CORRELAÇÃO ENTRE ANISOTROPIA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA E TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA, RAZÃO DE INSOLAÇÃO E PROFUNDIDADE ÓTICA DE AEROSSOL

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br
Faculdade de Tecnologia de Botucatu – Centro Paula Souza
João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br
Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agronômicas – Departamento de Recursos Naturais

Resumo. O conhecimento preciso da radiação solar incidente em uma localidade é importante para uso em diversos setores da sociedade, com aplicações em meteorologia, arquitetura, conversão energética dentre outros. Porém, a escolha do método de monitoramento de radiação solar difusa pode comprometer a qualidade da medida. Os métodos da diferença (referência) e do disco para medida da radiação difusa são mais precisos, porém de custos elevados, inviabilizando sua implantação. Nesse sentido dá-se preferência para o método do anel de sombreamento. No entanto, o método do anel requer correções isotrópicas e anisotrópicas em função da parcela do céu obstruída pelo sensor. Portanto, foram calculados desvios anuais entre as radiações difusa referencia e medida com correção isotrópica para quantificar a diferença devido a anisotropia da radiação. Os desvios encontrados variaram entre 1,5% a 10%, justificados pelas diferentes condições atmosféricas apresentadas para cada ano.Nesse sentido, para verificar a dependência dos desvios em função dos constituintes atmosféricos, os desvios foram comparados com a transmissividade atmosférica, a razão de insolação e a profundidade ótica de aerossol. Os resultados indicaram aumento nos desvios para aumento na transmissividade atmosférica, razão de insolação e profundidade ótica de aerossol, indicando que a presença de material particulado em suspensão na atmosfera muda o perfil de distribuição da radiação, causando as subestimativas do método do anel de sombreamento.

Palavras-chave: Radiação Solar Difusa, Anisotropia, Transmissividade Atmosférica, Aerossol.

1. INTRODUÇÃO

Informações precisas da quantidade de radiação solar incidente na superfície terrestre são essenciais para aplicações de conversão energética. O correto dimensionamento e monitoramento de sistemas solares permite maior qualidade às medidas, disponibilizando valores de entrada mais confiáveis para simulações nas áreas de meteorologia, arquitetura, engenharia de processos térmicos etc.

A radiação global, incidente na superfície terrestre, é composta pela soma das radiações direta, passagem da radiação sem interação com a atmosfera, e difusa, fruto do espalhamento da radiação pelos constituintes atmosféricos. O monitoramento dessas três radiações é imperativo para estudos de modelagem e conversão energética. No entanto, o investimento aplicado na medida da radiação direta é elevado devido à tecnologia empregada na construção dos sensores, às dificuldades de operacionalização e às dificuldades de capacitação técnica dos recursos humanos. Nesse sentido, para minimização dos custos, mede-se as radiações global e difusa e calcula-se a radiação direta por diferença. A radiação global pode ser medida por um piranômetro e a radiação difusa por um piranômetro posicionado sob a sombra projetada por um dispositivo sombreador.

Os métodos de sombreamento usados no monitoramento da radiação difusa conhecidos na literatura são os métodos do disco e do anel. O primeiro método envolve mecanismos de rastreamento solar, encarecendo o sistema. O segundo método consiste em uma montagem mais simples e barata, com um anel de dimensões conhecidas orientado na direção polar, inclinado na latitude local e com a função de sombrear o sensor durante todo o dia. Ajustes mecânicos a cada 2 ou 3 dias são necessários para compensar a declinação solar. Porém, o método do anel apresenta, como desvantagem, a necessidade da aplicação de fatores de correção na medida da radiação difusa, pois o anel, além de obstruir a radiação direta, também obstrui uma parcela do hemisfério celeste, subestimando a medida.

Diversos autores recomendam o uso de correções para a parcela de radiação difusa obstruída pelo anel (Drummond, 1956; Kasten et al, 1983; Dehne, 1984; Stanhill, 1985; Ineichen et al, 1984). Ao considerar a distribuição de radiação uniforme no céu (isotropia da radiação), é possível desenvolver matematicamente fatores de correção isotrópicos em função da geometria da montagem experimental adotada. A montagem mais conhecida e comercializada do anel de sombreamento é a montagem de Drummond (1956), que consiste em um piranômetro fixo e um anel que translada na direção polar para manter o sensor no centro da sombra projetada. Neste sistema, a distância sensor-anel e a largura da sombra variam ao longo do ano e o cálculo da fração de perda (F_P) e do fator de correção isotrópico (FC) são dados pelas Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente:

$$F_{P} = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot \left[\cos\left(\delta\right)\right]^{3} \cdot \int_{0}^{w_{S}} \cos\left(\theta_{Z}\right) dw \tag{1}$$

$$FC = \frac{1}{1 - F_{p}} \tag{2}$$

onde b é a largura do anel, R o raio do anel, δ a declinação solar, θ_Z o ângulo zenital, w o ângulo horário e w_s o ângulo horário do nascer do sol.

No entanto, a distribuição da radiação no hemisfério celeste não é uniforme (Grant, 1997; López et al., 2004). Materiais particulados como aerossóis e vapor d'água em suspensão na atmosfera, ao interagirem com a radiação, causam a anisotropia da mesma, principalmente em torno de uma região circular perpendicular à incidência dos raios solares. Esta radiação é chamada de radiação circunsolar e é obstruída pelo anel de sombreamento (Gueymard, 2001). Portanto, a distribuição e o efeito da anisotropia da radiação devem ser levados em consideração na determinação das equações de correção para medida da radiação difusa.

Para Drummond (1956), a aplicação do fator de correção isotrópico não é suficiente para correção da radiação difusa, necessitando correções adicionais de 3% para cobertura de céu nublado e 7% para cobertura de céu aberto. Painter (1981), comparando valores da radiação difusa medidas pelos métodos do disco e do anel, verificou que a anisotropia apresenta dependência sazonal, enquanto que Dehne (1984) e Vartiainen (1999) verificaram que a anisotropia apresenta dependência espacial. Kudish e Ianetz (1993), utilizando valores médios mensais, determinaram variações entre 2,9% a 20,9% entre a radiação difusa referência e a radiação difusa isotrópica medida com anel de sombreamento, com desvio máximo em julho e mínimo em dezembro, evidenciando a sazonalidade da anisotropia da radiação. Kasten et al (1983) propuseram equações lineares multivariadas para correção da anisotropia da radiação em função da fração difusa Kd (razão da radiação difusa pela radiação global), da declinação solar e do coeficiente de extinção da radiação direta. Pollard e Langevine (1988) estenderam essa análise, adicionando mais dois parâmetros para descrição da anisotropia: a altura solar e a transmissividade atmosférica Kt (razão da radiação global pela radiação extraterrestre). Battles et al (1995) desenvolveram equações numéricas de correção para radiação difusa em função de parâmetros isotrópico (geometria da montagem) e anisotrópicos (massa ótica, transmissividade atmosférica (cobertura de céu) e brilho celeste (espessura de nuvens)) no sentido de se melhorar a precisão do método de medida do anel de sombreamento. Para minimização dos efeitos das reflexões internas, LeBaron et al (1980) recomendam a pintura das paredes internas do anel de preto. As reflexões causadas pelas paredes internas do anel podem aumentar a quantidade de radiação difusa medida pelo sensor, propagando erros da ordem de até 20% para medidas em horários em torno do nascer e pôr-do-sol.

O Laboratório de Radiometria Solar de Botucatu mede as radiações global, direta e difusa desde 1996, porém o método do anel de sombreamento empregado no monitoramento da radiação difusa difere dos largamente utilizados e citados na literatura. O método desenvolvido em Botucatu, conhecido por método do anel de sombreamento Melo-Escobedo (MEO) (Melo e Escobedo, 1994), apresenta facilidade de operação e manutenção, consistindo em um anel fixo e inclinado na latitude local, orientado na direção polar. As variações na declinação solar são compensadas por meio da translação do sensor numa base móvel para mantê-lo sempre à sombra do anel.

As diferentes geometrias adotadas para o método do anel de sombreamento resultam em equações de correção isotrópicas sensíveis à escolha da montagem. Nesse sentido, para o método do anel de sombreamento Melo-Escobedo, Oliveira et al(2002) introduzem modificações na equação de perda de Drummond, apresentada pela Eq. (3):

$$F_{P} = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot \cos\left(\delta\right) \left[\frac{\cos\left(\phi + \delta\right)}{\cos\left(\phi\right)}\right]^{2} \cdot \int_{0}^{w_{S}} \cos\left(\theta_{Z}\right) dw \tag{3}$$

onde ϕ é a latitude.

O objetivo do trabalho foi quantificar os desvios entre as radiações difusa referencia e isotrópica medida com anel de sombreamento MEO e relaciona-los a parâmetros como transmissividade atmosférica, razão de insolação e profundidade ótica de aerossol. Objetivou-se também verificar o desempenho do método do anel de sombreamento na presença de atmosferas límpidas com maior concentração de aerossol.

2. METODOLOGIA

Os dados de radiação solar global, direta e difusa foram fornecidos pelo Laboratório de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais – Setor Ambientais – da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP/Botucatu. As coordenadas geográficas do local de medida são: 22,85° S de latitude, 48,45° O de longitude e 786 m de altitude. O período utilizado para o estudo compreende os anos de 1996 a 2006, num total de 11 anos de medidas no formato W/m².

A radiação solar global I_G foi monitorada por um piranômetro da marca Eppley modelo PSP, a direta I_D por um pireliômetro da marca Eppley modelo NIP acoplado a um sistema de rastreamento solar ST-3 posicionado

perpendicularmente à incidência dos raios solares e a difusa I_d por um piranômetro da marca Eppley modelo PSP posicionado sob a sombra projetada por um anel de dimensões 0,40 m de raio e 0,10 m de largura disposto segundo a montagem MEO. A radiação difusa, no ato da medida, foi corrigida com os fatores de correção isotrópicos desenvolvidos por Oliveira et al (2002) para a montagem MEO. Os sensores usados são de primeira classe e foram calibrados a cada 2 anos.

O gerenciamento dos sensores e a aquisição das medidas foram efetuados por um datalogger da marca Campbell Sci modelo 23X, efetuando leituras a cada 5 segundos e armazenando médias aritméticas dessas medidas a cada 5 minutos.

O co-seno do ângulo zenital, a radiação direta projetada na horizontal $I_{D\!H}$ e a radiação extraterrestre I_{O} foram calculados, respectivamente, por meio das Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6):

$$\cos \theta_{z} = sen\phi * sen\delta + \cos\phi * \cos\delta * \cos\omega \tag{4}$$

$$I_{DH} = I_D * \cos \theta_Z \tag{5}$$

$$I_{DH} = I_D * \cos \theta_Z$$

$$I_O = 1367 * \cos \theta_Z$$
(5)

Os dados de radiação solar foram submetidos a um controle de qualidade para assegurar confiabilidade às medidas. Os valores medidos que não se enquadraram nas condições impostas abaixo foram descartados.

- $0 \le I_G \le I_O$
- $0 \le I_{DH} \le I_{O}$
- $0 \le I_d \le 0.80 I_Q$
- $0 \le I_d \le 1,25 I_G$

A radiação difusa referência I_{dREF} foi calculada por meio da diferença entre as radiações global e direta na horizontal, enquanto que a transmissividade atmosférica Kt pela razão entre as radiações global e extraterrestre, dadas, respectivamente, pelas Eq. (7) e Eq. (8):

$$I_{dREF} = I_G - I_{DH} \tag{7}$$

$$Kt = \frac{I_G}{I_O} \tag{8}$$

Os dados de precipitação e insolação foram fornecidos pela Estação de Meteorologia de Botucatu do Departamento de Recursos Naturais - Setor Ambientais - da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP/Botucatu para os anos de 1996 a 2006 na partição de tempo diária. A insolação (n) foi monitorada por um heliógrafo do tipo Campbell Stokes. A razão de insolação (R) foi calculada pela Eq. (9):

$$R = \frac{n}{N} \tag{9}$$

onde N é o fotoperíodo.

Segundo a classificação climática de Koppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa (temperado quente) apresentando verão úmido e inverso seco.

A profundidade ótica de aerossol (POA) é a espessura ótica devido à extinção da radiação por uma coluna vertical de aerossóis. Os dados da profundidade ótica de aerossol (POA) foram cedidos pelo GSFC TOMS group (grupo Goddard Space Flight da NASA) e monitorados por instrumentos a bordo do satélite Earth Probe Toms, no período de 1996 a 2001. As informações foram disponibilizadas em arquivos brutos, com variação de 1º em 1º de latitude e 1º em 1º de longitude em médias mensais. Após seleção em função da latitude e longitude local, os dados mensais foram agrupados por ano e foram extraídas médias anuais da profundidade ótica de aerossol.

Os desvios anuais médios foram calculados em função da média anual das radiações difusa referência e medida, dados pela Eq. (10):

$$D(\%) = 100 * \left(\frac{\overline{I}_{dREF} - \overline{I}_{d}}{\overline{I}_{dREF}}\right)$$
 (10)

Os desvios anuais médios foram comparados com os valores médio anuais de transmissividade atmosférica (Kt), razão de insolação (R) e profundidade ótica de aerossol (POA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A escolha da partição média-5-minutos permite que fenômenos mais complexos, como a anisotropia da radiação, possam ser incluídos no processo de análise da dinâmica atmosférica (Suehrcke e McCormick, 1989). Nesse sentido, dados da radiação solar difusa medidos em W/m² na partição média-5-minutos foram agrupados em médias anuais e correlacionados entre si por meio do cálculo do desvio (Eq. (10)).

A Tab. 1 mostra os valores médios anuais das radiações solares difusa referência e medida pelo anel de sombreamento, os respectivos desvios-padrões (SD) e o desvio (D) entre as duas radiações difusa. Os elevados valores do desvio-padrão (SD) mostram a grande variabilidade apresentada pela partição média-5-minutos. Segundo Suehrcke e McCormick (1988), ao se diminuir o tempo de aquisição, a variabilidade entre as medidas aumenta em função do aumento da dinâmica atmosférica, influenciando o valor instantâneo da radiação. Os valores máximos encontrados para as radiações difusa referência e medida foram de, respectivamente, 171,62 W/m² ocorrida em 2000 e 162,28 W/m² em 2006. Os valores mínimos encontrados foram de 153,19 W/m² e 148,72 W/m², ambos ocorridos em 2003, respectivamente, para as radiações difusa referência e medida. O maior desvio foi de 9,96% para o ano de 1999 e o menor desvio foi de 1,54% para o ano de 2006. Segundo Miers (2005), erros experimentais da ordem de ±3,5% podem estar associados às medidas instantâneas efetuadas para condições de céu aberto devido ao efeito co-seno, causando superestimativas para os períodos da manhã e tarde e subestimativas para períodos em torno do meio dia solar. No entanto, o cálculo dos desvios levou em consideração tanto condições totais de cobertura de céu como períodos de manhã, tarde e meio dia solar, o que pode, na média, reduzir as incertezas nas medidas. Segundo Miers (2005) ainda, para aplicações com intervalo de tempo anual, as incertezas contribuem com menos de 0,1% nos resultados.

Tabela 1. Valor médio anual das radiações difusa referência e medida, seus respectivos desvios padrões e o desvio médio anual entre as radiações difusa referência e medida.

Ano	Difusa Referência (W/m²)	SD (W/m²)	Difusa Medida (W/m²)	SD (W/m²)	Desvio (%)
1996	168,05	137,93	160,27	132,97	4,63
1997	165,57	140,61	161,73	136,01	2,32
1998	166,82	128,33	161,51	123,95	3,18
1999	171,28	131,82	154,23	125,08	9,96
2000	171,62	141,24	156,01	131,78	9,09
2001	167,86	140,36	156,97	131,99	6,49
2002	161,57	136,93	153,73	129,10	4,85
2003	153,19	134,98	148,72	128,33	2,92
2004	159,26	132,16	155,60	127,79	2,30
2005	161,32	136,49	158,25	132,42	1,90
2006	164,82	136,92	162,28	133,08	1,54

A diferença entre os valores das radiações difusa, verificada pelos desvios, é justificada pelo uso do anel de sombreamento, o qual subestima o valor da radiação difusa medida, pois obstrui uma parcela do hemisfério celeste. No entanto, nosso esforço é no sentido de verificar de que forma essa diferença é afetada pela variação de parâmetros como transmissividade atmosférica (Kt), razão de insolação (R) e profundidade ótica de aerossol (POA). A Tab. 2 mostra os valores médios anuais da transmissividade atmosférica (Kt), razão de insolação (R) e profundidade ótica de aerossol (POA). Os dados de profundidade ótica de aerossol (POA) limitaram-se aos anos de 1996 a 2001, visto que foi o período de varredura dos sensores do satélite Earth Probe Toms.

Tabela 2. Valor médio anual da transmissividade atmosférica (Kt), razão de insolação (R) e profundidade ótica de aerossol (POA).

Ano	Transmissividade Atmosférica (Kt)	Razão de Insolação (R)	Profundidade Ótica de Aerossol (POA)
1996	0,480	0,627	0,115
1997	0,473	0,605	0,110
1998	0,465	0,584	0,111
1999	0,515	0,641	0,156
2000	0,499	0,604	0,159
2001	0,479	0,567	0,152
2002	0,484	0,535	
2003	0,477	0,574	
2004	0,463	0,565	
2005	0,460	0,559	
2006	0,470	0,639	

A transmissividade atmosférica (Kt) indica o quanto os constituintes atmosféricos, nuvens e partículas em suspensão deixam passar de radiação solar para a superfície. Já a razão de insolação (R) representa a quantidade de horas em que o sol brilhou em relação à quantidade total de horas possíveis em um dia, registrado pela queima de um papel graduado em horas para radiações solares superiores a 200 W/m². Geralmente, tanto a transmissividade atmosférica quanto a razão de insolação apresentam comportamentos semelhantes, com valores próximos de 0 para céu nublado e valores próximos de 1 para céu limpo. No entanto, os resultados podem ser ligeiramente diferentes, visto que são de obtidos por metodologias e partições de tempo diferentes. Os valores médios máximos para a transmissividade atmosférica (Kt) e para razão de insolação (R) foram respectivamente de 0,515 e 0,641 para o mesmo ano de 1999, enquanto que os valores médios mínimos foram de 0,460 para o ano de 2005 e de 0,535 para o ano de 2002, respectivamente. Para a profundidade ótica de aerossol (POA), o valor máximo foi de 0,159 para 2000 e o valor mínimo de 0,110 para 1997.

As Fig. 1, 2 e 3 mostram as comparações gráficas realizadas entre os desvios (D) e os parâmetros transmissividade atmosférica (Kt), razão de insolação (R) e profundidade ótica de aerossol (POA), respectivamente.

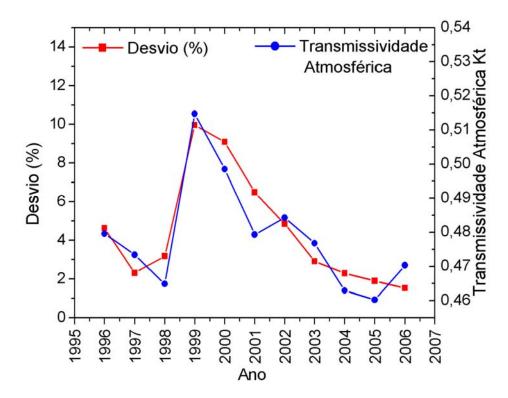


Figura 1. Comparação entre os desvios entre as radiações difusa referência e medida e a transmissividade atmosférica (Kt).

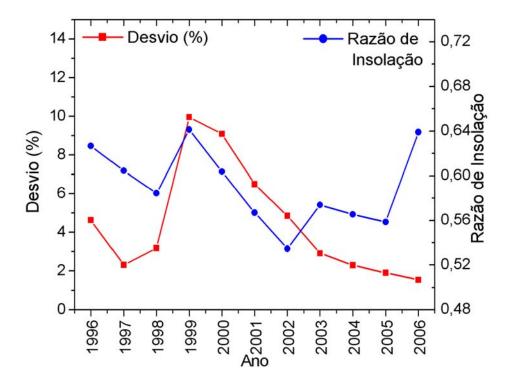


Figura 2. Comparação entre os desvios entre as radiações difusa referência e medida e a razão de insolação (R).

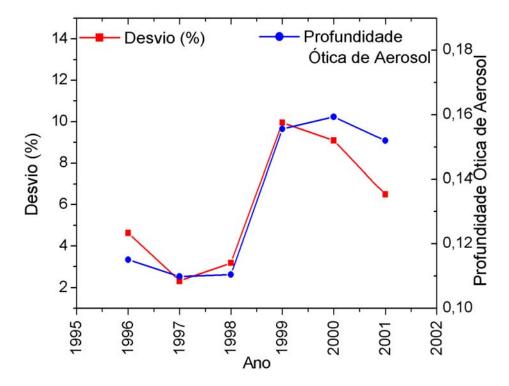


Figura 3. Comparação entre os desvios entre as radiações difusa referência e medida e a profundidade ótica de aerossóis (POA).

Na Fig. 1a pode-se observar a relação entre o desvio (D) e a transmissividade atmosférica (Kt), mostrando que ambos apresentam variações diretamente proporcionais, ou seja, o aumento na transmissividade atmosférica é acompanhado de um aumento no desvio e uma diminuição na transmissividade atmosférica é acompanhada de uma diminuição no desvio. Portanto, essa variação nos desvios indica que o método de medida da radiação solar difusa com anel de sombreamento é sensível às variações anuais da transmissividade atmosférica, apresentando forte dependência em função dos constituintes atmosféricos. Segundo Buie et al (2003), a interação da radiação com material particulado em suspensão na atmosfera, como é o caso dos aerossóis, aumenta à medida que se aumenta a transmissividade atmosférica, intensificando o efeito da anisotropia. Esse efeito é computado na forma de um fluxo radiativo denominado radiação circunsolar, o qual é obstruído pelo anel de sombreamento, justificando assim a subestimativa nas medidas e, consequentemente, o aumento nos desvios.

Verifica-se comportamento semelhante na comparação entre desvio e razão de insolação apresentada na Fig 2. A razão de insolação é um parâmetro que informa a porcentagem de horas de brilho solar ocorrido no dia. Segundo Vartiainen (1999), a anisotropia é maior quando ocorre aumento da luz solar direta. Nesse sentido, valores elevados de razão de insolação indicam desvios mais elevados em função do aumento da anisotropia, justificados pelas subestimativas da radiação difusa medida com o uso do anel de sombreamento.

A profundidade ótica de aerosol (POA) é uma medida quantitativa da extinção da radiação solar por espalhamento ou absorção de aerossóis. É, portanto, uma medida indireta da quantidade de aerossóis que compõem uma coluna padrão na atmosfera e interfere de forma significativa na distribuição de radiação na superfície. Nesse sentido, com os dados fornecidos pelo satélite Earth Probe Toms -GSFC TOMS group NASA, valores da profundidade ótica de aerossol medidas para um comprimento de onda de 380nm foram comparados com os desvios entre as radiações difusas referência e medida, como mostra a Fig. 3, onde pode-se observar evidências de uma correlação diretamente proporcional entre ambos.

Entre os anos de 1996 e 1998, os valores mais baixos da profundidade ótica de aerossol indicaram menores concentrações de aerossóis na atmosfera, resultando em desvios menores, visto que há diminuição do efeito da anisotropia. No entanto, entre os anos de1999 e 2001, o aumento da profundidade ótica de aerossol provocou um aumento do efeito da anisotropia, permitindo que o desvio seguisse a mesma tendência de aumento. Segundo Buie et al (2003), o aerossol, considerado uma partícula de dimensões relativamente grandes, ao interagir com a radiação, produz o efeito da anisotropia através do espalhamento Mie, o qual é caracterizado por um fluxo radiativo direcional maior no sentido espaço-superfície. Esse fluxo conhecido por radiação circunsolar é computado junto com a radiação direta, os quais são obstruídos pelo anel de sombreamento. Portanto, para atmosferas com maior concentração de aerossóis, o método de medida da radiação difusa com anel de sombreamento deixa de medir a radiação circunsolar, resultando numa medida subestimada, contribuindo assim para o aumento dos desvios.

A anisotropia depende das condições atmosféricas e seu efeito aumenta para atmosferas mais claras e limpas (Battles et al., 1995). Nesse sentido, os valores da transmissividade atmosférica foram agrupados em quatro intervalos discretos. O intervalo de interesse onde ocorre com maior freqüência a anisotropia da radiação foi o intervalo de Kt superior a 0,65, ou seja, com transmissão maior que 65%, classificado como cobertura de céu aberto. A figura 4 mostra o histograma de freqüências da transmissividade atmosférica Kt para cobertura de céu aberto.

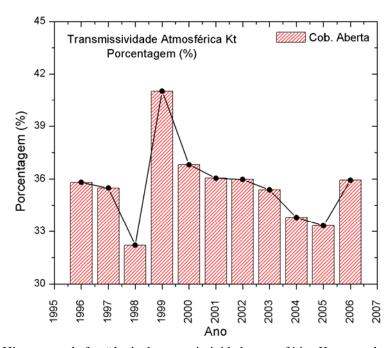


Figura 4. Histograma de freqüência da transmissividade atmosférica Kt para cobertura de céu aberto.

O aumento dos desvios na direção do aumento da transmissividade atmosférica significou um aumento do efeito da anisotropia, o qual é mais marcante à medida que a cobertura de céu torna-se mais límpida (Gueymard, 2001). Portanto, na cobertura de céu aberto, o anel de sombreamento bloqueia o efeito da anisotropia por meio da obstrução da radiação circunsolar, subestimando as medidas da radiação difusa. Pela Fig. 4 observa-se que os anos de 1999 e 2000 foram os que apresentaram a maior proporção de valores de Kt para cobertura de céu clara e límpida e, portanto, com maior probabilidade de ocorrência de aerossóis responsáveis pela aumento da anisotropia da radiação.

4. CONCLUSÃO

Os desvios entre as radiações difusa referencia e isotrópica medida pelo anel de sombreamento MEO variaram entre 1,5% e 10%, indicando que a anisotropia da radiação foi diferenciada para cada ano. Os menores desvios podem estar na mesma ordem de grandeza dos desvios experimentais, enquanto que os maiores desvios positivos indicaram que o método do anel de sombreamento é sensível à quantidade e distribuição dos constituintes atmosféricos, subestimando a medida da radiação solar difusa, principalmente para anos com elevado valor da transmissividade atmosférica. Resultados similares foram encontrados com relação à razão de insolação.

O aumento da profundidade ótica de aerossol indicou um aumento da quantidade de aerossóis dispersos na atmosfera, aumentando a anisotropia da radiação por espalhamento Mie. Constatou-se, portanto que, o anel de sombreamento bloqueou o efeito da anisotropia por meio da obstrução da radiação circunsolar, contribuindo assim para a subestimativa da radiação difusa medida e consequentemente para o aumento dos desvios.

REFERÊNCIAS

- Battles, F. J., olmo, F. J., Alados-Arboledas, L. 1995. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. Solar Energy, v.54, n.2, pp.105-114.
- Buie, D., Monger, A. G., Dey, C. J. 2003. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. Solar Energy, vol. 74, pp. 113-122.
- Dehne, K. 1984. 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.
- Drummond, A. J. 1956. On the measurements of sky radiation. Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie, v.7, pp.413-436.
- Grant, R. H. 1997. Shadow-band corrections for photosynthetically-active radiation under clear and overcast conditions, Agricultural and Forest Meteorology. Vol 87, pp. 213-222.
- Gueymard, C. A. 2001. Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. Solar Energy, vol. 71, n. 5, pp. 325-346.
- Ineichen, P., Gremaud, J. M., Guisan, O., Mermoud, A. 1984. Study of the corrective factor involved when measuring the diffuse solar radiation by use of the ring method. Solar Energy, vol. 32, n. 5, pp. 585-590.
- Kasten, F., Dehne, K., Brettschneider, W. 1983. Improvement of measurement of diffuse solar radiation. Solar radiation data, série F, n.2, pp.221-225, D. Redel, Dordrecht.
- Kudish, A. I., Ianetz, A. 1993. Analysis of diffuse radiation data for Beer Sheva: measured (shadow ring) versus calculated (global-horizontal beam) values. Solar Energy, vol. 51, n. 6, pp. 495-503.
- LeBaron, B. A., Peterson, W. A., Dirmhirn, I. 1980. Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. Solar Energy, vol. 25, pp. 1-13.
- López, G., Muneer, T., Claywell, R. 2004. Assessmente of four shadow band correction models using beam normal irradiance data from the United Kingdom and Israel. Energy Conversion and Management, vol. 45, pp. 1963-1979.
- Melo, J. M. D., Escobedo, J. F. 1994. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGÍAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY, vol. 1
- Miers, D. R. 2005. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality. Energy, v. 30, pp. 1517-1531.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J. 2002. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Boston, v. 19, pp. 698-708.
- Painter, H. E. 1981. The shadow ring correction for diffuse irradiance measurements. Solar Energy, vol. 26, pp. 361-363.
- Pollard, D. G. E Langevine, L. P. 1988. An anisotropic correction for diffuse irradiance measurements in Guyana. In: Proceeding of the 1988 Annual Meeting, M. J. Coleman (Ed.), pp. 238-243, ASES Cambridge.
- Stanhill, G. 1985. Observations of shadering correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea.Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol.111, pp.1125-30.
- Suehrcke, H., McCormick, P. G. 1988. The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. Solar Energy, v.40, n.5, p.423-430.
- Suehrcke, H., McCormick, P. G. 1989. The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day. Solar Energy, v.42, n.4, p.303-309.

Vartiainen, E. 1999. An anisotropic shadow ring correction method for horizontal diffuse irradiance measurements. Renewable Energy, vol. 17, pp. 311-317.

CORRELATION BETWEEN SOLAR RADIATION ANISOTROPY AND ATMOSFERIC TRANSMITTANCE, INSOLATION AND AEROSOL OPTICAL DEPTH

Abstract. The knowledge of the incident radiation on a place is very important in buildings applications, energy conversion and meteorology models. To ensure the solar radiation measures, the monitoring must be taken with quality. The diffuse solar radiation can be measured with the difference and the disk method, which are expensive due to the sun tracking mechanism required. An alternate and relatively inexpensive approach that is often employed is to use a pyranometer with an occulting ring to block the beam direct component from reaching the sensor (shadow ring method). However, this shading introduces errors that can markedly influence the accuracy of the measurements. Because of this error, isotropic and anisotropic factors need to be introduced to the diffuse irradiance readings. So, the deviation between the reference and isotropic diffuse are calculated and related in order to quantify the anisotropic factor. The deviation varies between 1,5% and 10% justified by the difference atmospheric conditions for each year. The results yields major deviations for greater atmospheric transmittance and greater amount of aerosol.

Key words: Diffuse Solar Radiation, Anisotropy, Atmospheric Transmittance, Aerosol.