

# A Intensidade Luminosa: da Vela à Candela

Luís Miguel Bernardo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

## Resumo

A intensidade luminosa é uma das mais relevantes grandezas físicas associadas à luz visto que quantifica o brilho de uma fonte luminosa. Neste artigo, apresenta-se a definição desta grandeza, os padrões e unidades que para ela se criaram e, finalmente, discute-se a candela, a unidade da intensidade luminosa do Sistema Internacional de Unidades (SI), cuja definição foi pela primeira vez estabelecida por convenção internacional, em 1948, e foi sendo melhorada ao longo dos últimos setenta anos.

## 1. Introdução

Quando se pretende medir uma determinada grandeza física, recorre-se a uma unidade, previamente estabelecida, que é muitas vezes definida por meio de um padrão. A estabilidade e a reprodutibilidade do padrão garantem a imutabilidade da unidade e consequentemente a precisão e a universalidade das medidas.

Entre as várias grandezas associadas à luz, encontram-se a *intensidade radiante* ( $I_e$ ) e a *intensidade luminosa* ( $I_v$ ). A primeira é uma grandeza radiométrica e define-se como a potência (ou o fluxo da energia) emitida, reflectida, transmitida ou recebida numa dada direção por unidade de ângulo sólido, sendo expressa em unidades de  $W\ sr^{-1}$  (watt por esterradiano). Como as grandezas associadas à luz são habitualmente dependentes do comprimento de onda ( $\lambda$ ) (ou frequência), é necessário definir grandezas diferenciais que representem o valor daquelas grandezas para um dado comprimento de onda (ou frequência). A *intensidade radiante espectral*  $I_e(\lambda)$  é definida como a derivada da intensidade radiante em ordem ao comprimento de onda (ou frequência) sendo expressa em unidades de  $W\ sr^{-1}\ m^{-1}$  (ou  $W\ sr^{-1}\ Hz^{-1}$ ). Pode calcular-se a intensidade radiante associada a uma fonte luminosa caracterizada por um determinado espectro, integrando a intensidade radiante espectral entre os limites do referido espectro  $[\lambda_1, \lambda_2]$ :

$$I_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_e(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

De forma semelhante, se pode definir a *intensidade luminosa espectral*  $I_v(\lambda)$  e calcular a intensidade luminosa  $I_v$ :

$$I_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_v(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

A intensidade luminosa é uma grandeza fotométrica, dependente da sensibilidade do olho humano, exprime-se em unidades  $lm\ sr^{-1}$  ou *candela* (cd) e define-se como a potência radiante numa dada direção por unidade de ângulo sólido, depois de ser espectralmente modificada pela função *eficácia luminosa*  $K(\lambda)$ . Esta função representa a sensibilidade do olho humano e tem uma forma semelhante a uma função gaussiana com um máximo central. Noutras palavras, a intensidade luminosa é a potência da luz numa dada direção por unidade de ângulo sólido, tal como é percebida por um olho humano “médio” (normalizado).

Assim, a intensidade luminosa espectral  $I_v(\lambda)$  pode ser escrita em função da intensidade radiante espectral  $I_e(\lambda)$  como:

$$I_v(\lambda) = K(\lambda) I_e(\lambda) = K_m V(\lambda) I_e(\lambda) \quad (3)$$

em que  $K_m = K(\lambda_m)$  é o valor máximo de  $K(\lambda)$  expresso em  $lm\ W^{-1}$ , de acordo com a unidade para exprimir  $I_v(\lambda)$ ;  $V(\lambda)$  é a *eficiência luminosa espectral*, sem dimensões, às vezes conhecida por *função de luminosidade* ou *curva de visibilidade*, e é igual a  $V(\lambda) = K(\lambda) / K_m$  representada também por  $\gamma(\lambda)$ , que é a *função colorimétrica* do sistema de referência *colorimétrico* CIE 1931, em que CIE é a sigla da *Commission Internationale de l'Éclairage*.

Para que o valor da intensidade luminosa espectral  $I_v(\lambda)$ , correspondente a um dado comprimento de onda  $\lambda \neq \lambda_m$ , tenha o mesmo valor que  $I_v(\lambda_m)$ , então a intensidade radiante terá que ser maior, pois  $V(\lambda) < V(\lambda_m)$ . A intensidade luminosa de uma fonte policromática, caracterizada por um determinado espectro, calcula-se integrando a intensidade luminosa espectral na banda espectral da fonte  $[\lambda_1, \lambda_2]$ :

$$I_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_v(\lambda) d\lambda = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \cdot I_e(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

A necessidade de estabelecer padrões e unidades para a intensidade luminosa surgiu quando se tornou indispensável regular a indústria das fontes de luz usadas para iluminação. Com o desenvolvimento da iluminação pública, sobretudo a partir do início do século XIX, surgiu a necessidade de comparar e normalizar as fontes luminosas e de estabelecer uma unidade fotométrica para a intensidade luminosa, baseada num padrão tão estável quanto pos-

sível, utilizando para isso as tecnologias disponíveis mais evoluídas. Numa primeira aproximação, pareceu natural recorrer à popular vela de cera como primeiro padrão e tomar o respetivo brilho como unidade de intensidade luminosa. Muitos dos padrões adoptados basearam-se em chamas de vários tipos de velas e manteve-se quase sempre a preocupação de ajustar, tanto quanto possível, a unidade dos outros padrões ao brilho da velha vela de cera, gordura ou parafina.

## 2. A História dos Padrões Luminosos

Vários foram os padrões luminosos propostos e adoptados desde o início do século XIX. Em França, utilizaram-se a *vela esteárica* que consumia 20 g de estearina por hora e a *lâmpada Carcel*, patenteada em 1800 por Bernard Guillaume Carcel (1750-1818), possuindo um mecanismo para a alimentação do óleo constituído por uma bomba controlada por um sistema de relojoaria [1]. Consumia numa hora 42 g de óleo de colza purificado, que embebia uma torcida que uma massa lineal de 0,36 g/cm e era composta de setenta e cinco fios [2]. Em 1860, esta lâmpada foi adoptada nos testes dos gases de iluminação de Paris depois de normalizadas as dimensões do queimador e da chaminé bem como as características da mecha [3]. Na Alemanha e Inglaterra, usou-se a *vela de espermacete* (*London standard spermaceti candle*) que foi estabelecida como padrão luminoso pelo *London Metropolitan Gas Act* de 1860; conhecida simplesmente por *vela inglesa*, tinha 22 mm de diâmetro, 76 g de massa e era feita de espermacete de baleia com cera de abelha em quantidade suficiente para evitar a cristalização; consumia o combustível à taxa de 120 grãos (7,776 g) por hora [4]. A estabilidade luminosa desta vela não era porém suficiente: as variações de luminosidade podiam atingir 30 %, dependendo das circunstâncias de utilização. Por sua vez, a *vela alemã*, ou *vela Kerzen* (Fig. 1), era uma vela de parafina, com temperatura de fusão de 55 °C, que tinha 20 mm

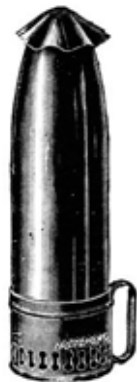


Fig. 1 - Vela Kerzen com base cilíndrica feita de folha de flandres pintada (*Einrichtungen und Apparate für den Physikalischen Unterricht*, 5.ª ed., E. Leybold's Nachfolger, Cöln A. Rh., s/d [1905], p. 451).

de diâmetro e ardia com uma chama de 5 cm de altura. A sua estabilidade e reprodutibilidade luminosas eram igualmente muito limitadas. No Posto Fotométrico que existia no Laboratório de Química Municipal do Porto aberto ao público em 1884, o químico Ferreira da Silva usava para testar os sistemas de iluminação da cidade a lâmpada Carcel com as dimensões do bico e da chaminé que tinham sido recomendadas por Jean Baptiste Dumas (1800-1884) e Henri Victor

Regnault (1810-1878) (Fig. 2) e adoptadas em França [1] e noutros países que usavam esta lâmpada.

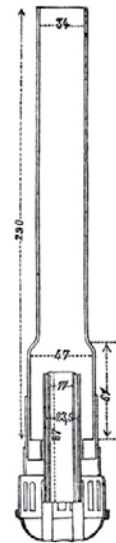


Fig. 2 - Dimensões (mm) do bico e da chaminé de vidro da lâmpada Carcel de acordo com a recomendação de Dumas e Regnault (A. J. Ferreira da Silva, *Instruções Regulamentares*, Porto, 1914, p. 6).

A lâmpada *Hefner*, inventada em 1884 pelo engenheiro electrotécnico alemão Friedrich von Hefner-Alteneck (1845-1904), utilizava uma mecha saturada de um líquido combustível, o acetato de amilo ( $C_7H_{14}O_2$ ), e representava um dos mais simples e precisos padrões da época (Fig. 3). A mecha sólida-

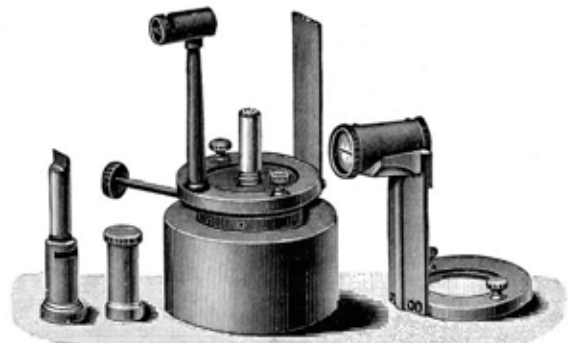


Fig. 3 - Lâmpada Hefner com acessórios. A chama sai do cilindro central do corpo da lâmpada; o braço lateral com um sistema óptico permite avaliar a altura da chama (*Einrichtungen und Apparate für den Physikalischen Unterricht*, 5.ª ed., E. Leybold's Nachfolger, Cöln A. Rh., s/d [1905?], p. 384).

era constituída por filamentos de algodão e enchia completamente um tubo com 8 mm de diâmetro interior e 25 mm de comprimento, feito de uma liga metálica constituída por zinco, cobre e níquel. A altura da chama, medida desde a saída do tubo até ao topo, era de 40 mm; podia ser regulada subindo ou baixando a mecha e podia ser avaliada por meio de um dispositivo óptico. Os críticos achavam que as medidas realizadas com esta lâmpada eram muito exigentes, demasiado demoradas e pouco fiáveis, sendo necessário fazer frequentes correções associadas à humidade e temperatura [6]. A *lâmpada Hefner* foi adoptada como padrão da intensidade luminosa na Alemanha, Áustria e países escandina-

vos, desde o final do século XIX.

O padrão *Vernon Harcourt*, aperfeiçoado durante os últimos 20 anos do século XIX, pelo químico e inventor inglês Augustus George Vernon Harcourt (1834-1919), era implementado por uma lâmpada na qual ar saturado de vapor de pentano era consumido num queimador especial, produzindo, sob condições específicas de pressão atmosférica e humidade [7], uma chama com intensidade luminosa equivalente a 10 velas inglesas (*candlepower*) [8]. Em 1898, este padrão foi adoptado em Inglaterra pelo *The Metropolitan Gas Referees*, de que fazia parte o próprio inventor, e usado para estabelecer os padrões de iluminação britânicos [9]. A pureza do pentano era um parâmetro crítico ao ponto de esta mesma instituição ter regulamentado o procedimento da sua purificação [10].

Em 1905, o Congresso Internacional de Fotografia de Liège, adoptou, como “padrão luminoso secundário,” um padrão de acetileno constituído por: (a) um queimador de débito constante, com aparelho de controlo, de Henri-Edmond Fouché (1860-1943); (b) um dispositivo inventado por Charles Féry (1865-1935) e modificado por Fernand Montpillard (1865-1937) [11].

Apesar da complexidade técnica crescente dos padrões baseados em chamas, a sua fiabilidade continuava a ser insatisfatória. A variedade de padrões adoptados em diferentes países era um problema adicional, pois dificultava uma normalização universal. Para minimizar estas dificuldades, estabeleceram-se tabelas de conversão entre as várias unidades, nem sempre rigorosas e muitas vezes significativamente distintas [12], [13]. O facto de os padrões, bem como as fontes luminosas que com eles se comparavam visualmente, apresentarem diferentes tonalidades de cores não era um menor problema. O professor Ferreira da Silva queixava-se que “a comparação do *carcel* com os bicos Auer seria *difficilima, senão impossivel, por causa de ser muito diferente o tom das duas luzes,*” pois a luz da lâmpada *carcel* tinha uma cor avermelhada e a dos bicos Auer era branca. E acrescentava “*recorremos, para vencer esta dificuldade, á cuba photometrica de Crova, utilizada com vantagem por diversos experimentadores.*” Esta cuba continha uma solução verde resultante da mistura de cloreto férrico e cloreto de níquel e, segundo a teoria de Crova, “a razão entre as intensidades dos raios verdes d’este comprimento de onda é igual á das intensidades de luzes brancas” [14]. Esta conclusão era, porém, rejeitada por outros experimentadores.

Um estudo feito por Alfred Perot, o seu assistente E. Langlet, F. Laport e R. Jouaust, encomendado pela Comissão Internacional de Fotometria e realizado no Laboratório de Ensaio do *Conservatoire National des Arts et Métiers* e no *Laboratoire Central d’Électricité* em Paris, permitiu estabelecer, em

1906, relações bastante precisas entre os padrões de chama [15] *Carcel, Hefner e Vernon-Harcourt*, que eram sobretudo usados em França, Alemanha e Inglaterra, respectivamente. Aqueles investigadores concluíram que era do máximo interesse adoptar um padrão baseado num fenómeno físico, tão independente quanto possível das condições exteriores (grau de humidade, pressão e temperatura do ar e até concentração de dióxido de carbono) [16].

No século XIX, enquanto se inventavam novos padrões de chamas e se aperfeiçoavam os conhecidos, foram propostas de padrões baseados em diferentes princípios de funcionamento. A incandescência devida à passagem da corrente eléctrica em resistências de platina foi estudada por vários investigadores como John W. Draper (1811-1882) em 1844, Johann K. F. Zöllner (1834-1882) em 1859 e Louis Schwendler (1838-1882) em 1878, os quais propuseram que um padrão baseado neste princípio fosse usado para definir a unidade de intensidade luminosa [17]. Numa Conferência Internacional, realizada a 3 de Maio de 1884, o físico francês Jules Violle (1841-1923) propôs uma inovadora unidade de intensidade luminosa, que já tinha previsto em 1879 e ensaiado posteriormente, tendo ficado conhecida por *unidade Violle*. Era definida como a intensidade luminosa da luz de uma determinada cor, emitida na direcção normal por 1 cm<sup>2</sup> de platina à temperatura de solidificação (2045 K ou 1772 °C). Para o caso da luz branca, a unidade prática ficava definida como a intensidade da luz total emitida pelo referido padrão nas mesmas condições [18]. Apesar de ter uma estabilidade superior à dos padrões de combustão, o *padrão Violle* tinha a desvantagem de ser pouco reprodutível, principalmente, porque a emissividade da platina se alterava durante a solidificação e dependia muito da quantidade de impurezas que, à época, eram difíceis de controlar.

Como a intensidade deste padrão era muito elevada, decidiu-se, na Conferência Internacional dos Eletricistas de 1889 realizada em Paris, adoptar como unidade da intensidade luminosa a *vela decimal*, igual a 1/20 da *unidade Violle*, que foi usada principalmente em França. Esta nova unidade foi oficialmente estabelecida neste país, por decreto de 26 de Julho de 1919, como a unidade principal da intensidade luminosa. A realização prática da vela decimal era feita por meio de lâmpadas de incandescência depositadas no *Conservatoire National des Arts et Métiers* de Paris, constituindo uma espécie de réplica ou padrão secundário. O seu valor correspondia a uma determinada fracção da média das intensidades médias de pelo menos cinco dessas lâmpadas, medidas perpendicularmente ao eixo [19].

Um padrão primário para a intensidade luminosa baseado em lâmpadas eléctricas foi igualmente pensado, logo após Edison ter inventado, em 1879, a lâmpada de incandescência, luminosamente muito mais estável que a sua antecessora lâmpada de arco. Foram, porém necessários quase 30 anos para definir, em 1907, a vela (*candle*), baseada num conjunto de lâmpadas de filamento de carvão cuidadosamente calibradas, a qual tinha sido sugerida já em 1902 pelo engenheiro electrotécnico inglês John Ambrose Fleming (1849-1945) [20].

Em 1905, iniciou-se um projeto internacional de criação de

um padrão universal, com a colaboração de quatro laboratórios nacionais - *Bureau of Standards* nos EUA, *Laboratoire Central d'Electricité* em França, *National Physical Laboratory* na Grã-Bretanha e *Physikalische Technische Reichsanstalt* na Alemanha. Na sequência deste projeto, os EUA, a França e o Reino Unido adoptaram, em 1909, uma unidade implementada por lâmpadas de filamento de carvão (com temperaturas de cor abaixo de 2000 K), cujo valor era praticamente igual à vela legal francesa (a vela decimal) e cujo nome - *vela internacional* - foi atribuído em 1921 pela CIE. Cada um dos laboratórios possuía um conjunto de lâmpadas eléctricas padrão. A Alemanha não aderiu à nova unidade e, até 1942, manteve-se fiel à *vela Hefner* que, no entanto, desde 1909, passou a valer 0,9 de uma *vela internacional*.

Apesar dos esforços internacionais no sentido de obter uma unidade fiável com a criação desta nova vela, a verdade é que a vela internacional não era suficientemente estável, pois estava condicionada às significativas variações associadas a uma lâmpada eléctrica de filamento de carvão. Não podia, por isso, representar uma solução definitiva e duradoura para um padrão que se pretendia estável.

### 3. A candela

Em 1933, quando já se conheciam com bastante profundidade as propriedades radiativas do *corpo negro* ou *radiador de Planck*, foi retomada a ideia da utilização da platina, à temperatura de congelação (2045 K) [21], para definir a unidade da intensidade luminosa. Valorizavam-se assim as propostas de Violle, Otto R. Lummer, Ferdinand Kurlbaum [22], e de outros investigadores como Charles W. Waider e George K. Burges do *National Bureau of Standards* [23]. O estudo preparatório deste tipo de padrão foi iniciado pela CIE e pelo *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM), antes de 1937. As conclusões estavam definidas em 1939, mas a sua implementação foi interrompida pela II Guerra Mundial. O novo padrão, que definia a nova vela, foi proposto pela CIE e aprovado pela CIPM, em 1946, e seria implementado por um corpo negro a radiar à temperatura de solidificação da platina de 2041,4 K com uma intensidade luminosa de 60 novas velas por centímetro quadrado. Em 1948, esta definição foi ratificada pela 9.<sup>a</sup> *Conference General de Poids et Mesures* (CGPM) que deu à nova vela um nome alternativo: *candela* (cd) [24], o nome latino para vela. O seu valor era inferior ao da vela internacional em cerca de 2 %. No *Sistema Internacional de Unidades* (SI), estabelecido pela CGPM em 1960, a candela foi considerada uma das sete unidades de base.

Em 1967, a 13.<sup>a</sup> CGPM produziu uma versão diferente da definição de candela, especificando que a intensidade luminosa era na direção perpendicular à superfície do corpo negro com uma área de  $1/600\,000\text{ m}^2$ , à temperatura de solidificação da platina (2045 K ou 1772 °C) e à pressão de 101 325 N m<sup>-2</sup> [25], isto é, 1 atmosfera. A área de  $1/600\,000\text{ m}^2$  foi escolhida de modo que o brilho da candela fosse praticamente idêntica à de uma vela de cera.

Dadas as dificuldades em realizar fisicamente o radiador de Planck e perante as novas possibilidades de medir a potência radiante, a 16.<sup>a</sup> CGPM adoptou, em 1979, uma nova definição para a candela, que ainda está em vigor. Ficou

estabelecido que o padrão fotométrico é um corpo negro à temperatura de 2 045 K, o ponto de fusão da platina pura, tendo sido estabelecido que teria uma luminância normal de  $600\,000\text{ cd/m}^2$ . Nesta base, a *candela* (cd) é uma unidade secundária da intensidade radiante, tendo sido definida como a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte emitindo radiação monocromática de 540 THz e cuja intensidade radiante nessa direção é  $1/683\text{ W sr}^{-1}$ . Nesta definição, não é feita referência explícita à função  $V(\lambda)$  para o cálculo da intensidade luminosa a outras frequências, mas estava implícita na intenção dos normalizadores como foi posteriormente divulgado. Aliás, esta era uma recomendação que vinha já de 1948 quando se estabeleceu pela primeira vez a candela como unidade de intensidade luminosa. O padrão de intensidade luminosa deixou de ser apenas um aparato físico para se transformar num modelo matemático regulado pela curva de emissão do corpo negro e pela função luminosidade. A avaliação da intensidade luminosa baseia-se agora na medição da intensidade radiante, realizada por instrumentos, com sensores muito precisos e fiáveis, sendo capazes de simular o olho humano através da função  $V(\lambda)$  e realizar os cálculos de acordo com a Eq. (4).

A 26.<sup>a</sup> CGPM, ocorrida a 16 de Novembro de 2018, estabeleceu que a candela é definida como “a unidade da intensidade luminosa numa dada direção e que toma o valor numérico fixo da eficácia luminosa de radiação monocromática de frequência 540 THz,  $K_{\text{cd}}$  [26], que é 683 quando expresso em unidade  $\text{lm W}^{-1}$ , igual a  $\text{cd sr W}^{-1}$  ou a  $\text{cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$ , em que o quilograma (kg), o metro (m) e o segundo (s) são definidos em termos da constante de Planck ( $h$ ), da velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e da frequência de transição hiperfina do césio ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ )” [27]. Ora, destas três constantes,  $h$  foi a única alterada pela 26.<sup>a</sup> CGPM, mas não de maneira significativa para que a definição de candela sofresse qualquer alteração relativamente à de 1979, embora os termos utilizados na definição sejam distintos e mais rigorosos. Noutras palavras, uma candela continua a ser a intensidade luminosa numa determinada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540 THz e tem uma intensidade radiante nessa direção de  $1/683\text{ W sr}^{-1}$ . A eficácia luminosa  $K_{\text{cd}} = 683\text{ lm W}^{-1}$  fica a par de mais seis constantes do SI todas elas de grande relevância física ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , a frequência de transição hiperfina do césio;  $c$ , a velocidade da luz no vácuo;  $h$ , a constante de Planck;  $e$ , a carga elementar;  $k$ , a constante de Boltzmann;  $N_A$ , o número de Avogadro).

### 4. Discussão e Conclusão

Na definição atual da candela, surgem dois parâmetros associados à eficácia luminosa, que são a frequência 540 THz e o valor  $K_m = K_{\text{cd}} = 683\text{ lm W}^{-1}$ , em que o lumen (lm) é a unidade do fluxo luminoso

(potência luminosa), sabendo-se que uma fonte pontual com a intensidade luminosa de uma *candela* radia um *lumen* no ângulo sólido de um *esterradiano* e, se for isotrópica, radia globalmente, em todas as direções,  $4\pi \text{ lm} = 12,56 \text{ lm}$ .

A curva da *eficácia* luminosa toma duas formas, uma para visão diurna - a *curva fotópica* - e a outra para visão noturna - a *curva escotópica*  $V'(\lambda)$  [28]

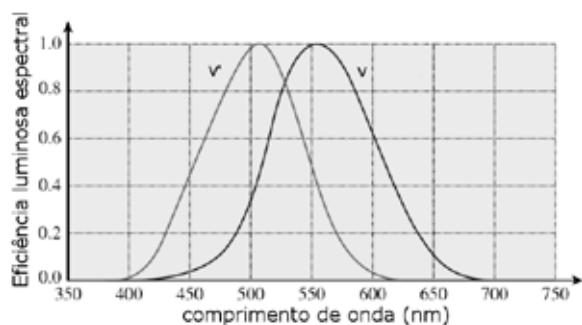


Fig. 4 - Eficiência luminosa espectral para visão escotópica  $V'(\lambda)$  (esquerda) e fotópica  $V(\lambda)$  (direita), com picos em 507 nm e 555 nm, respectivamente.

com as respectivas funções  $V(\lambda)$  e  $V'(\lambda)$  (Fig. 4). A primeira versão da curva  $V(\lambda)$  fotópica, publicada em 1923 por Kasson S. Gibson e Edward P. T. Tyndall, foi adoptada em 1924 pela 6.<sup>a</sup> Sessão da CIE, confirmada em 1931 como *função colorimétrica do sistema de referência colorimétrico CIE 1931*, e aprovada em 1933 pelo CIPM [29]. Esta curva foi modificada em 1951 por Deane B. Judd e melhorada em 1978 por Johannes J. Vos, tendo dado origem à função *CIE  $V_M(\lambda)$*  ou *CIE 1978  $V(\lambda)$* . Em 2005, Lindsay T. Sharpe, Andrew Stockman, Wolfgang Jagla e Herbert Jägle determinaram experimentalmente uma curva ainda mais rigorosa que representava a sensibilidade do olho humano à luz diurna [30]. Apesar destas ligeiras melhorias, a função *CIE 1931  $V(\lambda)$*  continua a ser a curva padrão para os cálculos da intensidade luminosa por razões de natureza prática, evitando-se assim possíveis ambiguidades com a introdução de uma nova curva. A função escotópica  $V'(\lambda)$  foi adotada pela CIE em 1951, com base em dados experimentais obtidos por George Wald (1906-1997), em 1945, e por Brian Hewson Crawford (1906-1991), em 1949; é representativa do grupo de observadores com idade inferior a 30 anos. O valor atribuído ao pico da curva fotópica - posteriormente usado na definição da *candela* e que ocorre no comprimento de onda 555 nm (ou na frequência 540 THz) - começou por ser  $621 \text{ lm W}^{-1}$ , em 1903; passou para  $673 \text{ lm W}^{-1}$ , em 1907. Em 1948, passou de  $685 \text{ lm W}^{-1}$  para  $680 \text{ lm W}^{-1}$  e, em 1979, estabilizou em  $683 \text{ lm W}^{-1}$ . O valor de pico para a curva escotópica, que ocorre no comprimento de onda 507 nm, foi estabelecido em 1979 como sendo  $1754 \text{ lm W}^{-1}$ . Este valor foi posteriormente ajustado para  $1700 \text{ lm W}^{-1}$  para que as curvas da eficiência luminosa fotópica e escotópica tivessem o mesmo valor a 555 nm.

A dependência psico-fisiológica da intensidade luminosa e da respectiva unidade, a *candela*, coloca-as numa posição única no SI, por não serem definidas exclusivamente a partir de constantes físicas universais. Além disso, a *candela* é definida à custa de outra unidade fotométrica, o *lumen*, a unidade do fluxo luminoso que, por isso, talvez merecesse o estatuto de unidade de base. Embora a intensidade luminosa e a *candela* sejam suficientemente importantes para poderem fazer parte do grupo das entidades definidas ou recomendadas no SI, não é evidente que devam pertencer ao grupo das grandezas ou unidades de base. Há quem defenda, com alguma razão, que deveriam ser excluídas desta categoria [31]:

*A candela é claramente uma unidade derivada por ser uma função da intensidade radiante (potência por unidade de ângulo sólido) e o máximo da função luminosidade. Não é uma unidade derivada coerente e, portanto, deveria pertencer logicamente à classe das "unidades aceites para uso com o SI". Contudo, ao mudar o seu estatuto de unidade de base (convencionalmente independente) ter-se-ia que mudar o estatuto das suas unidades derivadas coerentes lumen e lux, o que daria origem a confusões.*

Não se espera que as grandezas e unidades do SI, adoptadas em 2019, se mantenham imutáveis indefinidamente. Se acreditarmos na evolução histórica apresentada neste artigo, outras alterações serão certamente propostas e aprovadas no futuro, com o objectivo de melhorar o SI, tornando-o mais simples e rigoroso. A *candela* poderá ser uma das unidades a ser reformulada, na base, por exemplo, do número de fótons de uma determinada energia por unidade de ângulo sólido ou de uma descrição quântica da luz, que levou à reformulação da maioria das unidades de base do SI [32].

## Referências

1. Louis Figuier, "Les Merveilles de la Science," Vol. IV, Furne, Jouvet et Cie, Éditeurs, Paris (1870), pp. 36-37.
2. A. J. Ferreira da Silva, "Instruções Regulamentares para a determinação do poder illuminante do gaz adoptado no Posto Photometrico do Porto (1885)," Separata da Revista de Chimica Pura e Applicada (Ano 10.<sup>o</sup>, 1914), Tip. a vapor da Encyclopedia Portuguesa, Porto (1914), pp. 5-6.
3. Edmond Borias, "Traité Théorique et Pratique de la Fabrication du Gaz et de ses Divers Emplois," Librairie Polytechnique, Baudry et Cie Éditeurs, Paris (1890), p. 399; Sean François Johnston, "A Notion or a Measure: The Quantification of Light to 1939," Tese de Doutoramento, University of Leeds (1994), p. 80.
4. Stephen Wilk, "From Candle to Candela," Optics & Photonics News, Março de 2016, pp. 20-21.
5. A. J. Ferreira da Silva, "Instruções Regulamentares para a determinação do poder illuminante do gaz adoptado no Posto Photometrico do Porto (1885)," Separata da Revista de Chimica Pura e Applicada (Ano 10.<sup>o</sup>, 1914), Tip. a vapor da Encyclopedia Portuguesa, Porto (1914), pp. 5-6.
6. Sean François Johnston, "A Notion or a Measure: The Quantification of Light to 1939," Tese de Doutoramento, University of Leeds (1994), p. 86.

7. E. B. Rosa, E. C. Crittenden, A. H. Taylor, "Atmospheric Corrections for the Harcourt Standard Pentane Lamp," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. V, n.º 5, Setembro de 1921, pp. 444-451.
8. E. C. Crittenden, A. H. Taylor, "The Pentane Lamp as a Working Standard," *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 10, 1914, pp. 391-417; C. L. Boltz, "A Statue to Mr. Trattles and other scientific topics," London, Butterworths Scientific Publications (1952), p. 69.
9. "Augustus George Vernon-Harcourt, 1834-1919," *Nature*, Vol. 134, 22 de Dezembro de 1934, p. 963.
10. Sean François Johnston, "A Notion or a Measure: The Quantification of Light to 1939," Tese de Doutoramento, University of Leeds (1994), p. 84.
11. G. H. Niewenglowski, "Étalon secondaire pour la photométrie photographique," *Le Radium*, 3.º Ano, 1906, pp. 121-122.
12. B. C. Damien & R. Paillot, "Traité de Manipulations de Physique," Paris Masson & Cie Editeurs, Paris (1896), pp. 172-173.
13. No fim do século XIX, adoptavam-se as seguintes relações entre unidades: 1 Carcel = 0,481 Violle = 0,905 Vernon-Harcourt = 7,89 Kerzen = 8,91 "candle" ou vela inglesa = 7,5 vela normal francesa = 8,75 vela esteárica de Munique = 9,60 vela espermacete ordinária = 9,5 vela estrela ordinária. Estes valores variavam, no entanto, conforme as fontes; com base no "Formulaire de l'électricien de Hospitalier," o químico Ferreira da Silva indica que 1 Carcel = 7,6 vela alemã = 7,4 vela inglesa. Numa tabela publicada em 1931, estabelecia-se que 1 Violle = 2,08 Carcel = 16,1 vela estrela francesa = 16,4 Kerzen = 18,5 "candle" ou vela inglesa = (18,51) 18,86 Hefner [antiga] = (2,20) 20 vela decimal (Nota: entre parêntesis indicam-se valores incorretos impressos no livro a seguir citado); v. J. Tribouillois, L. Laumière, "Pour y voir clair, Initiation à l'Éclairage," Dunod, Paris (1931), p. 6. As atuais relações entre estas unidades podem consultar-se em <https://www.unitconverters.net/lumi-nous-intensity-convert.html>.
14. A. J. Ferreira da Silva, "A Transformação do Systema de iluminação no Porto em 1908," *Typ. a vapor da Encyclopaedia Portuguesa Illustrada*, Porto (1914), pp. 12-13.
15. E. B. Rosa, E. C. Crittenden, "Flame Standards in Photometry," *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 10, 1914, pp. 557-595.
16. SL. Matout, "Sur la valeur relative des étalons lumineux, Carcel, Hefner et Vernon Harcourt. - MM. A. Perot et Laporte," *Le Radium*, 3.º Ano, 1906, pp. 372-373.
17. Ian E. Cottington, "Platinum and the Standard of Light," *Platinum Metals Review*, Vol. 30, n.º 2, 1986, pp. 84-88
18. Idem, pp. 88-89.
19. M. Denis-Papin, J. Vallot, "Métrologie Générale," Tomo II, 4.ª ed., Dunot, Paris (1960), p. 119.
20. C. L. Boltz, "A Statue to Mr. Trattles and other scientific topics," London, Butterworths Scientific Publications (1952), p. 69.
21. "Le Bureau International des Poids et Mesures 1875-1975," B.I.P.M. - Pavillon de Breteuil, F 92310 Sèvres, France (1975), p. 153.
22. C. E. G. [Ch. E. Guillaume], "Une nouvelle unité de lumière," *La Nature*, 22.º Ano, 1.º Semestre, G. Masson Éditeur, Paris, 1894, p. 366.
23. C.W. Waidner, G.K. Burgess, "Note on the Primary Standard of Light," *Electrical World*, Vol. 52, 1908, pp. 625-628

24. Stephen Wilk, "From Candle to Candela," *Optics & Photonics News*, Março de 2016, p. 21.
25. Idem, *Ibidem*
26. Isto é,  $K_m = K_{cd} = 683 \text{ lm/W}$ .
27. "The International System of Units (SI)," Draft of the ninth SI Brochure, 6 de Fevereiro de 2019, Bureau International des Poids et Mesures, p. 20.
28. D. Allan Roberts, "Radiometry/Photometry," *The Photonics Design & Applications Handbook*, Livro 3, 38.ª edição internacional (1992), pp. H-65-68.
29. J. E. Hardis, "100 Years of Photometry and Radiometry," *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4450, 2001, pp. 25-26.
30. L. T. Sharpe, A. Stockman, W. Jagla, H. Jägle, "A luminous efficiency function,  $V^*(\lambda)$ , for daylight adaptation," *Journal of Vision*, Vol. 5, n.º 11, Dezembro de 2005, pp. 948-968.
31. Marcus P. Foster, "The next 50 years of the SI: a review of the opportunities for the e-Science age," *Metrologia*, Vol. 47, n.º 6, 2010, p. R47.24. Stephen Wilk, "From Candle to Candela," *Optics & Photonics News*, Março de 2016, p. 21.
32. J.C. Zwinkels, E. Ikonen, G. Ulm, M.L. Rastello "Photometry, radiometry and "the candela": evolution in the classical and quantum world" *Metrologia*, Vol. 47, n.º 5, 2010, pp. R15-R32



Luís Miguel Bernardo, é professor catedrático aposentado do Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Licenciado em Engenharia Electrotécnica na Faculdade de Engenharia da mesma universidade, obteve o mestrado e o doutoramento em Física na Universidade Estatal de Virgínia (Virginia Tech) nos E. U. A. Realizou nos últimos 40 anos investigação científica em processamento óptico, holografia, óptica não-linear e ultrarrápida e aplicações da óptica à indústria e à medicina, tendo produzido mais de 150 comunicações e publicações científicas. Fazem parte dos seus interesses a história da ciência e a divulgação científica, sendo autor dos livros: *Histórias da Luz e das Cores* (3 volumes, 2005-2010), *Cultura Científica em Portugal: uma perspectiva histórica* (2013) e *Visão, Olhos e Crenças* (2018). Foi durante dez anos diretor do Museu de Ciência da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, sendo coautor dos catálogos *Dois Séculos: instrumentos científicos na história da Universidade do Porto* (2011) e *250 Anos da Criação da Aula Náutica do Porto* (formato digital) (2012).