



Caracterização de espectrorradiômetro para calibrações e ensaios fotométricos e colorimétricos

T Ferreira da Silva* e A S Sardinha

¹ Optical Metrology Division, National Institute of Metrology, Quality and Technology, Duque de Caxias – RJ, 25250-020, Brazil

* tfsilva@inmetro.gov.br

Resumo: Ensaios fotométricos e colorimétricos são relevantes para a indústria em geral, em especial para o setor de iluminação. Este trabalho descreve a metodologia desenvolvida e o procedimento empregado para caracterização de um espectrorradiômetro integrado ao goniofotômetro da Divisão de Metrologia Óptica do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, com especial foco na determinação da temperatura de cor correlata de fontes luminosas. Os resultados permitem a determinação de um balanço de incertezas do instrumento e constituem etapa fundamental para sua utilização em calibrações e ensaios colorimétricos e fotométricos com confiabilidade metrológica.

1. Introdução

Dentre as metodologias empregadas em calibrações e ensaios de fontes luminosas pode-se destacar a abordagem espectrorradiométrica, que se baseia na medição da distribuição espectral da fonte com um espectrorradiômetro e posterior determinação de grandezas fotométricas e colorimétricas por meio de cálculos segundo procedimentos normalizados [1]. A partir deste instrumento, destaca-se, em especial, a possibilidade de realização de ensaios e calibrações de fontes luminosas em *temperatura de cor correlata* (TCC) [2,3].

A TCC é uma propriedade de fontes luminosas de extrema importância para a indústria de iluminação. A correta determinação deste parâmetro com confiabilidade e rastreabilidade metrológica impacta positivamente no dia-a-dia da população como usuários finais de lâmpadas e luminárias. Por definição, TCC representa a “temperatura de um radiador Planckiano com a cromaticidade mais próxima da cromaticidade associada à distribuição espectral dada em um diagrama UCS modificado de 1976” (em tradução livre de [4]).

Um espectrorradiômetro utilizado para este fim deve ser devidamente caracterizado. Este trabalho descreve a metodologia desenvolvida e o procedimento de caracterização empregados na avaliação do instrumento para medição de grandezas fotométricas e colorimétricas de lâmpadas incandescentes, com foco nas medições de TCC. O espectrorradiômetro sob caracterização compõe um sistema de medição de grandezas fotométricas e colorimétricas com o goniofotômetro da Divisão de Metrologia Óptica do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro. O procedimento de caracterização é embasado pela norma CIE 233:2019 [5]. A avaliação quantifica a concordância das medições em relação aos principais parâmetros intrínsecos do instrumento: escala de comprimento de onda (e banda

passante espectral), luz espalhada espectral e linearidade. Esta análise é fundamental para a utilização do equipamento para calibrações e ensaios metroológicos com confiabilidade.

2. Características do instrumento

O espectrorradiômetro LMT SM 8107 GO-DS [6] é montado em uma estrutura articulada e pode ser posicionado na direção do espelho do goniofotômetro para medição de fontes ópticas em todas as direções de emissão. O instrumento é composto por um sensor do tipo CCD com 1024 pixels estabilizado em temperatura, e ADC (conversor analógico-digital) de 16 bits. O intervalo espectral de operação abrange o espectro visível, de 380 nm a 780 nm. A entrada apresenta uma janela seguida por uma roda de filtros de densidade neutra, cobrindo quatro décadas. O instrumento é operado por um programa específico do fabricante e retorna tanto os resultados colorimétricos finais, quanto o conjunto de dados das medições espectrais em cada pixel. Os dados espectrais foram utilizados para avaliação das características do espectrorradiômetro. O tempo de integração (t_i) e a atenuação são, em geral, ajustados automaticamente pelo *software*.

3. Escala de comprimento de onda e banda passante espectral

A escala de comprimento de onda do instrumento e a banda passante espectral são avaliadas utilizando um conjunto de lâmpadas espectrais como padrões intrínsecos. Os comprimentos de onda medidos são comparados com os valores de referência para determinação do desvio espectral da leitura. O alargamento espectral aparente das linhas indicam a banda passante espectral.

3.1. Arranjo experimental

A tabela 1 mostra as lâmpadas espectrais utilizadas e os comprimentos de onda de referência considerados na avaliação da escala de comprimento de onda do instrumento [7].

Tabela 1. Linhas espectrais de referência utilizadas.

Lâmpada	λ [nm]	Lâmpada	λ [nm]
Hg	404,90	Cd	467,81
	435,83		479,99
	546,08		508,58
	577,96		643,85

As lâmpadas foram posicionadas, uma por vez, com incidência direta na entrada do espectrorradiômetro e operadas com fonte de alimentação própria estável. A lâmpada de Hg foi posicionada tanto próxima quanto afastada do instrumento (cerca de 5 cm e 30 cm, respectivamente). Uma terceira medição foi realizada com a lâmpada posicionada próxima, porém propositalmente desalinhada em ângulo com a direção normal ao instrumento (cerca de 30°). As medições com a lâmpada de Cd também foram realizadas em posicionamento próximo e distante, com repetições e reconfiguração do instrumento.

3.2. Resultados

Uma amostra das medições espectrais com cada lâmpada é apresentada na figura 1. As leituras foram normalizadas pelo máximo. As regiões espectrais correspondentes aos picos de interesse foram separadas e renormalizadas pelos respectivos máximos (ver detalhe na figura 1).

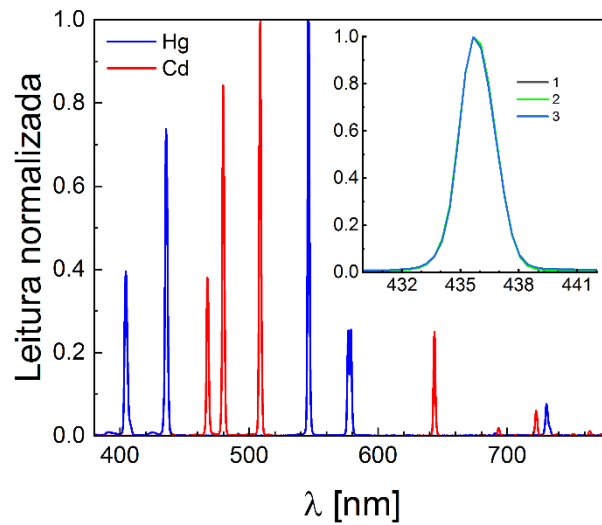


Figura 1. Medição espectral das lâmpadas de Hg e Cd e detalhe do pico 435,83 nm (três repetições superpostas).

O comprimento de onda efetivo λ_0 de cada linha espectral pode ser calculado como o primeiro momento de cada pico através da equação (1):

$$\lambda_0 = \frac{\sum_i y_i \lambda_i}{\sum_i y_i} \quad (1)$$

onde y_i corresponde à leitura e λ_i ao comprimento de onda em cada pixel i .

A figura 2 mostra uma avaliação comparativa das medições da lâmpada de Cd realizadas com diferentes tempos de integração (it) em relação ao tempo de 100 ms. Foi verificado um desvio espectral de 0,40 nm, equivalente a um pixel do instrumento, para tempos de integração abaixo de 100 ms. Para tempos de integração acima deste valor, não há variação significativa.

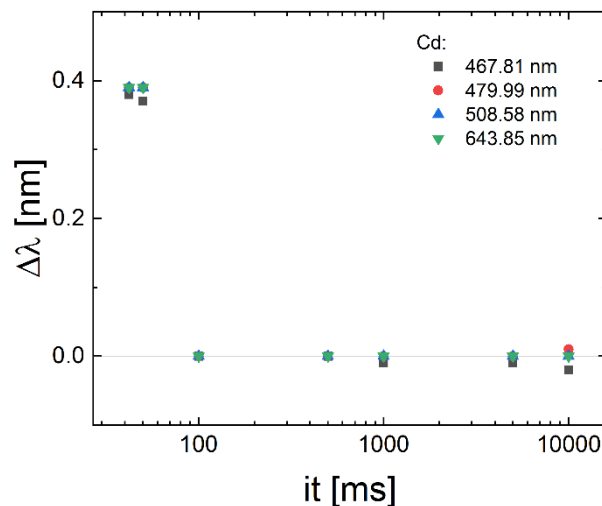


Figura 2. Deslocamento espectral das medições em diferentes tempos de integração em relação ao tempo de 100 ms.

Considerando que as linhas espectrais são relativamente estreitas (monocromáticas, neste contexto), a largura de linha resultante da convolução espectral é dominada pelo instrumento de medição. A largura

de banda espectral do instrumento foi analisada ajustando-se uma função gaussiana aos picos espectrais medidos. Os resultados da largura inteira à meia altura (FWHM) são mostrados na figura 3. Observa-se que comprimentos de onda menores se aproximam da largura de banda indicada no manual do instrumento, de 2,5 nm. Para comprimentos de onda maiores, a largura de banda tende a 1,6 nm.

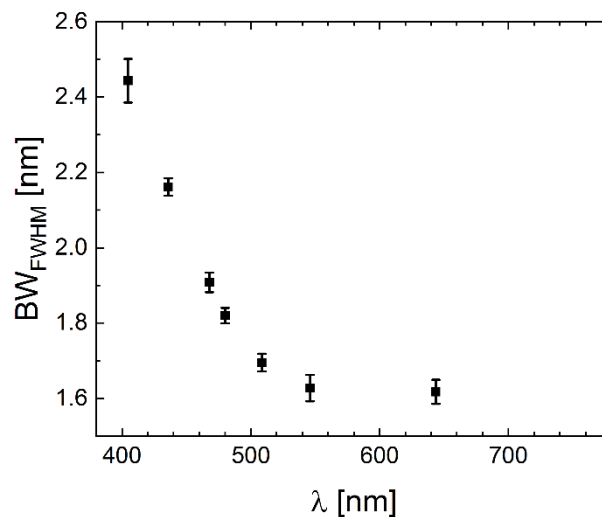


Figura 3. Largura de banda espectral (BW) do espectrorradiômetro.

A diferença entre os comprimentos de onda efetivos calculados e os valores de referência da tabela 1 são mostradas na figura 4. A maior divergência entre as séries de medição ocorreu em função do tempo de integração, conforme discutido. O desalinhamento angular proposital da lâmpada de Hg não resultou em variação significativa do comprimento de onda medido.

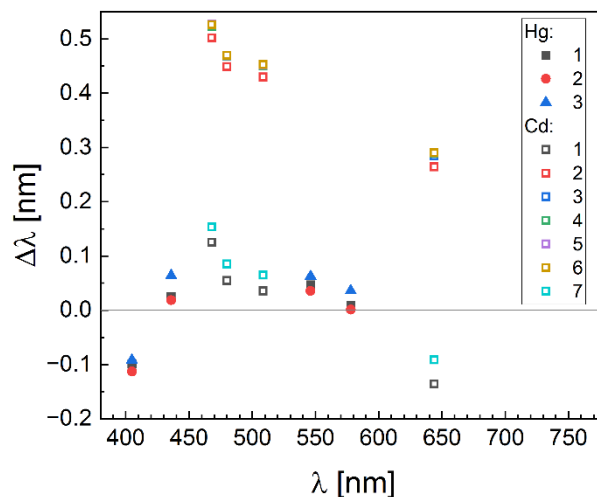


Figura 4. Diferenças entre os comprimentos de onda medidos e os valores de referência das lâmpadas de Hg e Cd.

A incerteza da escala de comprimento de onda u_λ pode ser calculada tomando-se metade do máximo descasamento espectral (pico a pico), com distribuição retangular usando a equação (2):

$$u_\lambda = \frac{\max\{\Delta_\lambda\} - \min\{\Delta_\lambda\}}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

O valor de incerteza resulta em 0,2 nm e é compatível com o parâmetro informado no manual do fabricante (mesmo valor). Cabe ressaltar que este resultado abrange o descasamento observado para tempos de integração curtos.

A TCC calculada com o método de Monte-Carlo [8] a partir da medição da distribuição espectral de uma lâmpada FEL 1000 W é avaliada considerando um deslocamento espectral de $\pm 0,2$ nm. O resultado variou ± 1 K em 3142 K. Para uma distribuição retangular, o deslocamento corresponde a esta incerteza resulta em 0,29 K. Já o impacto na incerteza da TCC calculada, considerando-se a incerteza de comprimento de onda na distribuição espectral foi de 0,79 K. A combinação das duas contribuições [8] resulta em uma incerteza espectral final $u_{Espect} = 0,8$ K.

3.3. Conclusão

A incerteza de comprimento de onda do instrumento foi avaliada como 0,2 nm, valor compatível com a informação em seu manual. A influência da incerteza espectral na TCC (u_{Espect}) é de 0,8 K para uma lâmpada incandescente em 3142 K.

4. Luz espalhada espectral

Luz espalhada espectral no interior do instrumento resulta em indicação de radiação em comprimentos de onda diferentes do incidente no mesmo. O efeito costuma ser relevante em espectrorradiômetros de matriz na região espectral de medição próxima ao ultravioleta (onde a responsividade da CCD costuma ser menor), especialmente quando utilizadas lâmpadas incandescentes (com emissão menor nessa região e considerável emissão no infravermelho). A avaliação desta característica é realizada utilizando-se um conjunto de filtros de corte caracterizados e diferentes fontes ópticas, separando-se os efeitos de diferentes regiões espectrais.

4.1. Arranjo experimental

Foram utilizadas fontes ópticas policromáticas e filtros seletivos para avaliação da luz espalhada espectral do espectrorradiômetro. Um conjunto de filtros ópticos de vidro colorido foi utilizado para limitar a incidência de radiação no instrumento. Suas transmitâncias espectrais, caracterizadas com um espectrofotômetro, são mostradas na figura 5. Cada filtro foi posicionado à entrada do espectrorradiômetro com uma abertura óptica circunscrita para vedar o acoplamento de radiação não filtrada.

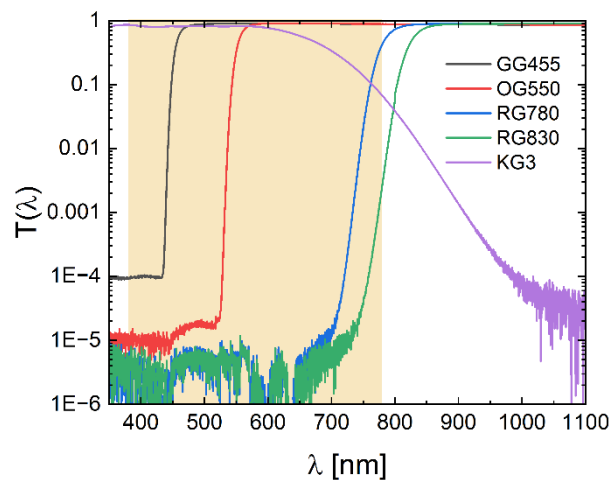


Figura 5. Transmitância espectral dos filtros ópticos utilizados. A região em destaque corresponde ao espectro visível.

As fontes ópticas foram posicionadas a uma distância fixa de cerca de 50 cm do instrumento. Foram utilizadas alternadamente lâmpadas incandescentes de 60 W e uma lâmpada LED. Os espectros medidos com o próprio espectrorradiômetro são mostrados na figura 6. Observa-se que o filtro KG3 reduz a radiação infravermelha da lâmpada incandescente.

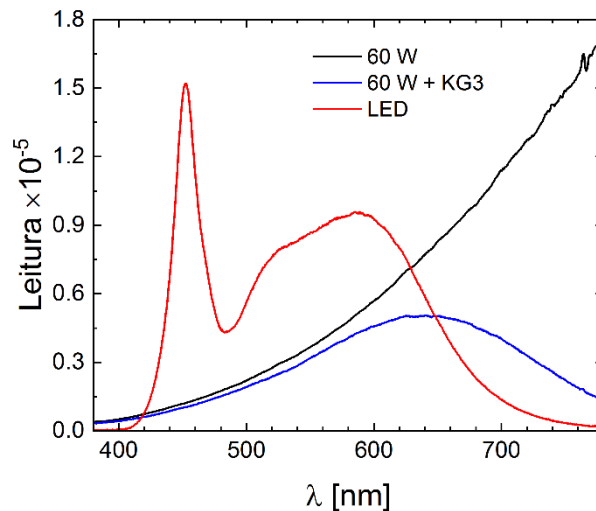


Figura 6. Espectros das fontes ópticas medidos com o espectrorradiômetro.

4.2. Resultados

A influência da luz espalhada espectral é observada comparando-se as medições espectrais das fontes ópticas filtradas com as distribuições espectrais esperadas (medição direta da fonte multiplicada pela transmitância espectral de cada filtro). A figura 7 superpõe as curvas medidas (linhas sólidas) e esperadas (linhas tracejadas) e as compara com a incidência direta de cada fonte (linha magenta). Observa-se que as medições não alcançam a supressão de ao menos quatro ordens de grandeza referente aos filtros de corte. Cabe ressaltar a dificuldade de avaliação do intervalo dinâmico do instrumento, uma vez que ao se bloquear a radiação incidente, o mesmo entra em modo de espera.

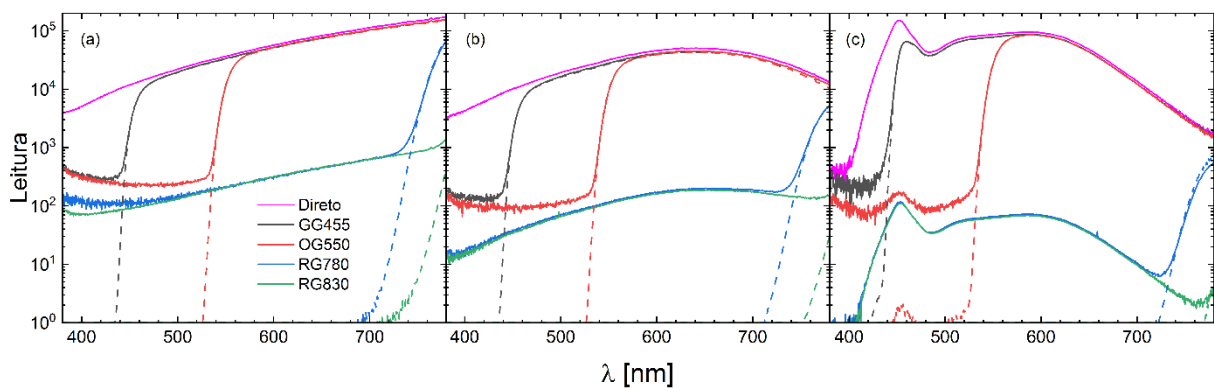


Figura 7. Medição direta (magenta), filtrada (linhas cheias) e esperada considerando a transmitância espectral (linhas tracejadas) para: (a) lâmpada 60 W; (b) lâmpada 60 W com filtro KG3; e (c) lâmpada de LED.

A medição corrigida pela luz espalhada espectral (M_λ) é obtida como na equação (3), onde a medição direta da lâmpada sem filtros (D_λ) é reduzida pela correção em porções espectrais. Cada correção é

computada como a diferença entre a medição com determinado filtro de corte (F_λ) – na região espectral abaixo do corte – e o valor esperado (medição direta multiplicada pela transmitância espectral do filtro, T_λ).

$$M_\lambda = D_\lambda - (F_\lambda - D_\lambda T_\lambda) \quad (3)$$

Considerando a integral da correção relativa à integral da medição direta (sobre a dimensão espectral), tem-se o pior caso como 2,0 % (para a lâmpada de 60 W). Fazendo-se este valor como uma incerteza de distribuição retangular, chega-se à estimativa de incerteza de luz espalhada de 0,58 %.

A influência da luz espalhada na TCC pode ser obtida comparando os resultados calculados pelo método de Monte-Carlo a partir das distribuições espectrais medida e corrigida. As diferenças de temperatura de cor correlata (ΔTCC) são mostradas na tabela 2.

Tabela 2. Valores de TCC calculados com os espectros medidos e corrigidos de diferentes fontes ópticas.

Fonte	Tipo	TCC [K]	ΔTCC [K]	$uLuzEsp$ [K]
60 W	Medido	2519	5,0	1,4
	Corrigido	2514		
60 W + KG3	Medido	2837	3,0	0,9
	Corrigido	2834		
LED	Medido	3200	0,0	0,0
	Corrigido	3200		

A incerteza na TCC devido à luz espalhada espectral é então tomada como o maior desvio com incerteza retangular, ou seja, $uLuzEsp = 1,4$ K.

4.3. Conclusão

A contribuição de incerteza devido à luz espalhada espectral é estimada tomando-se uma lâmpada incandescente como caso mais conservador, como $uLuzEsp = 1,4$ K.

5. Linearidade

A linearidade do espectrorradiômetro é avaliada variando-se o nível de sinal medido pelo instrumento e comparando a leitura com a expectativa linear. A análise deve incluir a variação de transmitância dos filtros de densidade neutra internos à entrada do equipamento.

5.1. Arranjo experimental

Uma lâmpada halógena estável de 250 W foi posicionada em duas posições distantes 244 cm e 80 cm (com repetição da primeira) do espectrorradiômetro. O nível de sinal medido foi variado dentro do intervalo do ADC através do *software* do instrumento, forçando-se, assim, a seleção de determinado filtro de densidade neutra. Os espectros medidos em cada situação foram avaliados em função de diferentes parâmetros (atenuação, tempo de integração, nível de sinal e distância).

5.2. Resultados

Os desvios dos valores de TCC indicados pelo instrumento são mostrados na figura 8 agrupados em função de diferentes parâmetros. Pode ser observada tendência de agrupamento dos dados em função da atenuação (figura 8a), com desvio do valor central no caso de atenuação por um fator 10. Isso pode ser causado por uma deriva na transmitância espectral do filtro ao longo do tempo, desde sua caracterização inicial pelo fabricante. Não há correlação evidente nos demais casos.

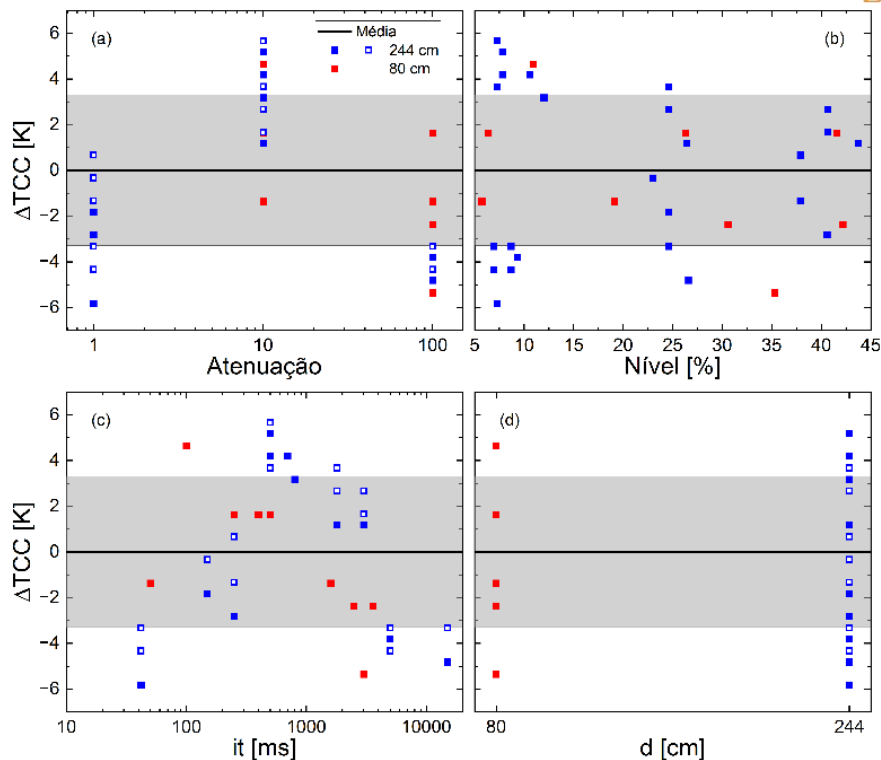


Figura 8. Desvio dos valores de TCC medidos (indicação do instrumento) em função da (a) atenuação, (b) nível do sinal, (c) tempo de integração e (d) distância da lâmpada.

Tomando-se o maior desvio pico-a-pico dentre os resultados como incerteza com distribuição retangular, tem-se a incerteza de linearidade como $uLin = 3,3$ K.

Uma avaliação da incerteza espectral foi realizada em função tanto do comprimento de onda quanto do tempo de integração, comparando-se diferentes traços medidos com a lâmpada em uma posição fixa. Os tempos de integração foram variados de 42 ms a 15 s, como mostrado na figura 9. O desvio pico-a-pico em relação à média para cada pixel (comprimento de onda) é calculado em função do tempo de integração e tomado como incerteza retangular. Os valores de incerteza são mostrados no eixo direito da figura 9 e apresentam valor médio quadrático (RMS) de $uLin_{pixel} = 0,84$ %.

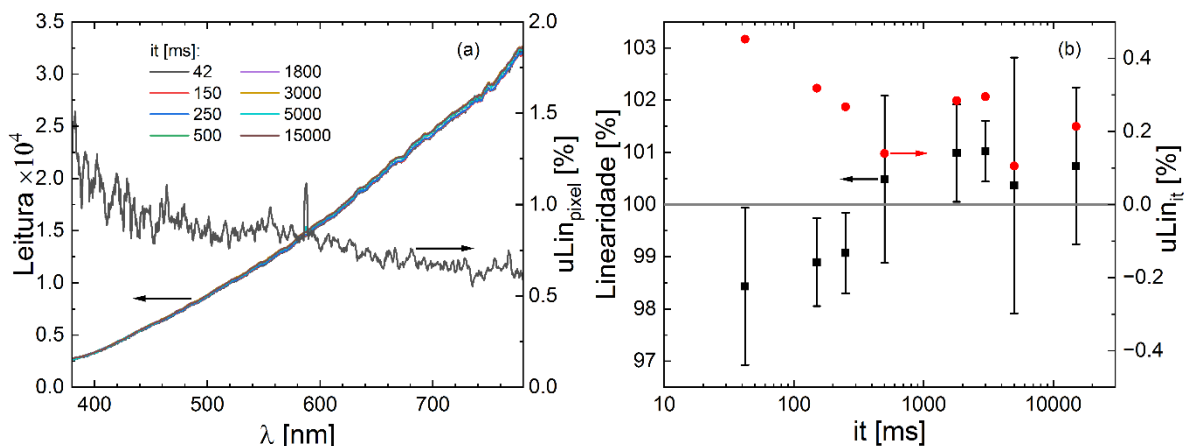


Figura 9. (a) Medição espectral da lâmpada halógena de 250 W (3146 K) com diferentes tempos de integração e incerteza de linearidade associada a cada pixel. (b) Linearidade da medição (média espectral) em função do tempo de integração e incerteza associada.

Após normalização dos dados espectrais em função da média para cada pixel, calcula-se a linearidade em cada tempo de integração como a média desses valores normalizados sobre todos os pixels, como mostrado na figura 9. A incerteza de linearidade associada a cada tempo de integração (eixo direito da figura 9b) é calculada como o complemento da linearidade com distribuição retangular. O máximo valor é tomado como incerteza de linearidade devido ao tempo de integração, $u_{Lin_it} = 0,45\%$.

A combinação das duas componentes (u_{Lin_pixel} e u_{Lin_it}) resulta em incerteza de linearidade igual a $u_{Lin} = 0,96\%$. Este valor, aplicado à simulação de Monte-Carlo, resulta em incerteza de 3 K, compatível com o valor extraído diretamente da figura 8. Constatou-se, também, que o cálculo da TCC pelo método de Monte-Carlo a partir dos espectros indicados na figura 9a resultaram em valores compatíveis com as indicações do espectrorradiômetro dentro de um desvio máximo de 1 K em 3146 K.

5.3. Conclusão

A incerteza devido à linearidade do espectrorradiômetro foi avaliada como $u_{Lin} = 3,3$ K, considerando-se variações de tempo de integração, nível de sinal, distribuição espectral e atenuação.

6. Composição de incertezas

As incertezas avaliadas são agrupadas na tabela 3. Os valores combinados dessas componentes resultam na incerteza padrão do instrumento (fator de abrangência $k=1$) de $u_{inst} = 3,7$ K, calculada segundo [9].

Tabela 3. Composição de incertezas do espectrorradiômetro.

Incerteza	Símbolo	Valor [K]
Escala espectral	u_{Espect}	0,8
Luz espalhada espectral	u_{LuzEsp}	1,4
Linearidade	u_{Lin}	3,3
Combinada	u_{inst}	3,7

7. Conclusão

A escala de comprimento de onda, a luz espalhada espectral e a linearidade do espectrorradiômetro LMT SM 8107 GO-DS integrado ao goniofotômetro da Divisão de Metrologia Óptica do Inmetro foram caracterizadas e sua influência na determinação da TCC de lâmpadas incandescentes foi avaliada. A combinação das incertezas associadas a esses parâmetros resulta na incerteza padrão do instrumento de 3,7 K (fator de abrangência unitário).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao *Laboratório de Aplicações Ópticas* pela medição da transmitância espectral dos filtros ópticos e à equipe do *Laboratório de Radiometria e Fotometria* pelas discussões técnicas.

Referências

- [1] J. Schanda, "Colorimetry: understanding the CIE system," John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [2] P. Kärhä *et al.*, "Method for estimating effects of unknown correlations in spectral irradiance data on uncertainties of spectrally integrated colorimetric quantities," *Metrologia* 54, 524 (2017).
- [3] I. Ázara e T. Menegotto, "Proposta de uma abordagem para a estimativa da incerteza em TCC e outras grandezas colorimétricas," IV Congresso Brasileiro de Metrologia Óptica, 2021.
- [4] CIE S 017:2020 ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd edition.
- [5] CIE 233:2019, "Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers".
- [6] Os modelos de instrumentos são mencionados apenas como referência técnica e não representam recomendação ou aprovação pelo Inmetro.
- [7] https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html, acessado em 7/7/2023.
- [8] T. Ferreira da Silva, "Calibração de lâmpadas incandescentes em temperatura de cor correlata por espectrorradiometria e abordagem por Monte-Carlo," V Congresso Brasileiro de Metrologia Óptica, 2023.
- [9] JCGM 100:2008, "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement".