimativa mensal para a radiação global em função da razão de insolação, por meio de uma equação de regressão de Angström-Prescott e de um modelo local para a radiação difusa, por meio de uma regressão polinomial conforme a literatura. Os indicadores estatísticos para validação dos modelos foram RMSE (erro médio quadrático), MBE (desvio das médias),  $r^2$  (coeficiente de determinação) e  $d$  de Willmott.

## 2. INSTRUMENTAÇÃO APLICADA NA GERAÇÃO SOLAR

Os principais instrumentos utilizados para medição de radiação solar são basicamente, piranômetro e o pireliômetro. O primeiro é usado para a medição da radiação global e difusa, esta última por meio de algum dispositivo de sombreamento (esfera ou banda). Já o pireliômetro é destinado à medição da intensidade da radiação direta em incidência normal, este deve estar sempre posicionado na direção do Sol e por isso requer um mecanismo de rastreamento solar de alta precisão elevando o seu custo.

Além dos dados de radiação incidente sobre uma superfície, outro dado importante nos estudos de previsão de radiação é o período de insolação em certo local. Além do próprio piranômetro, outro instrumento, consideravelmente mais simples, pode ser utilizado: o heliógrafo. Este instrumento consiste em uma esfera de vidro que, como uma lente, concentra os raios solares sobre uma fita gráfica. O raio concentrado marca a fita e permite a medição da duração da insolação no local de estudo.

Neste trabalho não se realizou medições de radiação solar, os dados pertinentes foram retirados dos bancos de dados do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e do InMET (Instituto Nacional de Meteorologia), sendo estes referências em medições meteorológicas e solarimétricas no Brasil. O SONDA é um programa gerenciado pelo INPE que realiza medições de interesse para energias renováveis, tanto eólica quanto solar. As estações solarimétricas do programa, atualmente 17 espalhadas pelo território nacional, medem as componentes da energia solar, a saber, global, direta e difusa, além de outras medidas de interesse. Em Brasília, existem medidas consistentes a partir de 2011. Já as estações meteorológicas sob controle do InMET, que possuem um cobertura temporal espacial bem mais relevante, fornecem somente dados de razão de insolação (nas estações convencionais) e radiação global (nas estações automáticas). Esses dados são de domínio público e de obtenção online gratuita.

## 3. MODELOS DE ESTIMATIVA E INDICATIVOS ESTATÍSTICOS

O modelo utilizado estabelece por meio de uma equação de regressão do tipo Angström-Prescott, que a razão entre a radiação solar global média mensal na superfície terrestre ( $\bar{H}$ ) e a radiação solar extraterrestre média mensal, no topo da atmosfera ( $\bar{H}_0$ ), se correlaciona com a razão entre horas de insolação ( $\bar{n}$ ) e a duração máxima de insolação no período ( $\bar{N}$ ), calculado a partir da latitude do local e da declinação da Terra na data de interesse, Eq. (1). Norris (1968) e Bennett (1965) desenvolveram tais correlações para outras localidades.

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (1)$$

A razão ( $\bar{H}/\bar{H}_0$ ) representa o índice de claridade médio mensal, ou,  $\bar{K}_T$ . Sendo que este índice muda constantemente durante um dia, mês, estação, ano, dependendo das condições atmosféricas. A razão ( $\bar{n}/\bar{N}$ ) representa a fração direta na incidência durante o período de análise. Substituindo na Eq. (1):

$$\bar{K}_T = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (2)$$

As constantes empíricas  $a$  e  $b$  da Eq. (2) são retiradas a partir da correlação de valores de uma série histórica de dados de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{n}/\bar{N}$ .

As medições de radiação difusa são difíceis de serem realizadas, devido o custo do instrumento para tal função, logo, métodos de estimativa dessa parcela de radiação são importantes para o auxílio em projetos em regiões que não possuem essa estrutura de medição. Além disso, como o desenvolvimento comercial da instrumentação com rastreadores solares para estações solarimétricas é relativamente recente, modelos estatísticos são úteis em estudos de séries históricas de dados estatísticos. Erbs *et al.* (1982) desenvolveram modelos de correlações para estimativa média mensal da componente difusa em função de  $\bar{K}_T$ , para  $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$ .

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad (3)$$

Sendo  $\bar{H}_d$  a radiação difusa média mensal e  $\bar{H}$  a radiação solar global média mensal na superfície terrestre.

Os índices estatísticos utilizados no trabalho foram RMSE e MBE sugeridos por Iqbal (1983),  $r^2$  (Lapponi, 2005) e  $d$  de Willmott (1981), dados pelas Equações (4), (5), (6) e (7), respectivamente. A utilização destes índices estatísticos é

adequada para validação de modelos, permitindo analisar o desvio médio (subestimativa ou superestimativa), espalhamento, concordância e ajustamento de modelos com relação às medidas (Alados et al., 2000).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (5)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E'_i| - |O'_i|)^2} \quad (7)$$

Onde,  $E_i$  representa os valores estimados,  $O_i$  representa os valores reais observados e  $N$  representa o número de observações. Na Eq. (6), o  $\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  corresponde à variação explicada e  $\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$  corresponde à variação não explicada. Na Eq. (7) o termo  $|E'_i|$  representa o valor absoluto da diferença ( $E_i - \bar{O}_i$ ), onde  $\bar{O}_i$  representa a média de  $O_i$  e  $|O'_i|$  representa o valor absoluto da diferença ( $O_i - \bar{O}_i$ ). Dividindo as estatísticas MBE e RMSE pelo valor médio dos dados de validação, obtêm-se os valores relativos em porcentagem.

O RMSE tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores estimados. O MBE indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo), o ideal é este valor tendendo a zero. O coeficiente de determinação é sempre um número positivo entre zero e um, que quanto maior for o  $r^2$ , melhor será o poder de explicação do modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O índice de concordância “d” de Willmott (1981), expressa o ajustamento entre os valores medidos e estimados, este varia de zero a um, onde quanto mais próximo de um, melhor a concordância dos dados.

#### 4. METODOLOGIA

A radiação solar extraterrestre mensal,  $\bar{H}_0$ , necessária para cálculo de  $\bar{K}_T$  de será estimada à partir da integração da irradiância solar extraterrestre  $H_0$  ( $W/m^2$ ), calculada pela Eq (8).

$$H_0 = H_c (d/D)^2 \quad (8)$$

onde  $H_c$  é a constante solar igual a  $1367 W/m^2$  (irradiância solar numa superfície plana e perpendicular aos raios solares, sem os efeitos atenuantes da atmosfera e a uma distância Terra-Sol médios) e  $(d/D)^2$  é a razão entre a distância instantânea e a distância média anual entre o sol e a terra, razão esta calculada pela Eq. (9):

$$(d/D)^2 = 1 + 0,033 \cos(360/365 * \text{Número do dia do ano}) \quad (9)$$

Para a geração das constantes  $a$  e  $b$  da equação de Angström-Prescott apresentada na Eq. (2) utilizou-se uma série histórica de dados meteorológicos entre os anos de 2011 e 2013 para a cidade de Brasília. Este período foi escolhido pois os dados compilados do SONDA estavam disponíveis. Os dados de radiação solar global na superfície terrestre ( $\bar{H}$ ) e radiação difusa ( $\bar{H}_d$ ) foram retirados do banco de dados do SONDA, e os dados de tempo de insolação mensal ( $\bar{n}$ ) do banco de dados do INMET. Não se encontrou essas medições em um único banco de dados, para esse período de análise. A distância entre as estações do SONDA e do InMET é de aproximadamente 30Km. No entanto, por se tratarem de estações localizadas em regiões geograficamente e climatologicamente similares adicionada ao fato de que os valores integrados em um mês serão utilizados, espera-se que erros devido a variabilidade espacial sejam amortecidos. As constantes  $a$  e  $b$  foram geradas por meio das relações de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{n}/\bar{N}$  para a série histórica analisada, uma regressão linear entre os pares  $(\bar{n}/\bar{N}, \bar{K}_T)$  foi aplicada obtendo-se assim os valores de  $a$  e  $b$  de melhor representação.

Para a validação, a equação gerada com suas constantes  $a$  e  $b$  definidas, foi aplicada a um ano de análise, especificamente 2014 (que não foi usado na obtenção de  $a$  e  $b$ ) e os dados estimados comparados tanto com os valores reais de radiação medidos no mês, quanto com os valores obtidos por meio de outros modelos (Dornelas et al, 2006) encontrados na literatura para a mesma região.

Com a relação de  $\bar{K}_T$  determinada, passou-se então a verificação do modelo de partição de radiação global em direta e difusa em função de  $\bar{K}_T$ . Os dados de radiação difusa foram obtidos da base de dados do programa do SONDA. Assumindo que um polinômio de terceiro grau adequado (Erbs et al., 1982) realizou um ajuste de curva para o fenômeno. Coeficientes locais para equação polinomial, Eq. (3), foram determinados para comparação com os

coeficientes sugeridos por Erbs *et al* (1982) já que eles podem ser função de condições geográficas e climatológicas locais. Os resultados estimados foram comparados com valores medidos para o ano de 2014.

## 5. RESULTADOS

A análise dos dados meteorológicos de radiação global e das horas de insolação possibilitou a determinação dos coeficientes médios  $a$  e  $b$  por meio das relações de  $\overline{K_T}$  e  $\overline{n/N}$  para a série histórica analisada (2011-2013) com base nos dados de estações meteorológicas do InMET e do projeto SONDA, e a comparação com valores reais medidos para o ano de 2014 para Brasília. Na Tab. 1 são apresentados os valores médios de  $\overline{H_0}$ ,  $\overline{H}$ ,  $\overline{n/N}$ ,  $\overline{K_T}$  e da parcela difusa  $\overline{H_d}/\overline{H}$ .

Tabela 1 – Correlações do índice de claridade ( $\overline{K_T}$ ), da razão de insolação ( $\overline{n/N}$ ) e da parcela difusa para o período de 2011 a 2014 na cidade de Brasília

Ano	Mês	$\overline{H_0}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\overline{H}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$\overline{n/N}$	$\overline{K_T}$	$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$
2014	Janeiro	40,91	22,80	0,60	0,56	0,37
2014	Fevereiro	41,23	22,30	0,47	0,54	0,36
2014	Março	37,03	18,48	0,43	0,50	0,41
2014	Abril	32,74	17,60	0,56	0,54	0,36
2014	Maio	28,60	18,05	0,66	0,63	0,27
2014	Junho	26,52	16,25	0,68	0,61	0,28
2014	Julho	27,52	17,79	0,70	0,65	0,25
2014	Agosto	31,11	21,36	0,79	0,69	0,23
2014	Setembro	35,46	22,61	0,71	0,64	0,25
2014	Outubro	38,81	22,05	0,57	0,57	0,33
2014	Novembro	40,49	19,37	0,42	0,48	0,44
2014	Dezembro	39,69	18,90	0,35	0,48	0,43
2013	Janeiro	40,91	16,88	0,31	0,41	0,50
2013	Fevereiro	41,23	19,41	0,45	0,47	0,43
2013	Março	37,03	19,30	0,45	0,52	0,40
2013	Abril	32,74	17,79	0,51	0,54	0,39
2013	Maio	28,60	18,76	0,72	0,66	0,21
2013	Junho	26,52	17,03	0,62	0,64	0,27
2013	Julho	27,52	18,82	0,76	0,68	0,27
2013	Agosto	31,11	21,36	0,81	0,69	0,25
2013	Setembro	35,46	19,41	0,62	0,55	0,39
2013	Outubro	38,81	20,06	0,50	0,52	0,38
2013	Novembro	40,49	19,19	0,45	0,47	0,47
2013	Dezembro	39,69	18,57	0,36	0,47	0,47
2012	Janeiro	40,91	17,22	0,27	0,42	0,51
2012	Fevereiro	41,23	18,63	0,46	0,45	0,45
2012	Março	37,03	19,30	0,51	0,52	0,36
2012	Abril	32,74	19,11	0,58	0,58	0,33
2012	Maio	28,60	18,76	0,65	0,66	0,26
2012	Junho	26,52	17,39	0,72	0,66	0,26
2012	Julho	27,52	18,87	0,74	0,69	0,21
2012	Agosto	31,11	20,23	0,81	0,65	0,24
2012	Setembro	35,46	21,23	0,68	0,60	0,31
2012	Outubro	38,81	22,26	0,62	0,57	0,34
2012	Novembro	40,49	18,25	0,31	0,45	0,47

2012	Dezembro	39,69	21,68	0,56	0,55	0,37
2011	Janeiro	40,91	19,32	0,51	0,47	0,44
2011	Fevereiro	41,23	19,22	0,44	0,47	0,43
2011	Março	37,03	18,97	0,43	0,51	0,39
2011	Abril	32,74	19,36	0,69	0,59	0,34
2011	Mai	28,60	18,50	0,74	0,65	0,28
2011	Junho	26,52	17,47	0,72	0,66	0,23
2011	Julho	28,52	22,06	0,85	0,77	0,14
2011	Agosto	31,11	22,06	0,83	0,71	0,19
2011	Setembro	35,46	25,62	0,77	0,72	0,21
2011	Outubro	38,81	15,62	0,28	0,40	0,50
2011	Novembro	40,49	17,61	0,39	0,43	0,47
2011	Dezembro	39,69	18,40	0,27	0,46	0,44

A Fig. 1 mostra as correlações índice de claridade ( $\overline{K_T}$ ) e da razão de insolação ( $\overline{n}/\overline{N}$ ) para estimativa média mensal, com base na análise histórica dos dados entre os anos de 2011 e 2013.

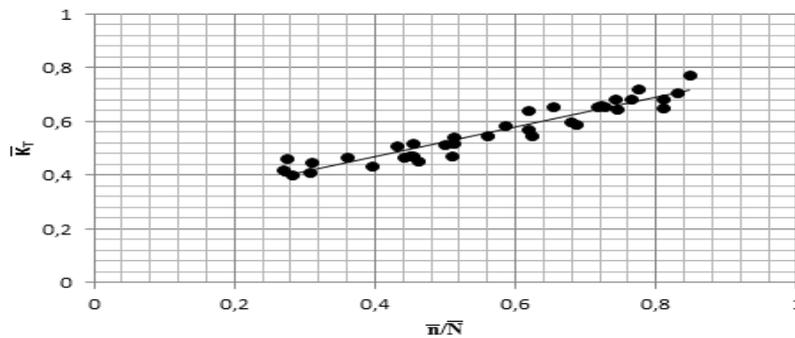


Figura 1- Índice de claridade  $\overline{K_T}$  em função da razão de insolação estimativa média mensal.

Levando em consideração um ajuste linear entre os pares de ( $\overline{n}/\overline{N}$ ,  $\overline{K_T}$ ), a equação de estimativa mensal que melhor caracteriza o período de análise pode ser visualizada na Eq. (6).

$$\overline{K_T} = 0,2501 + 0,5522 \frac{\overline{n}}{\overline{N}} \quad (10)$$

Para validação da correlação encontrada na Eq. (10), os resultados estimados do modelo para o ano de 2014 serão comparados com valores reais de radiação medidos pelo SONDA para o mesmo ano (Tab. 1). Os dados médios mensais de  $\overline{n}$ ,  $\overline{N}$  e  $\overline{H}_0$  foram considerados para estimar a radiação global média no mês ( $\overline{H}$ ) a partir do modelo apresentado na Eq. (6). Os dados estimados pelo modelo aqui apresentado foram confrontados com os dados reais medidos e com os resultados para o mesmo local de análise produzidos por Dornelas *et al.*, (2006) cujas constantes foram obtidas por meio de uma fonte distinta de dados, em uma série histórica de 20 anos para a mesma região, com coeficientes  $a = 0,282$  e  $b = 0,460$ . A comparação gráfica entre os modelos pode ser visualizada na Fig. 2.

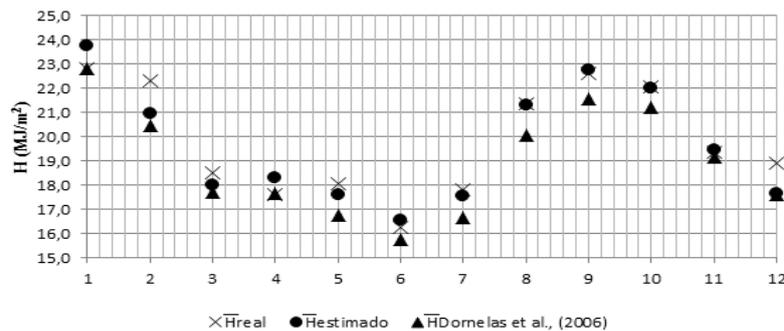


Figura 2 – Comparação entre medição real, resultado estimado e resultados obtidos pelo modelo de Dornelas *et al.*, (2006) para a radiação global média do ano de 2014

Verifica-se na Fig. 2 uma boa concordância entre os valores de radiação estimados pelo modelo aqui apresentado e os valores reais medidos, tendo resultados melhores do que o modelo apresentado por Dornelas *et al.*, (2006) que utilizou uma série histórica de dados maior. A maior diferença entre o valor estimado e o valor real ocorreu no mês de dezembro, em torno de 7%, subestimando a radiação global média no mês. Na Tab. 2 são apresentados os parâmetros estatísticos para os dois modelos.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros estatísticos para o modelo de estimativa radiação global e o modelo de Dornelas et al., 2006

Parâmetros Estatísticos	Modelo de estimativa para radiação global	Modelo de Dornelas et al., (2006)
MBE	3,45%	5,38%
RMSE	2,33%	5,49%
d	0,977	0,946
$r^2$	0,912	0,811

O coeficiente de determinação  $r^2$  encontrado entre a correlação do índice de claridade com a razão de insolação para o modelo de estimativa foi de 0,912, tendo um melhor ajuste com os dados reais do que o modelo de Dornelas et al., (2006). Isto mostra que a fração  $\overline{K_T}$  está bem correlacionada com a razão de insolação. Os resultados poderiam ser melhorados caso aumentasse o histórico de dados, assim como Escobedo *et al.* (2012).

Verifica-se por meio dos valores do RMSE, que o erro médio quadrático do modelo de estimativa para radiação global (2,33%) é menor do que o de Dornelas *et al.*, (2006), o que indica uma melhor qualidade nos dados estimados. Quanto ao MBE verifica-se que ambos os modelos superestimam os valores, porém o modelo de estimativa se aproxima mais de zero, o que indica uma menor superestimação. Por meio da análise do índice de concordância  $d$  de Willmott verifica-se que os dados gerados pelo modelo de estimativa possui uma melhor concordância com os dados reais.

A comparação do modelo de estimativa aqui apresentado com o modelo de Dornelas *et al.*, (2006) é importante, pois se verifica que, apesar de estarmos analisando uma série histórica de 3 anos de dados, seus resultados convergem com outros de séries históricas maiores, tendo melhores resultados.

Analisando a partição da radiação global em direta e difusa, na Fig. 3 é possível verificar a correlação entre a componente difusa e a radiação global com base na análise histórica dos dados entre os anos de 2011 e 2013, neste caso, a fração mensal que é difusa,  $\overline{H_d}/\overline{H}$ , está representada graficamente como uma função do índice de claridade médio mensal,  $\overline{K_T} = \overline{H}/\overline{H_0}$ .

Os coeficientes do polinômio de terceiro grau de ajuste da correlação entre a componente difusa e a radiação global podem ser visualizados na Eq. (10), o que mostra que a fração  $\overline{K_T}$  está bem correlacionada com a componente difusa.

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0,658 + 0,3297\overline{K_T} - 2,27\overline{K_T}^2 + 1,269\overline{K_T}^3 \quad (10)$$

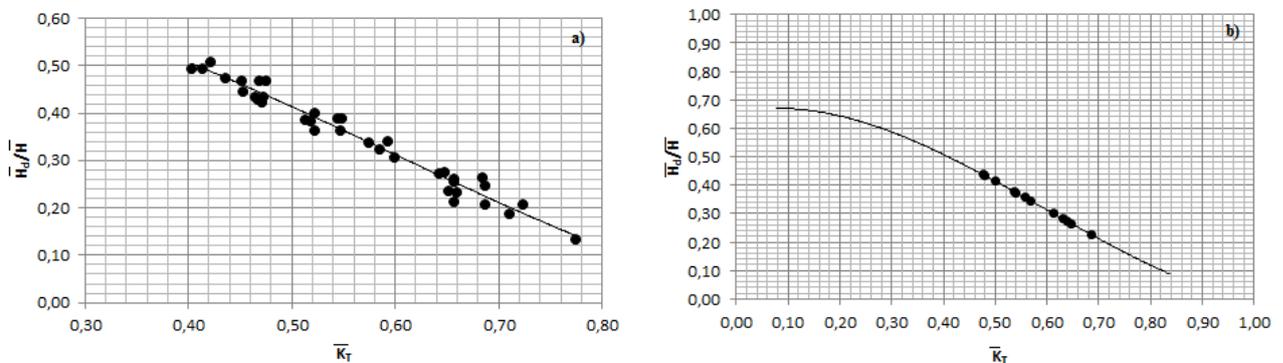


Figura 3 – a) Correlação fração média de radiação difusa e índice médio de claridade escala menor; b) Correlação fração média de radiação difusa e índice médio de claridade escala maior

Na Fig. 3a na qual verificamos os pares  $(\overline{K_T}, \overline{H_d}/\overline{H})$  de forma ampliada verifica-se que a curva não se aproxima visualmente de uma curva característica de um polinômio de terceiro grau, porém realizando uma previsão e aumentando esta curva (Fig. 3b) verifica-se que esta já se aproxima de um polinômio.

Comparando os resultados do modelo de estimativa da radiação difusa a partir do índice claridade  $\overline{K_T}$ , Eq. (10), com o modelo de Erbs *et al.* (1982) e os valores das medições reais para o ano de 2014, verifica-se uma boa concordância entre os resultados estimados pelo modelo gerado e os valores reais, como pode ser visto na Fig. 4.

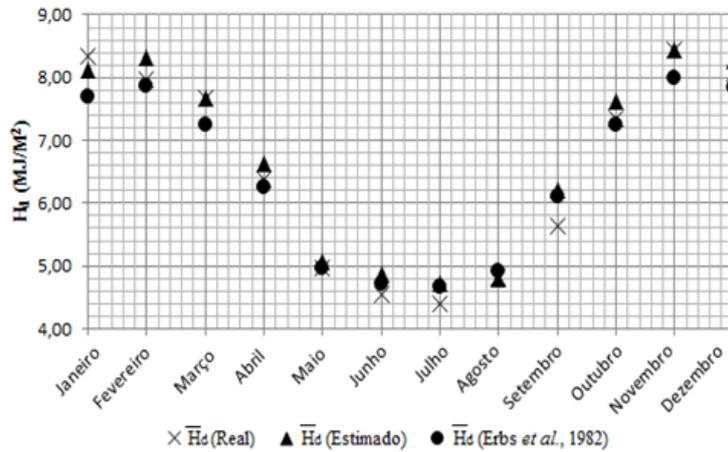


Figura 4 – Comparação entre medição real, resultado estimado e resultados obtidos pelo modelo de Erbs *et al.*, (1982) para radiação difusa média do ano de 2014

Verifica-se na Fig. 4 uma boa concordância entre os valores de radiação difusa estimados pelo modelo aqui apresentado e os valores reais medidos, tendo resultados melhores do que o modelo apresentado por Erbs *et al.*, (1982) quando analisando o erro em relação a medição real. A maior diferença entre o valor estimado e o valor real ocorreu no mês de junho, em torno de 7%, superestimando a radiação difusa média no mês. Na Tab. 3 são apresentados os parâmetros estatísticos para os dois modelos.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros estatísticos para o modelo de estimativa radiação difusa e o modelo de Erbs *et al.*, (1982)

Parâmetros Estatísticos	Modelo de estimativa para radiação global	Modelo de Erbs <i>et al.</i> , (1982)
MBE	4,00%	4,89%
RMSE	1,07%	1,54%
d	0,991	0,987
$r^2$	0,968	0,961

Analisando a Tab. 2, o coeficiente de determinação  $r^2$  encontrado tanto para o modelo de estimativa de radiação difusa, quanto para o modelo de Erbs *et al.*, (1982) indicam uma bom ajuste entre os dados estimados e os dados reais.

Verifica-se por meio dos valores do RMSE, que o erro médio quadrático de ambos os modelos se aproximam, quanto ao MBE verifica-se que ambos superestimam os valores e se aproximam de zero, o que indica uma boa estimativa. Em relação ao índice de concordância  $d$  de Willmott verifica-se uma excelente concordância dos dados estimados com os dados reais de ambos os modelos.

Não ter encontrado os dados de insolação e radiação em um mesmo banco de dados também podem ter contribuído para as diferenças, entre os valores estimados e os valores medidos.

O melhor resultado para a estimativa quando os coeficientes da equação são determinados com a utilização de dados locais demonstra a necessidade de utilizar dados locais para os ajustes destes modelos ou pelo menos com climas semelhantes para o estudo de áreas cujos dados solarimétricos não estejam disponíveis.

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados um modelo linear de estimativa mensal da radiação global e um modelo polinomial de terceiro grau de estimativa mensal da radiação difusa para a cidade de Brasília, com base em dados históricos retirados do SONDA e o InMET, de insolação e radiação. O modelo de radiação global apresenta coeficiente de determinação acima de 90% de correlação, já no de radiação difusa este coeficiente é em torno de 97%, o que indica um bom ajuste de ambos os modelos.

Os parâmetros estatísticos analisados mostram que ambos os modelos de estimativa (radiação global ou difusa) possuem uma boa concordância com valores reais, apesar de ambos os modelos superestimarem a radiação. Os resultados obtidos são próximos de resultados encontrados a partir de modelos de outros autores, o que indica uma coerência nos valores encontrados e apresentados.

A falta de um banco de dados único de insolação e radiação, e melhores dados para a análise comparativa dos valores estimados e valores reais podem ter influenciado os resultados. Uma alternativa seria a medição destas variáveis em um mesmo local, para minimizar os erros.

Esses modelos, juntamente com dados de longo prazo podem ser utilizados para análise de séries meteorológicas históricas para avaliação de possíveis tendências de alterações em escalas de tempo compatíveis com mudanças climáticas. Isso será realizado para sítios de interesse como, por exemplo, de Jaíba onde um projeto estratégico da ANEEL está ocorrendo.

### Agradecimentos

Esse trabalho só foi possível graças ao apoio financeiro do CNPq, através do Projeto 407076/2013-1 e ao projeto estratégico da ANEEL Jaiba Solar (PE-0394-1311/2011).

### REFERÊNCIAS

- ALADOS, I., OLMO, F. J., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.102, p.39-50, 2000.
- BENNETT, I., *Solar Energy*, 9, 145 (1965). “Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States.”
- DEHNE, K. Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula. *Instruments and observing methods*, Report n. 15, World Meteorological Organization, p. 263-7, 1984.
- DORNELAS, K.D.S., SILVA, C.L., OLIVEIRA, C.A.S. 2006. Coeficientes médios da equação de Angstrom- Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41: 1213-1219.
- ERBS, D. G., S. A. Klein, and J. A. Duffie, *Solar Energy*, 28, 293 (1982). “Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation.”
- ESCOBEDO J. F., TERAMOTO E. T., OLIVEIRA A. P., CODATO G. Equações de estimativa das frações solar direta e difusa em função do índice de claridade e razão de insolação. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, 2012.
- IQBAL, M. An Introduction to solar radiation. Canada: Academic Press, 1983, 390p.
- LAPPONI, J. C. Estatística usando Excel. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, p.1-19, 1960.
- NORRIS, D. J., *Solar Energy*, 12, 107 (1968). “Correlation of Solar Radiation with Clouds.”
- SOARES, J., OLIVEIRA, A.P., BOZAR, M.Z., MLAKAR, P., ESCOBEDO, J.F., MACHADO, A.J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, v.79, p.201-204, 2004.
- SOUZA, J.L., NICÁCIO, R.M., MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.1203-1220, 2005.
- WILLMOTT C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, Delaware, v. 2, n. 2, p. 184-194.

### ESTIMATION MODELS OF GLOBAL RADIATION AS A FUNCTION OF THE INSOLATION RATIO AND DIFFUSE RADIATION AS A FUNCTION OF THE CLEARNESS INDEX ( $\bar{K}_T$ ) FOR THE CITY OF BRASÍLIA

**Abstract.** *The knowledge of the temporal availability of solar radiation in a particular region is essential for any project involving solar energy, because for a good dimensioning of a generator set, the local knowledge of radiation is critical. Due to the high cost of the measurements of solar radiation, because of the instrumentation equipment, the estimation models of solar radiation at data easily measured, has become a alternative feasible and trustworthy. The work presents a model for the estimation of monthly average global radiation according to the insolation ratio ( $\bar{n}/\bar{N}$ ) and of clearness index ( $\bar{K}_T$ ) using an equation of Angstrom range-Prescott and a model for the estimation of diffuse radiation ( $\bar{H}_d$ ) from a polynomial correlation between  $\bar{K}_T$  and  $\bar{H}_d$ . On modeling held, used data from a period of three years (2011 to 2013) of database the SONDA (System of National Organization of Environmental Data) and InMET (National Meteorological Institute). The validation of models was performed between the confrontation of estimated results with real data for the year 2014, and with results of literature, in addition to the statistical analysis of indicative RMSE (mean squared error), MBE (mean bias error),  $r^2$  (coefficient of determination) and d of Willmott. The statistical parameters analyzed show that both estimate models (global or diffuse radiation) have a good correlation with real values. The results obtained are upcoming results from models of literature.*

**Key words:** *Instrumentation, Radiation, Estimate.*