



Proposta de abordagem conceitualmente simples para estimativa de incertezas de grandezas colorimétricas obtidas a partir de distribuições espectrais

Proposal of an approach with a simple concept to estimate uncertainties of colorimetric quantities derivated from spectral measurements

I Ázara¹, T Menegotto²

¹ Laboratório de Radiometria e Fotometria, Inmetro, Duque de Caxias, 25250-020, Brasil

² Superintendência do Inmetro no Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 90240-581, Brasil

iaoliveira@inmetro.gov.br; tmenegotto@inmetro.gov.br

Resumo. A estimativa das incertezas da temperatura de cor correlata (TCC), das coordenadas cromáticas u, v e da Duv é feita a partir das incertezas das coordenadas x, y , obtidas a partir das incertezas da distribuição espectral. No Congresso Brasileiro de Metrologia 2021 os autores apresentaram um método para estimativa da incerteza da TCC, das coordenadas cromáticas u, v e da Duv[1]. O método foi aperfeiçoado, e foram incluídas as incertezas das coordenadas cromáticas u', v' . Esta versão atualizada do método está sendo chamada de Laraf II, em referência ao Laboratório de Radiometria e Fotometria (Laraf) do Inmetro. O intuito do artigo é apresentar um método que seja de fácil compreensão e com resultados satisfatórios para a estimativa das incertezas de grandezas colorimétricas.

Abstract. Uncertainty estimation of correlated colour temperature (CCT), chromatic coordinates u, v and of Duv is calculated from the uncertainty of coordinates x, y , obtained from the uncertainty of the spectral distribution. In the Brazilian Metrology Congress 2021, the authors presented a method for estimating the uncertainties of CCT, of chromatic coordinates u, v and of Duv[1]. The former proposed method was updated, and were included the uncertainties for chromatic coordinates u', v' . This version of the method is being called Laraf II, due to both versions were developed in the Radiometry and Photometry Laboratory (Laraf), in Inmetro. The purpose of the paper is to present a method of easy understanding and with satisfactory results for estimating uncertainties of colorimetric quantities.

1. Introdução

A temperatura de cor correlata (TCC) de fontes luminosas é uma grandeza importante na sua descrição, pois fornece informação sobre o resultado qualitativo que será obtido com sua utilização para iluminação.

Para sua determinação a partir de uma distribuição espectral, o primeiro passo é a determinação das coordenadas x , y referentes ao diagrama CIE 1931, e as incertezas dessas coordenadas. Foram observadas situações em que incertezas baixas nas coordenadas correspondiam a incertezas altas na TCC, o que não deveria ocorrer, tendo sido feitas, nesses casos, as estimativas das incertezas das coordenadas e da TCC de maneira independente

A abordagem aqui apresentada permite fazer a estimativa da incerteza da TCC diretamente a partir das incertezas das coordenadas x, y .

2. Descrição resumida da determinação da TCC a partir de medições espectrais

2.1. Diagrama CIE 1931

No diagrama da figura 1 estão representadas as radiações monocromáticas e as suas combinações em diferentes proporções, que são representadas por duas coordenadas, x e y . A medição da distribuição espectral de uma fonte luminosa apresenta uma dispersão de valores para cada comprimento de onda, que acarreta em incertezas das coordenadas, que devem ser determinadas por um método que seja baseado no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) [2], por exemplo, conforme apresentado em [3]. Considerando a atual predominância das fontes LED na iluminação em geral, sugere-se que seja adotado o método geral apresentado em [3], sem utilização do fator α e outras simplificações aplicáveis a lâmpadas incandescentes e outras tecnologias anteriores ao LED.

A determinação dos valores de x e y é feito de acordo com o método apresentado em [4].

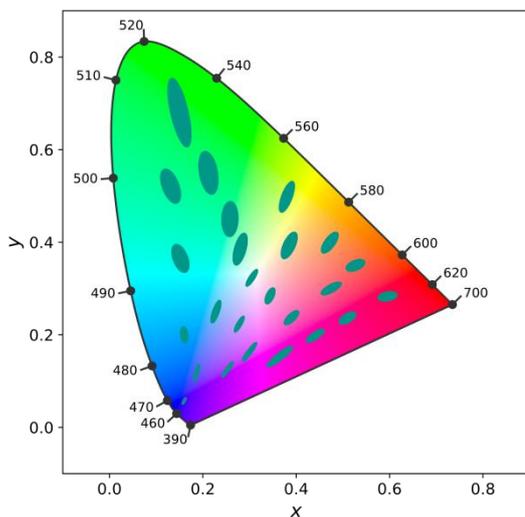


Figura 1 – Diagrama CIE 1931 (x, y) com comprimentos de onda monocromáticos indicados

2.2. Diagrama CIE 1964

O diagrama CIE 1931 não é uniforme. Na figura 1 – elaborada com o pacote *Colour for Python* [5] – as elipses correspondem a iguais diferenças de sensação visual, mas suas áreas são diferentes.

O Diagrama CIE 1964 (figura 2), chamado de u, v ou de $u', 2v'/3$, é uma transformação do sistema x, y para se obter um espaço de cores mais uniforme.

A relação matemática entre as coordenadas x, y e u, v determina uma relação bi-unívoca, ou seja, a um par x, y corresponde um único par u, v , e vice-versa.

A TCC correspondente a um par de coordenadas u, v tem o mesmo valor, em kelvin, do ponto do locus do corpo negro que lhe seja mais próximo, desde que essa distância seja igual ou menor do que 0,05, sendo essa distância identificada como Duv. O valor de Duv é positivo se o ponto estiver acima do locus do corpo negro, e negativo se estiver abaixo. As coordenadas dos pontos do locus do corpo negro são determinadas com base na lei de Planck. Portanto, a cada par de coordenadas u, v corresponde apenas uma TCC, mas o inverso não é verdadeiro.

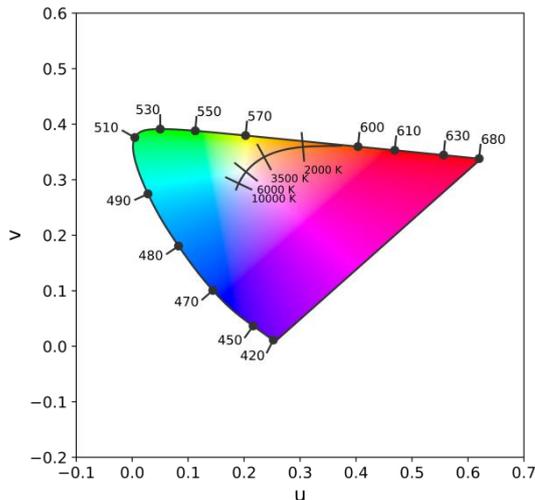


Figura 2 – Diagrama CIE 1964 (u,v) com o locus de Planck

3. Determinação das incertezas das coordenadas x, y

Os autores utilizaram a equação 7 da publicação [3], que está apresentada na equação (1), com os termos explicitados¹ e utilizando-se a incerteza expandida $U(S(\lambda))$ em lugar da incerteza básica combinada $u_c(S(\lambda))$. Portanto, serão obtidas as incertezas expandidas $U(x)$ e $U(y)$.

$$U^2(x) = \left(\frac{\bar{x}(\lambda) - x(\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda))}{\sum S(\lambda)(\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda))} \right)^2 U^2(S(\lambda)) \quad (1)$$

onde:

$U(x)$ é a incerteza expandida de x ;

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ são as funções CIE de igualação espectral de cores²

$S(\lambda)$ é a distribuição espectral da fonte luminosa em análise

$U(S(\lambda))$ é a incerteza expandida para cada comprimento de onda da distribuição espectral.

Para a determinação de $U(y)$ os caracteres x que estão em vermelho na equação (1) devem ser substituídos por y .

Caso se utilize $u(S(\lambda))$ ao invés de $U(S(\lambda))$, serão obtidas $u(x)$ e $u(y)$, e as respectivas incertezas expandidas devem ser determinadas elaborando-se planilha de incerteza que contemple as contribuições para as incertezas expandidas.

¹ Na publicação [3] os termos da equação são apresentados em uma forma compactada.

² Aba “1931 col observer” da planilha disponível em <https://cie.co.at/technical-work/technical-resources> opção “Selected Colorimetric Tables”.

4. Desenvolvimento

A determinação da TCC é feita a partir das coordenadas x, y ³. As incertezas de x, y permitem determinar uma área no diagrama CIE 1931 (figura 1) que contém todos os pares x, y que correspondem à probabilidade de abrangência adotada (normalmente 95,45%), conforme demonstrado na figura 3.

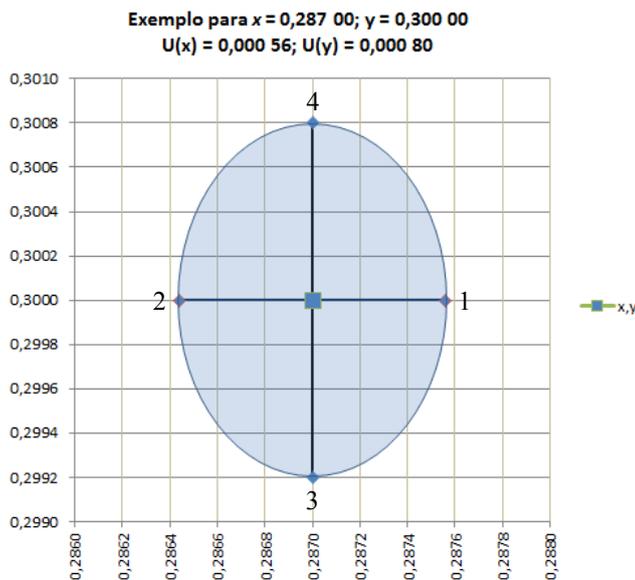


Figura 3 – Domínio dos pares x, y no diagrama CIE 1931 que correspondem às incertezas $U(x) = 0,000\ 56$ e $U(y) = 0,000\ 80$ para as coordenadas cromáticas $x = 0,287\ 00$ e $y = 0,300\ 00$

Da área que representa todos os pares abrangidos pela incerteza, o ponto mais distante de x, y é uma das extremidades dos eixos, podendo estar no eixo vertical ou horizontal, dependendo dos valores das incertezas de x e de y . Por isso, são calculadas as TCC correspondentes ao ponto x, y e aos quatro pontos extremos dos eixos. O valor adotado para a incerteza de TCC é a maior diferença absoluta entre as TCC desses quatro pontos e a TCC correspondente a x, y .

As coordenadas dos extremos dos eixos estão mostradas na Tabela 1

Tabela 1. Coordenadas, no diagrama CIE 1931, dos extremos dos eixos da figura 2

	x	y
1	$x_1 = x + U(x) = 0,287\ 56$	$y_1 = y = 0,300\ 00$
2	$x_2 = x - U(x) = 0,286\ 44$	$y_2 = y = 0,300\ 00$
3	$x_3 = x = 0,287\ 00$	$y_3 = y + U(y) = 0,300\ 80$
4	$x_4 = x = 0,287\ 00$	$y_4 = y - U(y) = 0,299\ 20$

Para a determinação dos valores da TCC e da Duv devem ser utilizados métodos validados, como os apresentados em [6] e [7], que usam os valores atualizados das constantes definidoras do Sistema Internacional de Unidades, reavaliadas em 2019 [9]. A Tabela 2 apresenta os valores da TCC e da Duv para o ponto x, y (referência) e os demais pontos.

³ Como as relações entre as coordenadas cromáticas x, y (CIE 1931), u, v (CIE 1960) e u', v' (CIE 1964) são definidas pelas equações (2) até (5), o método é facilmente adaptável para o caso de se conhecerem os valores e as incertezas de u, v ou u', v' .

Tabela 2. Valores de TCC e Duv referentes aos pontos x, y (referência) e aos extremos dos eixos, e as diferenças para os valores de referência

	TCC (K)	$ \Delta \text{TCC} $ (K)	Duv	$ \Delta \text{Duv} $
x, y	8 830,09	-	+0,002 28	-
1	8 780,43	49,66	+0,001 93	0,000 35
2	8 880,02	49,93	+0,002 59	0,000 31
3	8 801,20	28,89	+0,002 68	0,000 40
4	8 859,47	29,38	+0,001 84	0,000 44

Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados referentes aos dados da Tabela 2

	Valor	Incerteza Expandida U
TCC	8 830 K	50 K
Duv	+0,002 28	0,000 44

A determinação das incertezas das coordenadas cromáticas u, v e u', v' segue o mesmo princípio, devendo-se utilizar as seguintes relações:

$$u = \frac{4x}{12y-2x+3} \quad (2)$$

$$v = \frac{6y}{12y-2x+3} \quad (3)$$

$$u' = u \quad (4)$$

$$v' = \frac{3v}{2} \quad (5)$$

Para o exemplo da figura 3, foram determinadas as seguintes incertezas:

$$U(u) = U(u') = 0,000 4$$

$$U(v) = 0,000 3$$

$$U(v') = 0,000 5$$

5. Comparação com resultados publicados

Foi feita comparação dos resultados de incertezas de TCC, encontrados pelo método apresentado, com 13 resultados relatados nas publicações [3] e [6], onde são apresentados valores de u, v e suas incertezas expandidas. Os resultados estão representados na figura 4.

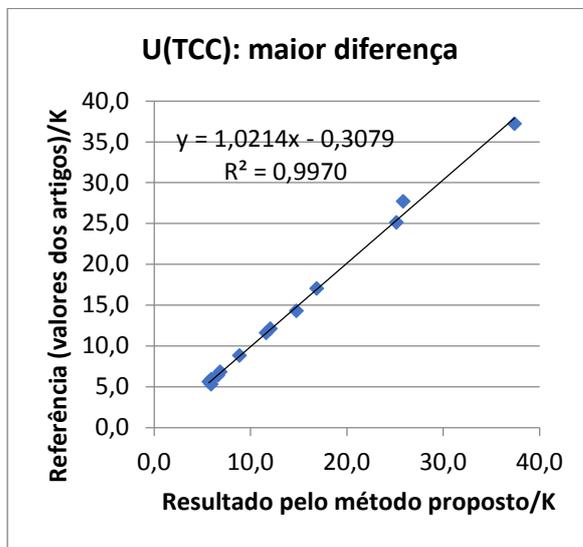


Figura 4 – Correlação entre as U(TCC) calculadas pelo método proposto e os valores de referência (valores dos artigos)

6. Comparação com resultados obtidos no Inmetro

Foi desenvolvido no Laboratório de Metrologia Óptica Primária (Lamop) do Inmetro um método independente, utilizando simulação de Monte Carlos, para estimativa das incertezas em grandezas colorimétricas de fontes luminosas, a partir de medições espectrais de irradiância. Utilizando-se a distribuição espectral, e as respectivas incertezas expandidas de x, y obtidas pelo Lamop na medição de uma lâmpada FEL, foram encontrados os resultados constantes da Tabela 4.

Tabela 4. Comparação entre resultados obtidos pelo Lamop e pelo método Laraf II

Caso	Tipo de lâmpada		Lamop	Laraf II
1	Incandescente	TCC (K)	2865 ± 12	2865 ± 11
		x	$0,4471 \pm 0,0007$	$0,4471 \pm 0,0007$
		y	$0,4077 \pm 0,0006$	$0,4077 \pm 0,0006$
2	<i>Incandescente</i>	TCC (K)	3198 ± 7	3198 ± 6
		x	$0,4239 \pm 0,0003$	$0,4239 \pm 0,0003$
		y	$0,3998 \pm 0,0003$	$0,3998 \pm 0,0003$
3	<i>Incandescente</i>	TCC (K)	2016 ± 16	2016 ± 10
		x	$0,5247 \pm 0,0012$	$0,5247 \pm 0,0012$
		y	$0,4133 \pm 0,0011$	$0,4133 \pm 0,0011$

7. Conclusão

Foi apresentado um método que prescinde de tratamentos estatísticos complexos para a determinação das incertezas de grandezas colorimétricas, sendo conhecidas previamente as incertezas das coordenadas x, y .

A comparação de resultados entre os obtidos pelo método apresentado e resultados de publicações internacionais, bem como com resultados obtidos no Inmetro por outro método comprovam a viabilidade de seu uso, sem prejuízo à confiabilidade dos resultados.



8. Agradecimento

O coautor Ivo Ázara agradece o apoio do programa Pronametro, do Inmetro, para o desenvolvimento das pesquisas.

9. Referências

- [1] I Ázara e T Menegotto 2021 *Congresso Brasileiro de Metrologia Óptica (online)*, p 1796, disponível em <https://metrologia2021.org.br/?p=1796>
- [2] BIPM 2008 *Guia para a expressão da incerteza da medição* – 1ª Ed. brasileira (Rio de Janeiro), disponível em http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf
- [3] J. L. Gardner 2000 *Color Res. Appl.* **25** (5), 349
- [4] CIE 015:2018 *Colorimetry 4th edition*
- [5] Colour Science for Python 0.3.11 – T. M. Mansecal, 2018, disponível em <https://pypi.org/project/colour-science/0.3.11/>
- [6] I Ázara, T Menegotto and J Gomes 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1826 012061
- [7] Y Ohno 2014 *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. N. Am.* **10**, 47
- [8] Petri Kärhä et al 2017 *Metrologia* 54 524-34
- [9] *The International System of Units (SI): Defining constants*, disponível em <https://www.bipm.org/en/measurement-units/si-defining-constants>