

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO INDOOR PARA PIRANÔMETROS BASEADO EM UM SIMULADOR SOLAR

Patrícia Lúcia de Oliveira Guimarães - patricia.guimaraes@cptec.inpe.br

Márcio Antonio Aparecido Santana - marcio.santana@cptec.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos,
Laboratório de Instrumentação Ambiental, Metrologia Ambiental

Waldeir Amaral Vilela - waldeir@las.inpe.br

Tiago Franca Paes - tiago@las.inpe.br

Luís Ângelo Berni - berni@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório de Associado de Sensores e Materiais,
Laboratório de Células Solares

Luiz Fernando da Silva - fernando.silva@cptec.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos,
Laboratório de Instrumentação Ambiental, Metrologia Ambiental

Resumo. Este trabalho apresenta a avaliação metrológica de um sistema de calibração ‘indoor’ de piranômetros que utilizou como fonte de radiação um simulador solar comercial, que é normalmente utilizado para caracterização de células solares de silício. Para validar o método indoor de calibração, foi realizada uma avaliação do simulador solar com relação as suas principais características com o intuito de minimizar as contribuições de incerteza provenientes da fonte de radiação. Ajustou-se o simulador solar para alguns níveis de irradiância e o sinal de saída do piranômetro em calibração foi comparado com o sinal obtido na saída de um piranômetro padrão de referência que foi previamente calibrado pelo método ‘outdoor’. Foi obtido o Fator de Calibração do piranômetro em teste e sua respectiva incerteza levando-se em consideração as diversas fontes de incerteza do sistema proposto e por fim a incerteza obtida pelo método de calibração ‘indoor’ foi comparada às incertezas obtidas através do método de calibração ‘outdoor’.

Palavras-chave: Radiação solar, Instrumentação ambiental, Calibração de radiômetros.

1. INTRODUÇÃO

Mensurar a quantidade de energia solar disponível é de fundamental importância na determinação do balanço de energia para as mais diversas áreas do conhecimento, seja para analisar as propriedades da atmosfera, determinar a energia disponível para a fotossíntese, validar medidas de radiação feitas por satélite, desenvolver projetos de eficiência energética dentre outras muitas aplicações.

Instrumentos que medem radiação solar global (radiação direta + radiação difusa) ou de ondas curtas são denominados piranômetros e podem ter seu princípio construtivo baseado em elementos sensores do tipo termoeletrico, fotoeletrico, piroeletrico ou bimetálico. Os mais comumente utilizados são os piranômetros do tipo termopilha e os do tipo fotoeletrico ou fotovoltaico, sendo que o primeiro é utilizado quando se requer uma exatidão maior (Vilela, 2010).

O piranômetro do tipo termopilha apresenta a saída um sinal em milivolts proporcional à diferença de temperatura entre uma superfície negra que é aquecida pela radiação incidente e uma placa branca inserida no interior do instrumento que não recebe radiação (junções de referência). Um domo de material específico (quartzo, por exemplo) melhora a resposta de cosseno e protege a superfície detetora do vento e da umidade. O corpo do instrumento é protegido da radiação solar direta através da utilização de um protetor de radiação e também pode ser usado um ventilador acoplado à base para controle da temperatura e manter o domo limpo. A Fig. 1 apresenta os detalhes construtivos e um piranômetro do tipo termopilha, de primeira classe.

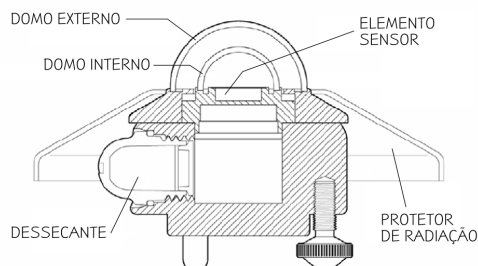


Figura 1 - Vista em corte de um piranômetro tipo termopilha

(adaptado do Manual de Instrução Kipp&Zonen)

A calibração dos piranômetros consiste em determinar o seu Fator de Calibração e sua dependência com relação às condições ambientais (Guimarães, 2009). Dentre as possibilidades de sistemas para calibração de piranômetros estão os métodos *outdoor* e *indoor*.

No método *outdoor*, o Sol é a fonte de radiação e os instrumentos de referência podem ser: um pirheliômetro e um piranômetro sombreado, um pirheliômetro e o próprio piranômetro sob calibração sombreado, ou apenas um piranômetro, desde que todos ou cada um deles tenha rastreabilidade à Referência Radiométrica Mundial. O pirheliômetro mede radiação direta e o piranômetro, quando sombreado, mede a radiação difusa. A soma das duas componentes resulta na radiação global de interesse. A Fig. 2 mostra sucintamente os métodos citados.

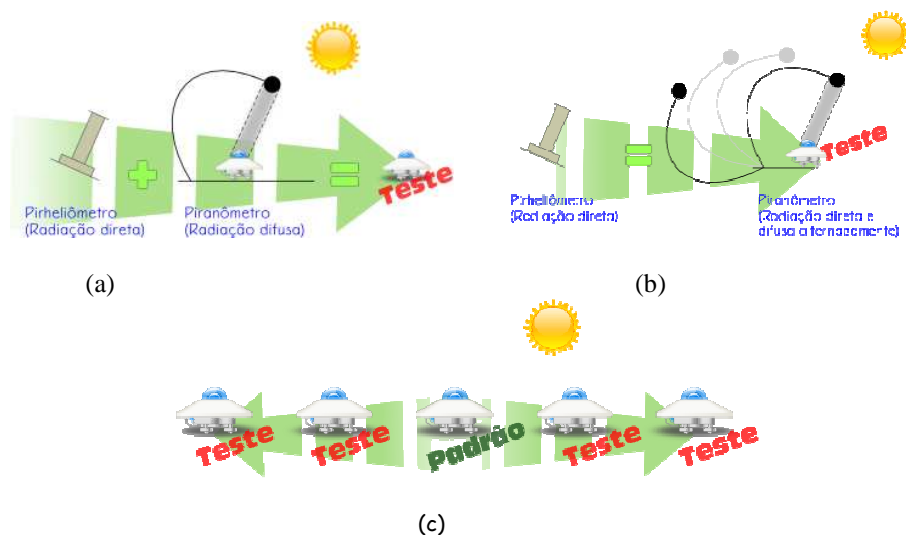


Figura 2 - (a) Calibração por comparação utilizando um pirheliômetro de referência para irradiância solar direta e um piranômetro de referência para irradiância difusa; (b) Por comparação utilizando um pirheliômetro de referência, o Sol como fonte de radiação e um disco sombreador removível para o piranômetro; e (c) Por comparação com um piranômetro de referência, utilizando o Sol como fonte, sob condições naturais de exposição.

As normas ISO 9846:1993, ISO 9847:1992 e ASTM E824 10 descrevem cada uma destas metodologias em detalhes.

No método *indoor*, a calibração é realizada em laboratório utilizando uma fonte artificial radiação (bancada óptica, esfera integradora, lâmpada, etc.) e, como instrumento de referência, pirheliômetros e/ou piranômetros com rastreabilidade à Referência Radiométrica Mundial. Alguns tipos de sistema são descritos sucintamente na norma ISO 9847:1992, embora este método seja descrito em normas, utilizados em indústrias de sensores de radiação e com dispositivos disponíveis no mercado para esta finalidade, ela é pouco utilizada devido principalmente às dificuldades técnicas de realizar tal calibração e pela falta de confiança de seus usuários nos sistemas atualmente disponíveis.

Os sistemas de calibração pelo método *outdoor* são largamente utilizados tendo em vista o baixo custo e a facilidade de realizá-la. Este método é o utilizado no Brasil pelo LIM/CPTEC/INPE (Laboratório de Instrumentação Meteorológica/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), em Cachoeira Paulista. Os instrumentos calibrados através destas metodologias atendem aos requisitos de incerteza recomendados pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM (WMO - *World Meteorological Organization*, 2008) para medidas de irradiância global e o instrumento é calibrado em toda a sua faixa de trabalho. A principal desvantagem do método *outdoor* em relação ao *indoor* é com relação à necessidade de vários dias de céu claro (céu aberto com pouquíssimas nuvens) tornando a calibração um processo lento e restrito algumas épocas do ano em certas regiões. Em alguns casos a estação ambiental ou solarimétrica precisa ficar desativada para esta grandeza quando o usuário necessita enviar seus instrumentos para outras regiões para serem calibrados causando enormes prejuízos em sua pesquisa e exigindo uma logística muitas vezes não disponível.

Neste contexto a utilização de uma metodologia *indoor* que apresente resultados satisfatórios em termos de requisitos de incerteza possibilitaria a realização de calibrações em curto espaço de tempo, além de verificações intermediárias hoje impensáveis dentro dos projetos de pesquisa tendo em vista, além da disponibilidade de instrumentos reservas, o custo operacional da retirada dos instrumentos de sítios distantes e de locais de difícil acesso.

A grande dificuldade na utilização de sistemas de calibração *indoor* está no alto custo dos simuladores solares de espectros expandidos que aproximam mais do espectro solar. Os simuladores solares não são desenvolvidos para calibração de radiômetros, normalmente estes dispositivos são de uso em pesquisas e indústrias de células solares e painéis fotovoltaicos, além disso, a distribuição espectral no plano de teste não inclui variações espectrais devidos a

alterações ambientais e normalmente os simuladores solares não simulam o deslocamento do sol, não permitindo reproduzir as condições exigidas pelas normas utilizadas na calibração *outdoor*. Os simuladores de custos reduzidos não simulam perfeitamente o espectro solar tornando sua aplicação inadequada para o processo de calibração de piranômetro.

O desempenho de um piranômetro durante a medida da radiação solar pode ser afetado pelas mudanças graduais na atmosfera e de radiação. Os níveis de radiação aumentam e diminuem durante o correr do dia, o ângulo de incidência e a temperatura do ar mudam e espera-se que a resposta do piranômetro perceba linearmente as mudanças nos níveis de irradiância e seja insensível a parâmetros ambientais tais como umidade e temperatura, embora possam acontecer alguns desvios em função dos princípios construtivos e da lei dos cossenos. No método *indoor* a calibração apresenta dificuldades tecnológicas para ser realizada em toda a faixa de trabalho dos principais instrumentos. Considerando as contribuições de incerteza provenientes da fonte artificial de radiação, para alguns casos, a incerteza final pode não atender aos requisitos da WMO para aplicações de balanço de energia por exemplo.

A proposta deste trabalho é avaliar metrologicamente um sistema de calibração *indoor* composto por um simulador solar comercial utilizado para caracterização de células solares de silício, que reproduz aproximadamente a radiação solar natural, e um piranômetro de referência calibrado através do método *outdoor*. São discutidas ainda as limitações do método e sua aplicabilidade.

1.1. O Simulador Solar

Simuladores solares são dispositivos que reproduzem em certas condições uma irradiância similar à radiação solar com o propósito de pesquisa e testes em laboratório de dispositivos fotovoltaicos (células e painéis solares), coletores térmicos solares, tintas automotivas, plásticos, materiais e outros equipamentos. Um simulador solar consiste basicamente de três componentes principais: (a) Iluminador e fonte de alimentação associada; (b) sistema óptico e filtros para colimar e casar o espectro e (c) controles para operação e ajustes de irradiância, como mostra a Fig.3.

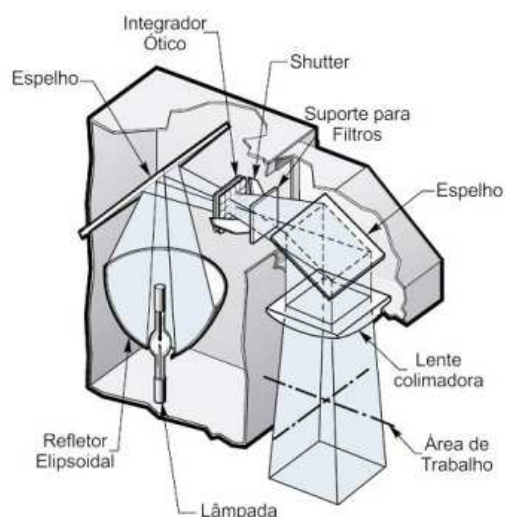


Figura 3 - Diagrama esquemático de um simulador solar. (Fonte: Newport, 2011)

Para que uma fonte de luz possa ser designada com sendo um simulador solar ela deve enquadrar-se nos requisitos da norma ASTM E927-10, que fornece meios para classificar os simuladores de acordo com o casamento espectral com relação a uma irradiância espectral de referência, a não-conformidade espectral da irradiância espacial e a instabilidade temporal de irradiância (Paes 2012).

2. O SISTEMA DE CALIBRAÇÃO

O sistema de calibração *indoor*, proposto neste trabalho é esquematizado na Fig.4. Ele é composto de um simulador solar, um piranômetro (classificado pela norma ISO 9060:1990 como padrão secundário) padrão de trabalho, um sistema de coleta de dados e um dispositivo mecânico de posicionamento.

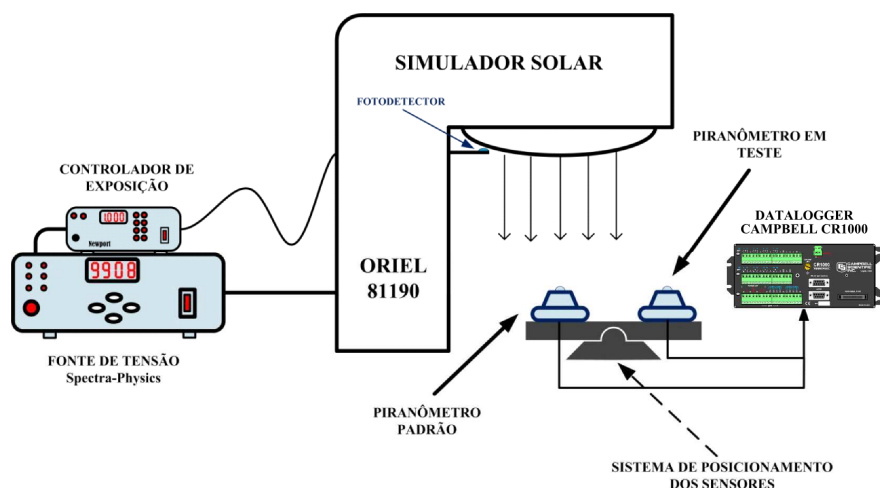


Figura 4 - Diagrama esquemático do sistema de calibração *indoor*

A fonte de radiação solar da Fig.5(a) é um simulador para caracterização de células solares de silício de 1000 W, marca ORIEL, modelo 81193, equipado com uma lâmpada de arco de Xenônio de emissão contínua com fluxo de saída colimado e uniforme de 6 x 6" (152 x 152 mm). A potência do fluxo de radiação pode ser ajustada para até 30% 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 $\pm 3^\circ$ (Oriel Instruments, 1996).

O padrão de trabalho da Fig.5 (b) é um piranômetro ventilado marca Kipp&Zonen, modelo CM22 (INPE/CPTEC/LIM, 2011), calibrado no LIM, em Cachoeira Paulista, através do método *outdoor*, com rastreabilidade ao PMOD / WRC (*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center*), na Suíça.

Para coletar e armazenar as leituras foi utilizado um datalogger, marca Campbell, modelo CR1000, calibrado pela RBC / INPE / LIT (Rede Brasileira de Calibração/Laboratório de Integração e Testes), com rastreabilidade ao INMETRO (INPE/LIT, 2010).

O radiômetro escolhido como instrumento sob calibração foi um piranômetro, marca Kipp&Zonen, modelo CM21, também classificado como padrão secundário segundo a norma ISO 9060:1990.

Todo o sistema que engloba a fonte artificial de radiação foi caracterizado em conformidade com as normas IEC 60904-9 Edición 2.0 2007-10 e ASTM E927-10, que fornecem metodologias de teste para classificar os simuladores 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.



(a)



(b)

Figura 5 - (a) Simulador Solar do Laboratório Associado de Sensores do INPE;
(b) Piranômetro padrão de trabalho do Laboratório de Instrumentação Meteorológica do INPE.

2.1 Caracterização da Fonte Artificial

(a) Irradiância espectral de referência:

Para que uma fonte artificial de radiação possa ser considerada como um simulador solar seu espectro deve assemelhar-se tanto quanto possível ao espectro solar. Para realizar esta comparação o simulador foi calibrado a uma

irradiância de $1353 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (constante solar) utilizando como referência uma célula solar de silício monocristalino de aplicação espacial (CHINA-923), por ter sua rastreabilidade e seus parâmetros bem definidos, possibilitando a comparação do espectro solar padrão da ASTM com espectro do simulador solar. Os resultados são mostrados na Fig. 6 e classificam o simulador como classe C.

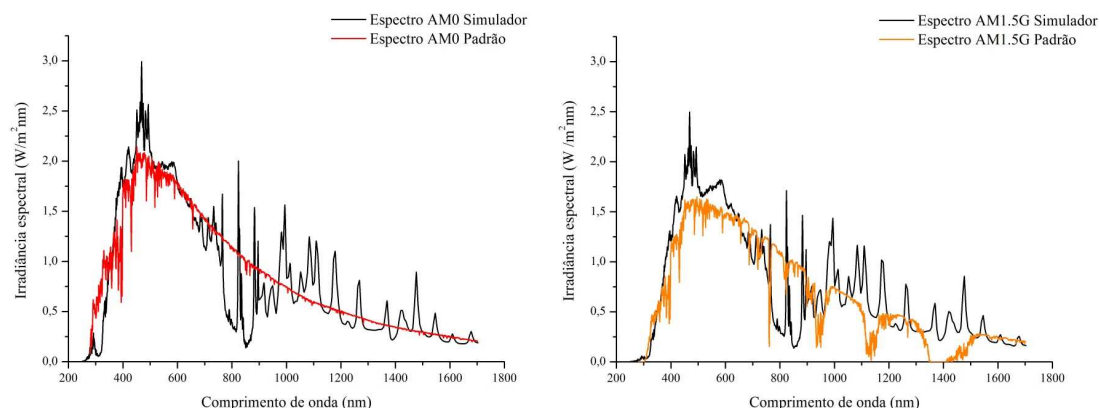


Figura 6 - Espectro solar padrão x espectro do simulador

(b) Não uniformidade de irradiância:

O mapeamento da uniformidade foi realizado para a área de trabalho de $(152 \times 152) \text{ mm}^2$ determinada no manual do fabricante do Simulador Solar Oriel 81193. Para realização das medidas foi utilizado um radiômetro calibrado, marca Li-Cor, com uma janela ótica de $47,8 \text{ mm}^2$. Também foram feitas medidas considerando uma área de $(76 \times 76) \text{ mm}^2$, visando uma região mais uniforme. O esquema utilizado permitiu mapear a uniformidade do feixe, calcular a não uniformidade e classificar o simulador solar de acordo com as normas IEC 60904-9 Edição 2.0 2007-10 e ASTM E927-10 (Paes 2012).

Para a área de $(152 \times 152) \text{ mm}^2$ foi obtida uma não uniformidade do feixe de $\pm 2,27\%$, classificando o simulador como classe B e para a área de $(76 \times 76) \text{ mm}^2$, $1,70\%$, classificando o simulador como classe A.

(c) Instabilidade temporal de irradiância:

A medida da resposta temporal tem por objetivo determinar variações significativas de irradiância incidente. Foi utilizado um radiômetro desenvolvido pelo Laboratório de Células Solares do INPE que foi posicionado no ponto central da área de trabalho do simulador e foram coletadas medidas por um período de duas horas. Este radiômetro possui uma célula solar de silício monocristalino como elemento sensor e apresenta tempo de resposta da ordem de ms.

Após 45 minutos (tempo necessário para o aquecimento da lâmpada) a flutuação máxima foi de $\pm 1,41\%$. A classificação do simulador referente a sua estabilidade temporal é classe A.

2.2 Procedimento de calibração

As medidas foram realizadas em conjunto com o Laboratório 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.

O procedimento de calibração consistiu em realizar 30 leituras consecutivas, em intervalos de 1 minuto, no padrão de trabalho e depois mais 30 leituras consecutivas no piranômetro sob teste, para cada um dos valores nominais de irradiância escolhidos: 500, 600, 700, 800, 900, 1000 e $1100 \text{ W}/\text{m}^2$. Após cada ajuste de irradiância, aguardou-se um período de 45 minutos para dar início a uma nova série de medidas, tempo necessário para a estabilização do simulador solar.

Um sistema mecânico para o posicionamento idêntico e alternado dos piranômetros sob o fluxo da lâmpada foi desenvolvido para que cada um dos piranômetros fosse instalado com seu elemento sensor a uma mesma distância do vértice da lâmpada, tomando-se o cuidado de nivelá-los antes do posicionamento no sistema. Os valores foram armazenados no *datalogger* e posteriormente foram feitos os cálculos.

2.3 Identificação das fontes de incerteza

Foram identificadas sete fontes de incerteza para o Método Indoor que influenciam na determinação do fator de calibração do piranômetro sob calibração, conforme Tab.1.

Tabela 1. Balanço de incertezas

Símbolo	Descrição	Fator de Abrangência	Distribuição	u	ν
$u(x_1)$	Repetitividade das medidas	-	Normal	0,01%	209
$u(x_2)$	Certificado do padrão	2,00	Normal	0,85%	∞
$u(x_3)$	Certificado do <i>datalogger</i>	4,53	Normal	0,024%	2,84
$u(x_4)$	Especificação do <i>datalogger</i>	1,73	Retangular	0,066%	∞
$u(x_5)$	Não-uniformidade de fluxo do simulador solar	2,00	Normal	0,85%	-
$u(x_6)$	Instabilidade temporal do simulador solar	2,00	Normal	0,71%	-
$u(x_7)$	Níveis de irradiância do simulador solar	2,00	Normal	0,05%	29
U_c	Incerteza expandida	-	Normal	2,8%	-

A calibração indoor utilizando a metodologia descrita produziu como resultado uma sensibilidade de $10,79 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 2,8\%$, para um fator de abrangência de $k = 2,00$ o qual, para uma distribuição *t-student* com grau de liberdade efetivo infinito, corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%..

A incerteza padrão combinada associada às fontes de incerteza identificadas foi obtida conforme os tratamentos estatísticos publicados pelo documento de referência EA-4/02 e pelo Guia para expressão da incerteza de medição (EA/Inmetro e SBM, 1999) (Inmetro, *et al.*, 1998).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através de um gráfico comparativo entre as diversas fontes de incerteza, visualizado na Fig. 7, verifica-se que as maiores contribuições para a incerteza expandida de medição são o certificado de calibração do piranômetro padrão, $u(x_2)$, e a não-uniformidade de fluxo do simulador solar, $u(x_5)$, seguidos pela instabilidade temporal do simulador solar, $u(x_6)$.

Comparando os resultados obtidos pela calibração *indoor* e os resultados obtidos pelas calibrações *outdoor* e calibrações anteriores obteve-se o a Tab. 2. Os dados desta tabela se referem ao radiômetro CM21, n/s: 021045, calibrado no LIM e no LAS. Os dados da primeira linha desta tabela se referem à primeira calibração do instrumento que consta no certificado de calibração fornecido pelo fabricante.

Para obtenção das incertezas referente ao o método indoor considerou-se inicialmente as informações fornecidas pelo fabricante do simulador, posteriormente foi realizada uma caracterização minuciosa de todo o sistema, por isso observa-se uma significativa melhora na incerteza.

Para o método outdoor não existem as incertezas $u(x_5)$, $u(x_6)$ e $u(x_7)$, logo para melhorar um sistema indoor, é necessário melhorar estas três incertezas e quanto menores estas incertezas, mais uma metodologia se aproximará da outra. Embora a incerteza na determinação do fator de calibração do piranômetro no método indoor com uso do simulador solar tenha apresentado valores aceitáveis para o WMO, isto não significa que se deva validar este método de calibração, pois para o método indoor com utilização de simuladores solares, não se aplicam as normais existentes e os resultados aqui apresentados são ainda preliminares e teríamos que testar outros modelos de radiômetros para fazer essa afirmação, pois a incerteza $u(x_1)$ é um comportamento particular de cada instrumento e não quer dizer que ele se comportará da mesma forma.

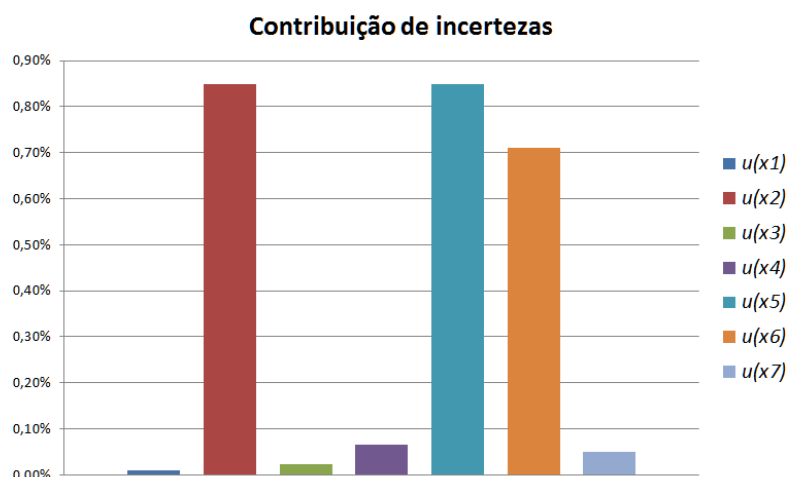


Figura 7 - Gráfico comparativo de contribuições de incerteza

Tabela 2. Resultados comparativos entre métodos e calibrações anteriores

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	Simulador	CPTEC/LIM/LAS
27/04/12	0,0927	0,0026	10,79	0,30	2,8%	Indoor	Simulador ²	CPTEC/LIM/LAS

¹ Lâmpada halógena com filamento de tungstênio

² Lâmpada arco de xenônio do Simulador Solar

³ Fabricante

Na calibração *indoor* apresentado neste trabalho, o piranômetro não é avaliado em toda a sua faixa de trabalho, pois o fluxo radiante é direcional. Variar os ângulos de inclinação para simular diferentes posições de cosseno correspondentes a determinados ângulos de incidência e simultaneamente também variar o ângulo azimutal do piranômetro para cada uma destas posições pode ser uma opção para abranger um pouco mais a faixa de trabalho do piranômetro.

Medidas de irradiação para aplicações de energia solar em modelos de clima e meteorológicos requerem um nível de incerteza da ordem de menos de 5% (recomendação da World Meteorological Organization, 2008), estações radiométricas pertencentes à rede global de radiação BSRN (Baseline Surface Radiation Network), 2% a 3%, etc. Outras aplicações, como monitoramento de ambiental, medidas de radiação para aplicação em engenharia de dimensionamento de coletores solares e sistemas fotovoltaicos, pesquisas de biomassa e agricultura podem ser mais flexíveis quanto ao nível de incerteza. A aplicabilidade da calibração *indoor* utilizando simuladores solares dependerá do propósito a que se destina o instrumento. A principal desvantagem desta metodologia é com relação ao tempo de utilização do piranômetro padrão (tempo de exposição do padrão à radiação), uma vez que na calibração *outdoor*, vários equipamentos podem ser calibrados simultaneamente (Guimarães, 2011).

4. CONCLUSÃO

Para que os dados gerados por sensores de radiação solar possam ser utilizados quantitativamente é necessário ter um alto grau de confiabilidade no mesmo, e isto só pode ser obtido se o sensor estiver devidamente calibrado. Com objetivo de desenvolver técnica de calibração que facilite este processo, neste trabalho foi descrito e realizada uma metodologia de calibração *indoor* de sensores de radiação solar do tipo piranômetro global utilizando um simulador solar e estimado as incertezas envolvidas no processo.

A continuidade dos testes com outros modelos de piranômetros será importante para classificar quais tipos de sensores e para quais aplicações se destinam a calibração *indoor* com simulador solar e também qual a melhor condição de calibração neste sistema, considerando a impossibilidade de calibrar o sensor em toda sua faixa espectral.

Vale lembrar que para este trabalho utilizou-se os recursos disponíveis no INPE para uma avaliação preliminar do uso do método de calibração *indoor* como, por exemplo, o simulador solar para caracterização de células solares de silício que talvez não seja a ferramenta adequada para esta atividade. Uma evolução neste trabalho poderá ser obtida se for utilizados fontes de radiação com melhor casamento espectral.

Não foi intenção deste trabalho, apresentar um método de calibração alternativo ao método *outdoor*, o principal objetivo foi avaliar “metrologicamente” o uso de um simulador solar no processo de calibração para criar quesitos para o desenvolvimento futuro de dispositivos que venham permitir a calibração *indoor*. Este trabalho deverá ter continuidade, com a possível compra de um simulador solar para células multijunções (Simulador multiespectral AAA) pelo LAS o que permitirá diminuir ainda mais as incertezas e aproximar um pouco mais das condições obtidas na calibração *outdoor*.

Um grande obstáculo num país tão vasto quanto o Brasil é a logística envolvida no processo de retirada dos sensores para calibração. Retirar o sensor de uma estação e aguardar uma calibração em laboratórios que dependem das condições climáticas locais, muitas vezes é inviável. Investir em um processo de calibração que não dependa das condições ambientais traz benefícios a toda comunidade científica. A calibração *indoor* também poderá ser uma ferramenta importante utilizada para verificações intermediárias onde o nível de incerteza não seja crítico.

REFERÊNCIAS

- ASTM International, “Standard Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing”, ASTM E 827 10, 2010.
- ASTM International, “Standard Test Method for Transfer of Calibration From Reference to Field Radiometers”, ASTM E 824-10, 2010.
- Campbell Scientific Inc., “Operator Manual CR1000 datalogger”.
- EA / INMETRO; SBM. “Expressão da incerteza de medição na calibração”. 1a. ed. brasileira do EA-4/02. RJ: INMETRO, ABNT, SBM, 1999. 34p.
- INMETRO, “Vocabulário Internacional de Metrologia . Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008)”, 1ª ed, INMETRO, Rio de Janeiro 2009
- INMETRO, ET AL. “Guia para expressão da incerteza de medição”. 3a. ed. brasileira do GUM. RJ: ABNT, INMETRO, SBM, 1998. 121p.
- INPE/CPTEC/LIM, “Certificado de Calibração n° 167 11”, 28 de junho de 2011.
- INPE/CPTEC/LIM, “Certificado de Calibração n° 168 11”, 28 de junho de 2011.
- INPE/CPTEC/LIM, “Certificado de Calibração n° 169 11”, 28 de junho de 2011.
- INPE/CPTEC/LIM, “Certificado de Calibração n° 195 11”, 28 de junho de 2011.
- INPE/LIT, “Certificado de Calibração n° LIT06-CPT-CC-034”, 17 de dezembro de 2010.
- International Organization for Standardization, “Solar energy -- Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation”, ISO 9060, 1990.
- International Organization for Standardization, “Solar energy - Calibration of a pyranometer using a pyrliometer”, ISO 9846, 1993.
- International Organization for Standardization, “Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”, ISO 9847, 1992.
- Kipp & Zonen. “Instruction Manual – CMP Series CMA Series”.
- NBR ISO/IEC 17025:2005 – “Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”.
- Oriel Instruments, “1000 Watt Solar Simulator. Models 81190”, 1996.
- P. L. O. Guimarães, M. A. A. Santana, W. A. Vilela, L. A. Berni, L. F. Silva, T. F. Paes. “Avaliação da utilização de um simulador solar para calibração indoor de piranômetros”, VI CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, Natal-RN, 27 a 30 de setembro de 2011.
- 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.
- Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center, “Calibration Certificate N° 2010-C-109”, 8 de novembro de 2010.
- Paes, T. F. Sistemas de caracterização de elementos sensores para radiômetros fotovoltaicos. 2012. 123 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.06.12.50-TDI). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
- Vilela, W. A. Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar. 2010. 208 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.17.18.50-TDI). Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
- World Meteorological Organization - WMO, “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation”, seventh edition, 2008.

METROLOGICAL EVALUATION OF AN INDOOR CALIBRATION SYSTEM FOR PYRANOMETERS USING A SOLAR SIMULATOR

Abstract. In this work we present the metrological evaluation of an indoor calibration system of pyranometers using as solar radiation source a solar simulator used to characterize silicon solar cells. In order to validate the indoor calibration, the solar simulator was characterized with respect to its main characteristics to minimize the uncertainty contributions from the artificial source of radiation. The solar simulator was adjusted to different irradiance levels and the output signal of the pyranometer under test was compared with the output signal of another pyranometer previously calibrated by the method 'outdoor'. The calibration factor and the uncertainty of the pyranometer under calibration was obtained taking into account the various sources of uncertainty of the proposed system and finally the uncertainty obtained by the method 'indoor' was compared with others obtained by the method 'outdoor'.

Keywords: Solar radiation, Environmental Instrumentation, Indoor calibration.