



AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE UM SIMULADOR SOLAR PARA CALIBRAÇÃO *INDOOR* DE PIRANÔMETROS

Patrícia L. O. Guimarães¹, Márcio A. A. Santana¹, Waldeir A. Vilela², Luis A. Berni², Luiz F. Silva¹,
Tiago F. Paes²

¹ INPE / CPTEC / LIM, Cachoeira Paulista - SP, Brasil, patricia.guimaraes@cptec.inpe.br

² INPE / CTE/ LAS, São José dos Campos - SP, Brasil, waldeir@las.inpe.br

Resumo: A avaliação preliminar da utilização de um simulador solar, utilizado para caracterização de células solares, será um passo importante no sentido de viabilizar a calibração de piranômetros em laboratório, também conhecida como calibração *indoor*. Geralmente estas calibrações são realizadas ao ar-livre, ou calibração *outdoor*, onde o próprio Sol atua como sistema de calibração. A principal desvantagem do método *outdoor* é a disponibilidade das condições climáticas locais, pois é necessário que o céu esteja aberto ou com poucas nuvens durante vários dias, fazendo com que o sistema de monitoramento ou estação ambiental permaneça desativado para esta variável durante este período, pois muitas vezes não há equipamento sobressalente. Com o desenvolvimento de um sistema para calibração *indoor* será possível estabelecer critérios de alternância entre os métodos para calibrações consecutivas do mesmo instrumento diminuindo o tempo entre calibrações, permitindo verificações intermediárias e diminuindo o tempo em que o equipamento fica fora da estação.

Palavras chave: radiação solar, piranômetro, simulador solar, calibração *indoor*, incerteza de medição.

1. INTRODUÇÃO

Medidas de radiação solar são realizadas continuamente em toda a parte do globo com o objetivo de estudar as transformações de energia que ocorrem entre o sistema Terra-atmosfera e de que forma ocorre a distribuição de radiação (incidente, refletida e absorvida), analisar a constituição e as propriedades da atmosfera, validar as medidas de radiação feitas por satélites, além de satisfazer as necessidades de diversos setores, tais como: meteorologia e climatologia, agricultura e construção civil (projetos de eficiência energética e conforto térmico, sistemas de refrigeração e aquecimento, etc.).

A disponibilidade da energia radiante do Sol que incide na superfície terrestre pode ser medida diretamente através de dispositivos denominados radiômetros que, de acordo com a faixa espectral e o tipo de radiação medida, recebem nomes específicos como, por exemplo, piranômetros, pirgeômetros, pireliômetros, saldo-radiômetros, etc. [1]

O piranômetro é um dispositivo utilizado para medir radiação global direta e difusa, cobrindo uma faixa espectral de 300 a 3000 nm, podendo ser utilizado tanto na horizontal como também em superfícies inclinadas ou mesmo voltado para baixo para medir radiação global refletida. Utilizando-se um disco sombreador para encobrir a radiação direta obtêm-se a radiação difusa.

Piranômetros normalmente utilizam elementos termoeletrônicos, fotoeletrônicos, piroeletrônicos ou bimetálicos como sensor. As principais propriedades físicas que influenciam sua classificação em níveis de performance e incerteza são: resposta espectral, sensibilidade (determinada por suas propriedades físicas, como potência termoeletrônica, condutividade térmica das junções e dimensões totais do elemento sensor), impedância, tempo de resposta, linearidade, influência da temperatura ambiente, *offset* térmico, temperatura de operação, resposta direcional, estabilidade.

A calibração dos piranômetros consiste na determinação do seu fator de calibração e a dependência deste às condições ambientais, tais como: temperatura, nível de irradiância, distribuição espectral de irradiância, variação temporal, distribuição angular de irradiância, inclinação do instrumento, etc. [2]

Dentre as várias metodologias recomendadas pela WMO (*World Meteorological Organization*) (citação), uma das mais utilizadas atualmente é a calibração *outdoor*, contemplada pelas normas ISO 9847:1992 e ASTM E824-10 [3,4], em que o piranômetro sob calibração é comparado com um piranômetro de referência, utilizando o Sol como fonte, sob condições naturais de exposição sendo o método utilizado também pelo Laboratório de Metrologia Ambiental, inserido no Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM), do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), da unidade do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de Cachoeira Paulista-SP. Além da calibração *outdoor* a norma ISO citada ainda descreve suscintamente algumas metodologias de calibração *indoor*.

A metodologia utilizada no LIM produz os resultados esperados em termos dos requisitos de incerteza recomendados pela WMO [5] para as medidas de irradiância

global em aplicações de energia solar, mas as condições climáticas locais durante o decorrer do ano restringem a disponibilidade de calibração para apenas alguns meses, quando o céu está claro ou com poucas nuvens, geralmente no período entre o inverno e a primavera. Muitas vezes o sistema de calibração tem que operar por vários dias até que se obtenham os dados necessários e nem sempre o usuário possui radiômetros sobressalentes; como consequência sua estação ambiental tem que ser desativada para estas variáveis por longo período o que prejudica a pesquisa e a manutenção de seu banco de dados de radiação solar.

O desenvolvimento de uma metodologia de calibração *indoor*, equivalente em termos de resultados com a metodologia *outdoor*, que produza resultados satisfatórios para atender ao aumento de projetos de pesquisa nesta área em um espaço de tempo menor, ou mesmo, para que se possa realizar verificações intermediárias em seus instrumentos de maneira compatível com a demanda trará benefícios para toda a comunidade científica. Em resposta a esta necessidade surgiu uma oportunidade de trabalho em conjunto do LIM com o Laboratório de Associado de Sensores e Materiais (LAS) da unidade do INPE de São José dos Campos, com a equipe o grupo do Laboratório de Células Solares, que possui em sua infra-estrutura um simulador solar utilizado para a caracterização de células solares.

Um simulador solar é um equipamento utilizado para reproduzir uma iluminação próxima à luz solar natural com o objetivo de testar células solares, plásticos, materiais e outros equipamentos. A norma ASTM E927-10 [6] fornece meios para classificar os simuladores solares utilizados em testes de equipamentos fotovoltaicos (células ou módulos solares) levando em consideração o casamento espectral com relação a uma irradiância espectral de referência, a não-uniformidade espectral da irradiância espacial e a instabilidade temporal de irradiância. Esta classificação é dividida em três classes (A, B, ou C) e um simulador pode ser classificado em múltiplas classes dependendo de suas características. A tabela 1 mostra um resumo das características mínimas de um simulador solar para cada classe, segundo a norma ASTM.

Tabela 1. Classificação de Simuladores

Classificação	Características		
	Casamento espectral para todos os intervalos	Não-uniformidade espacial de irradiância*	Instabilidade temporal de irradiância
Classe A	0,75 a 1,25	3%	2%
Classe B	0,6 a 1,4	5%	5%
Classe C	0,4 a 2,0	10%	10%

* Para simuladores com área de teste pequena a não-uniformidade para Classe A é 2%

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização de simuladores solares utilizados para caracterização de células solares como fonte de radiação artificial para calibração *indoor* de piranômetros e comparar os resultados com os obtidos através da metodologia *outdoor*. Com os resultados obtidos poder-se-á estabelecer uma metodologia para calibração *indoor*. Este artigo apresenta: a metodologia proposta, os critérios e procedimentos utilizados, a análise

de resultados, o cálculo do fator de calibração e da incerteza de medição, as limitações do método e sua aplicabilidade.

2. METODOLOGIA

Propôs-se um sistema de calibração por comparação com um piranômetro padrão de trabalho, calibrado pelo LIM através do método *outdoor* por comparação com o piranômetro de referência e com rastreabilidade à Referência Radiométrica Mundial, utilizando como fonte de radiação um Simulador Solar, disponível nas instalações do LAS.

Além da calibração *indoor*, foram realizadas mais duas calibrações *outdoor* do mesmo piranômetro, uma utilizando o mesmo padrão de trabalho utilizado para a calibração *indoor* e a outra utilizando o padrão de referência do LIM calibrado nas instalações do PMOD/WRC (*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center*), na Suíça [7].

2.1. O Sistema de Calibração Indoor

O experimento *indoor* foi realizado LAS. A Figura 1 ilustra o sistema de calibração.

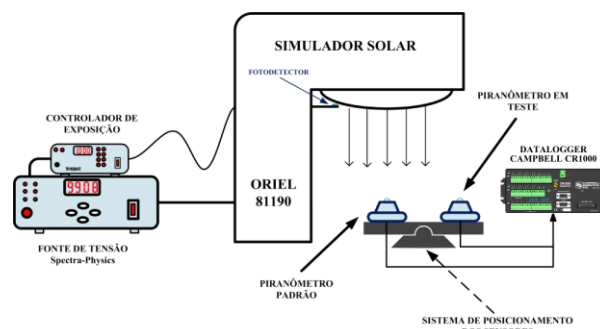


Fig. 1. Diagrama esquemático do sistema de calibração proposto

Para a calibração *indoor* foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Fonte artificial de radiação:** simulador solar de 1000 W, marca ORIEL, modelo 81193, equipada com uma lâmpada de arco curto de xenônio de emissão contínua com fluxo de saída colimado e uniforme de 6 x 6" (152 x 152 mm), modelo 6271. A potência do fluxo pode ser ajustada para até 25% da potência total do simulador através da combinação entre a potência da fonte de alimentação e ajustes no sistema óptico. O ângulo de colimação é de $\pm 3^\circ$ e a uniformidade de fluxo $\pm 5\%$ [8];
- Padrão de trabalho:** piranômetro, marca Kipp&Zonen, modelo CM22, calibrado através do método *outdoor* pelo INPE/CPTEC/LIM, com rastreabilidade ao PMOD / WRC (Referência Radiométrica Mundial). Certificado de calibração número 167-11, sensibilidade de $9,34 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e incerteza de $\pm 1,7\%$ [9];
- Sistema de coleta de dados:** datalogger, marca Campbell, modelo CR1000, calibrado pela RBC / INPE /

LIT (Rede Brasileira de Calibração/Laboratório de Integração e Testes), com rastreabilidade ao INMETRO. Certificado de calibração número LIT06-CPT-CC-034 [10];

- (d) *Radiômetro sob calibração*: piranômetro, marca Kipp&Zonen, modelo CM21, número de série: 021045.

Foram realizados também alguns testes preliminares antes da definição de um procedimento para a calibração propriamente dita:

- (a) *Estabilidade temporal da lâmpada do simulador*: o objetivo deste teste era determinar o tempo necessário para que a lâmpada do simulador entrasse em regime (atingisse a estabilidade). Para estas medidas foi utilizado um piranômetro fotovoltaico, que tem como elemento sensor uma célula solar de silício monocristalino, com tempo de resposta menor que 10 ms. Após 45 minutos de aquecimento da lâmpada sua flutuação máxima atingiu 1,6% para mais e 1,2% para menos.
- (b) *Temperatura máxima atingida por um corpo de teste semelhante depois de 2 horas sob irradiação*: foi colocado um corpo de prova em alumínio anodizado na cor natural com massa equivalente ao piranômetro sob calibração na base de incidência da radiação do simulador solar com o objetivo de monitorar a temperatura deste corpo. As medidas de temperatura foram realizadas com ventilação forçada e sem ventilação. Após as 2 horas o corpo de teste apresentou uma temperatura máxima de 42°C sem ventilação e de 36 °C com ventilação forçada.
- (c) *Avaliação da dependência da intensidade na estabilidade do sistema*: foram realizadas medidas com o piranômetro fotovoltaico para diferentes intensidades de irradiação e, após os 45 minutos de estabilização, observou-se que a estabilidade do sistema não depende da intensidade da irradiação.
- (d) *Homogeneidade da irradiância na área ocupada pela janela do sensor*: para este teste foi utilizado um espectrômetro, modelo GetSpec 2048, na superfície iluminada pelo simulador solar onde foram colocados os sensores para calibração. Para a área central (76 x 76 mm) obteve-se uma variação de $\pm 2,47\%$ na homogeneidade e para a área sugerida pelo manual (152 x 152 cm), $\pm 4,80\%$. Segundo o fabricante, a variação de homogeneidade do simulador Oriel 81193 é de $\pm 5\%$ [8].

2.2. Procedimento de Calibração Indoor

Os valores nominais de irradiância escolhidos para o experimento foram: 500, 600, 700, 800, 900, 1000 e 1100 W/m². Utilizou-se um sistema mecânico para o posicionamento idêntico e alternado dos piranômetros sob o fluxo da lâmpada. Cada um dos piranômetros foi instalado com seu elemento sensor a uma mesma distância do vértice da lâmpada e cuidadosamente nivelado antes do posicionamento no sistema. Após cada ajuste de irradiância, aguardou-se um período de 45 minutos para dar início a cada série de medidas, tempo necessário para a estabilização

da lâmpada. Para cada valor de irradiância ajustado no simulador foram realizadas 30 leituras consecutivas no padrão de trabalho e depois mais 30 leituras consecutivas no piranômetro sob teste, considerando um intervalo de 1 minuto entre cada leitura. Os valores foram armazenados no *datalogger* e posteriormente foram feitos os cálculos.



Fig. 2. Sistema de calibração indoor realizado no LAS

A Figura 2 mostra o simulador solar e o padrão de trabalho, utilizados nos experimentos.

2.3. O Sistema e o Procedimento de Calibração Outdoor

Para o sistema de calibração *outdoor* foram utilizados os equipamentos dos subitens (b), (c) e (d), do item 2.1. Além destes equipamentos foi feita uma segunda calibração utilizando como referência o piranômetro padrão, CM22, marca Kipp&Zonen, calibrado no PMOD/WRC. Certificado de calibração número 2010-C-109 [7]. Sensibilidade de 8,58 $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e incerteza de $\pm 0,7\%$.

Os piranômetros de teste e padrão foram montados lado a lado na mesa de calibração situada na cobertura do prédio do CPTEC/LIM (latitude: 22° 39' 49" S, longitude: 45° 00' 34" O, altitude: 563 m), conforme Figura 3.



Fig. 3. Sistema de calibração outdoor do CPTEC/LIM

O procedimento de calibração utilizado pelo LIM consistiu em fazer as leituras continuamente por vários dias, armazenando os dados no *datalogger*, que foi programado para coletar os dados a cada minuto, registrando a data, o horário, as medidas dos piranômetros em mV. Foram considerados como “dados válidos” os horários com elevação solar $\geq 20^\circ$, levando-se em consideração a latitude, longitude, altitude do município de Cachoeira Paulista. Foram escolhidos os dias de céu claro ou com poucas nuvens durante os meses de maio e junho de 2011. O procedimento adotado pelo LIM está em conformidade com

as normas ISO 17025:2005 [11], ISO 9847:1992 e ASTM E824-10.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1. Calibração Indoor

As leituras nos piranômetros foram feitas em tensão e foram calculados fatores de calibração individuais para cada leitura, considerando o fator de calibração do Certificado de Calibração do padrão de trabalho, conforme a relação:

$$F(ij) = \frac{V_R(ij)}{V_F(ij)} F_R, \quad [\text{W.m}^{-2}/\mu\text{V}] \quad (1)$$

onde

$V_R(ij)$ é a tensão medida no piranômetro de referência [mV];
 $V_F(ij)$ é a tensão medida no piranômetro de teste [mV];
 F_R é o fator de calibração do piranômetro padrão [W.m⁻²/μV].

O fator de calibração final foi calculado de acordo com a fórmula (2):

$$F = \frac{F_R \sum_{i=1}^n V_R(ij)}{\sum_{i=1}^n V_F(ij)}, \quad [\text{W.m}^{-2}/\mu\text{V}] \quad (2)$$

A Sensibilidade do piranômetro, S, dada em microvolts por watt por metro quadrado, informada também nos Certificados de Calibração é calculada através do inverso do fator de calibração F.

As fontes de incerteza que influenciam na determinação do fator de calibração do piranômetro sob calibração foram identificadas como sendo:

- (a) *Repetitividade das medidas*: foram consideradas as 30 medidas realizadas para cada valor de irradiância ajustado no simulador, ou seja, um total de 300 medidas. Incerteza do tipo A.
- (b) *Certificado do padrão de trabalho*: o padrão de trabalho foi calibrado pelo método *outdoor* no LIM, por comparação com o padrão calibrado no POMD/WRC. A sensibilidade informada no Certificado de Calibração [9] é de 9,34 μV/W.m⁻² ± 1,7%. Incerteza do tipo B.
- (c) *Certificado do datalogger*: para a faixa utilizada nas medidas, 7,5 mV, o Certificado de Calibração do datalogger [10] informa uma incerteza de ± 0,024%. Incerteza tipo B.
- (d) *Especificação do datalogger*: para a faixa de 7,5 mV, segundo o fabricante [12], a incerteza é ± [(0,06% da leitura + (1,5×1,0 + 1,0)) μV. Incerteza do tipo B.

(e) *Não-uniformidade de irradiância do simulador solar*: foi utilizado o valor de ± 2,47%, obtido através do teste preliminar que mediu a homogeneidade na área da janela do sensor dos piranômetros. Incerteza do tipo B.

(f) *Instabilidade temporal de irradiância do simulador solar*: ± 5,0% (fabricante) [8]. Incerteza do tipo B.

(g) *Instabilidade de irradiância durante as medidas*: foi calculada a irradiância emitida pelo simulador para cada leitura do padrão e calculado o desvio-padrão para cada conjunto de medidas. O valor que apresentou maior instabilidade foi o de 1100 W/m² e o menor, o de 700 W/m². A incerteza para o maior valor foi de ± 0,05%. Incerteza do tipo B.

A calibração *indoor* utilizando a metodologia descrita produziu como resultado uma sensibilidade de 10,79 μV/W.m⁻² ± 6,7%.

Para quantificar a incerteza padrão combinada associada às fontes de incerteza identificadas foram aplicados os tratamentos estatísticos publicados pelo documento de referência EA-4/02 e pelo Guia para expressão da incerteza de medição [13, 14]. A incerteza expandida de medição relatada foi declarada como a incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência *k*, o qual para uma distribuição *t-student* com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Além da obtenção do fator de calibração e sua incerteza, avaliou-se também os desvios-padrão para os níveis de irradiância ajustados. O valor que apresentou menor desvio-padrão foi 700 W/m².

3.2. Calibração Outdoor

Para a calibração *outdoor*, a análise de dados, o cálculo de incertezas e a obtenção do fator de calibração foram realizados segundo o procedimento do Laboratório de Metrologia Ambiental do LIM para calibração *outdoor* com os piranômetros em posição horizontal discutido detalhadamente em [2].

Os resultados obtidos para o piranômetro CM21 em função do padrão utilizado como referência foram:

- (a) *Padrão CM22 calibrado pelo LIM, com rastreabilidade ao PMOD/WRC*: 10,70 μV/W.m⁻² ± 1,9%.
- (b) *Padrão CM22 calibrado pelo PMOD/WRC*: 10,66 μV/W.m⁻² ± 1,1%.

3.3. Outdoor versus Indoor

Os resultados obtidos e também os resultados de calibrações anteriores são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Resultados

Data de Calibração	Fator de Calibração (F) [W.m ⁻² /μV]	Inc.Expandida de Medição [W.m ⁻² /μV]	Sensibilidade (S) [μV/W.m ⁻²]	Inc.Expandida de Medição [μV/W.m ⁻²]	Inc.Expandida de Medição Relativa	Método	Fonte	Laboratório
10/09/02	0,0927	0,0019	10,79	0,22	2,0%	Indoor	Lâmpada ¹	Kipp&Zonen ³
28/04/08	0,0944	0,0024	10,59	0,26	2,5%	Outdoor	Sol	CPTEC/LIM
28/06/11	0,0938	0,0011	10,66	0,12	1,1%	Outdoor	Sol	CPTEC/LIM
28/06/11	0,0935	0,0018	10,70	0,20	1,9%	Outdoor	Sol	CPTEC/LIM
14/03/11	0,0927	0,0062	10,79	0,72	6,7%	Indoor	Lâmpada ²	CPTEC/LIM/LAS

¹ Lâmpada halógena com filamento de tungstênio

² Lâmpada arco de xenônio do Simulador Solar

³ Fabricante

A Figura 4 ilustra graficamente os resultados obtidos.

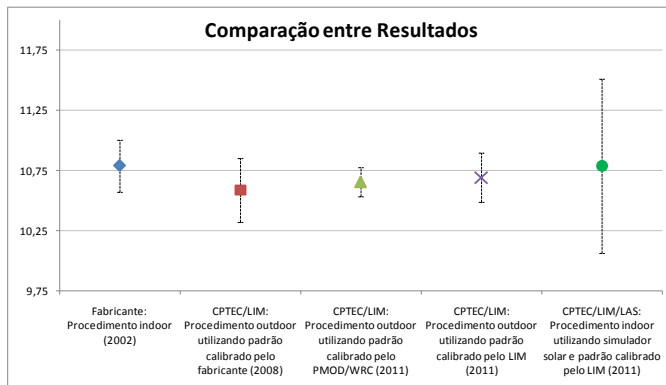


Fig. 4. Gráfico comparativo de incertezas

4. DISCUSSÃO

Dentre as fontes de incerteza identificadas para o método *indoor* observou-se que as características que classificam a fonte de luz como simulador solar são as que mais contribuem para o aumento da incerteza expandida de medição. Ou seja, ao escolher uma fonte de luz esta deve enquadrar-se nos requisitos da norma ASTM E927-05 para que possa ser designada como um simulador solar, além disso o ideal para que se obtenha uma incerteza menor é que o simulador seja de classe A. Por melhor que seja o piranômetro de referência torna-se necessário melhorar o sistema ou meio de calibração responsável por simular as condições necessárias.

Ainda com relação ao simulador, o nível de irradiância a ser escolhido deve ser tal que produza a menor instabilidade possível. No caso do simulador em questão, este valor seria o de 700 W/m².

O objetivo de qualquer calibração é avaliar o instrumento em toda a sua faixa de trabalho. Para um piranômetro espera-se uma resposta linear às variações do nível de radiação e que seja insensível às variações nos parâmetros ambientais, embora alguns desvios da ordem de poucos por cento sejam comuns.

Durante uma calibração *outdoor*, parâmetros como mudanças graduais nas condições ambientais e de radiação, ângulo de incidência e variações na temperatura do ar, podem afetar a performance do equipamento e são avaliadas

e observadas. Num dia de céu claro, valores em torno do meio-dia solar não apresentam desvios, o que pode mudar nas leituras feitas pela manhã ou ao entardecer devido provavelmente a quando os ângulos de incidência são tais que o sensor apresenta um desvio em relação a lei dos cossenos.

Para a calibração *indoor*, o piranômetro não pode ser avaliado em toda a sua performance, pois o fluxo radiante é direcional. Tendo isto em mente é aceitável e mais confiável que a incerteza obtida através deste método seja maior ou mais abrangente.

A aplicabilidade da calibração *indoor* dependerá do propósito a que se destina o equipamento. Medidas de irradiação para aplicações de energia solar requerem um nível de incerteza da ordem de menos de 5% [WMO], estações radiométricas pertencentes a Rede Mundial (BSRN), 2% a 3%, etc. Outras aplicações, como monitoramento de ambiental, estudos de performance de longa duração, pesquisas de biomassa e agricultura podem ser mais flexíveis quanto ao nível de incerteza.

Se consideramos as calibrações para as quais não se exige um nível de incerteza tão rigoroso, a principal desvantagem é com relação ao tempo de utilização do piranômetro padrão (tempo de exposição à radiação), uma vez que na calibração *outdoor*, vários equipamentos podem ser calibrados simultaneamente, enquanto que na calibração *indoor* só é possível calibrar um equipamento para cada ciclo.

Outros experimentos se fazem necessários como, por exemplo, variar os ângulos de inclinação para simular diferentes posições de cosseno correspondentes a determinados ângulos de incidência e simultaneamente variar o ângulo azimutal do piranômetro para cada uma destas posições. Com este tipo de teste seria possível abranger um pouco mais a faixa de trabalho do piranômetro. Também seria importante verificar se a utilização de filtros que correspondam ao espectro global, por exemplo, teriam uma influência positiva na calibração.

5. CONCLUSÃO

Com as definições das matrizes energéticas que cada país vem realizando, tanto para o estudo da disponibilidade de energia solar quanto para o ciclo hidrológico e tantas

outras aplicações, a calibração dos piranômetros é fundamental.

Com o estudo preliminar deste trabalho poder-se-á inferir melhorias no sistema proposto, discutir a sua viabilidade em termos práticos e de incerteza de medição, assim como qual sua aplicabilidade atual. A continuidade dos testes com outros modelos de piranômetros possibilitará classificar quais tipos de sensores e para quais aplicações se destinam a calibração *indoor* ou de laboratório e também qual a melhor periodicidade de calibração.

Devido à logística envolvida e da falta de sensores reservas nas estações de observação ambiental, um estudo sobre o histórico da instrumentação utilizada para a variável radiação solar está em andamento para obtenção de uma metodologia para que se possa estabelecer critérios de alternância entre as calibrações *outdoor* e *indoor* sem prejuízo para a confiabilidade das medidas de campo.

AGRADECIMENTOS

Às equipes do Laboratório de Células Solares do LAS/INPE e do Laboratório de Instrumentação Meteorológica do CPTEC/INPE pela dedicação e esforço conjunto. Ao MCT, FINEP, INPE e INMETRO pelo incentivo à implantação da área de Metrologia Ambiental no INPE e à CAPES e FAPESP pela disponibilização das normas técnicas.

REFERÊNCIAS

- [1] W. A. Vilela. “Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar”, (Tese de Doutorado, INPE São José dos Campos-SP, 2010), p. 178.
- [2] P. L. O. Guimarães, M. A. A. Santana. “Calibração de Sensores de Radiação Solar no Laboratório de Metrologia Ambiental do Inpe”, V CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, Salvador-BA, 9 a 13 de novembro de 2009.
- [3] International Organization for Standardization, “Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”, ISO 9847, 1992.
- [4] ASTM International, “Standard Test Method for Transfer of Calibration From Reference to Field Radiometers”, ASTM E 824-10, 2010.
- [5] World Meteorological Organization, “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation”, seventh edition, 2008.
- [6] ASTM International, “Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing”, ASTM E 827-10, 2010.
- [7] Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center, “Calibration Certificate N° 2010-C-109”, 8 de novembro de 2010.
- [8] Oriel Instruments, “1000 Watt Solar Simulator. Models 81190”, 1996.
- [9] INPE/CPTEC/LIM, “Certificado de Calibração n° 167-11”, 28 de junho de 2011.
- [10] INPE/LIT, “Certificado de Calibração n° LIT06-CPT-CC-034”, 17 de dezembro de 2010.
- [11] NBR ISO/IEC 17025:2005 – “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”.
- [12] Campbell Scientific Inc., “Operator Manual CR1000 datalogger”.
- [13] EA / Inmetro; SBM. “Expressão da incerteza de medição na calibração”. 1a. ed. brasileira do EA-4/02. RJ: INMETRO, ABNT, SBM, 1999. 34p.
- [14] Inmetro, et al. “Guia para expressão da incerteza de medição”. 3a. ed. brasileira do GUM. RJ: ABNT, INMETRO, SBM, 1998. 121p.
- [15] Inmetro, “Vocabulário Internacional de Metrologia . Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)”, 1ª ed, INMETRO, Rio de Janeiro 2009.