

RASTREABILIDADE DE RADIÔMETROS PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL

*Manfred G. Kratzenberg*¹, *Sergio Colle*¹, *Enio Bueno Pereira*², *Sylvio Luiz Mantelli Neto*², *Hans Georg Beyer*³ e *Samuel Luna de Abreu*¹

¹ LABSOLAR – Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Santa Catarina, Brasil.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE / CPTEC - DGE, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Elétrica, Hochschule Magdeburg-Stendal, Alemanha, Professor Visitante do LABSOLAR - Programa CAPES/DAAD

Resumo: O levantamento do potencial de energia solar nas regiões continentais do globo cujos países dispõem de poucas estações solarimétricas de boa qualidade é geralmente realizado por métodos numéricos derivados de modelos físicos baseados em satélites. No caso do Brasil, o mapeamento do potencial solar tem sido realizado sistematicamente pelo LABSOLAR e INPE, através do modelo físico BRASIL SR, desenvolvido no Brasil em parceria com pesquisadores parceiros do GKSS de Geesthacht – Alemanha. Os dados derivados de satélites são comparados com dados coletados na superfície, nas bases de totais horários, diários, mensal e anual. Por conseguinte, as incertezas agregadas aos radiômetros utilizados na validação devem ser minimizadas em relação à escala pirheliométrica internacional estabelecida pela WMO (World Meteorological Organization) / UN (United Nations), no contexto do projeto BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Os radiômetros de referência são os pirheliômetros de cavidade de HF (Hickey – Frieden) e o pirheliômetro de cavidade PMO-6 do Centro Mundial de Radiação de DAVOS.

Os resultados da calibração são apresentados em termos do intervalo de incerteza da constante de calibração, para os pirheliômetros de Angström e Eppley NIP, bem como para os piranômetros Eppley PSP, Kipp&Zonen CM11, CM22 e CM3B e também os piranômetros SP LITE e LICOR.

Palavras chave: calibração, piranômetro, pirheliômetro.

1. INTRODUÇÃO

A determinação da distribuição espacial e temporal da radiação solar incidente na superfície terrestre, na faixa de comprimento de onda do espectro solar, compreendendo o intervalo de 0,28 μ m a 3 μ m, tem sido objeto de pesquisa desde o trabalho pioneiro de Angström [1]. Nas últimas décadas do século XX, surgiram modelos físicos de cálculo da transmitância atmosférica, bem como teorias para explicar o papel da modulação da cobertura de nuvens sobre a distribuição da radiação solar, baseados em informações

digitais de imagens de brilho da terra, medida através do canal visível do espectro de radiômetros de satélites geostacionários. Exemplos de tais modelos são apresentados em [2], [3], [4] e [5]. Tais modelos permitem determinar o total horário da radiação global, difusa e direta com resolução espacial de até 7km x 7km, cuja incerteza na média mensal pode ser menor que 5%. Tais modelos são atualmente objeto de estudos no contexto do projeto SWERA – Solar Wind Energy Resource Assessment (www.cea.inpe.br/webdgc/swera/EN/en_swera_home.html), atualmente em execução com suporte da UNEP (United Nations Environment Programme) / GEF, envolvendo várias instituições internacionais, dentre as quais o LABSOLAR e o INPE / DGE – CPTEC. A validação de tais modelos físicos é o objetivo principal do projeto mencionado, para dotar o Brasil, dentre outros países, de uma base de dados confiável de distribuição da radiação global e direta incidente na superfície horizontal, com resolução horária de 12km x 12km e a América do Sul, neste caso, com resolução de 50km x 50km para cada três horas. Essa validação, tanto quanto a validação de outros modelos em desenvolvimento com o objetivo mais amplo de investigar o efeito da emissão de CO₂ na atmosfera, é realizada pela comparação de totalizações temporais calculadas através desses modelos, contra dados coletados na superfície, através de piranômetros (radiação global) e pirheliômetros (radiação direta). Por conseguinte, a qualidade dos dados coletados nesses radiômetros é fundamental para avaliar as incertezas das estimativas teóricas derivadas desses modelos.

O LABSOLAR integra, desde 1994, a rede de estações de superfície BSRN, organizada com apoio da WMO, para implementação de uma rede de estações de superfície, para coleta e qualificação de dados de radiação solar, no interesse da comunidade internacional de pesquisa da atmosfera. O centro internacional de qualificação e distribuição desses dados é o WMRC (World Monitoring Radiation Centre) / ETH – Zürich. Os instrumentos recomendados pelo comitê científico da BSRN, para validação de modelos físicos de cálculo da radiação solar incidente na superfície, na faixa de comprimento de onda do espectro solar entre 0,28 μ m e

3 μ m, são os piranômetros classificados pela WMO como “secondary standard”, para medição da radiação global e difusa e o pirheliômetro, para medição da radiação direta.

Neste contexto, o LABSOLAR é responsável pela operação das estações BSRN – Florianópolis e BSRN – Balbina (AM). A descrição dessas estações e instrumentação, bem como dos procedimentos de coleta, controle e qualificação de dados e calibração dos radiômetros são apresentados em [6]. Conforme [6], a incerteza associada a medição da radiação global não deve ser superior a 2% ou 2W/m². A incerteza associada a medição da radiação difusa não deve ser superior a 4% ou 5W/m² e associada a radiação direta não pode ser superior a 1% ou 2W/m². Figura (1) mostra as modalidades de radiação e especialmente a composição da radiação global. Figura (2) mostra um exemplo de piranômetro e figura (3) o esquema do instrumento.

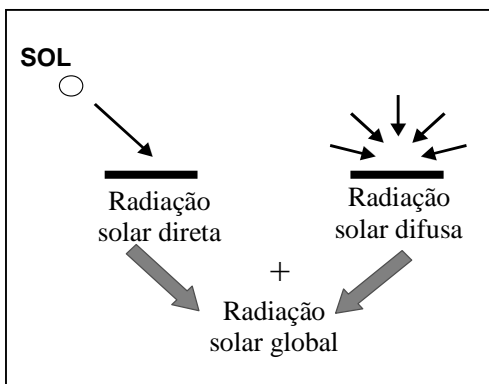


Fig. 1. Componentes da radiação solar

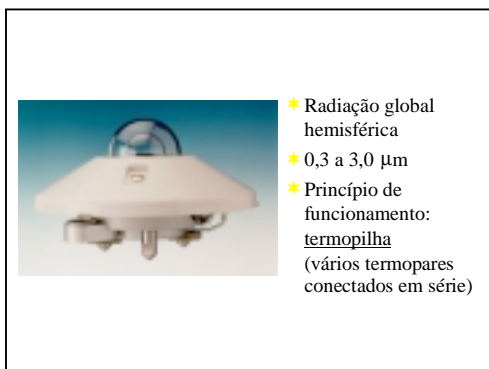


Fig. 2. Piranômetro Kipp&Zonen CM 11

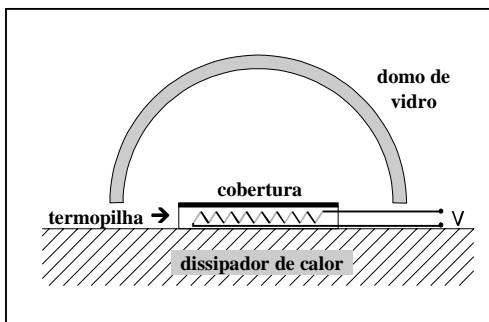


Fig. 3. Detalhe do sensor do piranômetro

A calibração de um pirheliômetro de campo é realizada pela comparação das medidas deste instrumento com dados medidos pelo pirheliômetro de cavidade. Tal instrumento padrão e a escala pirheliométrica internacional são descritos em [7]. Os piranômetros são calibrados através de três métodos, conforme descritos em [6] e [7], a saber,

- (i) método da soma “shade-unshade” (Norma ISO 9846 [8])
- (ii) método da comparação com piranômetro de referência (Norma ISO 9847 [9])
- (iii) método da comparação recíproca (método de Forgan [10]) .

No método (i) os dados de piranômetros são comparados com dados de um pirheliômetro de cavidade, que pode ser o pirheliômetro de compensação de Angström, ou melhor, os pirheliômetros de cavidade HF ou PMO-6.

O LABSOLAR dispõe dos dois pirheliômetros. O de Angström foi doado ao laboratório pelo Deutscher Wetterdienst (DWD) – Hamburg, no contexto do convênio CNPq – BMBF / KFA – Jülich (1992), enquanto que o HF foi doado pela WMO no contexto do projeto BSRN (1996). A rastreabilidade da escala internacional para calibração de piranômetros e pirheliômetros é esquematizada nas figuras (4) – (a) e (b).

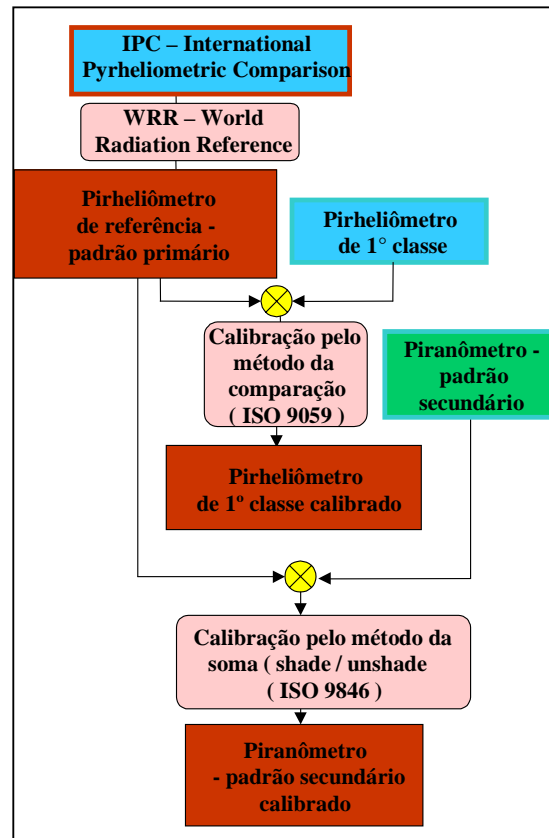


Fig. 4 (a). Rastreabilidade da escala radiométrica através do padrão primário

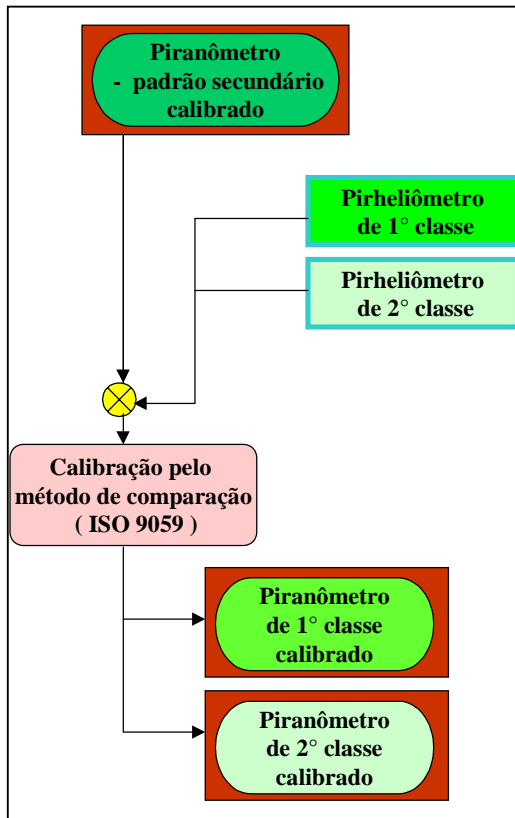


Fig. 4 (b). Rastreabilidade da escala radiométrica através do padrão secundário.

A rastreabilidade da referência radiométrica internacional do LABSOLAR, é indispensável para assegurar um bom padrão de qualidade em solarimetria, para as estações do LABSOLAR e de outras estações de superfície, cujo objetivo seja o fornecimento de dados de radiação solar para a comunidade científica de ciências atmosféricas e da engenharia de energia solar. Neste contexto, o projeto BSRN poderá desempenhar um importante papel para estabelecer no país a credibilidade há muito perdida no aspecto da monitoração da radiação solar, sobretudo nos últimos vinte anos, durante os quais o Brasil deixou de figurar nos bancos de dados de radiação solar da WMO e do Centro Mundial de Radiação Solar de São Petersburgo, até porque o que restou das estações solarimétricas instaladas pelo governo federal no país em 1978 foi desativado.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um estudo comparativo de calibração de diferentes piranômetros e de um pirheliômetro de campo NIP (normal irradiance pirheliometer), normalmente utilizados na solarimetria e também, uma comparação do pirheliômetro de compensação de Angström com o pirheliômetro de cavidade Hickey Friedem (HF). Os trabalhos de calibração e comparação foram conduzidos na bancada de calibração do LABSOLAR. Esta bancada de calibração foi construída com recursos do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o Setor de Energia), que presentemente está sendo executado em parceria com o LABSOLAR. O projeto SONDA é financiado com recursos

do CTENERG e tem sua coordenação centrada no CPTEC. A bancada de calibração mencionada foi projetada de acordo com recomendações técnicas da BSRN, para calibração de radiômetros, segundo as normas ISO 9846, 9847 e 9059 [11]. No contexto do projeto SONDA, as estações BSRN do LABSOLAR foram modernizadas, com a instalação de piranômetros Kipp&Zonen CM21 e CM22, instrumentos da mais alta qualificação presentemente utilizados na solarimetria. Um dos objetivos de grande alcance do projeto SONDA é a implementação no Brasil, de uma rede de nove estações de superfície de qualidade, no contexto da qual as estações BSRN e adicionalmente cinco estações solarimétricas de menor alcance do LABSOLAR, deverão ser integradas.

2. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO

2.1. Método da Soma “Shade-Unshade”

Este método baseia-se no princípio de que a soma da radiação direta horizontal e de radiação difusa, totalizados em um minuto, deve resultar na radiação difusa totalizada no mesmo intervalo de tempo. A radiação difusa e radiação global estão medidas com o piranômetro a ser calibrado. Para medição da radiação difusa é utilizado um disco de sombreamento que sombreia o piranômetro da radiação direta. A radiação difusa e a radiação global são medidas em intervalos de tempo correspondentes a operações realizadas com alternância de medições de radiação global (sem o disco de sombreamento) e medições de radiação difusa (com disco de sombreamento). O pirheliômetro de cavidade mede I_{bn} , a intensidade da radiação direta normal, cuja componente horizontal é $I_{bn} \cos \gamma$, onde γ é o ângulo de zênite solar, que é o ângulo compreendido entre o raio do sol e a normal a superfície horizontal.

Por definição,

$$I_G = I_{bn} \cos \gamma + I_D \quad (1)$$

onde I_G é a intensidade de radiação global (W/m^2) e I_D é a intensidade de radiação difusa (W/m^2), que são medidas com o piranômetro a ser calibrado.

O sinal do piranômetro para a componente global em microvolts é expresso por $(\mu V)_G = k I_G$ onde k é o fator de calibração do radiômetro. Da mesma forma, para a componente difusa $(\mu V)_D = k I_D$.

Da equação (1) resulta que

$$I_{bn} \cos \gamma = I_G - I_D \quad (2)$$

onde γ é calculado através de equações geofísicas embutidas no software do rastreador solar. Segue-se que

$$I_{bn} \cos \gamma = \frac{1}{k} [(\mu V)_G - (\mu V)_D] \quad (3)$$

de onde

$$k = [(\mu V)_G - (\mu V)_D] / I_{bn} \cos \gamma \quad (4)$$

2.2. Método da comparação com piranômetro de referência

Este método baseia-se na comparação dos dados de radiação medidos com o piranômetro a ser calibrado, com dados de radiação, medidos com um piranômetro calibrado pelo método (2.1). No presente caso o padrão de referência é o piranômetro Kipp&Zonen CM22, instrumento que produz um desvio de off-set mínimo.

2.3 Ilustrações dos diferentes processos de calibração

A figura (5) ilustra o pirheliômetro HF montado sobre um rastreador solar SM3 da Eppley Co., enquanto que a figura (6) mostra a unidade de controle e o sistema de aquisição de sinais do pirheliômetro mencionado. A figura (7) ilustra a bancada de calibração pelo método (2.1), enquanto a figura (8) ilustra o operador alinhando o disco de sombreamento na operação shade-unshade.



Fig. 5. Pirheliômetro de Hickey Frieden montado sobre o rastreador solar SM3 da Eppley Co., com detalhe da caixa de conexão de calibração.



Fig. 6. Unidade de controle e medição



Fig. 7. Bancada de calibração de piranômetros pelo método da soma, mostrando o piranômetro Kipp&Zonen CM22.

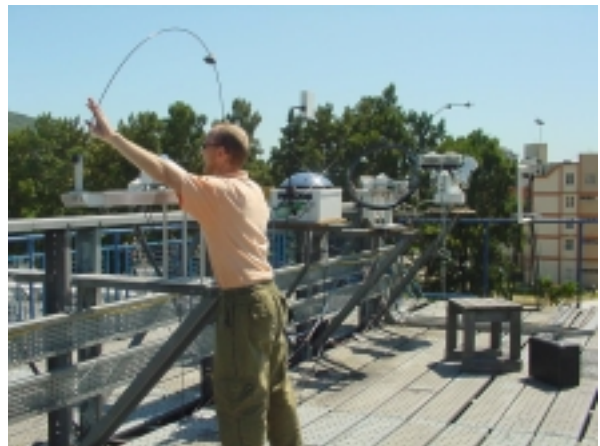


Fig. 8. Operação manual "shade-unshade" do anel de sombreamento da bancada de calibração.



Fig. 9. Piranômetros PSP Eppley (primeiro plano), SP LITE (segundo plano) e Kipp&Zonen CM 3B e CM21 (terceiro plano).

A figura (9) mostra a bancada de calibração pelo método (2.2), com os piranômetros Kipp&Zonen CM11 e CM3B, SP LITE, LICOR, Eppley PSP e o piranômetro de referência CM22. A figura (10) mostra o piranômetro de referência CM22 ventilado.



Fig. 10. Calibração dos piranômetros pelo método da comparação, tendo como referência o piranômetro Kipp&Zonen CM22 ventilado (à esquerda).

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Comparação do pirheliômetro de compensação de Angström com o pirheliômetro HF

As figuras (11) – (a) e (b) ilustram os resultados de medições realizadas com os dois pirheliômetros de referência, a saber, HF e Angström. Estes instrumentos foram comparados para avaliar as diferenças dos mesmos na condição de dia claro.

As figuras (12) – (a) e (b) ilustram o resultado de outra amostra de medições, desta vez em outro horário diferente daquele correspondente a primeira comparação. Verifica-se que mesmo com um erro aleatório elevado na medição manual com o radiômetro de Angström, este instrumento apresenta resultados médios coerentes, em relação ao radiômetro HF. O desvio entre o instrumento de referência de Angström e o instrumento HF, associado a alta incerteza do instrumento de Angström, demonstra que este pirheliômetro, na presente situação, não cumpre as exigências de qualidade estabelecidas pela WMO.

3.2. Calibração do pirheliômetro Eppley NIP No. 2804 através do pirheliômetro HF

Nesta secção são apresentados os resultados de calibração de um pirheliômetro de primeira classe (NIP) com um pirheliômetro de referência (HF), utilizando o método da comparação. A Figura 13-(a) mostra o resultado de uma calibração para a qual os ensaios foram executados em diferentes dias. A figura 13-(b) mostra os resultados de calibração para anos diferentes, como recomendado pela

WMO. A incerteza do fator de calibração calculado para este radiômetro é de 0,25%.

3.3. Calibração do piranômetro CM22 pelo método da soma

A seguir são mostrados os resultados de calibração do piranômetro de referência CM22 pelo método da soma descrito na seção 2.1. Os resultados da calibração são apresentados na figura (14). O fator de calibração calculado para este instrumento é $k = 9,432$ e o desvio percentual em relação ao fator de calibração fornecido pelo fabricante é da ordem de -0,4%.

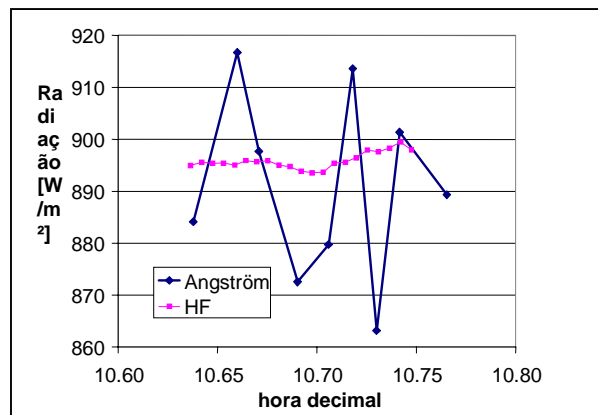


Figura 11 (a). Dados comparativos de radiação solar medidos com os pirheliômetros de referência de Angström e HF.

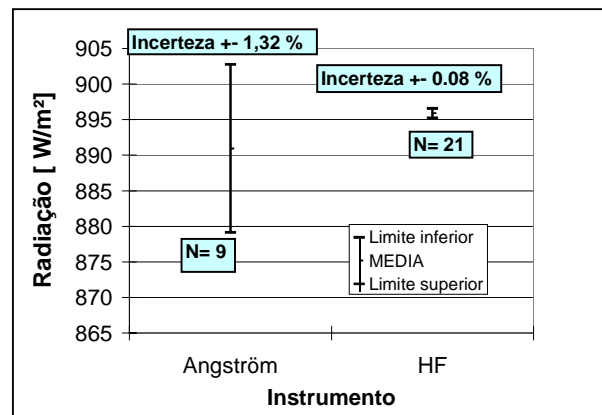


Figura 11 (b). Intervalos de incerteza respectivos aos pirheliômetros de referência (a diferença entre as médias dos resultados é de 0,5%)

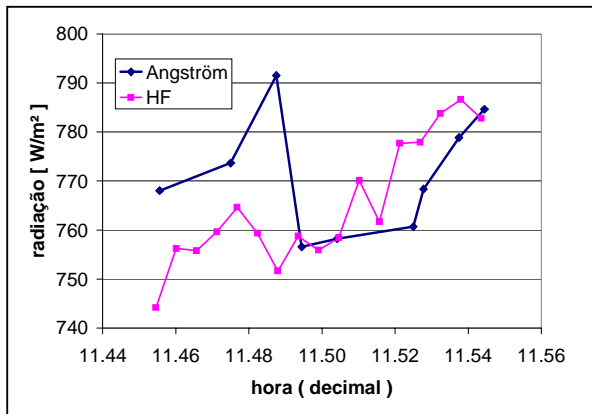


Figura 12 (a). Dados comparativos de radiação solar medidos com os pirheliômetros de referência, para outra sequência de medição.

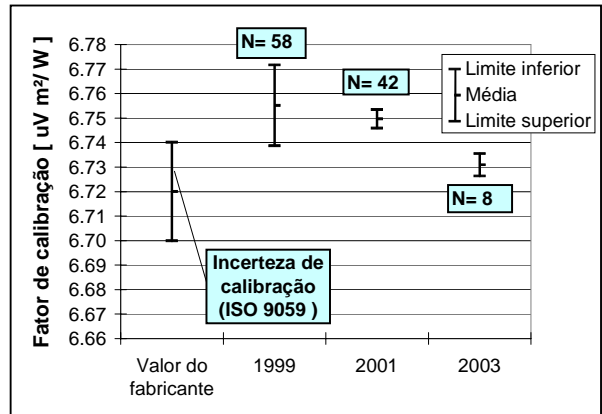


Figura 13 (b). Intervalos de incerteza relativos a calibração do pirheliômetro Eppley NIP No. 2804, para calibração em três anos distintos.

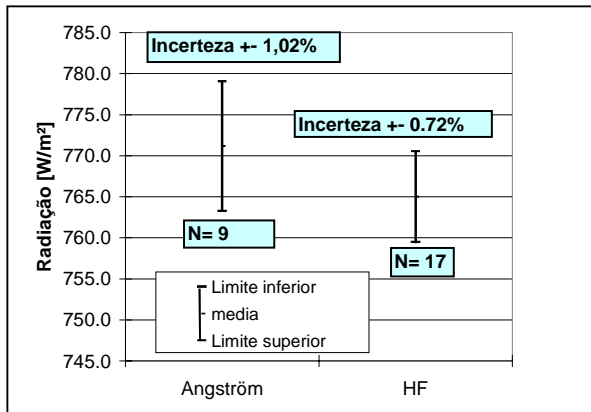


Figura 12 (b). Intervalos de incerteza respectivos aos pirheliômetros de referência, para outra sequência de medição.

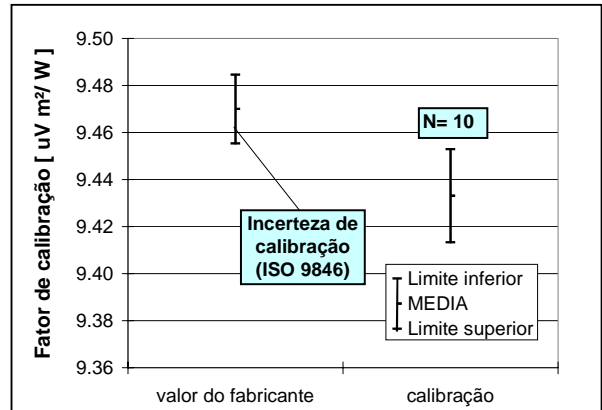


Fig. 14. Intervalos de incerteza relativos a calibração do piranômetro Kipp&Zonen CM22 (método de soma).

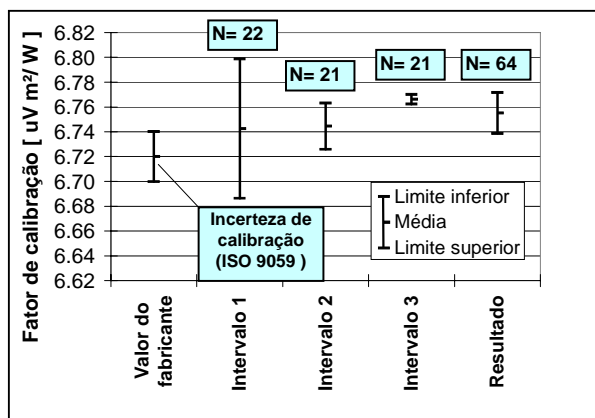


Figura 13 (a). Intervalos de incerteza relativos a calibração do pirheliômetro Eppley NIP No. 2804 (1999), para diferentes sequências de medição.

3.4. Calibração dos piranômetros de campo

Nesta seção são apresentados os resultados da calibração de diferentes piranômetros de campo (primeira classe, segunda classe e padrão secundário), por comparação com o piranômetro de referência CM22. Os resultados comparativos de calibração dos piranômetros Kipp&Zonen CM11 e CM3B, PSP Eppley, SP LITE e LICOR são apresentados nas figuras (15) e (16).

A figura (15) ilustra as retas de resposta dos radiômetros em mV, em função da intensidade de radiação solar em W/m^2 , esta última medida com o piranômetro de referência calibrado.

A figura (16) mostra os intervalos de incerteza associados aos fatores de calibração dos instrumentos calibrados, para intensidade de radiação variando entre $600W/m^2$ e $700W/m^2$, para um conjunto amostral de 195 medidas totalizadas em um minuto.

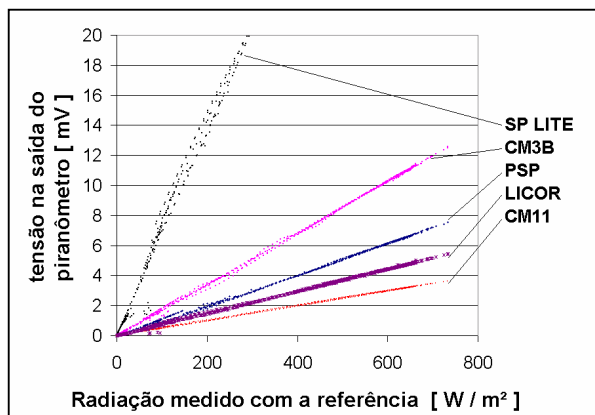


Fig. 15. Funções de resposta dos piranômetros calibrados pelo método da comparação.

Observa-se que o piranômetro CM11 apresenta resultados um pouco melhores que aqueles dos outros instrumentos. Deve-se observar que os piranômetros Eppley PSP e Kipp&Zonen CM11 são instrumentos de melhor qualidade em relação aos outros instrumentos, uma vez que os primeiros apresentam melhor estabilidade e melhor aderência à lei do co-seno [7].

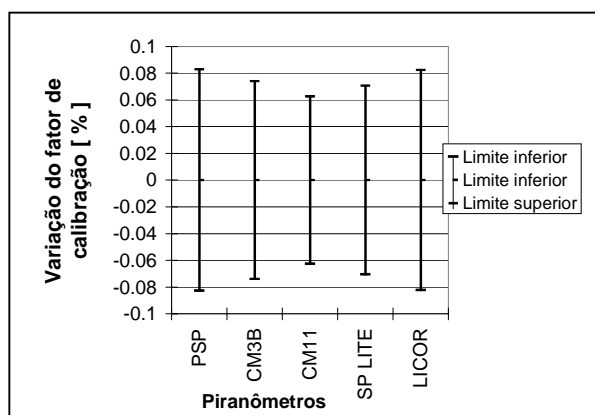


Fig. 16. Intervalos de incerteza respectivos aos piranômetros calibrados pelo método da comparação.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta os resultados ilustrativos de calibração de diferentes radiômetros utilizados na solarimetria. Os resultados apresentados caracterizam as diferenças normalmente encontradas entre os diferentes radiômetros na operação de calibração. Particular atenção foi dispensada a comparação de pirheliômetros, com o propósito de apresentar a metodologia e também demonstrar a capacitação do LABSOLAR para realizar a calibração desses radiômetros. Os resultados apresentados não são completos, na medida em que uma detalhada análise de erros e uma avaliação da rastreabilidade dos instrumentos em relação a referência radiométrica internacional não foram apresentados.

Deve-se ressaltar que as estações solarimétricas do LABSOLAR, a saber, de Chapecó-SC, Joinville-SC, Sombrio-SC, Lebon Regis_SC, BSRN_Florianópolis, BSRN-Balbina e Araras-RO, operam com radiômetros que serão calibrados segundo padrões de qualificação da BSRN. Pretende-se que tais estações, quando integradas a rede de estações do projeto SONDA, venham a contribuir, em futuro próximo, para oferecer uma base confiável de dados qualificados, em benefício das ciências da atmosfera e das energias renováveis no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho manifestam seu agradecimento ao apoio da BSRN / WMO, bem como ao apoio financeiro do MCT através do projeto SONDA, sem os quais este trabalho não teria sido realizado. Agradecem também ao Dr. Hamilton J. Vieira do CLIMERH / EPAGRI, pelo empréstimo dos piranômetros CM3B, SP LITE e LICOR.

REFERÊNCIAS

- [1] Angström, A., "On the Computation of Global Radiation from Records of Sunshine", Ark. Geofisik, vol. 2, no.5, pp. 471-479, 1956.
- [2] Stuhlman, R., Rieland, M., and Raschke, E., "An Improvement of the IGMK Model to Derive Total and Diffuse Solar Radiation at the Surface from Satellite Data", J. Appl. Meteor., vol. 18, pp. 586-603, 1990.
- [3] Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Beyer, H. G., Colle, S., Perez, R., and Heinemann, D., "Cross Validation of Satellite Radiation Transfer Models During SWERA Project in Brazil", Proceedings ISES 2003, Göteborg, Sweden, June, 2003.
- [4] Perez, R., Kmiecik, M., Herig, C., and Renné, D., "Remote Monitoring of PV Performance Using Geostationary Satellites", Solar Energy, vol. 71, no. 4, pp.255-261, 2001.
- [5] Beyer, H. G., Costanzo, C., and Heinemann, D., "Modifications of the Heliosat Procedure for Irradiance Estimates from Satellite Data", Solar Energy, vol. 56, pp. 121-207, 1996.
- [6] McArthur, L. J. B., "BSRN Operation Manual", BSRN Meeting Report of the BSRN Workshop – Regina, Canadá, August, 2002.
- [7] Fröhlich, C., and London, J., (Editors) "Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements", WCRP Publications Series No.7, WMO/TD, no. 149, October, 1986.
- [8] Norma ISO 9846, "Solar Energy – Calibration of a Pyranometer Using a Pyrheliometer", 1993.
- [9] Norma ISO 9847, "Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a Reference Pyranometer", 1992.
- [10] Forgan, B. W., "A New Method for Calibrating Reference and Field Pyranometers", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 13, pp. 638-645, 1996.
- [11] Norma ISO 9059, "Calibration of Field Pyrheliometers by Comparison to a Reference Pyrheliometer", 1990.

- [12] Coleman, H. W. and Glenn Steele, Jr., W., "Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers", John Wiley & Sons, 1989.

Autor: Eng. Manfred G. Kratzenberg, Dr. Sergio Colle, Eng. Sylvio Luiz Mantelli Neto, Eng. Samuel Luna de Abreu e Dr. Hans G. Beyer (Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, 88040-900 – Florianópolis, SC, Telefone: (48) 2342161, Fax: (48) 3317615, e-mail: colle@emc.ufsc.br).

Dr. Enio Bueno Pereira (INPE / DGE, Caixa Postal 515, 12201-970, São José dos Campos, SP, Telefone: (12) 39456741, e-mail: enio@dge.inpe.br).