



Desenvolvimento de sistema de calibração de células solares de referência rastreado a padrões radiométricos nacionais

T Ferreira da Silva*

Divisão de Metrologia Óptica, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro, Duque de Caxias – RJ, 25250-020, Brasil

* tfsilva@inmetro.gov.br

Resumo. Um sistema de calibração de células solares de referência (CSR) está em desenvolvimento no *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia* – Inmetro. A meta principal prevê a oferta do serviço com rastreabilidade aos padrões radiométricos nacionais. A responsividade espectral em irradiância da CSR é obtida em duas etapas de medição, que incluem a determinação de sua resposta espectral relativa (em um sistema de responsividade espectral diferencial por comparação com fotodetector calibrado) e uma medição absoluta de irradiância espectral. Este trabalho apresenta os principais avanços no desenvolvimento do sistema de medição. Os resultados preliminares indicam concordância das medições com o histórico de calibração de uma célula solar. A oferta do serviço permitirá prover a cadeia de rastreabilidade metrológica para ensaios de painéis fotovoltaicos.

1. Introdução

Células solares são dispositivos semicondutores capazes de converter radiação óptica (nas porções espectrais do ultravioleta, visível ou infravermelho, dependendo do material) em um sinal elétrico através do efeito fotovoltaico. Dispositivos fotovoltaicos (células solares, conjuntos de células solares e módulos fotovoltaicos [1]), em especial os de silício, são amplamente empregados na geração de energia elétrica renovável de matriz solar. Os ensaios de eficiência energética dos painéis fotovoltaicos objetivam sua classificação conforme normas específicas, permitindo certificar sua qualidade e comparar diferentes dispositivos entre si.

A calibração de células solares deve ser feita em condições de teste padrão [2]: (i) distribuição espectral da fonte óptica conforme o espectro solar global padrão AM1.5G; (ii) temperatura da célula em 25°C; e (iii) irradiância incidente de 1000 W/m². Como resultado, obtém-se a corrente de curto-circuito nestas condições, então utilizada para determinar a eficiência do dispositivo.

Calibrações secundárias através da comparação entre dispositivos devem considerar o descasamento espectral da fonte utilizada – seja um simulador solar ou o próprio Sol – em relação ao espectro padrão [3]. Por outro lado, a calibração da *responsividade espectral absoluta em modo irradiância* de uma célula solar permite que sua corrente de curto-circuito seja determinada para qualquer distribuição espectral, inclusive a AM1.5G. A calibração primária dessa célula solar de referência (CSR) pode ser alcançada através de um sistema de responsividade espectral diferencial (DSR) [4-7] por comparação com um fotodetector calibrado com rastreabilidade ao padrão radiométrico primário.

Este trabalho descreve o sistema de calibração de CSR em desenvolvimento no *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia* – Inmetro no âmbito do projeto de cooperação bilateral Brasil-Alemanha com o instituto *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB). Um sistema de medição do tipo DSR foi desenvolvido, possibilitando a calibração da CSR com rastreabilidade ao radiômetro criogênico de substituição elétrica do Inmetro [8] como padrão radiométrico primário da grandeza potência óptica. Os principais elementos sistêmicos desenvolvidos e resultados preliminares são apresentados. Os avanços reportados constituem etapas fundamentais para a futura oferta do serviço de calibração.

2. Metodologia

A *responsividade espectral absoluta em modo irradiância*, r_λ , de uma CSR é obtida como $[A W^{-1} m^2 nm]$, ou seja, a fotocorrente (na condição de curto-circuito) por unidade de irradiância espectral. Assim, a corrente total de curto-circuito pode ser determinada, para uma fonte óptica com irradiância espectral E_λ e considerando-se uma área A , como

$$I_{cs} = A \int_\lambda r_\lambda E_\lambda d\lambda \quad (1)$$

A r_λ da CSR pode ser determinada com um sistema DSR [4-7]. No sistema DSR, dois fotodetectores, teste (T_d) e padrão (P_d), são diretamente comparados quando submetidos a radiação óptica monocromática e conta ainda com um sistema de iluminação auxiliar.

Experimentalmente, pode-se utilizar como fonte óptica monocromática um laser sintonizável [6] ou uma lâmpada de espectro amplo conjugada com um monocromador [4,5]. De qualquer modo, a potência óptica geralmente não é suficiente para atingir a condição de teste padrão de $1000 W/m^2$ para uma CSR de $20 \times 20 mm^2$. Portanto, a medição é realizada em modo potência, ou seja, com o feixe óptico circunscrito ao fotodetector (condição *underfilled*). O resultado (razão entre os valores da corrente de curto-circuito de T_d e P_d multiplicada pela responsividade espectral calibrada de P_d) é normalizado para um determinado comprimento de onda e resulta em uma curva espectral *relativa*.

Considerando que a condição de teste padrão requer $1000 W/m^2$, é necessário avaliar a linearidade da CSR para se garantir a validade da calibração. Um sistema de iluminação auxiliar irradia a CSR durante o ciclo de comparação e eleva sua fotocorrente de operação. A medição da fotocorrente gerada pela radiação monocromática deve ser resolvida em relação à fotocorrente gerada pela iluminação auxiliar. Para isso, a radiação monocromática deve ser modulada em amplitude, enquanto que a iluminação auxiliar é operada em modo onda contínua.

Uma vez que a responsividade espectral *relativa* da CSR é conhecida e sua linearidade em função da iluminação auxiliar é obtida, deve-se determinar sua responsividade espectral *absoluta* em modo irradiância. Um feixe óptico maior que a área ativa da célula (condição *overfilled*) com irradiância homogênea na área de teste é utilizado. A medição é realizada no comprimento de onda de normalização da etapa anterior e o resultado converte a curva espectral relativa em resposta espectral absoluta como produto final da calibração.

3. Arranjo experimental

O arranjo experimental básico implementado é mostrado na figura 1. Um monocromador do tipo Czerny-Turner (M) é utilizado para seleção espectral da radiação da lâmpada de entrada. O instrumento é composto por duas seções consecutivas em configuração de dispersão subtrativa. Os conjuntos de grades (2400, 1200 e 600 linhas/nm) permitem cobrir o intervalo espectral de 200 nm a 2500 nm, com seleção automatizada e coordenada com a roda de filtros de rejeição de ordem superior na entrada. As fendas de entrada e central são automatizadas e as fendas de saída são ajustáveis para configuração da banda passante espectral da radiação monocromática. Um espelho automatizado em dois estágios seleciona a saída de interesse, colinear com a entrada ou lateral.

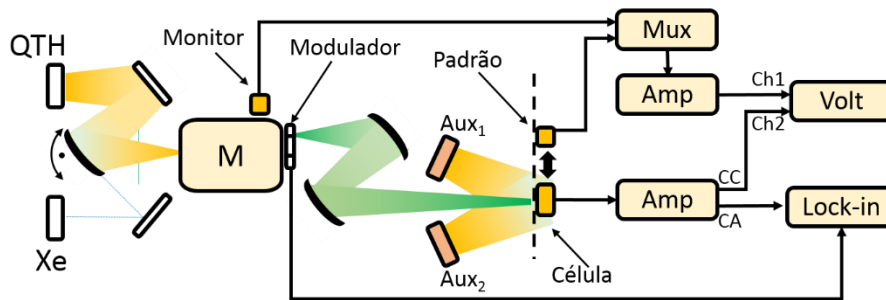


Figura 1. Arranjo experimental do sistema DSR implementado.

A radiação de entrada é selecionada com um espelho móvel dentre as lâmpadas de quartzo-halógena (QTH) ou Hg(Xe) – instaladas em caixas próprias com retrorefletor e condensador de saída – e acoplada ao monocromador por um conjunto de espelhos côncavos e planos. O feixe de saída do instrumento é condicionado com outro conjunto de espelhos côncavos e planos e direcionado para os detectores no plano de medição. O fotodetector padrão (P_d) e a célula solar teste (CSR) são alternados no plano de medição com um deslocador linear automatizado. Um fotodetector monitor (M) é posicionado na saída lateral do monocromador.

Um multiplexador seleciona como entrada o fotodetector padrão ou o monitor. Sua saída é conectada a um amplificador de transimpedância e a fotocorrente é convertida em tensão, então lida com um voltímetro digital.

Um modulador espacial do tipo *chopper* é posicionado à saída do monocromador. Sua função é possibilitar a resolução da fotocorrente gerada pela célula em resposta ao feixe monocromático (utilizado na comparação com o fotodetector padrão) em relação à fotocorrente gerada pela iluminação auxiliar contínua. Um segundo amplificador de transimpedância converte a corrente de curto-circuito em tensão com determinado ganho. Sua saída CC é conectada a um voltímetro digital, enquanto que sua saída AC é conectada a um amplificador do tipo *lock-in* (síncrono com o modulador espacial). O ganho CC é calibrado a partir de padrões nacionais (Inmetro) e o ganho AC relativo é caracterizado em relação a sua linearidade [9].

A iluminação auxiliar é composta por dois LEDs brancos de 1000 W [5] com uma óptica de colimação e homogeneização, montados em unidades de controle de temperatura e operados em corrente contínua (CC). A iluminação auxiliar é direcionada de forma simétrica para a CSR, sendo obstruída durante medição com o P_d .

A temperatura da CSR é estabilizada com um sistema de controle ativo e permite sua medição na condição padrão de 25 °C. Uma excursão de temperatura permite a avaliação da resposta da célula em função deste parâmetro. A temperatura da célula é monitorada através da leitura de seu sensor interno, do tipo Pt100, com um multímetro calibrado em modo resistência.

Um sistema de deslocamento vertical permite ainda a avaliação da uniformidade espacial da área ativa da CSR por comparação de sua resposta com incidência do feixe (menor que área) em diferentes regiões.

A linha de emissão espectral em 546,1 nm do Hg é utilizada para a medição de irradiância espectral absoluta. A lâmpada de Hg(Xe) é focalizada em uma esfera integradora por um espelho côncavo, como mostrado na figura 2. Um difusor de PTFE é colocado na entrada lateral da esfera, precedido por um filtro de banda passante específico para a linha espectral de interesse com largura espectral de 10 nm. A CSR e o fotodetector de referência são expostos alternadamente ao feixe homogêneo no plano de medição. Um medidor de potência óptica (PM) é acoplado à esfera como monitor.

Uma abertura radiométrica calibrada é acoplada ao P_d , para determinação da irradiância da fonte. A CSR é então iluminada com um feixe maior que sua área ativa. Durante o desenvolvimento, a medição de irradiância espectral pôde ser validada com um espectrorradiômetro referenciado à uma lâmpada padrão [10,11].

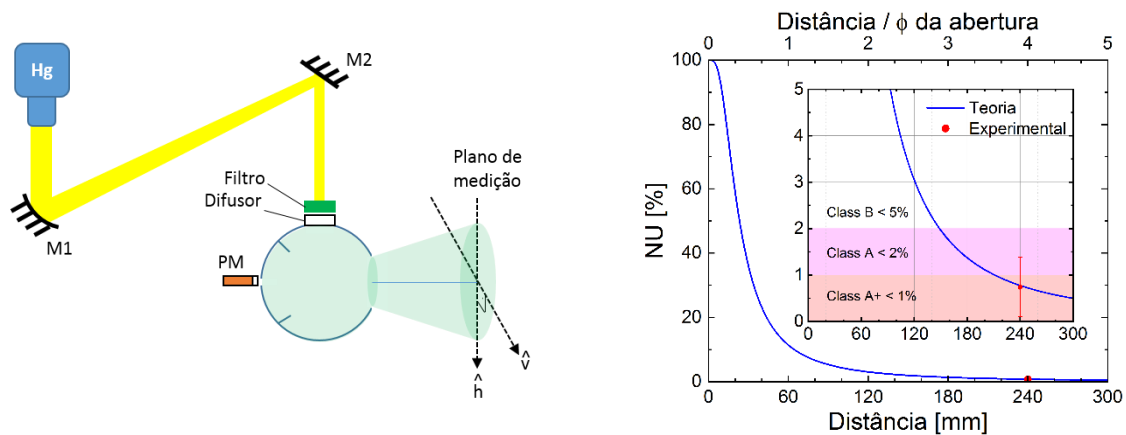


Figura 2. Arranjo experimental para medição da irradiância espectral absoluta (esquerda) e não-uniformidade teórica e experimental (direita).

A uniformidade espacial do feixe foi determinada varrendo-se um fotodetector de área $5,8^2 \text{ mm}^2$ no plano transversal – como indicado na figura 2. A não-uniformidade espacial em uma área de 20^2 mm^2 foi determinada, a uma distância de 240 mm da porta de saída de 60 mm de diâmetro da esfera, como 0,75%. Esse valor é compatível com simuladores solares classe A+ (<1%) [12] e está de acordo com a simulação a partir da geometria do sistema [13]. O erro de posicionamento do fotodetector (com uma abertura radiométrica acoplada com 3 mm de diâmetro) foi de 0,05%.

4. Rastreabilidade metrológica

O P_d utilizado responde na faixa espectral de 320 nm a 1100 nm e é rastreado ao *Sistema Internacional de Unidades* – SI por meio de padrões nacionais, com rastreabilidade ao radiômetro criogênico de substituição elétrica do Inmetro como padrão primário [8]. Este instrumento realiza a grandeza potência óptica a partir de uma fonte laser e a materializa pela determinação, por substituição direta, da responsividade espectral absoluta em modo potência em um fotodetector padrão do tipo armadilha de reflexão (*trap*) de silício [14]. Este detector é calibrado em linhas de laser entre 458 nm e 633 nm e sua resposta é modelada no intervalo de 410 nm a 950 nm. A rastreabilidade no ultravioleta (UV) e no infravermelho próximo (IV) é dada por um radiômetro piroelétrico eletricamente calibrado com refletância espectral caracterizada. O fotodetector *trap* é então utilizado como padrão para calibração de P_d por comparação em um sistema de medição semelhante ao DSR, porém em modo onda contínua e sem a iluminação auxiliar – sistema de responsividade espectral em potência baseado em lâmpadas e monocromador do Inmetro.

A área da abertura é calibrada com um sistema de imageamento referenciado com lasers interferométricos na Divisão de Metrologia Mecânica do Inmetro ou por método radiométrico [15].

5. Desenvolvimento do sistema de medição

5.1. Caracterização do monocromador

Os programas de controle do monocromador foram desenvolvidos de forma customizada. A inicialização do motor de passo foi experimentalmente determinada para posicionamento das grades em ordem zero. A escala de comprimento de onda foi determinada utilizando lâmpadas espectrais como radiações de referência incidindo diretamente na fenda de entrada do instrumento. Lâmpadas de Cd, Cs, Hg, Rb, Zn e Ne permitem avaliação no intervalo espectral coberto pelas grades utilizadas, de 2400 linhas/nm e 1200 linhas/nm. As incertezas de comprimento de onda são 0,10 nm e 0,12 nm respectivamente nos intervalos $280 \text{ nm} \leq \lambda \leq 320 \text{ nm}$ e $320 \text{ nm} < \lambda \leq 1100 \text{ nm}$.

5.2. Controle de temperatura da CSR

A temperatura da CSR é estabilizada por contato de sua base com uma placa de temperatura controlada em malha fechada (controle tipo PID) contendo um elemento termoelétrico Peltier e um termistor. O sensor interno da célula (Pt100) é utilizado como referência para estabelecer o ponto de operação e é monitorado durante as medições. O controle de temperatura permite estabilizar a célula dentro do intervalo de 21,5°C a 30°C, considerando a temperatura ambiente do laboratório – estabilizada em $(23,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$.

A estabilidade da temperatura foi avaliada durante várias etapas do ciclo operação do sistema (em modo experimental) ao longo de 200 minutos. A temperatura, inicialmente ajustada em 24,30 °C, derivou menos que 0,05°C. Esta flutuação corresponde a 0,22% e ocorreu ao se acionar a iluminação auxiliar incidindo diretamente sobre a célula.

5.3. Iluminação auxiliar

O sistema de iluminação auxiliar é composto por um par de LED brancos de 1 W [5] operando com temperatura e corrente estabilizadas. As pastilhas foram montadas sobre uma base termalizadora com controle de temperatura tipo PID atuando sobre elementos termoelétricos e com um termistor para realimentação. Um refletor parabólico e um tubo integrador foram adaptados para aumentar a eficiência de coleção da radiação e direcionar a iluminação para a posição de medição da CSR. Os itens são posicionados simetricamente à radiação monocromática, como indicado na figura 1. A temperatura de cada LED foi monitorada por 90 minutos durante aplicação de corrente de operação de 1 A, resultando em estabilidades melhor que 0,10%. A irradiância do sistema é ajustável variando-se o plano de medição (distância) ou a corrente de operação dos LED. Avaliação de uniformidade espacial e de eventual variação espectral com a corrente será realizada futuramente.

6. Resultados

Resultados preliminares de responsividade espectral relativa foram obtidos para uma CSR com o sistema DSR com rastreabilidade ao radiômetro criogênico de substituição elétrica do Inmetro. Foram feitas varreduras espectrais consecutivas dos fotodetectores padrão e monitor, da CSR e da mesma com incidência da iluminação auxiliar, incluindo repetição do ciclo. Apenas a lâmpada QTH foi utilizada. A figura 3 (esquerda) mostra as leituras obtidas, normalizadas para os respectivos valores em 546,1 nm. A responsividade espectral do fotodetector padrão é também mostrada, sendo praticamente linear no intervalo espectral rastreado de 410 nm a 950 nm. Os resultados obtidos sem e com a iluminação auxiliar são mostrados na figura 3 (direita). A diferença entre eles é pequena, dentro de suas incertezas.

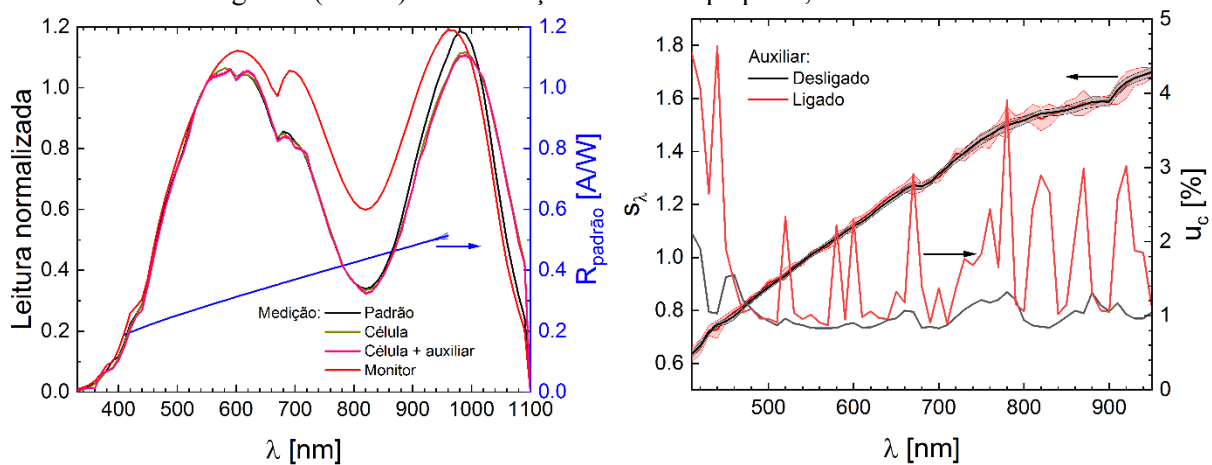


Figura 3. (Esquerda) Varredura espectral normalizada dos fotodetectores e responsividade espectral do fotodetector padrão; (direita) responsividade espectral relativa da CSR (medida diretamente e com iluminação auxiliar ligada) e incerteza combinada relativa.

Observa-se na figura grande semelhança entre as curvas normalizadas do fotodetector padrão e da CSR, especialmente abaixo de 900 nm. O resultado é esperado por ambos os detectores serem baseado em silício e devido à radiação incidente percorrer o mesmo caminho óptico até o plano de medição. Já a leitura do fotodetector monitor – mesmo modelo do detector padrão – apresenta forma geral semelhante às dos demais, porém com fator de escala devido à transmitância do caminho óptico da radiação monocromática, diferente a partir do espelho de saída do monocromador – ver figura 1.

A rastreabilidade do fotodetector padrão considera calibração de sua responsividade espectral com radiação contínua (CW). A ação do *chopper* resulta em modulação da intensidade da radiação em amplitude com onda quadrada com ciclo de trabalho (*duty cycle*) de 50%. Para validação da calibração nessa condição, foram tomadas duas varreduras espectrais consecutivas (com 20 minutos de intervalo) com o fotodetector padrão, com o *chopper* ativo e depois desligado. A razão média entre as leituras (ao longo do intervalo espectral) resultou em 0,503 com desvio-padrão 0,018. A responsividade espectral relativa da célula solar foi então determinada considerando ambos os casos – ver figura 4. A diferença relativa foi menor que 0,11% (valor RMS de 0,05%), atendendo também ao critério do erro normalizado menor que a unidade. O resultado confirma o fato de que o valor do ciclo de trabalho, pelo menos a 125 Hz, não interfere no resultado final, uma vez que este é posteriormente normalizado (valor relativo).

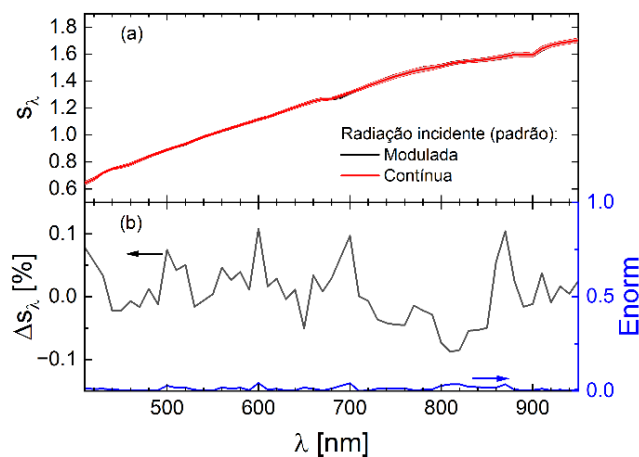


Figura 4. (a) Resultados e (b) comparação da responsividade espectral relativa da célula solar a partir de medição com radiação modulada ou contínua incidente no fotodetector padrão.

A incerteza de medição preliminar foi avaliada conforme o ISO GUM 2008 [16]. As componentes de incerteza consideradas são mostradas na figura 5. Foram contabilizados a repetibilidade (valor RMS por comprimento de onda do desvio-padrão experimental da média das medições), a reprodutibilidade (desvio-padrão das repetições, por comprimento de onda), os valores certificados de calibração do fotodetector padrão, a calibração do voltímetro e do amplificador utilizados com o fotodetector padrão, a caracterização de linearidade do amplificador de transimpedância e a incerteza do valor interpolado utilizado para normalização em 546,1 nm. A incerteza combinada considera a composição quadrática dos valores relativos. A influência da escala de comprimento de onda e da banda espectral tendem a se cancelar neste caso, devido à semelhança entre as medidas espectrais.

Observa-se dominância dos componentes tipo A (repetibilidade e reprodutibilidade) e da linearidade do amplificador *lock-in*. Cabe ressaltar que as etapas dos ciclos de medição foram realizadas em sequência, ou seja, cada varredura espectral foi executada em um determinado intervalo de tempo, sem o uso do fotodetector monitor para correção. As incertezas tipo A tendem a ser reduzidas com o uso do monitor ao longo as medições para evitar efeito de eventuais deriva e flutuações da radiação monocromática no sistema de medição. Além disso, deve ser realizado um estudo das melhores condições de ganho e escalas de medição, especialmente em relação ao uso do amplificador *lock-in*. A linearidade deste instrumento deve ainda ser reavaliada, considerando as particularidades da medição.

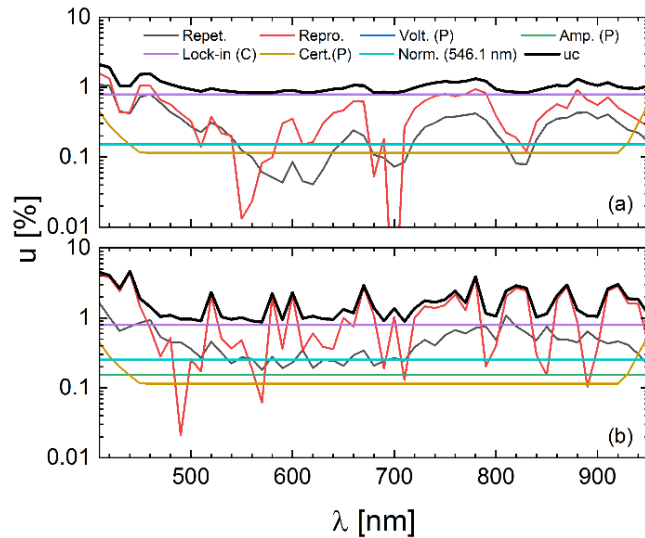


Figura 5. Balanço de incertezas das medições de responsividade espectral relativa da CSR (a) sem e (b) com iluminação auxiliar.

A validação dos resultados é feita utilizando-se como referência os valores de calibração da CSR pelo PTB. Os valores certificados são mostrados na figura 6 (esquerda) com iluminação auxiliar em diferentes níveis de irradiância. Observa-se variação sistemática entre as curvas, porém dentro da incerteza de calibração. A diferença relativa entre os valores medidos e os valores de referência são mostrados na figura 6 (direita).

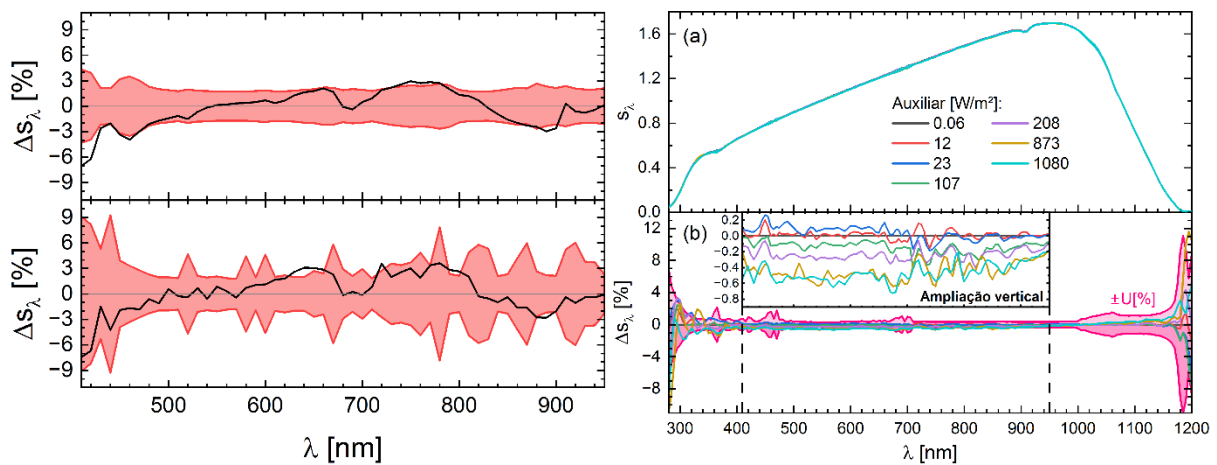


Figura 6. (Esquerda) Calibração da CSR segundo certificado do PTB. (Direita)

(Esquerda) Comparação dos resultados de medição com o certificado PTB (mostrado na direita) nas condições sem e com iluminação auxiliar. As curvas espectrais na figura direita superior são normalizadas em relação à de menor irradiância na figura direita inferior.

Observa-se majoritariamente concordância entre os resultados, considerando-se a incerteza combinada expandida entre os valores obtidos pelos dois institutos (faixas coloridas na figura 6 esquerda), o que equivale ao critério do erro normalizado menor que a unidade. A divergência nos comprimentos de onda mais baixos sugere a necessidade de alternar a lâmpada do sistema para a de Xe.

7. Conclusão

O serviço de calibração de células solares de referência está em fase de implementação no Inmetro. Um sistema de responsividade espectral diferencial com rastreabilidade ao padrão primário nacional de potência óptica está em desenvolvimento. Os resultados preliminares foram apresentados e validados dentro da incerteza de medição estimada conforme o histórico de calibração da célula solar em outro instituto nacional de metrologia. Existe espaço para melhoria tanto dos resultados, quanto das incertezas de medição. Espera-se que o serviço de calibração seja oferecido em breve e possa atender a demanda dos setores econômicos nacionais e da sociedade em geral.

Agradecimentos

O autor agradece à equipe do *Laboratório de Radiometria e Fotometria* do Inmetro pelo apoio técnico e ao *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB, Alemanha) pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] IEC 60904-1:2020 2020 *Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*
- [2] IEC 60904-3:2019 2019 *Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*
- [3] IEC 60904-7:2019 2019 *Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*
- [4] Metzdorf J *et al.* 2000 Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values *Metrologia* **37** 573-578
- [5] Hamadani B H *et al.* 2013 Absolute spectral responsivity measurements of solar cells by a hybrid optical technique *App. Opt.* **52** 5184-5193
- [6] Winter S *et al.* 2014 Design, realization and uncertainty analysis of a laser-based primary calibration facility for solar cells at PTB *Measurement* **51** 457-463
- [7] IEC 60904-4:2019 2019 *Photovoltaic devices - Part 4: Photovoltaic reference devices - Procedures for establishing calibration traceability*
- [8] Menegotto T, Ferreira da Silva T, *et al.* 2015 Realization of optical power scale based on cryogenic radiometry and trap detectors *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **64** 1702-1708
- [9] Ferreira da Silva T e Bessa P A C 2019 Caracterização de sistema de medição CA para calibração de células solares de referência *III Congresso Brasileiro de Metrologia Óptica, Florianópolis/SC.*
- [10] Ferreira da Silva T 2019 Secondary calibration of lamps in spectral irradiance *III Congresso Brasileiro de Metrologia Óptica, Florianópolis/SC*
- [11] Ferreira da Silva T *et al.* 2021 Intercomparison of indoor and outdoor spectral irradiance measurements between INTI and INMETRO *App. Opt.* **60** 5177-5185
- [12] IEC 60904-9:2020 2020 *Photovoltaic devices - Part 9: Classification of solar simulator characteristics*
- [13] Labsphere 2017 *Integrating Sphere Theory and Applications, Technical Guide*, <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2021/09/Integrating-Sphere-Theory-and-Applications.pdf> acessado em 28/2/2023.
- [14] Menegotto T, Ferreira da Silva T, *et al.* 2014 Characterization of radiometric transfer standards based on silicon trap detectors *29th Conf. on Precision Electromag. Measur.(CPEM 2014)*, Rio de Janeiro/RJ, pp. 148-149
- [15] Ferreira da Silva T 2017 Method for measuring the area of radiometric apertures using the ratio of Gaussian beams *App. Opt.* **56** 3497-3501
- [16] JCGM 100:2008 2008 *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*