

Duração do brilho solar obtido por diferentes sensores¹

José Francisco Alves do Carmo²; Magna Soelma Beserra de Moura³; Ana Paula Cardoso Guimarães⁴

¹ Trabalho produzido com resultados parciais no âmbito do projeto HELIOTERM.

² M.Sc. em Eng. Agrícola, Bolsista CNPq, Embrapa Semiárido, Fone: (87)3866-3659, j.francarmo@gmail.com

³ D.Sc., Eng^a. Agrônoma, Pesquisadora, Embrapa Semiárido, magna.moura@embrapa.br

⁴ D.Sc., Pesquisadora, Cepel Eletrobrás, pcardoso@cepel.br

RESUMO: Objetivou-se com este trabalho comparar o número de horas de brilho solar medido por meio do sensor de brilho solar CSD3 (n_{CSD3}) com dados obtidos por meio do heliógrafo de Campbell-Stokes (n_{CS}), relacionando ambos com a transmissividade atmosférica (Kt). Foram avaliados os dados de n_{CSD3} e de radiação solar global (Qg) referente ao período de outubro a dezembro de 2014, obtidos em uma estação solarimétrica. Em uma estação agrometeorológica convencional foram obtidos os dados de n_{CS} . Ambas as estações estavam localizadas na mesma área no Campo Experimental de Bebedouro da Embrapa Semiárido, em Petrolina, PE. A radiação solar incidente no topo da atmosfera (Qo) foi calculada por meio de relações empíricas com a latitude local, declinação solar e ângulo horário e a duração máxima do brilho solar (N) foi determinada pelo horário entre o nascer e o pôr do sol. Os resultados obtidos sugerem uma relativa subestimativa de n_{CSD3} com relação à n_{CS} , uma vez que o $Kt < 0,35$ (dia nublado) promoveu valor mínimo da fração de brilho solar $fN_{CS} = 0,11$ e $fN_{CSD3} = 0,05$, enquanto que em dia céu aberto ($Kt > 0,65$) ocorreu relação $fN_{CS} = 0,84$ e $fN_{CSD3} = 0,77$. Foi constatada correlação forte ($r^2 = 0,82$) entre n_{CSD3} e n_{CS} , sendo obtido o modelo polinomial quadrático de estimativa $n_{CSD3} = 0,1044 + 0,2587n_{CS} + 0,0532n_{CS}^2$. Conclui-se diante disso que, embora haja subestimativa de n_{CSD3} em relação à n_{CS} , em condições de céu aberto a diferença tende a ser menor do que em dias nublados.

PALAVRAS-CHAVE: insolação, instrumentação, transmissividade atmosférica

Sunshine duration obtained by different recorders

ABSTRACT: This work aimed to compare sunshine duration obtained by CSD3 sensor (n_{CSD3}) and “Campbell-Stokes” recorder (n_{CS}) and its correlation to the atmosphere transmissivity coefficient (Kt). Data of n_{CSD3} and solar global radiation (Rg) were obtained from October to December 2014 in a Solarimetric Station of CEPEL Eletrobras, while the records of sunshine duration from “Campbell-Stokes” were acquired at Agrometeorological Weather Station, being both located at the same site. The incoming solar radiation at the top of the atmosphere (Qo) was calculated from latitude, solar declination and hourly angle empirical relations. The maximum sunshine duration (N) was referred to the period between sunrise and sunset time. The results suggest a relative underestimation of n_{CSD3} with respect to n_{CS} , since the $Kt < 0.35$ (cloudy day) produced a minimum fraction of $fN_{CS} = 0.11$ and $fN_{CSD3} = 0.05$, while in full sunshine day ($Kt > 0,65$) produced maximum $fN_{CS} = 0.84$. and maximum $fN_{CSD3} = 0.77$. Also it was found a strong correlation ($r^2 = 0.82$) between n_{CSD3} and n_{CS} , and it was obtained the quadratic polynomial model: $n_{CSD3} = 0,1044 + 0,2587n_{CS} + 0,0532n_{CS}^2$. In conclusion, although there is always underestimation of n_{CSD3} for n_{CS} , over clearness sky days the difference tends to be lower than on cloudy days.

KEY WORDS: sunshine duration, insolation, atmospheric transmissivity

No Brasil, a energia elétrica tem como principal fonte as usinas hidrelétricas, seguida das termelétricas e, por fim, as usinas nucleares. Apesar de sua localização na região tropical, somente nas últimas décadas tem havido avanço na instalação de geradores eólicos, e mais recentemente, tem-se buscado utilizar a energia solar, mesmo que em pequenas proporções e em locais remotos, de difícil acesso às linhas de distribuição. Para uso dessas fontes renováveis de energia em maior escala, são necessários diversos estudos, dentre os quais aqueles sobre o potencial da região para a geração de energia com base na radiação solar, por exemplo. No Brasil, a avaliação da disponibilidade de radiação solar tem sido publicada no Atlas de Irradiação Solar no Brasil (Cole e Pereira, 1998), Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2000) e no Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2006). Os resultados destes trabalhos mostram que a radiação solar no país varia de 8 a 22 MJ m⁻² durante o dia, sendo que as menores variações ocorrem nos meses de maio a julho, quando a radiação varia entre 8 e 18 MJ m⁻². De acordo com Pereira et al. (2006), a variação da radiação solar à superfície nas diversas regiões do país depende, além de sua localização em relação ao equador, da composição atmosférica e das características climáticas, principalmente cobertura de nuvens e precipitação. Considerando tudo isso, o Nordeste brasileiro é a região de maior média anual de radiação solar (Pereira et al., 2006).

A atualização constante dos mapas da radiação é uma necessidade real, assim como manter o histórico das medidas de radiação, anteriormente estimadas com base na insolação medida à superfície ou temperatura. As mudanças das estações convencionais por outras automáticas, a avanço e a disponibilidade de sensores de radiação cada vez mais precisos traz questionamentos quanto à continuidade do banco de dados previamente estabelecido com base em equipamentos mecânicos. Por exemplo, as estações (agro) meteorológicas convencionais da rede brasileira utilizavam o heliógrafo de Campbell-Stokes para medir a insolação ou a duração de brilho solar (n_{CS}), em horas e décimos, e com estes dados era estimada a radiação solar à superfície, pois poucas estações dispunham de instrumentos para sua medida. Com isso, as estimativas da radiação solar ganharam destaque em vários trabalhos (Polo et al., 2015; Roman, et al., 2014), e recentemente, há certa necessidade de se estimar a duração de brilho solar (Vivar et al., 2014; Al-Mostafa et al., 2014).

Com a automação das estações meteorológicas, o heliógrafo de Campbell-Stokes torna-se obsoleto, e uma alternativa para sua substituição são os registradores automáticos do brilho solar, como o CSD3 da Kipp & Zonen ou BF5 da Delta-T, ou realizar o cálculo a partir de medidas, a cada minuto, da radiação direta acima de 120 W m⁻², conforme recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1986). De acordo com Massen (2011), as medidas de insolação realizadas pelo heliógrafo de Campbell-Stokes superestimam em até 10% as horas de brilho solar estimadas por sete métodos e pelo sensor CSD3. Por sua vez, Kerr e Tabony (2004) informam a superestimativa que o heliógrafo de Campbell-Stokes fornece nos dados de insolação quando comparado com sensores automáticos depende da estação do ano, variando de 7 a 20%. Com o sensor CSD3 revelando valores de insolação superiores ao heliógrafo, Matuszko (2015), também observou diferenças mensais variando de 3,5% a 26,7%. Essas variações dependem do local, da época do ano, da cobertura de nuvens, do tipo de nuvens, da ocorrência de chuvas, dentre outros aspectos.

Assim, objetivou-se com este trabalho comparar o número de horas de brilho solar medido por meio do sensor de brilho solar CSD3 (n_{CSD3}) com dados obtidos por meio do heliógrafo de Campbell-Stokes (n_{CS}), relacionando ambos com a transmissividade atmosférica (Kt) em Petrolina, PE.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados no presente estudo foram obtidos de uma estação solarimétrica pertencente ao Centro de Pesquisa em Energia Elétrica – CEPPEL/Eletronbras e de uma estação agrometeorológica,

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

ambas localizadas numa área do Campo Experimental de Bebedouro (09°09'S; 40°22'O; 365,5m), pertencente à Embrapa Semiárido, no município de Petrolina, PE. O clima local é classificado, segundo Köppen, como BSw^h, ou seja, semiárido, com média da temperatura do ar de 26,1 °C e da umidade relativa do ar igual a 65,2%, com total anual da precipitação de 503,1mm.

Os dados de radiação solar global (Q_g) e difusa (Q_{dif}) foram obtidos por meio de dois radiômetros modelo CMP21 (Kipp & Zonen B. V. Delft, Netherlands) instalados em um rastreador solar SOLYS 2 (Kipp & Zonen B. V. Delft, Netherlands), sendo que um deles foi mantido sombreado para obtenção da Q_{dif} . Ainda sobre o rastreador solar foi instalado um pireliômetro modelo CHP1 (Kipp & Zonen B. V. Delft, Netherlands), para a obtenção da radiação solar direta (Q_{dir}).

Os dados automáticos da insolação (n_{CSD3}) foram obtidos por meio de um sensor de brilho solar automático modelo CSD3 – Sunshine Duration Sensor (Kipp & Zonen B. V. Delft, Netherlands). Todos os registros foram realizados a cada segundo, com médias armazenadas a cada minuto em um datalogger CR 1000 (Campbell Scientific INC, Utah, USA).

Os dados de insolação pelo método convencional foram obtidos por meio de um heliógrafo tipo Campbell-Stokes (n_{CS}) da estação agrometeorológica convencional. Para fins de análise comparativa, os dados de insolação foram expressos em termos de fração diária de brilho solar (fN), conforme equação 1:

$$fN = n/N \quad (1)$$

em que fN é a fração diária de brilho solar, n é o número de horas de brilho solar à superfície (determinado pelo heliógrafo de CS e pelo CSD3) e N é a duração do dia.

A fração diária de brilho solar foi correlacionada com o coeficiente de transmissividade (Kt) que expressa a transmissividade atmosférica diária e determina as condições de nebulosidade, conforme equação 2:

$$Kt = Q_g/Q_o \quad (2)$$

onde Q_g é a radiação solar global medida à superfície e Q_o é a radiação solar teórica no topo da atmosfera, que foi obtida com base na latitude local, declinação solar e no ângulo horário, conforme segue (Vianello e Alves, 2006):

$$Q_o = 37,60(D/d)^2 (H \operatorname{sen}\varphi \operatorname{sen}\delta + \operatorname{cos}\varphi \operatorname{cos}\delta \operatorname{sen}H) \quad (3)$$

$$Q_o = 1367(d/D)^2 \quad (4)$$

sendo $(D/d)^2$ a distância relativa Terra-Sol obtida conforme Spencer (1971), em função do número do dia do ano (NDA):

$$(D/d)^2 = 1,000110 + 0,034221 \operatorname{cos}[2\pi (NDA - 1)/365] + 0,001280 \operatorname{sen}[2\pi (NDA - 1)/365] + 0,000719 \operatorname{cos}\{2[2\pi (NDA - 1)/365]\} + 0,000077 \operatorname{sen}\{2[2\pi (NDA - 1)/365]\} \quad (4)$$

O ângulo horário entre o nascer e pôr do sol (H) foi determinado utilizando-se a expressão:

$$H = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta) \quad (5)$$

em que φ é a latitude local e δ é a declinação solar calculada conforme equação proposta por Spencer (1971), descrita como segue:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos[2\pi(NDA - 1)/365] + 0,070257 \sin[2\pi(NDA - 1)/365] \quad (6)$$

$$- 0,0065758 \cos\{2[2\pi(NDA - 1)/365]\} + 0,000907 \sin\{2[2\pi(NDA - 1)/365]\}$$

$$- 0,002697 \cos\{3[2\pi(NDA - 1)/365]\}$$

$$+ 0,001480 \sin\{3[2\pi(NDA - 1)/365]\}$$

As medidas em campo dos sensores automáticos foram realizadas a cada minuto, e computados os totais diários da insolação, que foram comparados com os dados diários obtidos pelo heliógrafo de Campbell-Stokes e com as estimativas por meio de equações foram realizadas para o período de outubro a dezembro de 2014.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados os dados médios, a cada minuto, da radiação solar global (Q_g), direta (Q_{dir}) e difusa (Q_{dif}), para o período de outubro a dezembro de 2014. Observa-se que a Q_g máxima foi de $830,98 \text{ W m}^{-2}$ por volta do meio dia local (12h00). Entretanto, não houve simetria ao redor do meio dia da Q_{dir} e Q_{dif} . Verifica-se que o máximo da radiação difusa ocorreu na primeira metade da manhã, quando em geral, ocorre maior incidência de nuvens na região. Pode-se identificar ainda, que a curva da Q_{dir} teve uma leve redução nesse horário. Por outro lado, na segunda metade do período diurno, à tarde, há maior Q_{dir} em compensação com menor Q_{dif} . O valor máximo para a Q_{dir} foi $582,83 \text{ W m}^{-2}$ e da Q_{dif} foi $315,86 \text{ W m}^{-2}$. Em média, os dias de outubro a novembro de 2014 apresentaram total de $20,52 \text{ MJ m}^{-2}$ de Q_g .

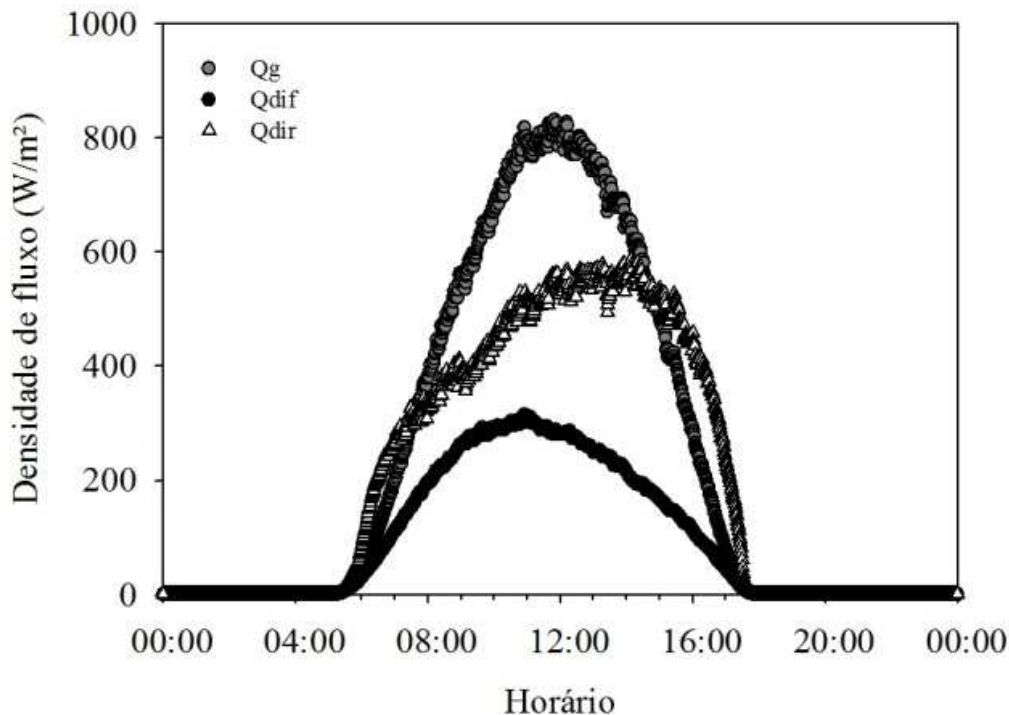


Figura 1. Densidade de fluxo de radiação solar global (Q_g), direta (Q_{dir}) e difusa (Q_{dif}) média para o período de outubro a dezembro de 2014 em Petrolina, PE.

A fração diária de brilho solar foi calculada considerando as medidas da insolação pelo heliógrafo de Campbell-Stokes (fN_{CS}) e pelo sensor automático CSD3 (fN_{CSD3}). Esses dados foram comparados com o coeficiente de transmissividade (Kt), que expressa a transmissividade atmosférica diária e determina as condições de nebulosidade. Conforme pode-se observar na Figura 2, para uma mesma condição de nebulosidade (Kt), a fração fN_{CS} apresentou valores mais elevados do que fN_{CSD3} , indicando que os maiores valores de brilho solar à superfície foram medidos pelo heliógrafo de Campbell-Stokes. Para $Kt < 0,35$ (dias nublados), verifica-se que ocorreu valor mínimo da fração de brilho solar $fN_{CS} = 0,11$ e de $fN_{CSD3} = 0,05$, enquanto que em dias de céu aberto, com $Kt > 0,65$ ocorreu relação $fN_{CS} = 0,84$ e $fN_{CSD3} = 0,77$ (Figura 2). Diante disso, embora haja subestimativa de

n_{CSD3} em relação à n_{CS} , em condições de céu aberto a diferença tende a ser menor do que em dias nublados. A relação entre o Kt e fN_{CS} apresentou coeficiente de correlação igual a 0,80, enquanto com fN_{CSD3} o r^2 foi igual a 0,88 (Figura 2).

Foi constatada correlação forte ($r^2 = 0,82$) entre n_{CSD3} e n_{CS} (Figura 3) sendo obtido o modelo polinomial quadrático de estimativa $n_{CSD3} = 0,1044 + 0,2587n_{CS} + 0,0532n_{CS}^2$.

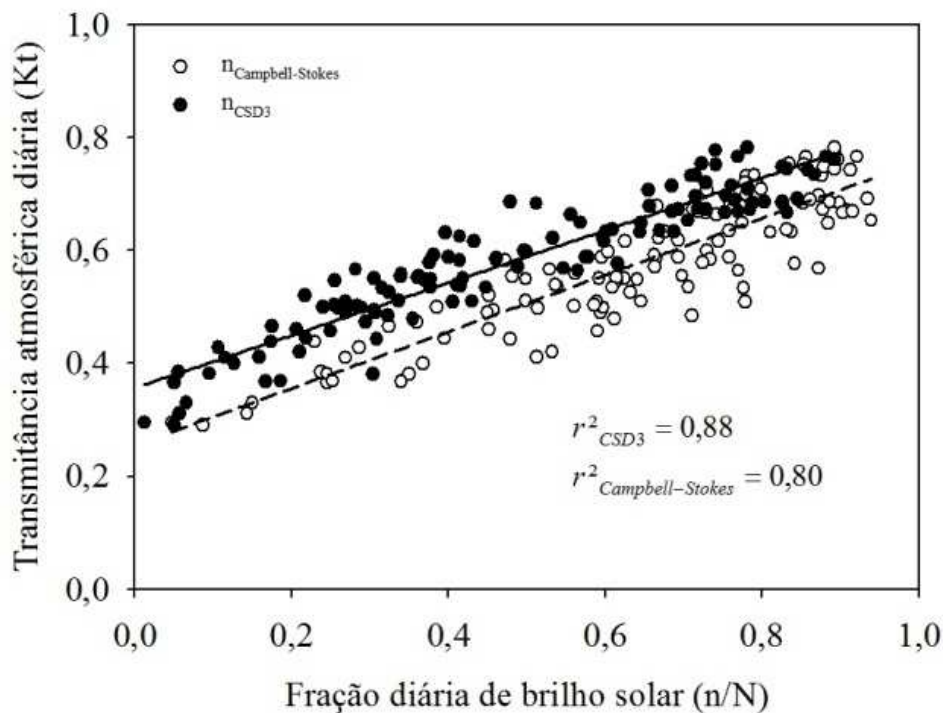


Figura 2. Relação entre a fração diária de brilho solar (n/N) considerando as medidas da insolação pelo heliógrafo de Campbell-Stokes (fN_{CS}) e pelo sensor automático CSD3 (fN_{CSD3}) com o coeficiente de transmissividade (Kt), para o período de outubro a dezembro de 2014, em Petrolina, PE.

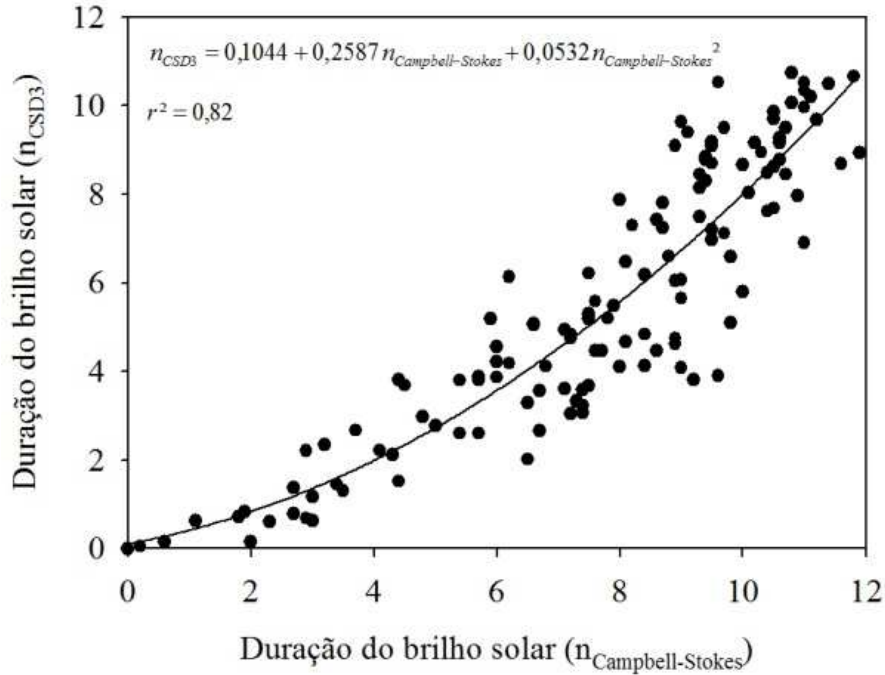


Figura 3. Duração do brilho solar medida pelo heliógrafo de Campbell-Stokes (n_{CS}) e pelo sensor automático CSD3 (n_{CSD3}) para o período de outubro a dezembro de 2014, em Petrolina, PE.

Os resultados obtidos no presente estudo estão de acordo com Massen (2011), que verificaram que o heliógrafo de Campbell-Stokes promove uma sistemática superestimativa das horas de brilho solar. Ao contrário, Matuszko (2015) observou que duração média de brilho solar anual registrada pelo CSD3 para o período de 2007 a 2012 foi de 164 h ou 10,4 % maior do que usando o heliógrafo Campbell-Stokes, sendo as maiores diferenças observadas nos meses de maior cobertura de nuvens. Contrastando com este autor, Kerr e Tabony (2004) também verificaram que o heliógrafo Campbell-Stokes superestima as medidas de brilho solar à superfície em comparação com registradores automáticos. Segundo estes autores, isso ocorre principalmente à forte queima do diagrama do heliógrafo em dias de céu limpo, sem nebulosidade, como acontece na maior parte dos dias no semiárido. Não foram identificados muitas referências sobre este tipo de estudo, porém, todos sugerem haver necessidade de acompanhamento por um período de tempo maior do que o mostrado no presente estudo, a fim de que a série histórica de dados de insolação possa ser comparada com os sensores mais modernos e automáticos. Matuszko (2015) e Kerr e Tabony (2004) sugerem que sejam identificadas as relações mensais entre os sensores de medida da insolação.

CONCLUSÕES

- Foi constatada forte correlação entre as medidas de brilho solar realizadas pelo heliógrafo Campbell-Stokes com o sensor automático CSD3, sendo obtido o modelo polinomial quadrático de estimativa $n_{CSD3} = 0,1044 + 0,2587n_{CS} + 0,0532n_{CS}^2$;
- Há subestimativa do brilho solar medido pelo sensor automático CSD3, que tende a ser menor em condições de céu aberto;
- Este estudo precisa ser continuado a fim de se saber o comportamento do brilho solar medidos por sensores automáticos, a fim de que os novos registros possam ser melhor comparados com a série histórica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-MOSTAFA, Z. A. et al. Sunshine-based global radiation models: A review and case study. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 209–216, 2014.
- COLLE, S.; PEREIRA, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
- KERR, A.; TABONY, R. Comparison of sunshine recorded by Campbell–Stokes and automatic sensors, **Weather**, v. 59, p. 90–95, doi:10.1256/wea.99.03, 2004.
- MASSEN, F. Sunshine duration from pyranometer readings. Disponível em: < http://meteo.lcd.lu/papers/sunshine_duration_from_pyranometer/Sunshine_duration_from_pyranometer_readings.pdf>. Acesso em 28/06/2015.
- MATUSZKO, D. A comparison of sunshine duration records from the Campbell-Stokes sunshine recorder and CSD3 sunshine duration sensor, **Theor. Appl. Climatol.**, v. 119, p. 401-406, doi:10.1007/s00704-014-1125-z, 2015.
- PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. Disponível em: < http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 28/06/2015.
- POLO, J. et al. Spatial variability and clustering of global solar irradiation in Vietnam from sunshine duration measurements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 326–1334, 2015.
- ROMAN, R. et al. Reconstruction of six decades of daily total solar shortwave irradiation in the Iberian Peninsula using sunshine duration records. **Atmospheric Environment**, v. 99, p. 41-50, 2014.
- TIBA, C. Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
- VIVAR, M. et al. Estimation of sunshine duration from the global irradiance measured by a photovoltaic silicon solar cell. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 26–33, 2014.
- WMO. Revised instruction manual on radiation instruments and measurements WMO/TD - No, 149, ed. C. Frohlich and J. London (World Climate Research Programme publications series 7) WMO - Geneva Switzerland, 1986. Disponível em: < http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_149.pdf>. Acesso em:28/06/2015.
- WOOD, J., MUNEEER, T., AND KUBIE, J.: Evaluation of a new photodiode sensor for measuring global and diffuse irradiance, and sunshine duration, *J. Sol. Energ.-T ASME*, 125, 43–48, doi:10.1115/1.1531149, 2003.