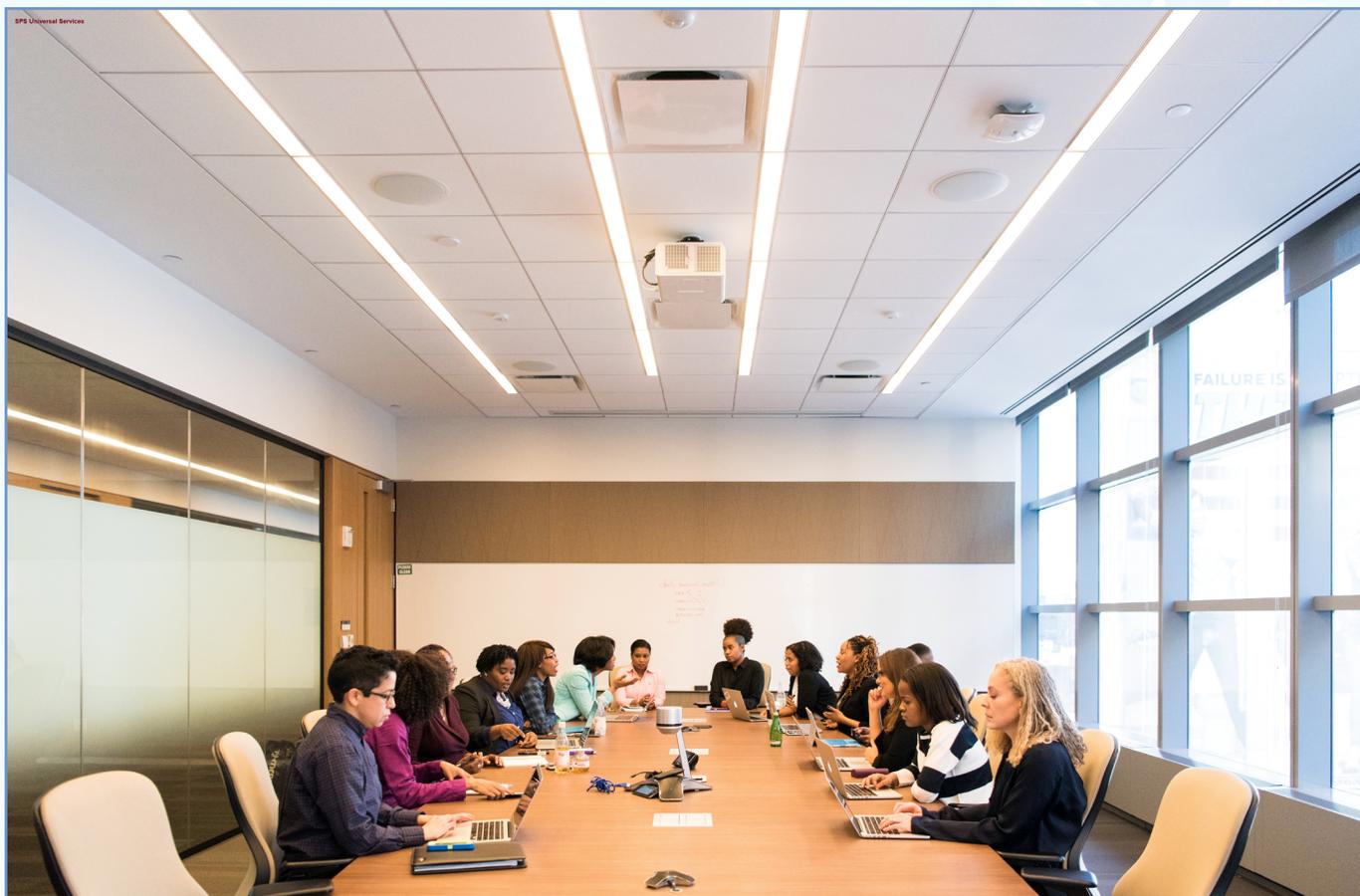


Calculando na prática o projeto integrativo

Por Betina Tschiedel Martau
Colaboração de Nathali Pimentel Chaves

Como quantificar o impacto sobre o sistema circadiano humano



Fonte: Photo by sps universal on Unsplash

AS MÉTRICAS QUE UTILIZAMOS NO NOSSO DIA A DIA SÃO GRANDEZAS definidas pelo homem para que ele consiga comparar quantidades em seu ambiente através de um sistema padronizado (ANTICOLE, 2016). Para que se pudesse prever as condições de iluminação de um ambiente, o Sistema Internacional do CIE (Comissão Internationale de l'Eclairage) determinou uma relação entre a luz e a sua capacidade de produzir sensações visuais, a partir da sensibilidade do olho humano às ondas eletromagnéticas. As unidades utilizadas em projetos luminotécnicos – como a Iluminância (lm/m^2 , ou seja, lux) e a Luminância (cd/m^2) – são derivadas dessa relação entre a luz e o olho humano, ou seja, somente com os efeitos relacionados à visão e ao conforto visual (REA, 2013).

Em 2002, quando os pesquisadores Berson, Dunn e Takao identificaram outras células na retina sensíveis à luz – nomeadas como ipRGC – relacionadas com o ciclo de 24 horas do corpo humano e a sua produção hormonal – o ciclo circadiano – eles comprovaram o que a Cronobiologia já vinha estudando desde a década de 1960: fisiologicamente, a luz tem uma influência muito maior do que imaginada anteriormente nos seres humanos, associando-se a outras funções que não somente à visão. A primeira década desde o início do ano 2000, foi dedicada a pesquisas que buscavam compreender quais as variáveis que influenciavam no processo não visual do impacto da luz, bem como quais seriam as doses ideais para manter o corpo sincronizado com o meio ambiente.

Em 2019, a CIE determinou o termo oficial para essa iluminação completa como iluminação integrativa (integrative lighting), no texto CIE Position Statement on Non-Visual Effects of Light - Recommending proper light at the proper time, definindo-a como a “iluminação que tem como objetivo específico integrar efeitos visuais e não visuais, produzindo efeitos fisiológicos e psicológicos em humanos que se refletem em evidências científicas”.

Após estabelecido conhecimento suficientemente robusto sobre esses mecanismos, a pesquisa se voltou a encontrar formas de quantificar o impacto desses efeitos sobre o corpo humano. Porém, uma grande lacuna se formou, porque agora havia uma nova variável – a supressão da melatonina pela luz – que precisava ser quantificada.

Portanto, essa necessidade de criar uma maneira de medir o impacto da luz na produção desses hormônios – especificamente a melatonina – fez com que os pesquisadores começassem a testar diferentes métricas visando estabelecer métodos para desenvolver um projeto luminotécnico adequado também para os aspectos não visuais, e que pudessem ser agregados às metodologias já existentes para as variáveis relacionadas aos aspectos visuais (BOYCE, 2003).

Propostas de métricas

As primeiras métricas testadas para determinar o impacto da luz no sistema circadiano foram o Fator de ação circadiana (acv), dos autores Gall e Bieske (2004); o Biolúmen (Biolm), de Lang (2011); e a Iluminância Melanópica, de Enezi e outros (2011). Elas não prosperaram, mas foram o ponto de partida para a compreensão de possíveis procedimentos para o desenvolvimento dessa nova unidade que se buscava.

A partir das primeiras propostas citadas, dois grupos de pesquisa começaram a se destacar na discussão sobre o desenvolvimento de métricas para o sistema não visual: o Lucas Group, da Universidade de Manchester no Reino Unido, coordenado por Robert Lucas (<http://lucas-group.lab.manchester.ac.uk/labmembers/people/default.aspx?PersonID=1050>), e o Lighting Research Center, do Rensselaer Polytechnic Institute, em Troy (NY) nos EUA, coordenado por Mariana Figueiró, (<https://www.lrc.rpi.edu/education/graduateEducation/facultydetails.asp?id=11>).

O grupo europeu propõe uma unidade métrica denominada Iluminância Melanópica (Melanopic Illuminance) cujo desenvolvimento foi apresentado primeiramente no artigo Lucas et al. (2014). A partir dessa, outras métricas foram propostas



Figura 1

O projeto de iluminação integrativa considera a iluminância vertical o mais próximo da retina possível.
Fonte: Foto de Harry no Unsplash

– entre elas o Lux Melanópico Equivalente (Equivalent Melanopic Lux, EML), popularizada pela WELL Certification (2020), bem como a Iluminância Melanópica Equivalente à Luz Diurna (D65).

O grupo americano propõe a métrica Estímulo Circadiano (Circadian Stimulus, CS) que apresenta também recomendações para aplicação da métrica em diversos usos arquitetônicos (REA e FIGUEIRO, 2018).

Ambas as métricas avaliam a iluminância vertical incidente o mais próximo possível da retina (Figura 1), como veremos a seguir, o que em muito se diferencia do cálculo convencional para os efeitos visuais, onde a iluminância no plano horizontal é o principal fator de cálculo. Outro fator importante é a necessidade de equipamentos de medição diferentes do que se tem atualmente, onde não mais as superfícies são o foco, mas sim a posição da exposição da retina à luz. Metodologicamente também divergem sobre os mecanismos da retina envolvidos no processo de estimulação circadiana e o ponto de saturação do estímulo. Portanto, o que faremos a seguir é apresentar a estrutura de cálculo de cada métrica, sem discutir seu fundamento teórico.

Lux Melanópico Equivalente

O Lux Melanópico Equivalente, como mencionado anteriormente, é uma métrica popularizada pelo International WELL Building Institute (IWBI) através da sua Certificação WELL (IWBI, 2020). Essa unidade é empregada para o desenvolvimento de projeto luminotécnico que leve à otimização da iluminação do ambiente voltado para manutenção e melhoria de aspectos relacionados à saúde e bem-estar do usuário.

A metodologia apresentada é baseada em uma Razão melanópica (R) que multiplicada pela iluminância vertical (L) resulta no valor em EML. A Razão melanópica (R) é o valor obtido a partir de

CCT	Light Source	Ratio
2700	LED	0.45
3000	Fluorescent	0.45
2800	Incandescent	0.54
4000	Fluorescent	0.58
4000	LED	0.76
5450	CIE E (Equal Energy)	1.00
6500	Fluorescent	1.02
6500	Daylight	1.10
7500	Fluorescent	1.11

** Source: WELL Building Standard*

Figura 2

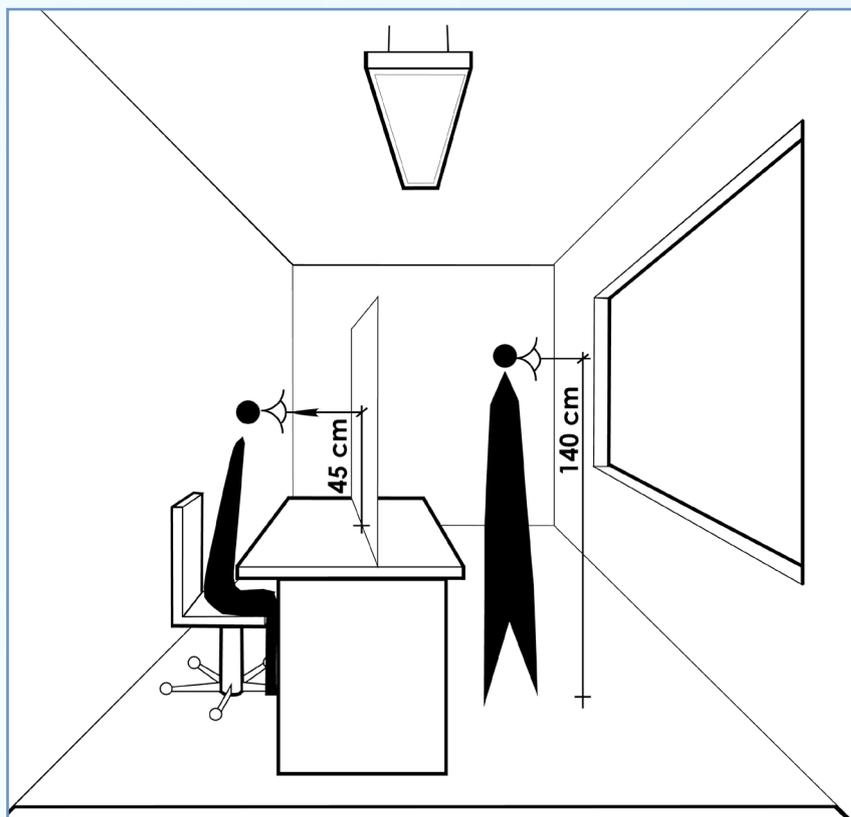
Tabela da Razão Melanópica por tipo de fonte de luz.
Fonte: WELL Building Standard.

uma fórmula proposta na metodologia que utiliza como ferramenta uma “calculadora” (<https://standard.wellcertified.com/sites/default/files/Melanopic%20Ratio.xlsx>). Para o cálculo, são considerados os valores de distribuição espectral de potência radiante (Spectral Power Distribution, ou SPD) reais da fonte de luz ou os SPD padrões do sistema indicados na tabela fornecida pela certificação WELL (Figura 2).

A iluminância vertical (L) é medida na altura do olho do usuário (Figura 3) – imagine a luz direcionada para frente do

Figura 3

Esquema gráfico com as alturas de medição da iluminância vertical (L) indicadas pela certificação WELL para o cálculo de determinação do EML.
Fonte: Desenho refeito por Nathali Chaves com base em IWBI, 2020.



olho – sendo considerada a altura de 1,40 m (quando não se sabe informações sobre a existência ou não de estações de trabalho) ou a 0,45 m de altura acima do plano de trabalho (quando o ambiente tem a configuração e mobiliário definidos).

Os parâmetros estabelecidos pela Certificação WELL recomendam um mínimo de 240 EML para obter a pontuação máxima na certificação nessa categoria e 150 EML para a pontuação mínima, entendidos como a situação ideal e a aceitável para a qualidade da iluminação para os usuários. Esses EML mínimos devem ser atingidos considerando a iluminação elétrica pelas primeiras quatro horas no turno da manhã – por exemplo, das 9h às 13h – e progressivamente diminuídas após as 20h.

Vamos a um exemplo prático desse cálculo. Um ambiente de escritório está sendo iluminado por uma fonte LED de 4000K, que tem o valor de R de 0,76, com uma iluminância vertical (L) prevista na altura do olho do usuário de 200 lux. Aplicando a fórmula, tem-se que:

$$\text{EML} = 200 (L) \times 0,76 (R) = 152 \text{ EML}$$

O Lux Melanópico Equivalente obtido para esse ambiente é de 152 EML. Considerando os parâmetros mínimos a serem atendidos no turno da manhã (150 EML), pode-se afirmar que haveria uma condição mínima de estimulação circadiana nesse escritório no horário estabelecido.

Supondo que o ambiente anterior seja iluminado pela luz do dia (Daylight), que tem o valor de R de 1,10 e a mesma iluminância vertical (L) na altura do olho do usuário de 200 lux. Aplicando a fórmula, tem-se que:

$$\text{EML} = 200 (L) \times 1,10 (R) = 220 \text{ EML}$$

Com a utilização da luz do dia, o resultado de Lux Melanópico Equivalente para esse ambiente é de 220 EML, ou seja, a estimulação circadiana é aumentada, ainda que com a mesma iluminância vertical. Portanto, é muito importante a escolha da fonte de luz

adequada, pois como exemplificado, a variação entre as fontes de luz natural e elétrica (e mesmo entre as elétricas) pode impactar de forma diferente no sistema circadiano, mesmo que com a mesma iluminância vertical na altura do olho. Isso ocorre pela variação do SPD do espectro de cada fonte de luz.

Há parâmetros para os diferentes usos arquitetônicos, bem como para os horários do dia em que o cálculo está sendo realizado. Importante ressaltar que uma variação baseada nessa métrica foi adotada pela norma CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light CIE S026 (CIE, 2018). A Iluminância Melanópica Equivalente à Luz Diurna (D65) é a unidade métrica proposta na citada norma e busca manter uma relação com as métricas básicas da luz, como a iluminância.

Estímulo Circadiano (Circadian stimulus, CS)

Proposta pelo Lighting Research Center do Rensselaer Polytechnic Institute e denominada de Estímulo Circadiano (CS) (REA e FIGUEIRO, 2018) ela é majoritariamente aplicada em projetos nos EUA ([Lume Arquitetura - Ed.102 by Revista Lume Arquitetura](#)). Constantemente atualizada e aprimorada, tem sido objeto de discussões no mundo da iluminação. Diferentemente do EML, essa unidade não utiliza um fator de conversão da iluminância vertical (R), mas oferece uma ferramenta denominada CS Calculator para a obtenção direta do estímulo circadiano (CS). A unidade CS em si é uma concepção de métrica diferente, não vinculada a sistemas usuais como iluminância, mas sim relacionada ao efeito da exposição à luz por uma hora na supressão noturna da melatonina nos seres humanos, equivalente ao valor percentual (%) mínimo em unidades absolutas para a ativação (CS=0,1) e para a saturação (CS=0,7) do sistema circadiano.

Os parâmetros recomendados para a utilização da métrica são de que, para o turno diário de trabalho, o valor mínimo é

de CS $\geq 0,3$ para o turno diurno ou, pelo menos, durante as duas ou três primeiras horas da manhã. No período da tarde, é recomendado utilizar como suplementação da iluminação uma fonte de luz vermelha no ambiente ou dispositivos de iluminação pessoal – que são luminárias individuais de mesa, instaladas de forma que a luz se direcione para o olho do usuário do espaço de trabalho. Essas recomendações podem variar bastante dependendo do tipo de atividade – entre salas de aula, lar para idosos, edificações para saúde e escritórios. Definida a atividade, cumprem-se os parâmetros de valores de CS adequados ao horário diurno e noturno, o qual será utilizado como base para o planejamento da iluminação do ambiente ou de sua variação ao longo do dia.

A altura de medição da iluminância vertical no ambiente não é especificada pois é relacionada à altura de cada usuário, a partir da utilização de um aparelho de aferição denominado Daysimeter (Figura 4). Ele é acoplado ao usuário sempre o mais perto possível da retina e, diferentemente de um luxímetro que procura medir a iluminância nas superfícies de um espaço, ele mede a iluminância vertical média a qual um usuário estaria exposto. Esse é o dado utilizado para a conversão da iluminância obtida (lux) em CS na ferramenta proposta pelo método denominado CS Calculator. Caso a utilização de um equipamento específico não seja possível, Thayer, Morrison e LRC-RPI (2020) consideram aceitável a utilização de aplicativos em telefones celulares (Figura 5).

O método de cálculo se divide em uma sequência de três procedimentos. O primeiro está relacionado à seleção da fonte de luz utilizada no ambiente (Figura 6), mais especificamente do seu SPD.

Para que o resultado seja o mais preciso possível, é importante que os valores da distribuição espectral de potência radiante (SPD) da fonte de luz sejam fornecidos pelo fabricante para cada intervalo de temperatura de cor empregada (Figura 7).



Figura 4

Imagem do equipamento desenvolvido para medição da iluminância vertical próxima a retina.
Fonte: <https://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/LightandDaysimeter.asp>

Porém, caso não seja possível obter esses dados, pode-se calcular por aproximação com valores de fontes de luz padrões que estão disponíveis na ferramenta.

O segundo passo (Figura 8) está relacionado à definição de variáveis de cálculo, como a densidade do pigmento macular óptico – recomendado pelos autores que se mantenha no fator de 0,5 – e a inserção do valor de iluminância vertical (obtida ou pretendida). Também é possível realizar o procedimento contrário em “Source Circadian Stimulus”, indicando qual o valor de CS se deseja em projeto e a calculado-

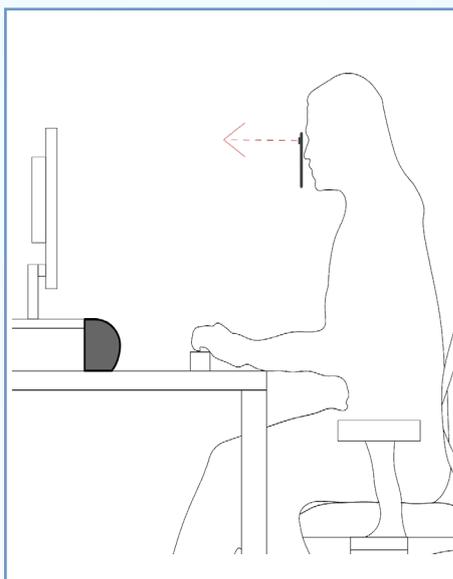


Figura 5

Esquema gráfico com a posição do telefone celular em caso de medição da iluminância vertical próxima a retina por aplicativos.
Fonte: <https://www.lrc.rpi.edu/healthyliving/#section-personalLightDevices>

Figura 6

Imagem da tela da Calculadora CS
Passo 1 - Selecionar o SPD da fonte
de luz utilizada no ambiente.
Fonte: FIGUEIRO, REA e WARD, 2019.

Step 1: Select Sources

Select Available Sources

Manufacturer: Any

CCT: 4000

Lamp: LED

Keyword: Search Sources

Reset Filters

Add Custom Source

Available Sources

LED Hybrid Violet Pump 2
LED Phosphor Blue Pump 9
LED Phosphor Blue Pump 10
LED Phosphor Blue Pump 14
LED Phosphor Blue Pump 18
LED Phosphor Blue Pump 19
LED Phosphor Blue Pump 25

ora informa a iluminância vertical necessária para que isso ocorra.

No terceiro e último passo (Figura 9), o valor de CS é apresentado em conjunto com outras especificações técnicas sobre a fonte de luz, como a temperatura de cor.

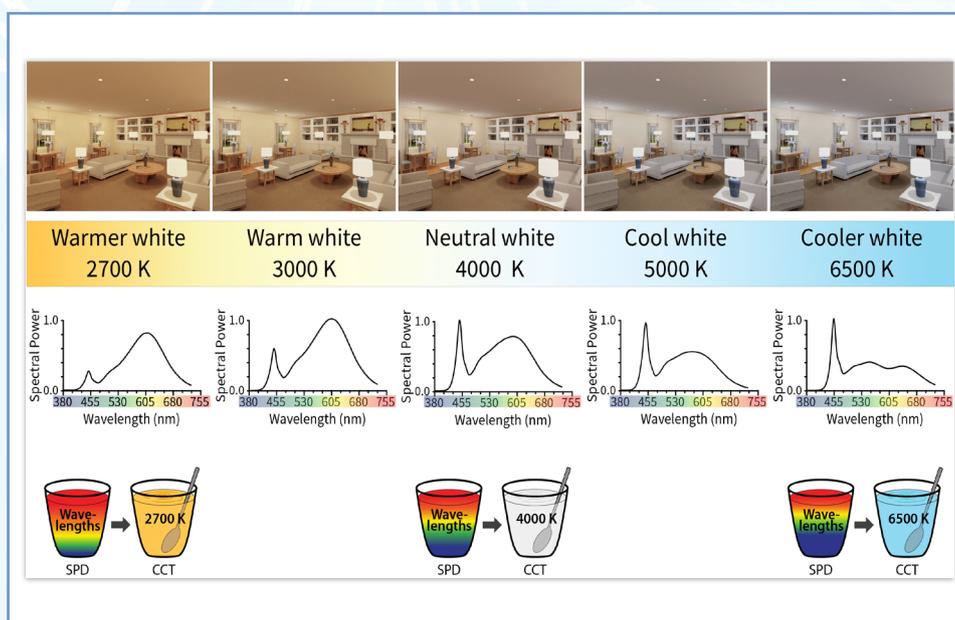
Vamos a outro exemplo prático. Um ambiente de escritório está sendo iluminado por uma fonte de luz LED com temperatura de cor de 4000K, assim como aquela do EML, e o Daysimeter mede a mesma

iluminância vertical de 200 lux (o que equivaleria a medição da iluminância no ponto indicado pela metodologia do EML). Em um primeiro momento, o SPD da fonte de luz tem que ser selecionado ou inserido na Calculadora CS. No segundo momento, adicionamos a iluminância vertical medida pelo Daysimeter, mantendo a densidade do pigmento macular ótico em 0,5. No terceiro momento, as informações técnicas relativas à fonte de luz e o CS são apresentados para que sejam interpretadas e analisadas pelo projetista.

Nesse exemplo de cálculo, o valor de CS obtido é de 0,208. Isso significa que estando o valor encontrado abaixo do valor mínimo de $CS \geq 0,3$ a iluminação projetada é adequada para os horários da noite e madrugada, a partir das 20h até as 6h. A conclusão é de que, para a maior parte dos horários da atividade escritório, mesmo que atendessem a norma para o conforto visual de tarefas, não atenderia às questões de estimulação circadiana necessárias para manutenção das funções do corpo que precisam ser ativadas durante a fase clara. A partir dessa informação, pode-se tomar decisões de projeto, como mudar o SPD da fonte de luz ou criar estratégias para aumentar a iluminância vertical com o objetivo de atingir os valores ideais de CS para os primeiros períodos da manhã.

Figura 7

Esquema gráfico com a variação da iluminação em um mesmo espaço demonstrando a importância de associar os dois fatores ao cálculo: SPD e a temperatura de cor da fonte de luz. Lembrando que duas fontes com mesma temperatura de cor podem ter diferentes SPD.
Fonte: <https://www.lrc.rpi.edu/healthyliving/#section-personalLightDevices>



Considerações finais

O estudo da Iluminação Integrativa ainda é uma área de conhecimento em acelerado desenvolvimento no mundo, influenciando tanto na criação de sistemas de iluminação elétrica mais eficientes – em energia e qualidade do SPD – quanto no desenvolvimento dos projetos de iluminação. A compreensão de como funciona a relação da luz com o sistema circadiano está evoluindo, assim como a definição das métricas para quantificar esse impacto. Além da iluminância horizontal, utilizada nos projetos luminotécnicos que conhecemos, será importante controlar outras variáveis que determinarão a qualidade visual e não visual desse projeto luminotécnico, como a iluminância vertical e as características do espectro das fontes de luz. Nos projetos de iluminação voltados para o sistema não visual humano é importante determinar a luz certa, para o lugar certo e a hora certa.

Legislações com orientações sobre como projetar para o sistema não visual humano já começam a ser publicadas, como por exemplo: CIE S026/E:2018 (CIE, 2018), com a Iluminância Melanópica Equivalente à Luz Diurna (D65); e a DIN SPEC 67600 (2013) - norma alemã - que apresenta diretrizes de projeto a partir da MEL-LOR (Melanopic Light Output Ratio).

Step 2: Edit Variables

Additional Variables	
Biological Input Variables	Value
Macular Pigment Optical Density:	0.5

Source Illuminances
Enter a vertical illuminance value in lux to determine a CS value based on your chosen SPD.

Source	Vertical Photopic Illuminance (lx)	Remove Source
LED Phosphor Blue Pump 25	<input type="text" value="200"/>	

- OR -

Source Circadian Stimulus
Enter a target CS value to determine the vertical illuminance needed to achieve this target based on your chosen SPD.

Circadian Stimulus (CS)

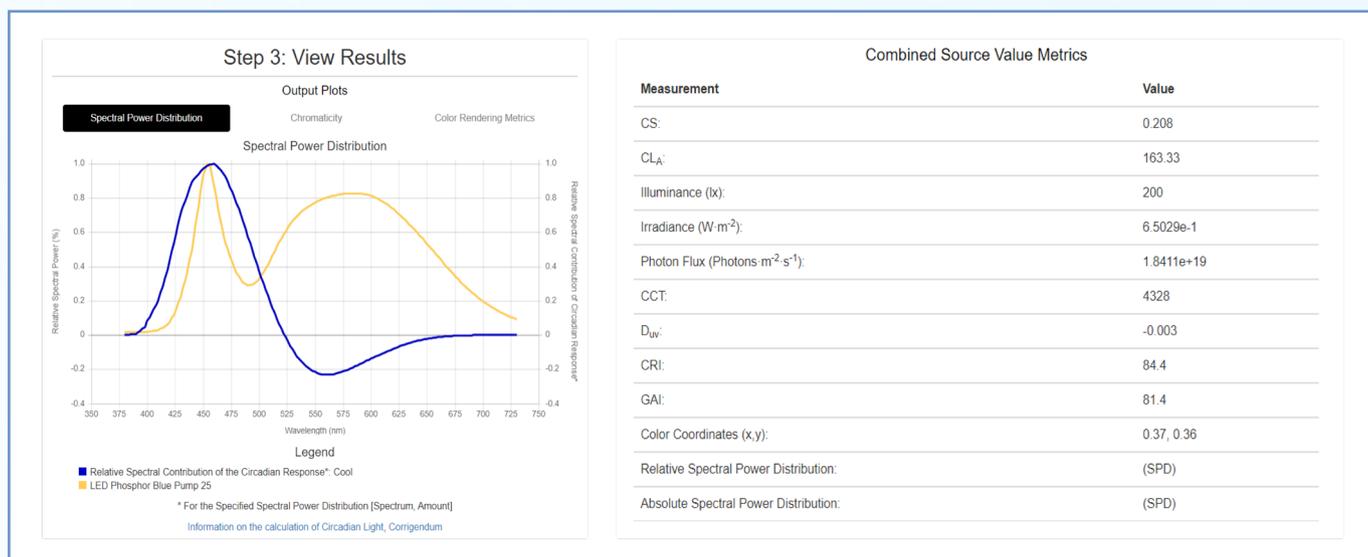
Figura 8

Imagem da tela da Calculadora CS Passo 2 - Indicar a iluminância vertical medida pelo Daysimeter ou indicar o valor de CS desejado para o projeto.
Fonte: FIGUEIRO, REA e WARD, 2019.

Porém, a falta de consenso sobre as questões de quantificação do impacto ainda é uma limitação. Pesquisas de outros grupos também estudam o desenvolvimento de métricas circadianas, além dos citados. Na Universidade do Sul da Califórnia (University of Southern California), EUA, utilizam a métrica denominada stimulus frequency (stim.freq), apresentada em artigo de Konis (2016), com unidades métricas com conceitos e procedimentos diferentes do EML e do CS. Será necessário aguardar que as discussões interna-

Figura 9

Imagem da tela da Calculadora CS Passo 3 - Informações técnicas relativas à fonte de luz e o resultado de CS.
Fonte: FIGUEIRO, REA e WARD, 2019.



cionais sobre o tema amadureçam e consigam estabelecer uma diretriz comum. Enquanto isso, adotar as metodologias instituídas pelos organismos reguladores já estabelecidos acaba sendo a melhor recomendação. Portanto, precisamos urgentemente implementar essas normas traduzidas no Brasil.

É importante destacar que os projetos com essa abordagem exigem uma nova e melhor formação dos profissionais e uma maior consciência da responsabilidade dos lighting designers, que podem determinar um ambiente mais saudável – ou não – para o usuário.



Prof. Dra. Betina Tschiedel Martau

É pesquisadora e docente do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura (PROPAR) na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atua também na graduação nas disciplinas de Habitabilidade II e Luminotécnica aplicada à Arquitetura. Atualmente é coordenadora do Laboratório de Conforto Ambiental – LABCON, da mesma Universidade.

O aproveitamento da luz natural – quando possível – e o uso criterioso das fontes de luz para um projeto elétrico apropriado às tarefas visuais exercidas no ambiente, bem como aos ciclos circadianos, é o novo desafio dos projetistas. A criação de um ambiente arquitetônico de longa permanência mais saudável pode melhorar significativamente a qualidade de vida das pessoas. Em locais em que os projetos integrativos já foram implementados e avaliados, os resultados confirmam os ganhos a longo prazo tanto na produtividade quanto no bem-estar dos usuários. ◀



Nathali Pimentel Chaves

Arquiteta e Urbanista pela Unisinos (RS) em 2014, com período sanduíche na Hochschule Ostwestfalen-Lippe/Detmolder Schule für Architektur und Innenarchitektur em Detmold, Alemanha. É mestranda em Arquitetura pelo PROPAR, UFRGS, com a dissertação “Novos processos de projeto de iluminação: Explorando a iluminação integrativa”

Nota das autoras: O cálculo de iluminação integrativa envolve estudo de vários aspectos, entre os quais o perfil do usuário e os cronogramas de iluminação, não abordados neste artigo. Os projetos que envolvem saúde devem ser acompanhados por profissionais médicos. Não nos responsabilizamos pelo uso inadequado das informações contidas nesse artigo.

Referências:

- ANTICOLE, M. Por que o sistema métrico é importante. TEDED, 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=7bUVjJWA6Vw>>
- BOYCE, P. R. Human Factors in Lighting. 1. Ed. New York: Taylor & Francis, 2003.
- CIE. CIE Position Statement on Non-Visual Effects of Light - Recommending proper light at the proper time, 2nd edition, 2019. Disponível em: <[http://cie.co.at/files/CIE Position Statement - Proper Light at the Proper Time \(2019\) _0.pdf](http://cie.co.at/files/CIE%20Position%20Statement%20-%20Proper%20Light%20at%20the%20Proper%20Time%20(2019)%20_0.pdf)>.
- CIE. CIE S 026 - SYSTEM FOR METROLOGY OF OPTICAL RADIATION FOR IPRGC-INFLUENCED RESPONSES TO LIGHT, 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.25039/S026.2018>>.
- DIN. DIN SPEC 67600, 2013. Disponível em: <<https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/fnl/din-spec/wdc-beuth:din21:170956045>>.
- ENEZI, J. et al. A “Melanopic Spectral Efficiency Function Predicts the Sensitivity of Melanopsin Photoreceptors to Polychromatic Lights. Journal of Biological Rhythms, [s.l.], v.26, n. 4, p. 314-323, 2011.
- FIGUEIRO, M. G.; REA, M. S.; WARD, G. J. Web CS Calculator. 2019. Disponível em: <<https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/>>.
- GALL, D.; BIESKE, K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities. Proceedings of the CIE Symposium '04 on Light and Health: Non-Visual Effects, [s. l.], n. October, p.129-132, 2004.
- International WELL Building Institute (IWBI). WELL Certification - Light, 2020. Disponível em: <<https://v2.wellcertified.com/v/en/light>>
- KONIS, K. A novel circadian daylight metric for building design and evaluation. Building and Environment, [s.l.], n. Novembro, v.113, p.22-38, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.025>>
- LANG, D. Energy efficient lighting for the biological clock. In: (K. P. Streubel et al., Eds.) 2011, Anais...: International Society for Optics and Photonics, 2011. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.875323>>
- LUCAS, R. J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. Trends in Neurosciences, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 1-9, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>>
- REA, M. S. Value Metrics for better lighting. 1. ed. Bellingham: SPIE Press, 2013.
- REA, M. S.; FIGUEIRO, M. G. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. Lighting Research & Technology, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 497-510, 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.1177/14771477153516682368>>
- THAYER, A.; MORRISON, M.; LRC-RPI. Personal Lighting Devices. 2020. Disponível em: <<https://www.lrc.rpi.edu/healthyliving/#section-personalLightDevices>>.