

ANÁLISE PRELIMINAR DO “OFFSET” TÉRMICO EM PIRANÔMETROS SOB DIFERENTES CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

Rafael Haag – rafael.haag@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br
Labsol, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Thomas Stoffel – thomas.stoffel@nrel.org
Solar Radiation Research Laboratory, NREL.

Resumo. Medidas de irradiância solar global realizadas na superfície terrestre geralmente apresentam valores menores ($10\text{--}25\text{ Wm}^{-2}$) que a estimada por modelos de transferência radiativa. Medidas efetuadas com piranômetros revelam que o offset térmico noturno além de presente no período diurno, é consideravelmente maior em dias de céu limpo, sendo responsável pela subestimativa da irradiância solar global e também da parcela difusa. Isto é causado pelo gradiente térmico no instrumento que origina trocas radiantes entre a superfície do sensor e as cúpulas. Estes erros de offset térmico são proporcionais à diferença entre a temperatura do sensor e cúpula na quarta potência. Este trabalho apresenta resultados preliminares sobre o offset térmicos de piranômetros. A relação entre o offset térmico noturno e a radiação infravermelha líquida é efetuada utilizando dados obtidos por um pirgeômetro Kipp & Zonen modelo CNR1. Também é realizada e medida do offset térmico em dois locais com distintas condições atmosféricas, variando desde atmosferas sem nuvens e com baixa umidade até atmosfera totalmente encoberta e alta umidade relativa. Todas as medidas foram efetuadas nos meses de junho e dezembro de 2009 no Solar Radiation Research Laboratory (SRRL) pertencente ao National Renewable Energy Laboratory (NREL) em Golden, CO e no Laboratório de Energia Solar (Labsol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS.

Palavras-chave: Radiação Solar, Radiometria, Piranômetro, Offset Térmico.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem se observado uma maior demanda por dados sobre o potencial solar em diversos países. Geralmente estes dados são obtidos através de duas formas; por satélites geoestacionários ou redes de radiômetros em superfície. A utilização de dados a partir de satélites permite uma ampla cobertura espacial, no entanto, seus resultados exigem sofisticados modelos numéricos de transferência radiativa na atmosfera e dados precisos sobre o perfil de distribuição de diversos parâmetros atmosféricos. Por outro lado, dados fornecidos por radiômetros em superfície possibilitam grande resolução temporal e *a priori* são independentes de outros parâmetros sendo, portanto, valores absolutos. Normalmente empregam-se piranômetros térmicos para a medida da componente global da irradiância solar e adaptam-se anéis de sombra para a medida da componente difusa. No entanto, nos últimos anos, vários trabalhos indicam a possível ocorrência de erros na metodologia empregada, principalmente para a medida da componente global e difusa. Estes erros possuem diversas origens, entre elas a resposta térmica do sensor (Wardle e McKay, 1984, Zerlaut, 1983, 1986), erro na resposta cosseno (Lester e Myers, 2006 e Michalsky et al., 1995) e *offset* térmico (Bush, 2000 e Dutton et al., 2001).

Estas incertezas na medida da irradiância solar na superfície terrestre passaram a ter grande importância a partir das duas últimas décadas com o surgimento de inúmeros projetos que tentam correlacionar as mudanças climáticas globais e variações da intensidade da radiação solar na atmosfera terrestre e concentração de alguns componentes atmosféricos, como aerossóis, vapor de água e nuvens. Vários modelos numéricos apontam para um erro sistemático de medida da componente global da ordem de $10\text{--}25\text{ W/m}^2$ (Philipona 2002; Bush et al., 2000; Valero e Bush, 1999; Pilewsky e Valero, 1995) quando efetuada por piranômetros térmicos, mais especificamente o modelo Eppley PSP. Haag (2007) também revela uma subestimativa sistemática da irradiância global medida por um piranômetro Eppley PSP em relação aos valores previstos por um modelo de transferência radiativa.

Cess et al. (2000) observou que valores experimentais para a componente difusa da irradiância solar em dias de céu limpo obtidos no laboratório SGP (*Southern Great Plains*) em Oklahoma, EUA apresentavam magnitudes menores que as previstas por modelos numéricos de transferência radiativa apenas originada devido ao espalhamento Rayleigh. Isto representa uma impossibilidade física.

Alguns autores desenvolveram técnicas para corrigir ou compensar estas incertezas experimentais (Lester e Myers, 2006; Reda et al., 2005). Uma análise dos resultados experimentais e os erros associados, fornecidos por vários instrumentos, foi apresentada por Gueymard e Myers, (2009). Este trabalho confirma a subestimativa da componente global e difusa por piranômetros térmicos, principalmente o modelo Eppley PSP e mostra que há uma forte dependência do desvio dos valores da irradiância medida em função de fatores climáticos.

Tradicionalmente, a componente global da irradiância solar é obtida através de piranômetros. Em função dos erros de medidas já exemplificados, vários programas e instituições de referência para a radiometria em superfície (por exemplo, o *Baseline Surface Radiation Network* ou BSRN), preconizam que a medida da componente global da irradiância solar seja obtida indiretamente, através de um pireliômetro de referência destinado à medida da componente direta normal e um piranômetro com baixo *offset* térmico dotado de disco de sombra para a medida da componente difusa horizontal. Estas duas componentes medidas são adicionadas para a obtenção da componente global.

2. OFFSET TÉRMICO EM PIRANÔMETROS

O principal componente de um radiômetro (instrumento destinado à medida da energia radiante do Sol ou outra fonte qualquer) é o sensor, também denominado de detector. Os detectores utilizados em radiômetros solares são classificados como calorimétrico, termomecânico, termoelétrico e fotoelétrico.

A irradiância solar global é medida através de radiômetros com campo de visão hemisférico (dentro de um ângulo sólido de $2\pi sr$). Este tipo de instrumento é chamado de piranômetro. Este instrumento também pode ser utilizado em posição inclinada e neste caso recebe uma parte da radiação refletida pelo solo. Diferentemente dos pireliômetros que utilizam tubos colimadores, os piranômetros possuem seus sensores instalados de tal modo que estes sejam capazes de receber a irradiância solar emitida por todo o hemisfério celeste.

Os sensores termoelétricos, normalmente usados em piranômetros térmicos, são constituídos por um par metálico de materiais distintos com os seus extremos conectados. Quando há uma diferença de temperatura entre as duas junções, surge uma força eletromotriz, que é proporcional à diferença de temperatura e depende das características dos metais utilizados. Instrumentos destinados à medida da radiação solar que adotam estes tipos de sensores geralmente empregam uma combinação de cobre-constantan, sendo que apenas uma das junções é exposta ao feixe solar e a outra é conectada ao corpo metálico do instrumento. A tensão presente nos terminais de um sensor termoelétrico é muito baixa, por isso, costuma-se associar vários sensores em série para obtenção de uma tensão mais elevada. Este arranjo de vários sensores termoelétricos é denominado de termopilha. Esta termopilha nos piranômetros normalmente empregados para medidas de radiação solar consiste de aproximadamente 40 sensores termoelétricos com resposta espectral entre 0,3 – 100 μm . A junção quente possui a mesma temperatura do absorvedor preto e a junção fria assume a temperatura do corpo metálico. Na ausência de radiação incidente e gradiente térmico, as temperaturas do absorvedor e do corpo do instrumento são idênticas e a tensão presente na saída do piranômetro é nula. Na existência de uma diferença de temperatura entre o corpo do instrumento e o sensor, surge uma tensão de saída que será proporcional ao gradiente térmico. Esta diferença de temperatura ocorre quando há a incidência de radiação solar sobre o absorvedor e este sofre um acréscimo de temperatura ou quando o absorvedor apresentar uma temperatura inferior ao corpo do instrumento, neste caso a tensão será negativa.

O absorvedor troca radiação infravermelha com o próprio corpo do instrumento e com a cúpula interna de vidro. Também há troca de radiação com a cúpula externa, em regiões onde a cúpula interna não é opaca. Haeffelin et al., (2001), determinou a emissividade integrada no espectro de emissão de um corpo negro de 300 K para a cúpula de vidro interna com espessura de cerca de 1 mm como aproximadamente 0,8 e 0,9 para espessura de 2 mm. A refletividade hemisférica interna é próxima de 0,1 para cúpula com espessura de 2 mm e pode ser desprezada. Uma cúpula interna com espessura de 1 mm possui uma pequena transmitância e pode transferir energia entre o absorvedor e a cúpula externa. A emissividade da base metálica em 300 K é pequena, da ordem de 0,1 e segundo Haeffelin et al., (2001), pode ser desprezada. Deste modo o *offset* térmico existente nos piranômetros pode ser atribuído aos seguintes fatores: (1) a cúpula possui uma pequena capacidade térmica o que possibilita uma rápida variação de temperatura, (2) a cúpula possui uma pequena condutibilidade térmica que cria um pequeno gradiente de temperatura na região em contato com a base do piranômetro, (3) a cúpula possui um fator de visão com o céu unitário e uma emissividade hemisférica na região do infravermelho próxima de 0,9, (4) a cúpula é transparente em uma larga região do espectro (0,3 – 2,5 μm) e por último (5) o piranômetro permanece em regime térmico transiente em função das trocas térmicas na superfície originada pela temperatura externa, vento, precipitação entre outras.

O piranômetro Eppley, modelo PSP (*Precision Spectral Pyranometer*), é conhecido por apresentar *offset* térmico resultante do balanço térmico entre as cúpulas de vidro e o detector do instrumento (Haeffelin et al., 2001; Bush et al., 2000; Dutton et al., 2001). Este *offset* térmico é facilmente observado à noite como uma tensão residual negativa. Na ausência de radiação solar incidente no detector o esperado seria uma resposta nula de tensão, no entanto, surge um valor negativo que varia em função do balanço térmico resultante entre o detector e as cúpulas de vidro.

Vários autores propõem metodologias para caracterização da medida do *offset* térmico em piranômetros. Bush et al., (2000), caracterizou o *offset* térmico de piranômetros Eppley PSP medindo as temperaturas da cúpula externa e do corpo do instrumento. Formulando uma relação entre a temperatura da cúpula e do corpo do instrumento durante a noite, Bush et al., (2000) estimou o *offset* durante o dia para um piranômetro PSP não ventilado entre valores próximos de zero para uma atmosfera coberta por nuvens e próximos de $-20 W/m^2$ para uma atmosfera sem a presença de nuvens.

2.1 Balanço de energia em piranômetros térmicos

A seguir é desenvolvida uma breve descrição do balanço de energia em um piranômetro térmico. Uma abordagem completa sobre o assunto é vista em Fairall et al., (1998). Nesta simplificação adotada, assume-se que o piranômetro

encontra-se em equilíbrio térmico e desprezam-se as respostas espectrais dos materiais envolvidos. É conveniente dividir a irradiância em duas componentes distintas, ou seja, radiação de onda longa (L) e onda curta (S). R_{\uparrow} e R_{\downarrow} representam as irradiâncias dirigidas para cima e para baixo respectivamente no interior da cúpula de vidro. T_d , T_s e T_c são as temperaturas da cúpula, sensor e corpo do instrumento respectivamente.

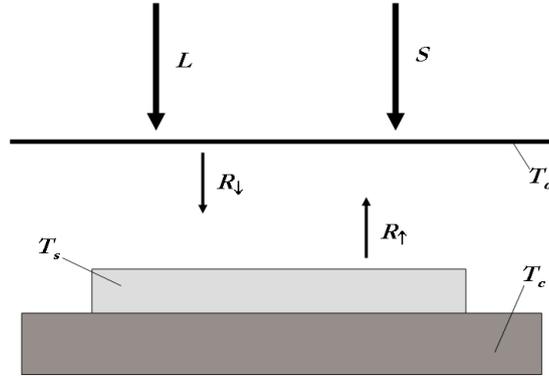


Figura 1 – Diagrama simplificado do piranômetro Eppley PSP para cálculo do balanço de energia. L é radiação de onda longa, S representa a parcela de onda curta. R_{\uparrow} e R_{\downarrow} indicam as irradiâncias dirigidas para cima e para baixo respectivamente no interior da cúpula de vidro. T_d , T_s e T_c são as temperaturas da cúpula, sensor e corpo do instrumento respectivamente.

O equacionamento simplificado para o balanço de energia é assim definido:

$$R_{\uparrow} - R_{\downarrow} = k\alpha\Delta \quad (1)$$

$$\varepsilon_s T^4 + \rho_s R_{\downarrow} = R_{\uparrow} \quad (2)$$

$$S_{\tau_{sw}} + L_{\tau} + \varepsilon_d \sigma T_{d^4} + \rho_d R_{\uparrow} = R_{\downarrow} \quad (3)$$

$$\varepsilon_s + \rho_s = 1 \quad (4)$$

$$\tau + \varepsilon_d + \rho_d = 1 \quad (5)$$

$$T_c + \alpha\Delta V = T_s \quad (6)$$

onde k representa a condutibilidade térmica do sensor ($W m^{-2} K^{-1}$), $\alpha \approx 694 K V^{-1}$ (Payne e Anderson, 1999), ΔV é a tensão fornecida pela termopilha, σ é a constante de Stefan–Boltzmann ($5,6697 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), τ , ε , ρ , indicam as transmitâncias, emitâncias e refletâncias, respectivamente e estão referidas em relação ao sensor ou cúpula quando adicionados os subíndices s e d , respectivamente. τ_{sw} é a transmitância de onda curta da cúpula (muito próxima de 1 para piranômetros e quase 0 para pirgeômetros). Resolvendo as Eq. (1)-(6), é obtida a seguinte relação:

$$S = \left(\frac{1 - \rho_d}{\varepsilon_s} + \rho_d \right) k\alpha\Delta + \varepsilon_d (\sigma T_{s^4} - \sigma T_{d^4}) + \tau (\sigma T_{s^4} - L) \quad (7)$$

Na Eq. (7) o primeiro termo do lado direito da equação representa o sinal de saída do piranômetro em função da radiação incidente. O segundo termo está relacionado ao *offset* térmico e o último termo representa a influência das trocas radiantes em onda longa entre o piranômetro e o meio.

Bush et al., (2000) a partir da Eq. (7) propuseram uma expressão simplificada para determinação do *offset* térmico (ΔF), como:

$$\Delta F = a(T_d^4 - T_s^4) - b, \quad (8)$$

onde,

$$a = -\varepsilon_d \tau \quad (9)$$

$$b = -\tau(\sigma T_s^4 - L), \quad (10)$$

sendo a uma constante e b uma variável que depende da temperatura do sensor e da radiação de onda longa.

3. VARIAÇÃO *OFFSET* TÉRMICO EM DIFERENTES PIRANÔMETROS E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS.

Através da Eq. (8), parece imediato que o valor do *offset* térmico pode ser compensado, caso sejam conhecidos os valores de T_d , T_s e L . No entanto, as medidas destes parâmetros são de difícil obtenção como mostram Bush et al., (2000), Fairall et al. (1998) e Amauri et al. (2006), por exemplo. Gueymard e Myers (2009) enfatizam que a correção do *offset* térmico *a posteriori* através do valor residual da radiação de onda longa medida por um pirgeômetro depende das características individuais dos piranômetros e da climatologia local. Vários autores (Dutton et al., (2001); Younkin and Long (2002) e Bush et al., (2000)) analisam a variação do *offset* térmico, principalmente no modelo Eppley PSP, em função dos valores locais da radiação de onda longa. Long et al., (2001), através de medidas obtidas durante 18 meses, aponta para uma distribuição bimodal na relação entre o fluxo de radiação em onda longa medida por um pirgeômetro e *offset* térmico noturno em piranômetros. Esta relação bimodal segundo Long et al., (2001) possui íntima correlação com a umidade relativa local. Valores altos de umidade relativa ($RH > 80\%$) favorecem a deliquescência de partículas higroscópicas e a formação de neblina e reduzem o efeito de *offset* térmico.

Para estimar o comportamento do *offset* térmico sob diferentes condições climáticas, foram efetuadas medidas do valor residual noturno fornecidos por diferentes tipos de piranômetros térmicos no laboratório SRRL (*Solar Radiation Research Laboratory*) em Golden, Colorado ($39,74^\circ$ N, $105,18^\circ$ W, elevação de 1828 m) pertencente ao NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) visto na Fig. 2 e no LABSOL (Laboratório de Energia Solar) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul ($30,07^\circ$ S, $51,12^\circ$ W, elevação de 10 m) mostrado na Fig. 3. Também foi realizada a análise do comportamento do *offset* térmico em função da radiação de onda longa residual medida por um pirgeômetro Kipp & Zonen modelo CNR1 no laboratório SRRL/NREL.



Figura 2 – Localização e imagem dos radiômetros no laboratório SRRL/NREL em Golden, Colorado, USA.

Laboratório de Energia Solar,
Porto Alegre, RS

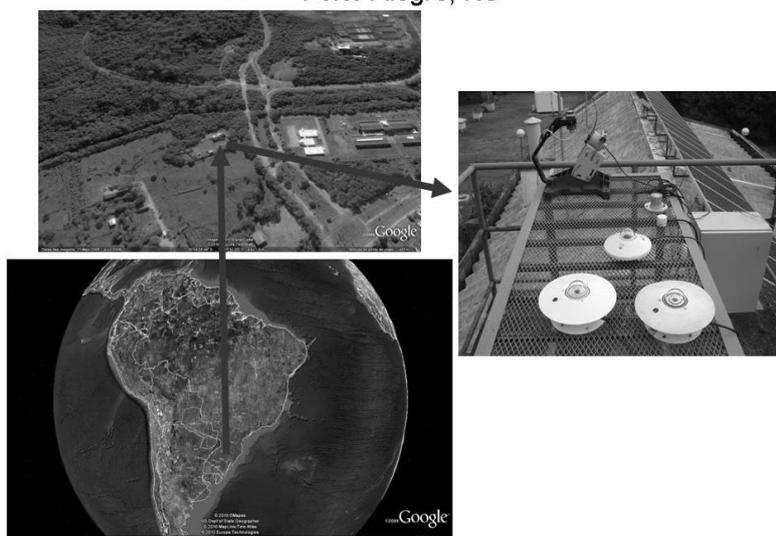


Figura 3 – Localização e imagem dos radiômetros no LABSOL (Laboratório de Energia Solar) na UFRGS em Porto Alegre, RS.

O laboratório SRRL/NREL coleta de forma contínua e simultânea dados de aproximadamente 100 radiômetros e outros instrumentos meteorológicos. Como mostrado na Fig. 2, a base de coleta de dados possui um horizonte aberto em todas as direções. As condições geográficas e climáticas favorecem as medidas de radiação solar por apresentarem uma atmosfera limpa e estável durante grande parte do ano. O LABSOL/UFRGS está localizado em um vale e possui limitações de horizonte em algumas direções. Como pode ser visto na Fig. 4, as características climáticas entre as duas regiões de observação são bastante distintas. O laboratório SRRL/NREL apresenta valores de umidade relativa abaixo de 50 % na maior parte do ano, enquanto o LABSOL/UFRGS possui valores de umidade relativa média mensal ao redor de 75 %. A temperatura média mensal em Golden, CO durante a maior parte do ano é menor que 10 °C, em Porto Alegre oscila entre 14 e 25 °C.

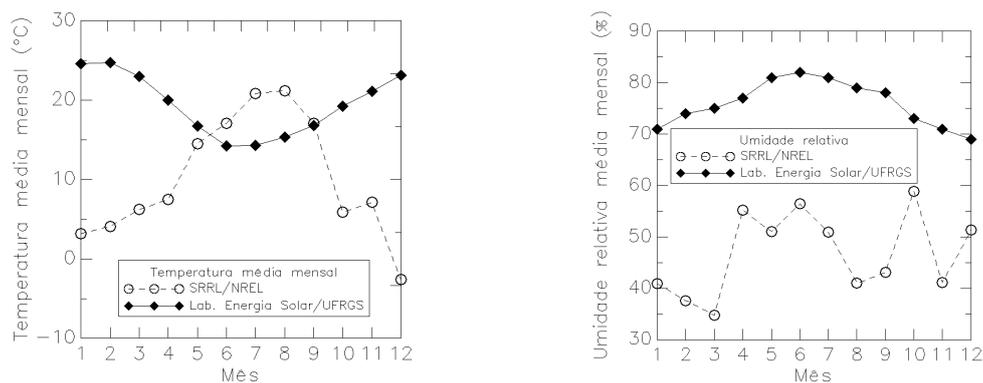


Figura 4 – Valores médios mensais para temperatura (gráfico à esquerda) e umidade relativa (gráfico à direita) no SRRL/NREL em Golden, CO e no Laboratório de Energia Solar/UFRGS em Porto Alegre, RS.

3.1 Variação do *offset* térmico em função de parâmetros climáticos

A Fig. 5 apresenta a variação do *offset* térmico para três modelos de piranômetros em função do saldo radiante em infravermelho (IR) medido pelo pirgeômetro Kipp & Zonen CNR1 no laboratório SRRL/NREL durante o período noturno no mês de junho de 2009. O histograma mostrando a distribuição destes resultados é visto na Fig. 6. Observa-

se que o modelo PSP da Eppley apresenta os valores mais altos de *offset* térmico entre os três modelos analisados. O piranômetro TSP-700 da empresa YES, possui um valor médio de *offset* térmico abaixo de 2 W/m^2 neste período, no entanto, este piranômetro fornece esporadicamente valores maiores que 12 W/m^2 mesmo em condições de baixo valor de irradiância IR residual. O modelo CM22 da Kipp & Zonen claramente apresenta os melhores resultados. O valor médio de *offset* térmico é próximo de 1 W/m^2 e 99% dos valores medidos estão abaixo de 2 W/m^2 durante o período analisado.

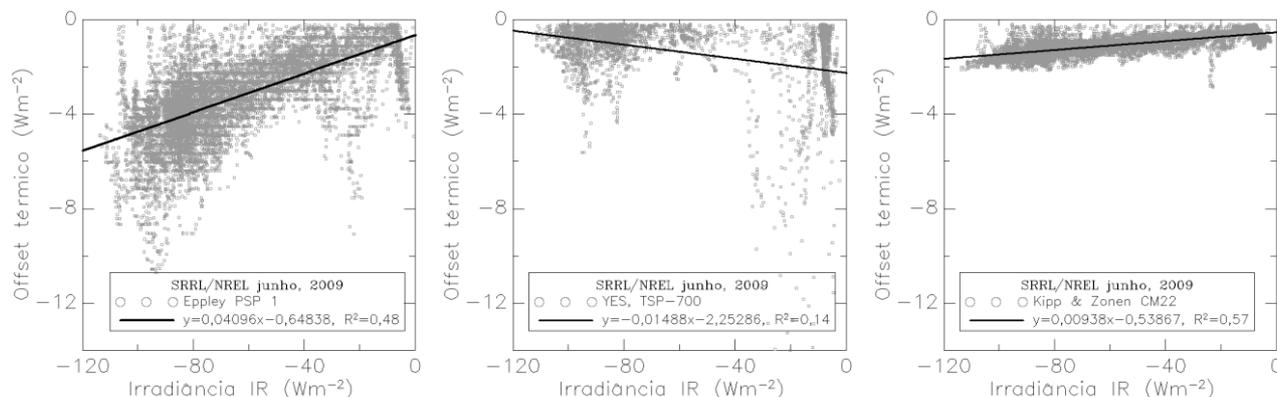


Figura 5 – *Offset* térmico noturno de três modelos de piranômetros durante o mês de junho 2009 no SRRL/NREL em função do saldo de irradiância infravermelha. Na esquerda os resultados para o modelo PSP da Eppley, no centro o modelo TSP-700 da YES e na direita os resultados do modelo CM22 da Kipp & Zonen.

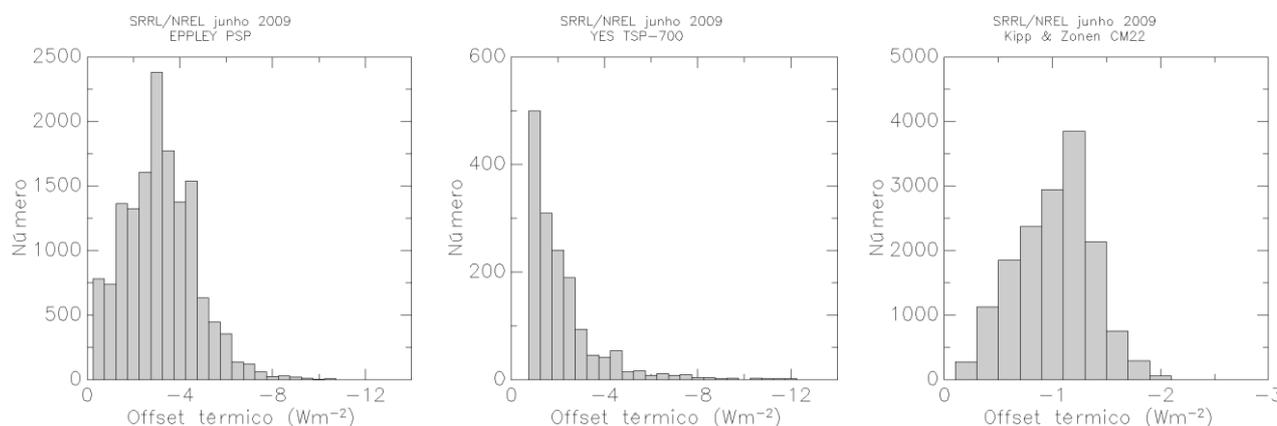


Figura 6 – Histograma mostrando a distribuição de ocorrência para os valores de *Offset* térmico noturno de três modelos de piranômetros durante o mês de junho 2009 no SRRL/NREL. Na esquerda os resultados para o modelo PSP da Eppley, no centro o modelo TSP-700 da YES e na direita os resultados do modelo CM22 da Kipp & Zonen.

Observa-se na Fig. 7 o histograma de distribuição dos valores de *offset* térmico obtidos durante o período noturno no mês de dezembro de 2009 no LABSOL/UFRGS. São mostrados os resultados para os modelos PSP da Eppley, CM11 da Kipp & Zonen e D3B da indústria Maxwell.

Os piranômetros PSP e CM11 mostram um *offset* térmico médio próximo de 4 W/m^2 durante o período analisado. O histograma de valores para o *offset* térmico do modelo D3B produzido pela empresa brasileira Maxwell (<http://maxwell.studiogt.com.br>), revela uma distribuição bastante anormal em relação aos demais modelos. Este piranômetro do tipo *black & white* possui uma única cúpula de acrílico e cinco setores brancos e pretos. Gueymard e Myers (2009) descrevem que em condições de céu totalmente nublado, que está associado a baixos valores de *offset* térmico, piranômetros preto e branco apresentam resultados bastante confiáveis e comparáveis com o padrão de medidas do laboratório NREL, mas em situações de céu limpo, o piranômetro modelo 8-48 da Eppley, por exemplo, sobre-estima a irradiância entre ≈ 4 -7%.

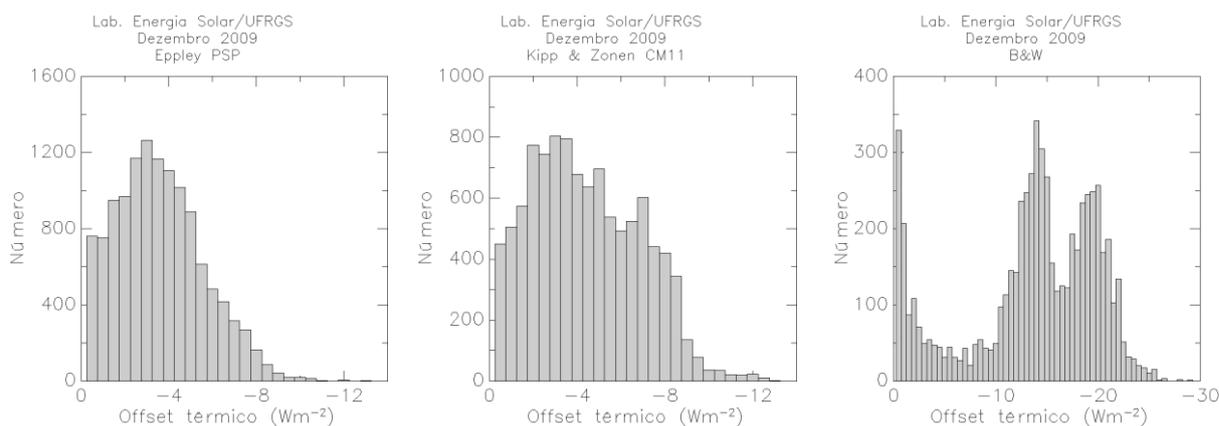


Figura 7 – Histograma da distribuição de ocorrência para os valores de *Offset* térmico noturno para três modelos de piranômetros durante o mês de dezembro 2009 medidos no LABSOL/UFRGS. São mostrados os resultados para os modelos PSP da Eppley na esquerda, CM11 da Kipp & Zonen no centro e no gráfico da direita o modelo D3B da indústria Maxwell.

Os autores suspeitam que esta variação possua origem no descasamento espectral entre os segmentos pretos e brancos e também possa ser causada por desvios na resposta azimutal, tempo de resposta do instrumento e efeito do vento em razão deste instrumento possuir apenas uma cúpula de vidro. No presente caso, as possíveis causas para o elevado valor de *offset* térmico do piranômetro D3B não são conhecidas. Além das origens descritas por Gueymard e Myers (2009), a cúpula de acrílico empregada neste instrumento pode contribuir de forma significativa.

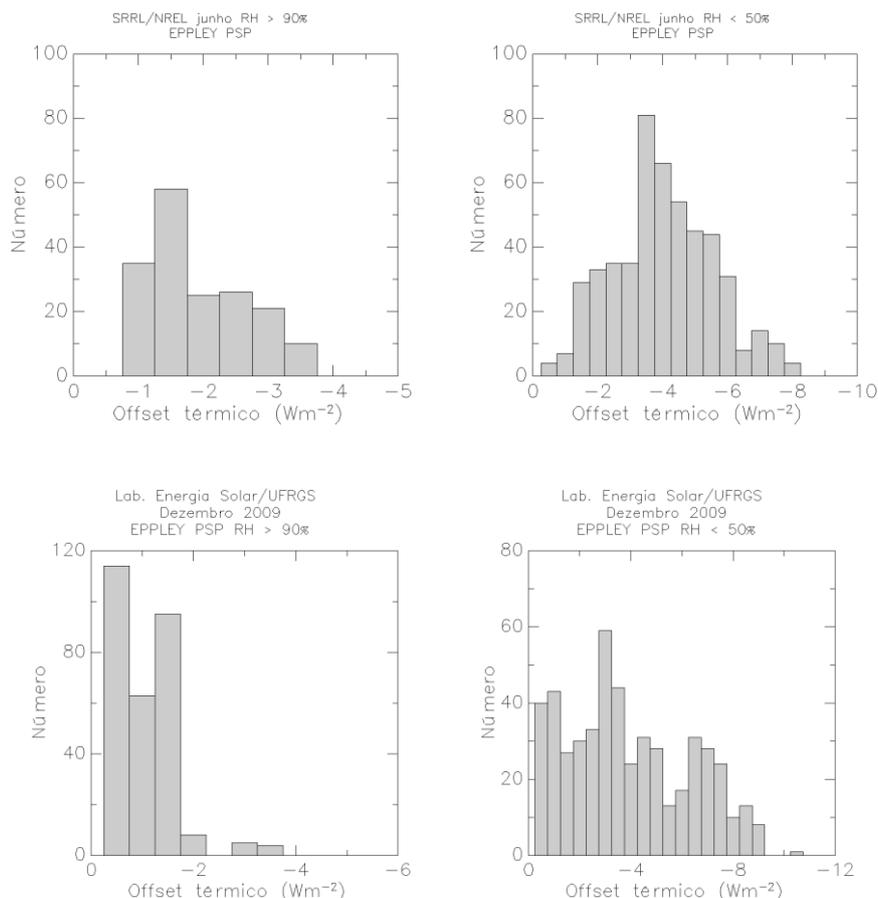


Figura 8 – Distribuição dos valores de *Offset* térmico noturno para o piranômetro PSP da Eppley ao longo de duas noites com diferentes condições climáticas no SRRL/NREL e no Laboratório de Energia Solar/UFRGS. Um período selecionado apresentou céu totalmente encoberto e umidade relativa acima de 90% e outro céu limpo e umidade relativa abaixo de 50%.

Também foram selecionados dois cenários climáticos bastante distintos, sendo um com umidade relativa elevada (RH médio > 90%) e céu encoberto e outro com atmosfera sem cobertura de nuvens e umidade relativa abaixo de 50%. Os resultados para a distribuição de valores de *offset* térmico para o piranômetro PSP da Eppley no SRRL/NREL e no LABSOL/UFRGS são apresentados na Fig. 8. Nos dois locais de estudo, observa-se valores menores do *offset* térmico para noites de céu encoberto e umidade relativa elevada. Em noites de atmosfera limpa e baixo valor de umidade relativa os valores de *offset* térmico se elevam e apresentam uma maior dispersão.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo preliminar sobre medidas do *offset* térmico de piranômetros em dois laboratórios com características climáticas distintas. Entre os modelos analisados, o piranômetro CM22 da empresa Kipp & Zonen apresentou os melhores resultados e mostrou desvio da ordem 1 W/m^2 durante o período de estudo. O piranômetro TSP-700 da empresa YES mostrou valores de *offset* térmico médio abaixo de 2 W/m^2 , no entanto, apresentou valores episódicos acima de 10 W/m^2 . O modelo PSP da Eppley durante períodos de céu limpo e baixa umidade relativa pode apresentar valores instantâneos acima de 10 W/m^2 no valor do *offset* térmico. O modelo CM11 da Kipp & Zonen mostrou desempenho similar ao PSP da Eppley. O modelo D3B produzido pela empresa Maxwell mostrou valores de *offset* térmico acima de 30 W/m^2 e as causas para este elevado valor ainda não são bem conhecidas. Dados fornecidos por piranômetros que apresentam um elevado *offset* térmico tendem a subestimar a radiação global e principalmente a difusa, notadamente durante o inverno e em períodos de céu limpo e baixos valores de umidade relativa. Este efeito também é ampliado em locais de latitude elevada em função da relação entre a componente difusa e direta. O piranômetro PSP da Eppley, por exemplo, pode apresentar erros médios diários da ordem de 10-15% na estimativa da componente difusa em razão do *offset* térmico.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado com recursos do CNPq pertencentes ao edital MCT/CNPq 27/2007 e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia. O Laboratório SRRL/NREL conta com recursos do Solar Energy Technology Research Program do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

REFERÊNCIAS

- Bush, B.C., 2000. Characterization of thermal effects in pyranometers: a data correction algorithm for improved measurement of surface insolation, *J. Atmos. Ocean. Technol.* 17, pp. 165–175.
- Cess, R. D., Qian, T. T., Sun, M. G., 2000. Consistency tests applied to the measurement of total, direct, and diffuse shortwave radiation at the surface. *J. Geophys. Res.*, 105 (D20), 24,881–24,887.
- Dutton, E. G., Michalsky, J. J., Stoffel, T., Forgan, B. W., Hickey, J., Nelson, D. W., Alberta, T. L., Reda, I. 2001. Measurement of broadband diffuse solar irradiance using current commercial instrumentation with a correction for thermal offset errors. *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, 18(3), 297-314.
- Fairall, C. W., Persson, P. O. G., Bradley, E. F., Payne, R. E., Anderson, S. P., 1998. A new look at calibration and use of Eppley Precision Infrared Radiometers. Part I: Theory and application. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15:1229–1242.
- Gueymard, C. A., Myers D. R., 2009. Evaluation of conventional and high-performance routine solar radiation measurements for improved solar resource, climatological trends, and radiative modeling, *Solar Energy*, 83 (2), pp. 171-185
- Haag, R., 2007. Desenvolvimento de um Radiômetro Espectral e Metodologia para Caracterização do Espectro Solar. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Haefelin, M., Kato, S., Smith, A. M., Rutledge, C. K., Charlock, T. P., Mahan, J. R., 2001. Determination of the thermal offset of the Eppley precision spectral pyranometer. *Appl. Opt.*, 40, 472-484.
- Lester, A. e Myers, D.R., 2006. A method for improving global pyranometer measurements by modeling responsivity functions, *Solar Energy* 80, pp. 322–331.
- Long, C. N., Younkin, K., Powell, D. M., 2001. Analysis of the Dutton et al. IR Loss Correction Technique Applied to ARM Diffuse SW Measurements. In Proceedings of the Eleventh Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting, ARM-CONF-2001. U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- Michalsky, J.J., Harrison, L. C., Berkheiser III W. E., 1995. Cosine response characteristics of some radiometric and photometric sensors, *Solar Energy* 54, pp. 397–402.
- Oliveira, A. P., Soares, J., Božnar, M.Z., Makar, P., Escobedo, J. F., 2006. An Application of Neural Network Technique to Correct the Dome Temperature Effects on Pyrgeometer Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 23:1, 80-89
- Payne, R. E., Anderson, S. P., 1999. A new look at calibration and use of Eppley Precision Infrared Radiometers. Part II: Calibration and use of the Woods Hole Oceanographic Institution Improved Meteorology Precision Infrared Radiometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16:739–751.

- Philipona, R., 2002. Underestimation of solar global and diffuse radiation measured at Earth's surface. J. Geophys. Res., 107(D22), 4654.
- Pilewski, K.E., Valero, F.P.J., 1995. Direct observations of excess solar absorption by clouds. Science, 267, 1626-629.
- Reda, I., Hickey, J., Long, C., Myers, D.R., Stoffel, T., Wilcox, S., Michalsky, J.J., Dutton, E. G., Nelson, D., 2005. Using a blackbody to calculate net-longwave responsivity of shortwave solar pyranometers to correct for their thermal offset error during outdoor calibration using the component sum method, J. Atmos. Ocean. Technol. 22, pp. 1531–1540
- Valero, F. P. J., Bush, B.C., 1999. Measured and calculated clear-sky solar radiative fluxes during the Subsonic Aircraft Contrail and Cloud Effects Special Study (SUCCESS) J. Geophys. Res., 104(D22), 27387-27398, 27 November
- Wardle, D.I., McKay, D.C., 1984. Symposium proceedings, recent advances in pyranometry. In: Proceedings of International Energy Agency, Task IX, Solar Radiation and Pyranometer Studies, Norrkoping, Sweden, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, Canada.
- Younkin, K., Long, C. N., 2002. Results of the Dutton et al. IR Loss Correction VAP: Statistical analysis of corrected and uncorrected SW measurements. In Proceedings of the Twelfth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting, ARM-CONF-2002. U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- Zerlaut, G.A., 1983. Solar radiation measurements: calibration and standardization efforts in advances in solar energy. In: Böer, K.W., Duffie, J.A., (Eds.), vol. 1, Am. Solar Energy Soc., Boulder, CO, pp. 19–59.
- Zerlaut, G.A., 1986. Solar radiometry instrumentation, calibration techniques, and standards, Solar Cells 18, pp. 189–203.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THERMAL OFFSET IN PYRANOMETERS UNDER DIFFERENT ATMOSPHERIC CONDITIONS

Abstract. *Solar global irradiation observations at Earth's surface generally are less ($10\text{--}25\text{ Wm}^{-2}$) than those calculated by radiative-transfer models. Measurements with pyranometers demonstrate that the night thermal offset is present and considerably larger during daytime clear sky measurements and is responsible for the underestimation of clear sky solar global, as well as diffuse irradiance. This is caused by temperature gradients in the instrument that create radiative exchanges between the domes and the sensor surface. These offset errors are proportional to the difference between the fourth power of the dome and detector temperatures. This paper presents preliminary results of the pyranometers thermal offset response. Relationships between the thermal offset and net infrared irradiation are established using nighttime data from Kipp & Zonen Pyrgeometer CNR1 model. The thermal offset is also measured over a variety of atmospheric conditions, ranging from clear and dry to heavy overcast and wet in two distinct sites All measurements took place in June and December 2009 in Solar Radiation Research Laboratory (SRRL) of the National Renewable Energy (NREL) in Golden, CO and in Solar Energy Laboratory (LABSOL) of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS.*

Key words: *Solar Radiation, Radiometry, Pyranometer, Thermal Offset.*