XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8714

Simulação computacional aplicada à avaliação de desempenho de iluminação integrativa

Computational simulation applied to the evaluation of integrative lighting performance

Flávia Alexandrino de Mattos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | mattosflavia93@gmail.com
Cintia Akemi Tamura
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | cintiatamura@gmail.com
Eduardo Leite Krüger
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | ekruger@utfpr.edu.br

Resumo

A dessincronização aos ciclos de claro e escuro proporcionada pela exposição inadequada à iluminação pode resultar em disrupções que vão de alterações nos ciclos de sono e vigília a prejuízos em funções neurológicas, imunológicas e metabólicas. Neste contexto surgem as métricas circadianas, que determinam parâmetros lumínicos ambientais de referência para favorecer a homeostase circadiana. Sob esta perspectiva, avaliou-se o grau de acurácia de simulações computacionais na predição do potencial circadiano de diferentes configurações de iluminação ambiental. Comparam-se resultados obtidos com o *software* ClimateStudio v.2.1 aos auferidos *in loco* em câmara climática em Karlsruhe, Alemanha. Valores de Lux melanópico equivalente (EML) obtidos para valores preditos e medidos mantiveram maior congruência em situações de iluminação elétrica, enquanto em situações com iluminação natural apresentaram maior discrepância. Os resultados ressaltam a dificuldade de se basear o cálculo de métricas circadianas em dados que dependem fortemente de condições climáticas variáveis e do comportamento do usuário, reforçando a necessidade de aprofundamento do tema iluminação integrativa.

Palavras-chave: Iluminação integrativa. Lux Melanópico Equivalente. Simulação computacional. Ciclo circadiano. ClimateStudio v.2.1.

Abstract

Desynchronization with light-dark cycles caused by inadequate exposure to natural light can result in disruptions ranging from changes in sleep-wake cycles to impairments in neurological, immunological, and metabolic functions. In this context, circadian metrics emerge, establishing environmental lighting parameters as references for circadian homeostasis. This study evaluated the accuracy of computer simulations in predicting the circadian potential of different environmental lighting configurations. Results obtained with ClimateStudio v.2.1 software were compared to on-site measurements conducted in a climate chamber in Karlsruhe, Germany. Equivalent Melanopic Lux (EML) values for predicted and measured data showed higher congruence under electric lighting conditions, while natural lighting scenarios exhibited greater discrepancy. This result highlights the difficulty of basing circadian metric calculations on variations in weather conditions and occupant behavior, reinforcing the need for further research into integrative lighting.

Keywords: Integrative lighting. Equivalent melanopic lux. Computer simulation. Circadian cycle. ClimateStudio v.2.1.

Como citar:
MATTOS, F. A., et al. Simulação computacional aplicada à avaliação de desempenho de iluminação integrativa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

A iluminação ambiental para fins visuais é amplamente normatizada, com métricas consolidadas baseadas em níveis de iluminância, controle de ofuscamento e reprodução de cores. Contudo, a descoberta das ipRGCs (células ganglionares da retina intrinsecamente fotossensíveis) por Berson, Dunn e Takao [1], responsáveis pela produção de melanopsina [2], ampliou esse campo ao revelar os efeitos não visuais da luz diretamente relacionados ao ciclo circadiano, um ritmo de aproximadamente 24 horas regulado pela alternância claro-escuro [3] e associado a funções como sono, metabolismo, humor [4], imunidade, saúde cardiovascular, termorregulação e produção hormonal [5].

Em função dessa relevância, o termo "*integrative lighting*" foi incorporado ao vocabulário da *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) em 2020. Contudo, persistem lacunas quanto às métricas circadianas (MC), não havendo um consenso sobre parâmetros de exposição, nem sobre sua compatibilidade com normas focadas no conforto visual, além de possíveis vieses associados à sua adoção em certificações [6][7].

Alinhado às preocupações apontadas por Münch et al. (2020) [8], como a definição da exposição adequada à luz natural, a falta de padronização metodológica e a limitada integração entre disciplinas, este estudo visa contribuir com o campo de estudo ao avaliar o grau de acurácia de resultados obtidos por meio de simulações computacionais na predição do potencial circadiano de diferentes configurações de iluminação ambiental. Ressalta-se também a complexidade de se estabelecer valores a partir da simulação devido à não estaticidade da luz natural e a diferenciação individual ocasionada por comportamentos individualizados que interferem diretamente na medição da iluminância vertical (Ev).

Paralelamente ao avanço das métricas circadianas, observa-se o crescente emprego de ferramentas de simulação computacional para estimar a exposição luminosa ainda na fase de projeto arquitetônico. Entretanto, parte dos softwares tradicionais de simulação de iluminação não incorpora as características espectrais da luz e sua interação com os materiais, desconsiderando a capacidade das superfícies de alterar a distribuição espectral da luz refletida que irá atingir o plano ocular, o que pode influenciar a estimativa das métricas circadianas [9]. Nesse contexto, a confiabilidade das simulações computacionais torna-se particularmente relevante, uma vez que seus resultados têm sido utilizados para subsidiar decisões de projeto, certificações ambientais e pesquisas em iluminação integrativa. Para isso, propõe-se uma metodologia que compara dados obtidos por meio de simulações computacionais aos auferidos em medições *in loco*.

METODOLOGIA

Inicialmente, selecionou-se a métrica circadiana a ser utilizada como referência para a realização do comparativo entre dados simulados virtualmente e coletados em ambiente real. Moraes e Martau (2024) [10], em revisão sistemática realizada em fontes internacionais, identificaram o Lux Melanópico Equivalente (EML, em m-lux) e o Estímulo Circadiano (CS, adimensional) como os mais citados respectivamente em 75% e 13% dos estudos relacionados ao tema iluminação integrativa. Tamura e Krüger (2025) [11], por sua vez, conduziram uma revisão da literatura em bases nacionais sobre o mesmo tema, identificando que 53,6% dos trabalhos avaliados utilizaram o EML como métrica circadiana, 21,4% utilizaram o CS, e 14,3% utilizaram ambos.

Assim, adotou-se a métrica EML para utilização no presente trabalho, por ser a mais difundida no meio acadêmico. Adicionalmente, é a que possui disponibilidade de ferramentas de simulação computacional para seu cálculo.

EML E PARÂMETROS DE REFERÊNCIA

O EML quantifica os efeitos biológicos da luz decorrentes das ipRGCs. Inicialmente proposta por Lucas et al. (2014) [12], na métrica converte a iluminância fotópica (medida em lux fotópico) em valores que consideram a sensibilidade espectral da melanopsina, possibilitando estimar seu potencial de supressão e de estimulação circadiana. O EML baseia-se na sensibilidade espectral das células retinais ganglionares intrinsecamente fotossensíveis [13], sem considerar a resposta dos cones e bastonetes em relação à iluminação não visual e ao estímulo circadiano.

Para estabelecer parâmetros comparativos de presença ou ausência de conformidade, realizou-se revisão de referências internacionais como a certificação WELL, diante da inexistência de normativas brasileiras específicas. A relevância desse guia é reforçada por sua citação pelo *Department of Energy dos Estados Unidos* [14], que destaca o uso do índice EML, o qual é adotado pela certificação WELL e fundamentado na norma CIE S 026:2018.

A certificação WELL v2 (2025) [15] adota o EML exigindo níveis mínimos mantidos por 4 horas consecutivas, com início até o meio-dia. Os critérios variam conforme o tipo de uso e as condições de iluminação natural. Neste estudo, foram adotados os parâmetros para “demais usos” em “projetos com luz natural otimizada”, para situações de iluminação natural considerando a adequação dos ambientes analisados, resultando na exigência de EML ≥ 180, e com limite padrão com EML≥ 275 para iluminação elétrica, para atendimento ao nível mais rigoroso da certificação.

SOFTWARES UTILIZADOS

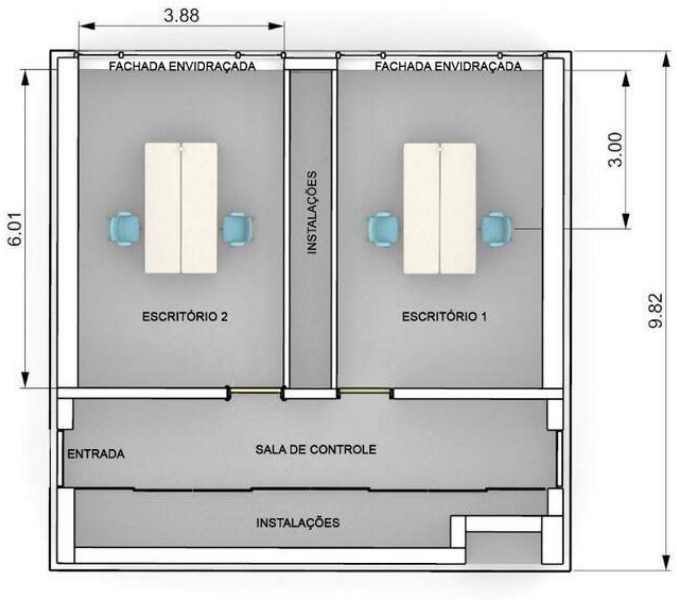
A partir disso, foram analisados os valores dos índices de Ev obtidos a partir dos dados experimentais e de EML, calculados a partir destes índices considerando as respectivas distribuições espectrais de cada momento de medição, comparando-os com os obtidos através de modelagem computacional com o *software* Rhinoceros versão 7 e simulados com o *plugin ClimateStudio* versão 2.1.

TRABALHO DE CAMPO

Os dados experimentais utilizados como base para os cálculos e análises desta pesquisa foram coletados por Tamura e Krüger (2016) [16] entre 2014 e 2015 em Karlsruhe, Alemanha, na câmara climática denominada LOBSTER (*Laboratory of Occupant Behavior, Satisfaction, Thermal Comfort, and Environmental Research*) do *Karlsruher Institut für Technologie* (KIT). Essa pesquisa tinha como principal objetivo verificar a influência da incidência de luz, solar ou elétrica, na percepção dos indivíduos e em outras funções biológicas não-visuais. Foi aprovada pelo comitê de ética do KIT, previamente à coleta de dados com participantes recrutados pelos pesquisadores.

O LOBSTER é composto por dois escritórios, com mesas, cadeiras e computadores, configurando estações de trabalho (Figura 1). Cada sala possui uma fachada envidraçada, que permite a entrada de luz solar; cada janela também apresenta um sistema blackout, que permite obstruir completamente a entrada de luz natural para estudos com luz elétrica. O LOBSTER dispõe de trilho circular em sua base, que permite giros da câmara de até 350°, com o posicionamento da fachada envidraçada segundo diferentes orientações cardeais.

Figura 1: Planta baixa dos escritórios



Fonte: o autor.

Com o intuito de se fazer medições com diferentes arranjos luminosos, definiram-se as seguintes orientações de fachada:

- N/NW (azimute 335°) e SW (azimute 225°), para o inverno;
- N/NW (azimute 335°) e S/SW (azimute 200°), para primavera e verão.

Testou-se também a iluminação elétrica sem luz natural, com venezianas fechadas. Utilizaram-se lâmpadas fluorescentes OSRAM (6500K, IRC≥70) (OSRAM, 2025), com quatro unidades por sala e luz difusa refletida no teto. As condições térmicas foram rigorosamente controladas dentro da faixa de conforto térmico Classe B para o índice térmico PMV [17], enquanto as condições de céu variaram ao longo das sessões. Em cada estação, realizaram-se os testes em três orientações distintas. O experimento ocorreu das 8h às 13h, com dois participantes por sala e nas duas salas concomitantemente, e incluiu questionários de satisfação aplicados às 8h50, 10h30 e 12h30, utilizando escala de -3 a +3 [18].

A amostra foi composta por 16 indivíduos do sexo masculino, estudantes alemães com características físicas e faixa etária semelhantes. Tamura e Krüger (2016) [16] descrevem com mais detalhes o experimento. Cada participante foi avaliado durante nove sessões totais ao longo de três estações do ano, em três configurações de

iluminação diferentes a cada estação. Foram realizadas medições ao longo de 12 dias em cada estação do ano, totalizando 36 dias de pesquisa de campo.
A iluminância vertical ao nível dos olhos foi medida com actímetro Actiwatch Spectrum® (*Philips Respironics*) afixado na testa dos participantes e todos os dados foram tratados anonimamente.

CÁLCULO DOS ÍNDICES

Para o cálculo do EML, utilizaram-se ferramentas disponibilizadas pelo *International WELL Building Institute* [15]. Utilizando-se os dados das medições da distribuição espectral da fonte de luz e da iluminância vertical, Ev (coletada individualmente para cada participante), foi possível calcular o EML, obtendo-se um resultado individual, em cada um dos três horários de resposta do questionário, para cada dia de experimento. Para os cálculos de EML com iluminação natural, adicionaram-se os mesmos dados espectrais medidos como fontes de luz customizadas na planilha "*Melanopic Ratio*", que resultava em um valor de M/P, que, multiplicado por Ev, permitia obter os respectivos valores de EML. Para os cálculos de EML com iluminação elétrica, utilizou-se um valor constante de M/P, com base na distribuição espectral medida no experimento. Uma vez calculados os índices, baseou-se nos índices de referência apresentados anteriormente para verificação de conformidade. O EML é dado pela Equação 1.

Equação 1:

$$EML = Ev \times M/P \quad [11]$$

Onde:
EML: lux melanópico equivalente;
Ev: Iluminância vertical;
M/P: razão de lux melanópico por lux fotópico.

De acordo com a WELL *Buildings*, esses são alguns valores padrão para a razão M/P (tabela 1):

Tabela 1: Valores da razão M/P para diversas fontes de luz

CCT (K)	Fonte de Luz	Razão
2700	LED	0,45
3000	Fluorescente	0,45
2800	Incandescente	0,54
4000	Fluorescente	0,58
4000	LED	0,76
5450	CIE E (Energia Igual)	1,00
6500	Fluorescente	1,02
6500	Luz do dia	1,10
7500	Fluorescente	1,11

Fonte: adaptado de WELL (IWBI, 2017).

Ressalta-se que ainda que a CCT tenha influência sobre o estímulo circadiano, a maior contribuição vem da distribuição espectral da fonte de luz. Ou seja, duas fontes com o mesmo valor de CCT podem promover estímulos circadianos diferenciados.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os valores de EML também foram calculados a partir da modelagem computacional para simulação pelo software Rhinoceros versão 7 com o plugin *ClimateStudio* versão 2.1. Esta etapa do estudo foi realizada para comparação dos valores de Ev e EML encontrados na simulação com os dados medidos de Ev e os dados calculados de EML a partir disso, como já explicado anteriormente.
No entanto, os dados relatados nos resultados são originados dos cálculos através da planilha e das distribuições espectrais medidas no experimento.

Para a modelagem, foram utilizadas as medidas e fotos do interior e entorno fornecidas pelos autores do experimento inicial. A determinação de dados de refletância e transmitância dos materiais necessários para a simulação foram baseados no estudo de Weiss (2017) [19], e foram adaptados às possibilidades mais próximas disponíveis no plugin *ClimateStudio*. Os dados utilizados podem ser vistos na tabela 2 a seguir:

Tabela 2: Valores de refletância e transmitância utilizados no modelo

Material	**VLR (total)**	**VLR (especular)**	**R melanópico**	**M/P**	**Rugosidade**
Macbeth neutral 0.8	0,61	0,00	0,60	1,00	0,00
Metallic shade overhang	0,50	0,03	0,50	1,01	0,10
Mullion E14 526	0,50	0,04	0,50	1,00	0,01
Cubicle partition laminated wood	0,48	0,01	0,41	0,84	0,20
Floor LM83	0,20	0,00	0,20	1,00	0,00
Sugar (white)	0,80	0,00	0,78	0,98	0,00
Beige painted door	0,62	0,01	0,49	0,79	0,20
White rough plaster facade	0,35	0,00	0,30	0,86	0,30
Vidros	**VLT**	**VLR (front)**	-	-	-
DGU low iron (dynamic shade)	70%	10%	-	-	-
DGU cool lite	72.50%	11%	-	-	-

Fonte: Autores.

Apesar da altura do plano de trabalho padrão ser determinada em 75 cm acima do piso conforme a norma NBR 15575 [20], considerou-se a altura de posicionamento do espectrorradiômetro no experimento, aproximadamente 15 cm da superfície da mesa, resultando em uma altura de 0,9 m para a simulação de Eh. A simulação de Ev, por sua vez, manteve-se em 1,20 m acima do chão, no plano vertical, como indica a mesma norma. Os valores de EML foram determinados pelo plugin *ClimateStudio* que calcula a razão M/P de acordo com o espectro da fonte luminosa e dos respectivos resultados de Ev.
Para as situações de iluminação elétrica, os tipos de céu descritos no experimento foram classificados conforme indicado na tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Tipos de céu

Tipo de céu (experimento)	Tipo de céu (simulação)
Ensolarado	*CIE clear sky*
Parcialmente ensolarado	*CIE clear sky*
Nublado	*CIE intermediate*
Chuvoso	*CIE overcast*
Tempestuoso	*CIE overcast*

Fonte: Autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se separadamente uma análise sobre a conformidade dos resultados da EML com os parâmetros estabelecidos para estímulo circadiano, um comparativo entre iluminação elétrica e iluminação natural e, por fim, um comparativo entre os dados medidos e simulados. Os dados referem-se a horários específicos pela manhã, conforme indicado.

MÉTRICAS CIRCADIANAS

Para iluminação elétrica, os índices de EML, salvo em medições pontuais (2,1% das observações), superaram o valor mínimo para estímulo circadiano (tabela 4). Embora a iluminação elétrica seja constante ao longo dos dias e horários, podem ter ocorrido variações nos resultados em função de desvios ocasionais na posição dos indivíduos no ambiente.

Tabela 4: Percentual de atendimento à MC obtidos para as duas salas – iluminação elétrica

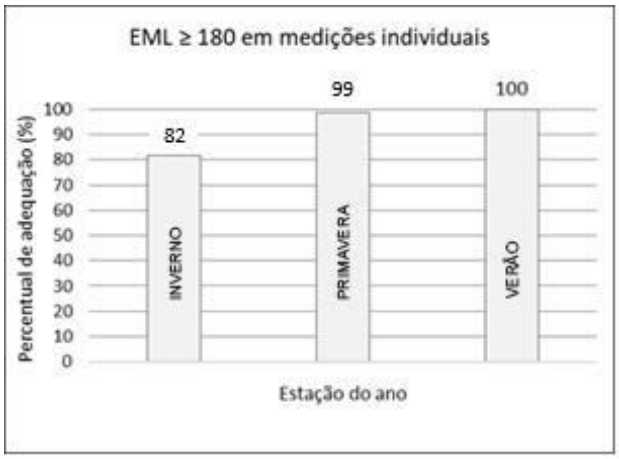
Horário	Atendimento a recomendações da métrica EML (%)
8h50	97,9
10h30	100
12h30	100

Fonte: Autores.

Na sequência, verificou-se primeiramente o atendimento para as situações de iluminação natural. De acordo com a Certificação WELL, verificou-se a conformidade com os valores mínimos exigidos nas sessões experimentais, por estação e horário de medição (Figura 2).

Figura 2: Percentual de adequação às MC, por estação do ano

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8714



Fonte: Autores.

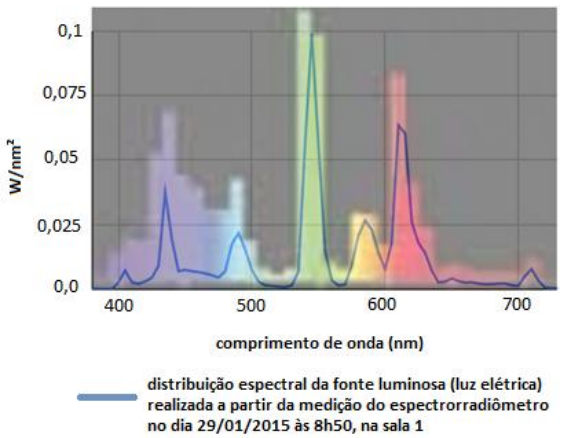
Apesar da iluminação elétrica ser constante e com as mesmas características para todos os dias e horários, pequenas alterações foram observadas por se tratar de uma medição dependente das posições e movimentos dos indivíduos.

Para entender melhor o comportamento espectral da luz artificial e compará-lo ao esperado pelo tipo de lâmpada utilizado no experimento, a distribuição espectral utilizada como base para os cálculos deste trabalho foi convertida no gráfico abaixo. Pode-se notar uma atividade maior na faixa de comprimento de onda em torno de 550 nm, correspondente à luz verde, e menores picos de luz vermelha e azul; isso significa um estímulo circadiano médio (provocado em maior parte pelos comprimentos de onda correspondentes à luz azul).

A Figura 3 representa a distribuição espectral de um modelo de lâmpada da OSRAM que mais se assemelha à das condições experimentais. Pela descrição do modelo, a lâmpada OSRAM LUMILUX *Cool Daylight* 6500K e com CRI>80 é condizente com o espectro da lâmpada utilizada.

Observa-se a convergência do espectro previsto para a fonte luminosa com o encontrado através das medições realizadas pelo espectrorradiômetro.

Figura 3: Sobreposição de gráfico da distribuição espectral com dados de medição, e imagem da distribuição espectral de lâmpada correspondente à utilizada no experimento utilizado como base para este trabalho.

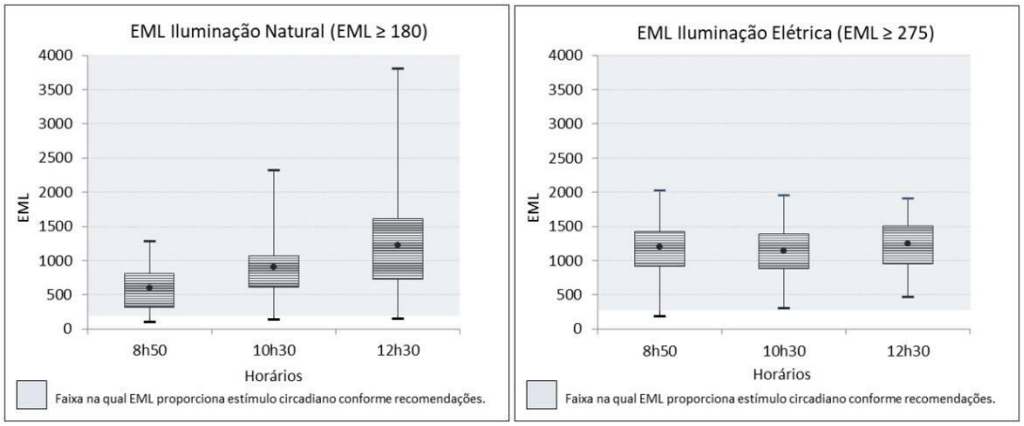


Fonte: OSRAM (2025) [20]

COMPARATIVO ENTRE ILUMINAÇÃO NATURAL E ELÉTRICA

Nos *boxplots*, (Figuras 4a e 4b) são apresentados os principais valores e sua distribuição, por horário e por tipo de iluminação, com médias, valores mínimos e máximos, além do intervalo interquartil. Observa-se aumento gradual dos índices EML sob iluminação natural, considerando-se todas as estações e orientações em conjunto, enquanto na iluminação elétrica os valores permanecem estáticos. Desconsiderando os mínimos recomendados para o EML, o 1º quartil mantém-se acima dos limites estabelecidos. Nota-se ainda variação nesses limites entre iluminação natural e elétrica para EML, com níveis mínimos mais rigorosos para a elétrica, segundo a referência WELL (Figura 5b).

Figura 4: Gráficos de caixa para EML: para iluminação natural (a) e para iluminação elétrica (b)

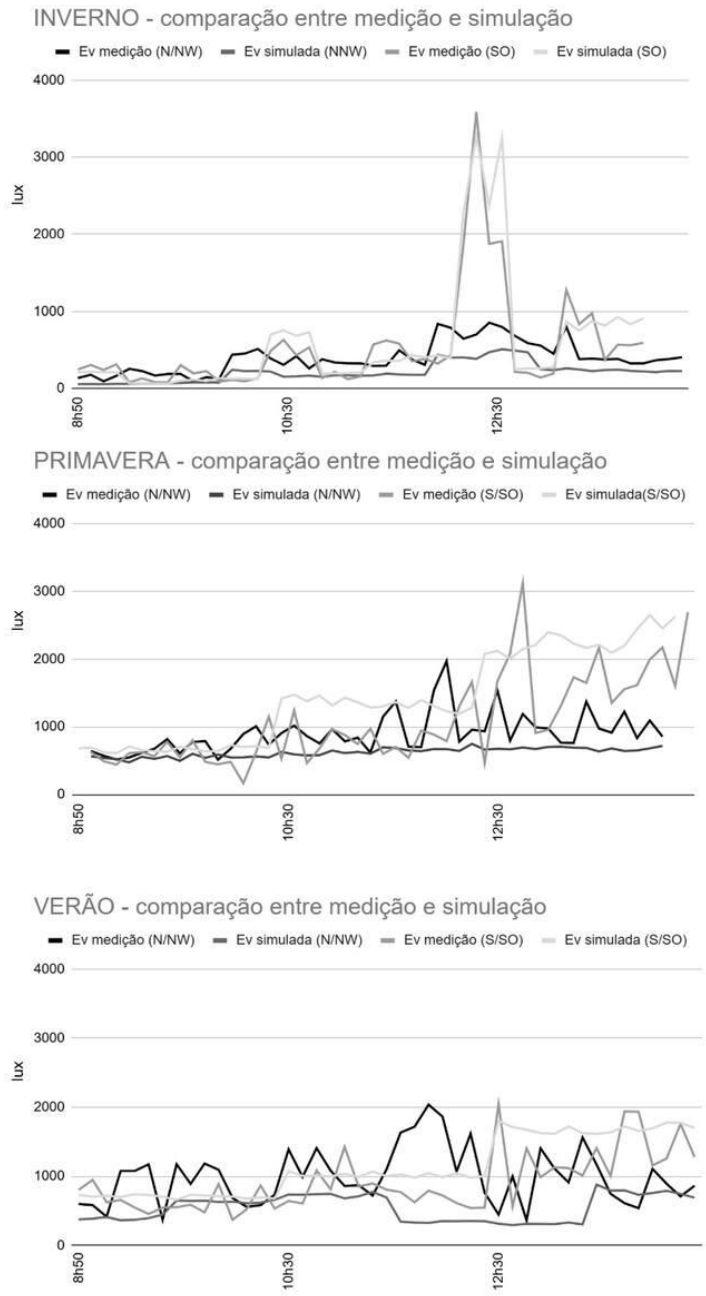


Fonte: Autores.

Pôde-se observar, em geral, um crescimento gradual dos valores de iluminância conforme o horário do dia, o que reflete proporcionalmente no aumento do EML. Para a orientação N/NW, considerando uma iluminação mais difusa, esse crescimento fica menos evidente. Se observam maiores picos nos níveis obtidos para a orientação S, principalmente nos valores calculados, devido provavelmente a situações de incidência direta nos aparelhos de medição acoplados aos participantes do experimento. Em contraste, os valores de Ev resultantes das simulações se mostraram mais estáveis.

Na Figura 5 apresentada a seguir, pode-se comparar os valores absolutos de Ev encontrados, por orientação e para cada estação, a partir das medições e simulações, no qual pode-se visualizar os picos e padrões encontrados.

Figura 5: valores de Ev (lux) obtidos para inverno (a), primavera (b) e verão (c), ao longo da manhã, para iluminação natural, classificados por orientação solar.



Fonte: Autores.

Ainda, comparando os valores obtidos por simulação com os calculados, notou-se diferença relevante em relação ao tipo de iluminação natural, equatorial e não-equatorial, sendo maior a disparidade entre os valores em orientações com luz solar direta (equatorial), como pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1: Diferença percentual entre valores encontrados através de medição em relação aos obtidos por simulação computacional, por faixas.

ESTAÇÃO	Intervalo	Orientação: SW ou S/SW	Orientação: N/NW
INVERNO	0-20%	35%	2%
	21-30%	11%	2%
	>30%	53%	96%
PRIMAVERA	0-20%	29%	30%
	21-30%	15%	24%
	>30%	56%	46%
VERÃO	0-20%	27%	27%
	21-30%	29%	18%
	>30%	44%	56%

Fonte: Autores.

As maiores discrepâncias entre as orientações ocorrem no inverno, tendendo-se a igualar os resultados para S/SW e N/NW no verão.
Os níveis de correlação de Pearson (r) entre os níveis de iluminância vertical medidos e simulados e os valores da métrica EML resultantes de cálculo e simulação são apresentados no Quadro 2. Obtiveram-se valores fortes de correlação (r>0,7) na maioria das situações, exceto para a primavera em N/NW e especialmente no verão.

Quadro 2: correlação de Pearson (r) entre valores de Ev e EML medidos e simulados, por estação e orientação.

CORRELAÇÃO DE PEARSON (r)			
Estação	Orientação	Ev medição *vs.* Ev simulação	EML calculado *vs.* EML simulação
INVERNO	SO	0,94	0,93
	N/NW	0,91	0,92
PRIMAVERA	S/SO	0,77	0,75
	N/NW	0,56	0,43
VERÃO	S/SO	0,75	0,76
	N/NW	-0,23	-0,26

Fonte: Autores.

Por fim, analisou-se a diferença entre o atendimento aos parâmetros para os índices calculados de EML com os índices gerados pela simulação (Quadro 3), considerando os parâmetros já citados nas sessões anteriores, com EML>180lx, para situações de iluminação natural, de acordo com a Certificação WELL. Embora haja alguma discrepância entre valores reais e simulados, a tendência indica maior inadequação no inverno.

Quadro 3: atendimento aos critérios de estímulo circadiano

Situações com estímulo circadiano de acordo com EML	Simulado (%)	Calculado (%)

Inverno	63	82
Primavera	100	100
Verão	100	100

Fonte: Autores.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a avaliação do estímulo circadiano varia conforme o critério adotado e cenário analisado.

Observou-se maior previsibilidade de resultados em cenários com iluminação artificial, enquanto as condições de iluminação natural apresentaram maior variabilidade e discrepâncias, sobretudo em situações com incidência direta e diferentes orientações, reforçando a complexidade da análise.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que as simulações computacionais são ferramentas relevantes para análise de desempenho circadiano, porém devem ser utilizadas com cautela, especialmente em avaliações absolutas.

Por fim, ressalta-se que os resultados desse estudo estão condicionados às limitações metodológicas adotadas, como o contexto experimental controlado e a simplificação de espectros luminosos utilizados para a simulação.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram a ferramenta ChatGPT (OpenAI, GPT 5.5) exclusivamente como apoio à revisão linguística, incluindo sugestões de coesão, clareza, fluidez e melhoria de vocabulário. A ferramenta não foi utilizada para gerar dados, interpretar resultados, elaborar análises científicas ou formular conclusões. Após seu uso, os autores revisaram criticamente todo o conteúdo e assumem total responsabilidade pelo artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] BERSON, D. M.; DUNN, F. A.; TAKAO, M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. **Science**, v. 295, n. 5557, p. 1070–1073, 2002. DOI: 10.1126/science.1067262.

[2] VETTER, C. *et al*. A review of human physiological responses to light: implications for the development of integrative lighting solutions. **Leukos**, v. 18, n. 3, p. 387–414, 2022. DOI: 10.1080/15502724.2021.1872383.

[3] NATIONAL INSTITUTE OF GENERAL MEDICAL SCIENCES. **Circadian rhythms**. Bethesda: NIGMS, 2023. Disponível em: <https://www.nigms.nih.gov/education/fact-sheets/Pages/circadian-rhythms. >. Acesso em: out. 2025.

[4] FIGUEIRO, M. G.; GONZALES, K.; PEDLER, D. Designing with circadian stimulus. **Lighting Design + Application**, v. 46, n. 10, p. 30–34, 2016. DOI: 10.1582/LEUKOS.2016.12.01.001.

[5] RAHMATI, H. *et al*. Circadian rhythms and human studies: methodology challenges, and future directions in research. Biological Rhythm Research, p1-30, 2025.

[6] BAUM, F.; LABONTE, R. Health wash in Helsinki. **Health Promotion International**, v. 29, n. 1, p. 141–143, 2014. DOI: 10.1093/heapro/dat090.

[7] HOUSER, K. W.; ESPOSITO, T. Human-centric lighting: foundational considerations and a five-step design process. **Frontiers in Neurology**, v. 12, p. 630553, 2021a. DOI: 10.3389/fneur.2021.630553.

[8] MÜNCH, M. *et al*. The role of daylight for humans: gaps in current knowledge. **Clocks & Sleep**, v. 2, n. 1, p. 61–85, 2020. DOI: 10.3390/clockssleep2010008.

[9] BELLIA, L.; DIGLIO, F.; FRAGLIASSO, F. **Assessment of melanopsin-based quantities: Comparison of selected design tools and validation against on-field measurements.** *Energy and Buildings*, v. 288, 2023, 113020. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110037

[10] MORAES, C. S.; MARTAU, B. T. Métricas de iluminação integrativa com eficiência energética: revisão sistemática de literatura. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2024. p. 1–10.

[11] TAMURA, C, A; KRÜGER, E, L. Iluminação integrativa: caracterização e lacunas em pesquisas no Brasil. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO , 18., 2025. **Anais [...].** [S. l.], 2025. https://doi.org/10.46421/encacelacac.v18i1.6933.

[12] LUCAS, R. J. *et al*. Measuring and using light in the melanopsin age. **Trends in Neurosciences**, v. 37, n. 1, p. 1-9, 2014. DOI: 10.1016/j.tins.2013.10.00

[13] CHINCHERO, H. F. *et al*. A review of parameters and techniques in human-centered integrative lighting. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING, 24., 2024. **Proceedings [...]**. [S. l.]: IEEE, 2024. p. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPQS62544.2024.10662241.

[14] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Lighting R&D program – human physiological responses to light**: R&D meeting. Washington, D.C.: DOE, 2020.

[15] INTERNATIONAL WELL BUILDING INSTITUTE. **WELL Building Standard v2**: Q2 2025. New York: IWBI, 2025. Disponível em: <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/light/feature/5>. Acesso em: 11 mar. 2026.

[16] TAMURA, C. A.; KRÜGER, E. L. Estudo piloto em câmara climática: efeito da luz natural em aspectos de saúde e bem-estar não relacionados à visão. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 149–168, 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000200084.

[17] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: ergonomics of the thermal environment. Oslo: ISO, 2005.

[18] TAMURA, C. A. **Avaliação das relações entre iluminação ambiente e a saúde e bem estar de usuários**: proposta metodológica utilizando câmera climática. 268 f. Tese (Doutorado em Tecnologia e Sociedade) – UTFPR, Curitiba, 2017.

[19] TRENTO, T. P. W. Determinação de métricas para reprodução da percepção visual por simulações computacionais. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UTFPR, Curitiba, 2017.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: Edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

[21] OSRAM Fluorescent lamps. Disponível em: https://images.100y.com.tw/pdf_file/21-OSRAM-FLUORESCENT-LAMPS.pdf. Acesso em: junho 2025.