

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE CORRELAÇÃO E AJUSTE DA RADIAÇÃO DIFUSA PARA O AGRESTE PERNAMBUCANO

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho – manoel@pesqueira.ifpe.edu.br
Caique Alberto de Oliveira Gerônimo - geronimo.caique@gmail.com
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

Resumo. As aplicações das medidas da irradiância difusa estão agrupadas basicamente na determinação da irradiância direta e no cálculo da incidência da irradiância global em um plano não horizontal. Para tanto, normalmente são utilizados modelos de correlação ao invés de realizar medidas, devido aos altos custos envolvidos. Neste trabalho foram utilizados valores de irradiância difusa medidos no plano horizontal no período de dezembro de 2014 a maio de 2017 na estação solarimétrica do IFPE localizada no município de Pesqueira-PE, como banco de dados para o desenvolvimento de modelos de correlação da irradiância global e da difusa, após passarem por um procedimento de qualificação de dados. Foram obtidos modelos na escala instantânea e horária com as equações de Gompertz e sigmoidal com bons índices de determinação, acima de 0,83 para todos os casos. O modelo de Gompertz na escala horária obtido foi comparado com outros modelos desenvolvidos no Brasil e na Argentina, sendo considerado adequado. A partir da análise da média mensal diária de K_d , detectou-se a possível existência de uma sazonalidade com período de 10 meses, utilizando-se o método da transformada de Fourier, fato a ser comprovado em trabalhos futuros. Por fim, foram desenvolvidos fatores de correção isotrópicos para as medidas da irradiância difusa relacionados com as condições de céu: nublado, parcialmente nublado e claro, e fatores que estão fortemente relacionados com o valor de K_t , para os quais foram encontrados coeficientes de duas equações polinomiais.

Palavras-chave: Energia Solar, Radiação difusa, Correção isotrópica

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e a utilização de tecnologias solares estão cada vez mais conquistando espaço em nosso dia a dia. O aproveitamento do recurso solar em processos de conversão da radiação solar em energia térmica e fotovoltaica necessita de uma avaliação e conhecimento da disponibilidade deste na região em que se deseja desenvolver o projeto. Além disto, segundo Cao et al. (2017), o conhecimento do recurso solar também tem sua importância em diversas áreas como agricultura, arquitetura e iluminação. Diante do contexto, observa-se uma escassez relativamente grande em relação a informações precisas e confiáveis sobre os valores radiação solar, principalmente da componente direta, o que dificulta a realização de estudos de viabilidade para implantação de usinas heliotérmicas.

Em meio a este cenário, surge a necessidade de realizar medições em diversas localidades, e assim conseguir ter um banco de dados da radiação solar e, de posse dos dados, fazer uma análise mais detalhada dos locais mais promissores para execução dos projetos que dependam da radiação solar. O projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) organizado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) é uma das iniciativas públicas no sentido de formar um banco de dados de medições da radiação direta. Outras iniciativas isoladas também estão em andamento, principalmente por empresas privadas.

Além da forma tradicional de obtenção de valores da radiação direta, por meio de pireliômetro, é possível também calcular os valores da radiação direta, utilizando a relação apresentada na Eq. (1), cujo método é denominado por alguns autores como “método da direta pela diferença”, a exemplo de Dal Pai (2005).

$$H_b = \frac{H_h - H_d}{\cos(\theta_z)} \quad (1)$$

Na Eq. (1), H_h é a irradiância global horizontal, H_d é a irradiância difusa horizontal, H_b é a irradiância direta normal, todas em Wh/m^2 . θ_z é o ângulo zenital. Todas as grandezas podem ser estudadas na escala de minuto, sendo o mais comum a escala horária. Na escala diária e mensal, não se utiliza o termo $\cos(\theta_z)$.

A partir da utilização do método da diferença para o cálculo da componente direta da radiação solar é que se aponta a importância do estudo da radiação difusa, principalmente de suas bem conhecidas e estudadas relações matemáticas com a radiação global como mostram autores já consagrados na área como Liu e Jordan (1963), Hay (1963), Erbs et al. (1984), Collarespereira e Rabl (1979), Perez et al. (1986), entre outros. Outra aplicação do estudo e dos modelos da radiação difusa é na estimativa da radiação global incidente em um plano não horizontal como por exemplo módulos fotovoltaicos e coletores solares.

Devido aos altos custos financeiros envolvidos tanto na aquisição quanto na manutenção de estações solarimétricas que realizam medições da componente difusa, apenas uma pequena quantidade de localidades possui equipamentos registrando valores de radiação difusa. Comumente, existem aparelhos que foram desenvolvidos com esta finalidade como: os anéis de sombreamento, disco sombreador e as esferas sombreadoras. Nas estações solarimétricas que possuem um pireliômetro registrando a componente direta da radiação, é comum se encontrar também um piranômetro sombreado por uma esfera sombreadora que aproveita o próprio movimento do rastreador para bloquear a componente direta da radiação.

Deve-se atentar para o fato que, conforme afirma Souza (2012), qualquer método que utilize o recurso de sombreamento de um piranômetro para medição da irradiação difusa necessita que sejam empregados fatores de correção, uma vez que ocorre o bloqueio de uma parcela da radiação por partes do equipamento. Esta afirmação leva à conclusão que o método da diferença, quando utilizado para o cálculo da irradiação difusa (manipulação da Eq. (1)), é um procedimento que pode permitir a obtenção de valores da irradiação difusa considerados como referência.

Tomando como base dados de radiação difusa medidos no agreste pernambucano, mais precisamente no Município de Pesqueira-PE, este trabalho apresenta uma análise dos valores obtidos no período de 2 anos de medidas, no que se refere ao comportamento das variações desta componente, teste de modelos de correlação entre Kt (índice de claridade) e o Kd (fração da difusa na radiação global) e uma proposta para correção dos valores da radiação difusa medidos quando comparados com a difusa calculada pelo método da diferença.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta dos dados se deu no Campus Pesqueira do IFPE, localizado na cidade de Pesqueira-PE (latitude: -8:21:59,87, longitude: -36:40:50,34 e altitude: 660m), onde se encontra instalada uma estação solarimétrica em operação desde 2013. O trabalho foi realizado por meio da utilização do banco de dados com os valores das componentes direta, difusa e global da radiação solar no plano horizontal coletados no período de dezembro de 2014 a maio de 2017. Os equipamentos instalados na estação solarimétrica são: um piranômetro para radiação global: Eppley PB, um piranômetro para radiação difusa: Kipp&Zonen CMP3 sombreado por uma esfera e um pireliômetro: Kipp&Zonen CHP1. Todos estão conectados ao coletor de dados CR1000 Campbell que registra valores a cada minuto.

2.1 Controle de qualidade dos dados

O banco de dados de radiação do período citado é composto por um conjunto de dados na escala de minuto com 623.751 registros, um conjunto de dados na escala horária com 11.959 registros e outro na escala diária com 923 registros. É importante salientar que nestes conjuntos de dados estão listados apenas os momentos do dia em que a altitude solar é maior que zero, ou seja, apenas os momentos entre o nascer e o pôr do Sol.

Com o objetivo de retirar dos conjuntos de dados valores espúrios e detectar erros nas medições, foram aplicados filtros de qualidade de dados, que conforme Raichijk (2012) consistem em uma série de filtros que impõem limites inferiores e superiores de aceitação das diferentes intensidades de valores medidos. Como este trabalho trata apenas da radiação difusa, concentrou-se inicialmente em filtros que trabalham com esta componente, foram desconsiderados filtros que utilizam relações entre Kt e Kd e filtros para Kt. Os filtros empregados neste trabalho e que foram descritos por Raichijk (2012) e Vilela et al. (2015), estão listados nas Eq. (2), (3) e (4).

$$\alpha > 10^\circ \quad (2)$$

$$0 < K_d < 1,1 \quad (3)$$

$$d_c < H_d < d_{ov} \quad (4)$$

Nas Eq. (2), (3) e (4): α é a altitude solar em graus, Kd é a fração da irradiação difusa presente na irradiação global, H_d é a irradiação na escala diária em Wh/m². d_c é a irradiação difusa de céu claro, em Wh/m², calculado pelo modelo ESRA (Rigollier et al., 2000) e d_{ov} é irradiação difusa máxima de céu coberto, em Wh/m², calculada conforme Page (1997).

2.2 Análises do comportamento da radiação difusa na escala de minuto (instantânea)

A Tab. 1 apresenta um resumo da aplicação dos filtros de qualidade nos dados na escala de minuto. Na aplicação dos filtros citados, foi realizada uma adaptação da Eq. (4), que está descrita neste trabalho com valores de irradiação (Wh/m²), sendo alterados para valores de irradiância (W/m²)

Tabela 1 - Resumo da aplicação dos filtros de qualidade nos dados instantâneos.

Filtro	No de registros retirados	Percentual
$\alpha > 10^\circ$	72823	11,6%
$0 < K_d < 1,1$	1340	0,24%
$d_c < H_d < d_{cv}$	166687	30,3%

As quantidades e os percentuais indicados na Tab. 1 são resultado da aplicação em sequência dos filtros, na ordem em que estão citados neste trabalho. Verifica-se que, grande parte dos dados foram excluídos da análise pelo filtro que utiliza os limites da difusa de céu claro e nublado, aproximadamente 30% dos registros foram retirados. Restaram ao todo 61,4% dos dados originais. De forma a se verificar a influência dos filtros na localização de valores problemáticos, foi elaborado o gráfico da Fig. 1, que apresenta o plano $K_t - K_d$ e a diferenciação entre os valores que passaram ou não pelos filtros de qualidade apresentados.

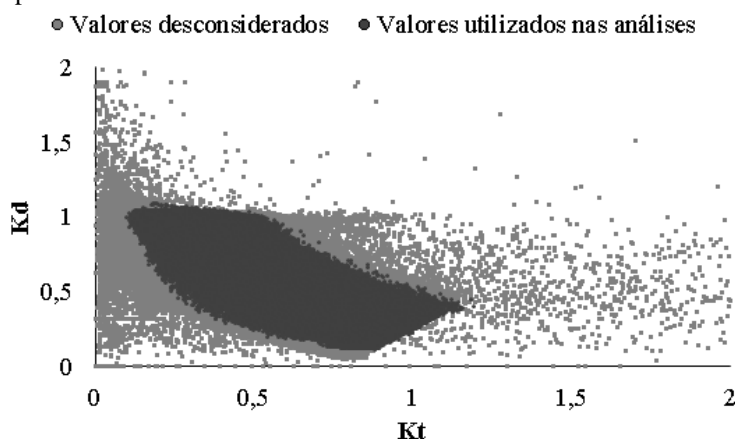


Figura 1 - Plano $K_t - K_d$ com valores instantâneos que foram desconsiderados pelos filtros de qualidade e os valores que foram utilizados nas análises.

A partir do gráfico da Fig. 1, observa-se a abrangência de valores que foram verificados nas medidas da irradiação difusa e global. Os valores de K_t e K_d apresentam-se muito além dos níveis considerados normais pelos filtros. Estes valores mais altos são verificados para altitudes solares muito baixas, situação na qual os filtros das Eq. (2) e (3) são utilizados para detecção e extração. Verificou-se também que o filtro da Eq. (4) atuou principalmente na região que apresenta valores de K_t e K_d baixos, situação que não reflete a realidade da relação entre estes dois índices, pois todos os modelos que correlacionam estes, as duas componentes são inversamente proporcionais. Para dias de céu claro (K_t maior), a irradiação difusa é menor devido a menor quantidade de nuvens no céu e vice-versa.

Já considerando apenas os valores de K_d que passaram pelo controle de qualidade, foi traçado o gráfico da Fig. 2 que mostra o ajuste de dois modelos utilizados por Vilela et al. (2015) para a relação entre K_t e K_d na escala instantânea.

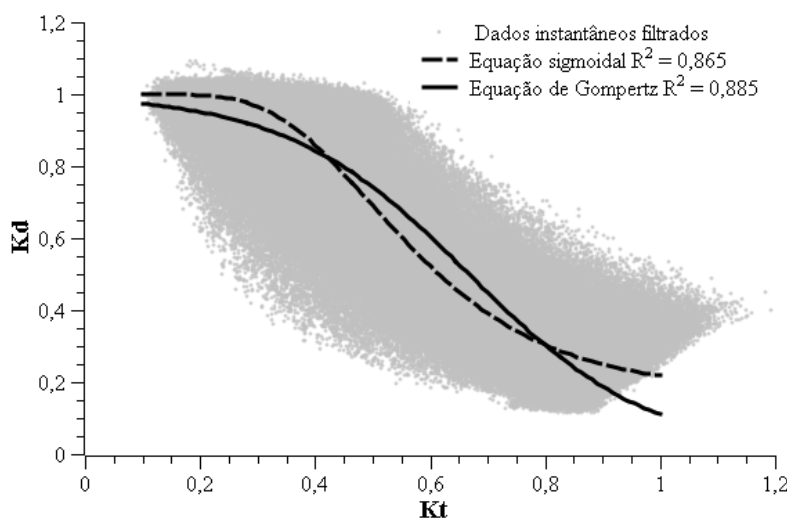


Figura 2 - Ajuste das equações sigmoideal e Gompertz para dados instantâneos.

Nas correlações realizadas com os pares ordenados $K_t - K_d$ apresentados na Fig. 2, foram utilizadas duas expressões distintas: a função logística sigmoideal (Eq. (5)) e o modelo de crescimento de Gompertz (Eq. (6)). Pode-se observar que ambas promoveram, visualmente um ajuste adequado. Porém, para valores de K_t próximos da unidade, a

curva da equação sigmoideal aparenta tangenciar uma reta com K_d maior que zero, já a curva da equação de Gompertz apresenta tendência a tangenciar o eixo horizontal ($K_d = 0$). Para valores de K_t menores que 0,4 (aproximadamente), ambos os gráficos apresentam uma assíntota em $K_d = 1$. O valor de R^2 para a equação de Gompertz foi de 0,885 e para a equação sigmoideal foi de 0,865, o que mostra uma boa concordância das equações encontradas. As Eq. (5) e (6) apresentam as expressões de ambos os modelos obtidos. K_d e K_t estão na escala de minutos.

$$K_d = \frac{1}{1 + e^{-4,211 + 6,305 K_t}} \quad (5)$$

$$K_d = 1 - 0,824 e^{-e^{(2,912 - 5,863 K_t)}} \quad (6)$$

Nas Eq. (5) e (6), os valores dos coeficientes são da mesma ordem de grandeza dos encontrados por Vilela et al. (2015).

A partir dos dados instantâneos filtrados foi obtida a distribuição de frequência das ocorrências dos valores de K_d , cujo gráfico está apresentado na Fig. 3.

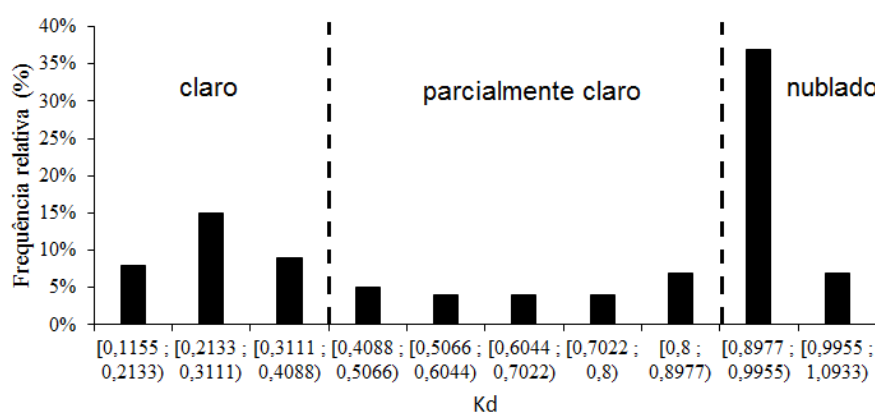


Figura 3 - Distribuição de frequência dos valores de K_d instantâneos.

No gráfico da Fig. 3, pode-se notar que existe uma maior frequência de ocorrência de valores de K_d (próximos à unidade) na faixa entre 0,89 e 0,99, com 37% dos registros. Porém, considerando que para céu nublado, pode-se utilizar a faixa de K_d acima de 0,9 (obtido por substituição de $K_t = 0,35$ na Eq. (5)) então, o percentual observado de momentos de céu nublado será de 44%. Para céu claro, o percentual de ocorrência será na faixa de K_d menor que 0,4 sendo assim, 32% do total de observações. Outra constatação é que a distribuição de frequência é bimodal, com picos bem distintos na faixa de céu claro e na faixa de céu nublado.

2.3 Análises do comportamento da radiação difusa na escala horária

Para os dados na escala horária, também foram aplicados os mesmos filtros das Eq. (2), (3) e (4). A Tab. 2 apresenta um resumo da aplicação dos filtros de qualidade nos dados horários.

Tabela 2 - Resumo da aplicação dos filtros nos dados horários.

Filtro	No de registros retirados	Percentual
$\alpha > 10^\circ$	1982	16,6%
$0 < K_d < 1,1$	28	0,3%
$d_c < H_d < d_{ov}$	2516	25,3%

De acordo com os valores apresentados na Tab. 2, observa-se que a maioria dos valores excluídos foi devido ao critério dos limites da irradiação difusa de céu claro e nublado, 25,3% dos casos. Do total dos 11.595 valores iniciais, restaram para análise 62,1%.

O gráfico da Fig. 4 apresenta o espaço $K_t - K_d$ na escala horária, estão indicados os dados que foram filtrados e os que restaram para análises posteriores.

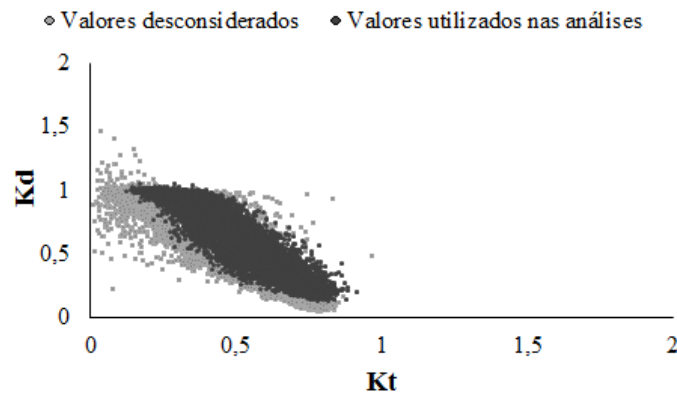


Figura 4 - Plano Kt - Kd com valores horários que foram desconsiderados pelos filtros de qualidade e os valores que foram utilizados nas análises.

Os dois gráficos (Fig. 1 e Fig. 4) foram elaborados na mesma escala dos eixos, na Fig. 4, observa-se que, o conjunto de todos os dados medidos estão menos dispersos do que aqueles apresentados na Fig. 1. A maior atuação dos filtros de qualidade foi no sentido de excluir valores de Kt – Kd baixos, como confirmam também os valores apresentados na Tab. 2. Ainda pode-se observar que não foram verificados valores de Kt maiores que a unidade. Os valores restantes estão em uma formação bem definida

Da mesma forma realizada com os dados instantâneos, foram realizados ajustes das duas equações (Gompertz e Sigmoidal) com os dados horários, o gráfico com os ajustes está apresentado na Fig. 5.

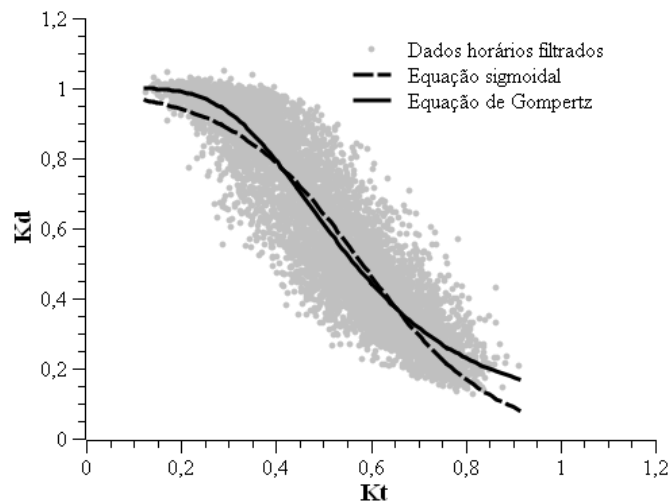


Figura 5 - Ajuste das equações sigmoidal e Gompertz para dados horários.

A partir dos resultados apresentados na Fig. 5, com os ajustes das equações sigmoidal e de Gompertz, verifica-se que ambas promoveram ajustes adequados. Os coeficientes de determinação (R^2) encontrados foram 0,832 (sigmoidal) e 0,846 (Gompertz), ligeiramente menores que os encontrados na escala instantânea. O coeficiente do ajuste da equação de Gompertz também foi maior que o da equação sigmoidal, seguindo a mesma situação encontrada na escala instantânea. As Eq. (7) (sigmoidal) e Eq. (8) (Gompertz) apresentam as equações obtidas dos ajustes, Kt e Kd estão expressos na escala horária.

$$Kd = \frac{1}{1 + e^{-4,219 + 7,261Kt}} \quad (7)$$

$$Kd = 1 - 0,904e^{-e^{(2,61 - 5,546Kt)}} \quad (8)$$

Como forma de comparação com outros modelos desenvolvidos, o gráfico da Fig. 6 mostra, além da curva (Kt x Kd) da Eq. (8), quatro curvas para as cidades de Recife-PE, Botucatu-SP, Luján-ARG e Salta-ARG, desenvolvidas por Vilela et al. (2015).

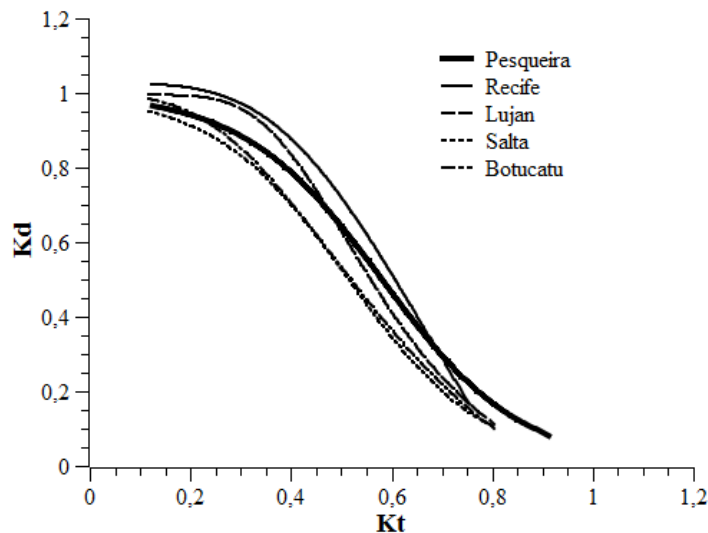


Figura 6 - Comparação com modelos do plano Kt - Kd desenvolvidos.

Verifica-se, no gráfico da Fig. 6 que, todos os modelos apresentados estão se entrelaçando, porém observa-se que os modelos para as cidades de Salta-ARG e Botucatu-SP estão mais abaixo do conjunto de curvas, podendo ser provocado pelo tipo de clima das duas localidades. Mais acima do conjunto de curvas está a cidade de Recife-PE. O modelo desenvolvido neste trabalho encontra-se em um patamar mediano dentro do conjunto de curvas. Destaca-se que os modelos do trabalho de Vilela et al. (2015) são concordantes para Kt próximo de 0,8, enquanto que para Pesqueira, a curva da equação se apresenta mais deslocada para cima.

2.4 Comportamento da radiação difusa no período analisado

Para o período de 31 meses analisado, obteve-se a variação da média mensal diária da irradiação difusa em relação à média diária geral, apresentada no gráfico da Fig. 7.

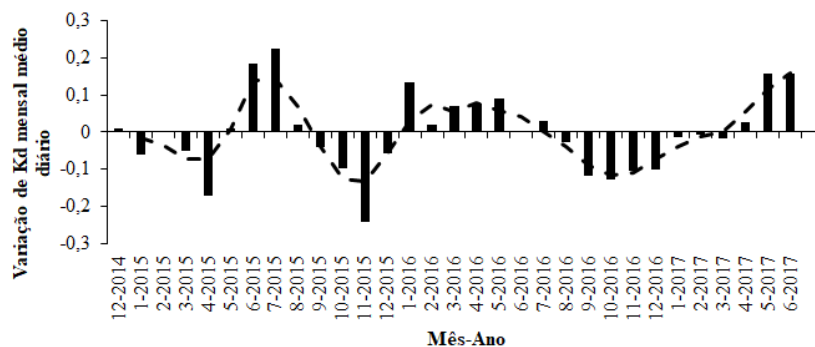


Figura 7 - Variabilidade de Kd médio mensal em relação à média.

No gráfico da Fig. 7, as barras verticais indicam a variação do Kd mensal médio diário em relação à média diária do período (0,46). Barras com valores positivos indicam que a média diária do mês foi acima da média geral e vice-versa. Do total de meses analisados, observou-se que 51,6% apresentaram médias diárias acima da média geral e os outros 48,4% com médias diárias abaixo da média geral, com isto, tem-se um equilíbrio entre meses acima e abaixo da média, o que indica uma possível sazonalidade dos valores.

A linha tracejada do gráfico da Fig. 7 representa a média móvel de um período de 3 meses, centrada no mês do meio. A partir da observação da média móvel, nota-se que existe uma possível sazonalidade das médias mensais diárias de Kd, com período de aproximadamente entre 8 e 10 meses, o que difere do período da sazonalidade esperada da radiação solar ou do período da definição das estações do ano para o local estudado.

Para se confirmar esta constatação, utilizou-se o método de detecção de sazonalidade por transformada de Fourier (Iwok, 2016), como forma de definir a frequência da variabilidade observada no gráfico da Fig. 7. Verificou-se, após a aplicação da transformada rápida de Fourier, que ocorre um pico na frequência de aprox. 0,1 Hz, o que corresponde a um período de 10 meses, conforme gráfico da Fig. 8.

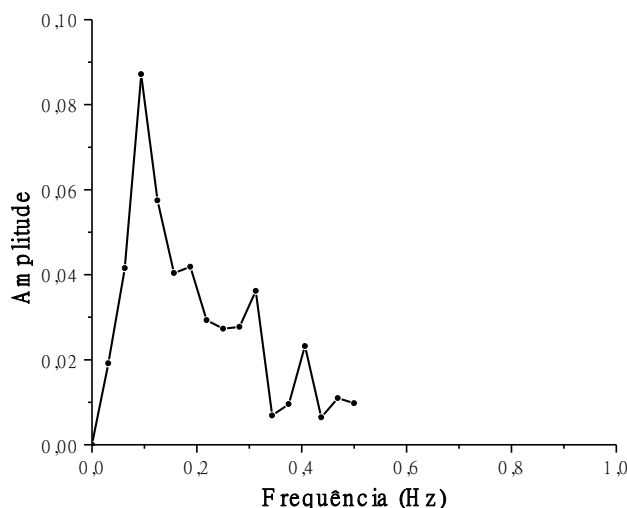


Figura 8 - Resultado da aplicação da transformada de Fourier para os valores da variação de K_s diário médio mensal em torno da média.

2.5 Proposta de desenvolvimento de fatores de correção anisotrópicos

Segundo Dal Pai (2005), a medição da irradiação difusa, utilizando o método de anel sombreamento, apresenta como desvantagem a utilização de fatores de correção (FC) para compensar a parcela (F_p) da irradiação difusa barrada pelo anel de sombreamento. Os fatores de correção baseiam-se na isotropia e anisotropia da irradiação e levam em consideração, respectivamente, apenas a aplicação de fatores geométricos (raio e largura do anel) e geográficos (latitude e declinação solar), assim como os efeitos atmosféricos (turbidez, nebulosidade, poluição, vapor d'água).

Porém, conforme descrito anteriormente, para este trabalho, utilizou-se uma esfera sombreadora para o bloqueio da radiação direta sob um piranômetro. Mas, levando-se em consideração o que afirma Souza (2012), em qualquer método de medição da irradiação solar difusa, é indispensável à aplicação de fatores de correção, visto que, muitas vezes, parte da irradiação solar difusa é bloqueada pelo próprio aparelho. É importante salientar que estas correções são aplicadas a valores instantâneos, pois as condições de dispersão da radiação são distintas a cada instante.

Outra justificativa para a utilização destes fatores é o maior espalhamento angular da radiação quando a borda de uma nuvem encobre o disco solar, chamado de efeito de borda, que provoca o chamado efeito lente, discutido por vários autores como: Dal Pai (2005), Piacentini (2011) e Almeida et al. (2014). Este efeito pode ser observado nas fotos da Fig. 9, que mostra a visão do disco solar coberto pela esfera sombreadora para duas situações distintas de nuvem.

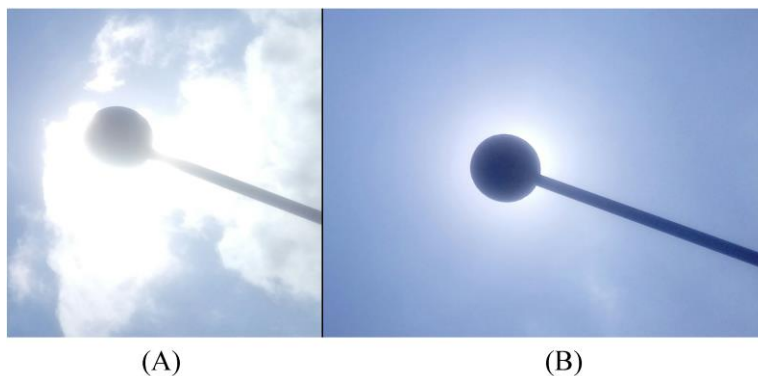


Figura 9 - Fotos do encobrimento do disco solar por uma esfera sombreadora: (A) ocorrência de borda de nuvem e (B) céu claro.

Na Fig. 9A, observa-se um maior espalhamento da radiação em volta da esfera, devido ao efeito de borda da nuvem, o que pode levar ao piranômetro a detectar um valor maior da radiação difusa neste momento. Na Fig. 9B verifica-se que o espalhamento da radiação é mais reduzido, embora ainda exista devido à turbidez da atmosfera.

Levando-se em conta os fatos apresentados, foram propostos dois tipos de fatores de correção anisotrópicos: o primeiro que depende das condições do céu, dadas pelo valor de K_t conforme a classificação Liu e Jordan (1960): Nublado ($0 < K_t \leq 0,30$), parcialmente nublado ($0,30 < K_t \leq 0,65$) e aberto ($0,65 < K_t \leq 1$). E o segundo, que segmenta o intervalo válido de K_t em 20 partes.

Os gráficos da Fig. 10 apresentam as curvas de ajuste obtidas entre as medidas da irradiação difusa com a esfera sombreadora (Irradiância difusa esfera) e a irradiação obtida pelo método da diferença (diferença entre a irradiação

global e a direta incidente no plano horizontal), denominada irradiância difusa referência; para os três tipos de cobertura de céu: nublado, parcialmente nublado e aberto.

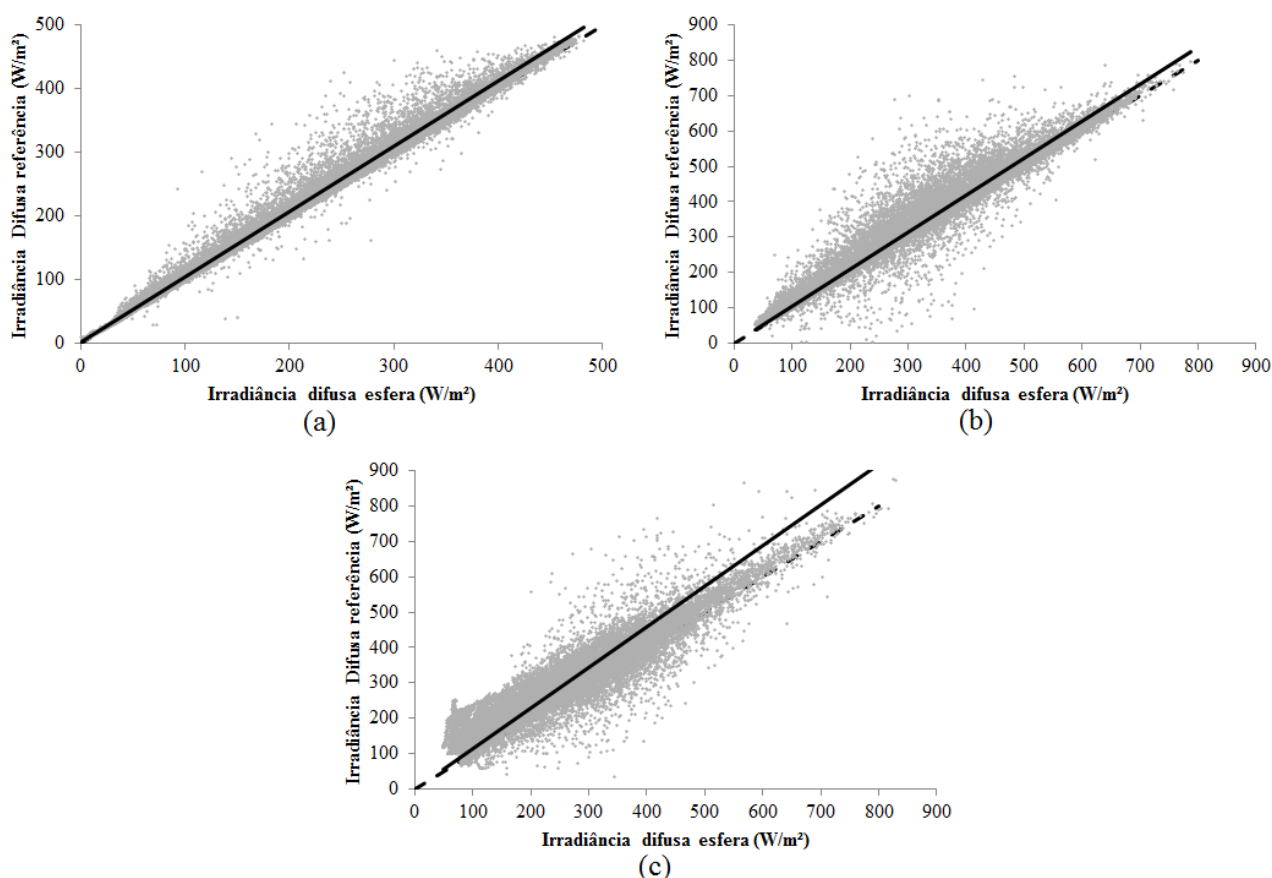


Figura 10 - Curvas de ajuste isotrópico para os tipos de céu: (a) nublado, (b) parcialmente nublado e (c) aberto.

Nos gráficos da Fig. 10, a linha tracejada representa a relação ideal entre a irradiância difusa medida com a esfera e a irradiância difusa de referência, as linhas cheias são as retas de ajuste entre os valores das duas grandezas, obtidas pelo método dos mínimos quadrados. Observa-se que, para as três condições de céu, conseguiu-se uma reta de ajuste e que para todos os casos, a reta obtida (linha cheia) está acima da reta ideal (tracejada), o que indica que os valores medidos com o piranômetro e a esfera são subestimados. Verifica-se também que ocorre uma maior dispersão a medida que as condições do céu saem de nublado para aberto.

As equações obtidas das correlações estão apresentadas na Tab. 3, assim como os seus respectivos valores para os coeficientes de determinação no R^2 . Verifica-se que todos os coeficientes de determinação obtidos estão acima de 0,8 e que os valores das correções aumentam conforme o céu torna-se mais aberto. O fator de correção para céu aberto superou o percentual de erro da instrumentação utilizado (5%).

Tabela 3 - Valores das correções isotrópicas da irradiância difusa.

Cobertura do céu	Equação de correção anisotrópica	R^2
Nublado	$Idf\ Corr. = 1,0321 \times Idf\ Esfera$	0,9896
Parcialmente nublado	$Idf\ Corr. = 1,0458 \times Idf\ Esfera$	0,9384
Aberto	$Idf\ Corr. = 1,1493 \times Idf\ Esfera$	0,8198

Seguindo o mesmo procedimento metodológico descrito por Dal Pai (2005) com o objetivo de verificar se os valores da correção isotrópica das medidas da irradiância difusa pelo o método da esfera sombreadora estão relacionados com o índice de claridade (Kt). O intervalo de 0 a 1 de transmissividade atmosférica foi dividido em 20 partes iguais, com uma amplitude de 0,05 e os ajustes foram estabelecidos, por meio da correlação gráfica entre a irradiância difusa medida pelo método de referência, pela irradiação difusa, medida pela esfera sombreadora. A Fig. 11 apresenta as correções estabelecidas em função dos intervalos do índice de claridade (Kt).

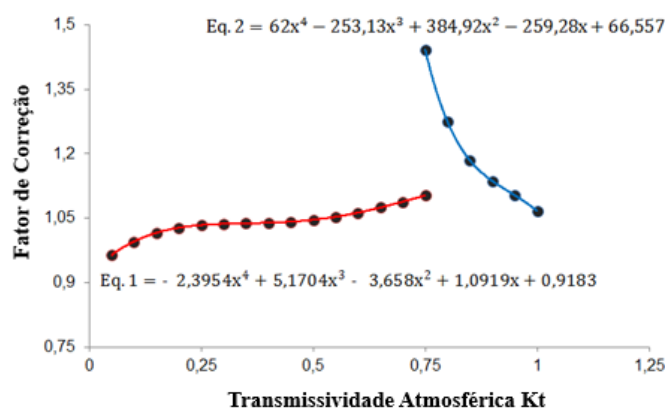


Figura 11 - Fatores de correção isotrópica em função de Kt.

Conforme mostra a Fig. 11, com o objetivo de facilitar a determinação da equação do ajuste entre Kt e o fator de correção isotrópico adequado para as curvas das correções, o intervalo de Kt foi dividido em duas partes: o primeiro representado pelos valores de Kt de 0 à 0,75 e o segundo compreende os valores de Kt entre 0,75 e 1. Ambas apresentaram seus ajustes para uma equação polinomial do quarto grau. A Tab. 4 apresenta os valores dos coeficientes das duas equações polinomiais utilizadas para relacionar os valores de Kt com os coeficientes de ajuste isotrópico. Destaca-se que os fatores de correção obtidos, para valores de Kt menores que 0,5 estão abaixo de 5% que é considerado como erro de instrumentação, ou seja, para valores de Kt acima de 0,5, os fatores realizam a correção dos valores medidos acima das diferenças que são considerados erros de medida.

Tabela 4 - Coeficientes das equações que relacionam o valor de Kt e os coeficientes de ajuste isotrópicos.

Cobertura do Céu	Equação de Correção					R ²
	<i>Idf corr.</i> = $(a_0 + a_1Kt + a_2Kt^2 + a_3Kt^3 + a_4Kt^4)$ <i>Idf Esfera</i>					
	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	
0 < Kt < 0,75	0,9183	1,0919	-3,658	5,1704	-2,3954	0,972
0,75 < Kt < 1	66,557	-259,28	384,92	-253,13	62	1

2.6 Considerações finais

Foram obtidas duas correlações entre Kt e Kd: uma para a escala instantânea e outra para a escala horária. Verificou-se que em comparação com os modelos desenvolvidos por Vilela et al. (2015), que a curva do modelo horário Kt – Kd apresenta-se em um patamar mediano. Para ambas as escalas, a equação de Gompertz foi a que apresentou maior coeficiente de determinação quando comparado com a equação sigmoideal, embora as diferenças entre os dois valores de R² encontrados seja menor que 1%. Verificou-se que os filtros de qualidade ajudaram a identificar os outliers e a indiretamente melhorar a qualidade das correlações obtidas.

Foi observado que existe uma provável sazonalidade dos valores mensais médios diários de Kd em relação a sua variação para a média. O período observado de variação está entre 8 a 10 meses. Utilizando-se o método da transformada de Fourier, constatou-se que o período é de aprox. 10 meses, porém, observa-se que este resultado necessita de um banco de dados que extrapole em várias vezes o período observado para confirmação.

Foi empregada a metodologia apresentada por Dal Pai (2005) para o desenvolvimento de fatores de correção isotrópicos dos valores da irradiância difusa medida com esfera sombreadora. Observou-se que os fatores dependem das condições de céu e podem ser modelados segundo uma equação polinomial de 4º grau, resultado semelhante ao apresentado por Dal Pai (2005).

Agradecimentos

Os autores agradecem à FACEPE, ao CNPq e ao IFPE pelo apoio dado durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. P., Zilles, R. e Lorenzo, E., 2014. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. *Solar Energy*, vol. 110, n. pp. 168-173.
- Cao, F., Li, H., Yang, T., Li, Y., Zhu, T. e Zhao, L., 2017. Evaluation of diffuse solar radiation models in Northern China: New model establishment and radiation sources comparison. *Renewable Energy*, vol. 103, n. pp. 708-720.
- Collarespereira, M. e Rabl, A., 1979. Average Distribution of Solar-Radiation - Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, vol. 22, n. 2, pp. 155-164.

- Dal Pai, A., 2005. Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correções anisotrópicos e modelos de estimativa. Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Botucatu.
- Erbs, D. G., Klein, S. A. e Duffie, J. A., 1984. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily e monthly average global radiation. *Solar Energy*, vol. 28, n. pp. 293.
- Hay, J. E., 1963. A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the U.S., its outlying possessions and Canada. *Solar Energy*, vol. 7, n. 2, pp. 53-74.
- Iwok, I. A., 2016. Seasonal Modelling of Fourier Series with Linear Trend. *International Journal of Statistics and Probability*, vol. 5, n. 6, pp. 65-72.
- Liu, B. Y. H. e Jordan, R. C., 1960. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. *Solar Energy*, vol. 4, n. 3, pp. 1-19.
- Liu, B. Y. H. e Jordan, R. C., 1963. A Rational Procedure for Predicting the Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors - with Design Data for the United-States, Its Outlying Possessions and Canada. *Solar Energy*, vol. 7, n. 2, pp. 53-74.
- Page, J., 1997. Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK. Londres, Chartered Institute of Building Services Engineers.
- Perez, R., Stewart, R., Arbogast, C., Seals, R. e Scott, J., 1986. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation. *Solar Energy*, vol. 36, n. 6, pp. 481-497.
- Piacentini, R. D., 2011. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil. *Renewable Energy*, vol. 36, n. pp. 409-412.
- Raichijk, C., 2012. Control de calidad de mediciones de radiación solar. *Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, n. pp.
- Rigollier, C., Bauer, O. e Wald, L., 2000. On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - With respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, vol. 68, n. 1, pp. 33-48.
- Souza, A. P., 2012. Radiação solar difusa horária incidente em superfícies inclinadas: fatores de correções, evolução diurna e modelo de estimativa. Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
- Vilela, O. C., Pedrosa Filho, M. H. O., Escobedo, J. F., Pai, A. D., Raichijk, C., Salazar, G. A., Grossi, H., Righini, R. e Fraidenraich, N., 2015. Qualificação e caracterização da radiação direta, difusa e global em diferentes localidades do Brasil e Argentina. XXXVIII Reunión de trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, San Rafael - ARG.

DEVELOPMENT OF MODEL OF CORRELATIONS AND ADJUSTMENT OF DIFFUSE RADIATION FOR PERNAMBUCANO HARSH

Abstract. *The diffuse irradiance measurements applications are grouped basically for determining the beam irradiance and for calculating the incidence of global irradiation in the non-horizontal plane. Correlation models are normally used instead of measurements due to highest cost involved. In this work, diffuse irradiance values measured in horizontal pane from December 2014 to May 2017 in IFPE solarimetric station located in Pesqueira-PE city were used to compose a data base for developing global and diffuse correlations models after passing by a qualification proceeding. Instantly and hourly models were obtained using Gompertz and sigmoidal equations with good determining index above 0.83 for all cases. The hourly scale Gompertz model was compared to other models developed in Brazil and Argentina and it was considered adequate. There is a possible seasonality with 10 months of period in the monthly daily mean of K_d , this was observed using the Fourier transform method. In the end, it was developed isotropic correction factors for the diffuse irradiance measurements related to the sky conditions: cloudy, partially cloudy and open, these factors are strong related to the K_t value, it was obtained the coefficients of two polynomial equations.*

Key words: *Solar Energy, Diffuse radiation Isotropic correction.*