XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

# Avaliação fotobiológica do mascaramento de céu em ambientes de trabalho: Iluminação integrativa e bem-estar laboral

*Evaluación fotobiológica del enmascaramiento del cielo en entornos de trabajo: Iluminación integrativa y bienestar laboral*

*Photobiological assessment of sky masking in work environments: Integrative lighting and workplace well-being*

Iluminação natural e artificial / *Iluminación natural y artificial / Natural and artificial lighting*

**Galon, Rodrigo**
Mestre, FAU USP, São Paulo, Brasil, rcgalon@gmail.com

**Monteiro, Leonardo Marques**
Doutor, FAU USP, São Paulo, Brasil, leo4mm@usp.br

## Resumo

Esta pesquisa se concentra na avaliação da iluminação de ambientes de trabalho impactados por mascaramento do céu devido a edificações do entorno, focando no bem-estar fotobiológico dos trabalhadores, considerando-se que pode ocorrer diminuição da qualidade de vida e consequente diminuição de produtividade. O objetivo da pesquisa é verificar o impacto fotobiológico do mascaramento de céu em ambientes de trabalho por meio da métrica lux melanópico equivalente (EML). O método consiste em simulações computacionais sucessivas do ambiente de trabalho, realizadas com e sem obstruções no entorno. A partir da identificação da obstrução crítica, foram conduzidas simulações sucessivas com incrementos no número de luminárias, considerando diretrizes de Iluminação Integrativa. Os resultados da pesquisa indicam a possibilidade de restabelecimento de níveis mínimos de EML por meio de configurações de iluminação elétrica compensatórias para um dia fotobiológico saudável para os trabalhadores, verificando ainda o impacto energético dessas configurações de iluminação elétrica.



Palavras-chave: Iluminação integrativa. Ambiente de trabalho. Mascaramento de céu. EML. Simulação computacional.



## *Resumen*

*Esta investigación evalúa la iluminación en entornos laborales afectados por el enmascaramiento del cielo debido a edificaciones circundantes, con foco en el bienestar fotobiológico de los trabajadores, considerando su impacto en la calidad de vida y productividad. El objetivo es analizar el impacto fotobiológico del enmascaramiento del cielo mediante la métrica de lux melanópico equivalente (EML). El método consiste en simulaciones computacionales sucesivas del entorno laboral, realizadas con y sin obstrucciones em el entorno inmediato. A partir de la identificación de la obstrucción crítica, se realizaron simulaciones sucesivas con incrementos en el número de luminarias, considerando directrices de Iluminación Integrativa. Los resultados indican la viabilidad de restablecer niveles mínimos de EML con iluminación eléctrica compensatoria, garantizando un día fotobiológicamente saludable y evaluando su impacto energético.*



*Palabras clave: Iluminación integrativa. Entorno laboral. Enmascaramiento del cielo. EML. Simulación computacional.*



## *Abstract*

*This research focuses on the assessment of workplace lighting affected by sky masking due to surrounding buildings, emphasizing workers' photobiological well-being, considering that a decrease in quality of life and, consequently, productivity may occur. The objective of the study is to verify the photobiological impact of sky masking in workplaces through the equivalent melanopic lux (EML) metric. The method involves successive computational simulations of the work environment, carried out with and without surrounding obstructions. After identifying the critical obstruction, successive simulations were conducted with an increasing number of luminaires, following Integrative Lighting guidelines. The research results indicate the possibility of restoring minimum EML levels through compensatory electric lighting configurations for a photobiologically healthy day for workers, also assessing the energy impact of these lighting configurations.*



*Keywords: Integrative lighting. Workplace. Sky masking. EML. Computational simulation.*

## Introdução

A arquitetura contemporânea tem encontrado na neurociência importantes contribuições para o entendimento de como somos afetados fisiológica e psicologicamente pelas diferentes dimensões de um ambiente. A descoberta das células ganglionares retinais intrinsecamente fotossensíveis (ipRGCs) pela equipe de David M. Berson em 2002 revolucionou o entendimento sobre os efeitos não-visuais da luz na regulação do ciclo circadiano humano (Lucas *et al.*, 2013).

A iluminação regula processos bioquímicos ao modular neurotransmissores e hormônios como a melatonina e o cortisol, essenciais para os ritmos circadianos de sono. Através dos ipRGCs a luz de comprimentos de onda curtos influencia diretamente a supressão da melatonina, que estimula o estado de alerta e vigília, enquanto a falta desse estímulo sinaliza ao corpo para reduzir o gasto de energia e se preparar para o descanso e para o sono. O entendimento dessas influências não visuais da luz na neurofisiologia e neuro comportamento humanos na prática projetual já são aplicadas em luminotécnica de forma qualitativa e quantitativa através de fontes de luz com composições espectrais diferenciadas para induzir sensações de relaxamento, proteção, eficiência, produtividade e competição (Tomassoni; Galetta; Treglia, 2015).

Atualmente, a Iluminação Integrativa é definida pelo vocabulário da *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) como a "iluminação integrando efeitos visuais e não visuais e produzindo benefícios fisiológicos e/ou psicológicos para os seres humanos" (CIE, 2020). Para abordar questões não visuais da luz quantitativamente, foram desenvolvidas diversas métricas, incluindo o lux melanópico equivalente (EML, *Equivalent Melanopic Lux*). Entretanto, ainda não há padronização global para adoção delas.

As normas atuais sobre iluminância focam apenas nos aspectos visuais, desconsiderando os efeitos não visuais da luz na fisiologia humana, e a iluminância por si só não garante qualidade de iluminação (WELL, 2023). De Vries *et al.* (2018) destaca que a iluminância no plano vertical impacta a avaliação de ambientes de trabalho, o estado afetivo, a vigilância subjetiva e o desempenho nas tarefas. Iluminação inadequada pode reduzir o ritmo de trabalho, prejudicar a percepção de detalhes, aumentar erros e acidentes. Assim, aos efeitos visuais e emocionais da luz, somam-se os não-visuais, influenciando projetos com Iluminação Integrativa (Schlangen; Price, 2021), que visa promover o bem-estar.

No entanto, fatores urbanos podem comprometer o acesso à luz natural, essencial para a regulação do ritmo biológico e a eficiência energética. A densidade e altura das edificações podem intensificar o mascaramento do céu, reduzindo significativamente a incidência de luz natural em ambientes internos (Mello, 2020). A configuração morfológica urbana impacta diretamente essa incidência, mascarando a visão do céu por meio de paredes, muros ou edifícios vizinhos (Laranja *et al*., 2013). A regulação e a geometria urbanas influenciam a disponibilidade de luz natural nos interiores (Hoppe *et al*., 2016). O problema não se limita ao bloqueio da radiação solar direta, mas também ao mascaramento do céu, reduzindo a radiação difusa ao longo do dia. Assim, a relação entre altura, dimensão e afastamento das edificações determina o sombreamento entre construções, aumentando a demanda por iluminação artificial e impactando o consumo energético.

As normas para recuos e distâncias mínimas entre edifícios no município de São Paulo são definidas na Lei nº 16.402/2016 que trata do Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (Lei de Zoneamento), que prevê a exigência de estudos de projeção de sombra para empreendimentos de médio e grande porte que visam garantir a incidência mínima de luz solar em áreas internas e adjacentes das edificações (SÃO PAULO, 2016). Para isso, a fiscalização e o licenciamento urbanístico são conduzidos pela Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento (SMUL) e a Comissão de Análise de Projetos.

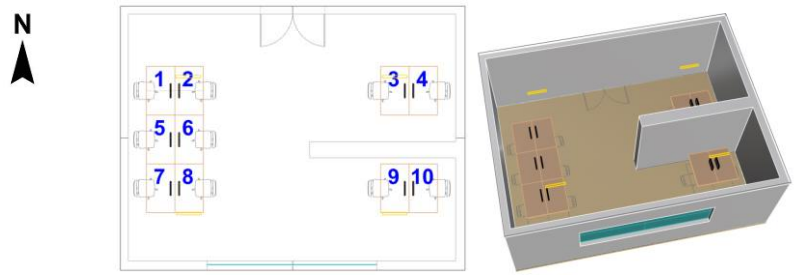
Nos casos impactados pelo mascaramento de céu, na falta da luz natural para um estímulo não visual suficiente, podemos estudar a possibilidade de compensação pela iluminação elétrica através de diretrizes de Iluminação Integrativa, oferecendo assim, uma composição lumínica satisfatória para um dia fotobiológico saudável em um ambiente de trabalho diurno.

O objeto desta pesquisa é o impacto fotobiológico do mascaramento de céu nos usuários de ambientes de trabalho. O objetivo da pesquisa é verificar o impacto fotobiológico do mascaramento de céu nos usuários de ambientes de trabalho por meio da métrica circadiana lux melanópico equivalente (EML).

## Metodologia

O método adotado para esta pesquisa é analítico, através da modelagem de um ambiente de trabalho hipotético com expediente das 8h às 17h utilizando o software Rhinoceros 3D 7®, compreendendo um escritório de 8,0m x 6,0m x 3,0m com abertura envidraçada voltada para fachada sul. O layout (Figura 1) contempla 10 estações de trabalho compostas por mesas de 0.70m por 1.20m a 0.75m de altura do piso com um monitor de 17” cada.

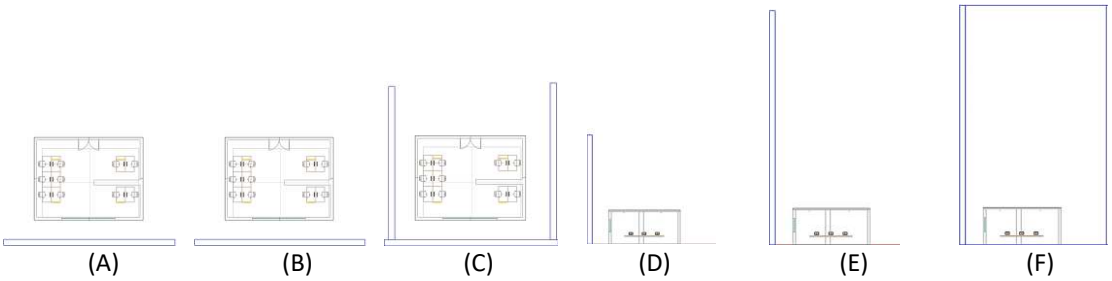
**Figura 1 - Planta baixa de layout e perspectiva 3D do ambiente de trabalho em estudo.**




Fonte: elaboração própria.

A pesquisa adotou como referência o requisito L03 da certificação WELL, que exige EML mínimo de 275 nas primeiras quatro horas do dia, até o meio-dia, medido a 45 cm acima do plano de trabalho. Para avaliar o fator EML, o cálculo requer o SPD (*Spectral Power Distribution*) da fonte luminosa, essencial para analisar a luz incidente.

**Figura 2 – (A-C) Plantas baixas do ambiente simulado e (D-F) Cortes do ambiente simulado, com destaque para as sucessivas obstruções de 10,00m e 20,00m frontal e laterais.**




Fonte: elaboração própria.

As simulações foram realizadas no software ALFA® (*Adaptive Lighting For Alertness*), através de licença estudantil, considerando três configurações progressivas de obstruções (Figura 2): Simulação 1 com obstrução de 10,00m a 1,50m de afastamento da fachada da abertura (Figura 2 - A e D); Simulação 2 com obstrução de 20,00m a 1.50m de afastamento da fachada da abertura (Figura 2 – B e E); Simulação 3 com obstrução de 20,00 a 1,50m de afastamento das fachadas de abertura e duas laterais (Figura 2- C e F).

Os parâmetros de entrada para as simulações no ALFA:

a) **Localização**: São Paulo (-23.55ºN, -46.64ºE, 769m acima do mar).

b) **Tempo**: dia 21 de junho, solstício de inverno no hemisfério sul (período do ano com menor incidência de luz natural). Os horários de simulações: as primeiras quatro horas de ocupação do ambiente de trabalho (8hs, 9hs, 10hs, 11hs e 12hs).

c) **Condição do céu**: Limpo (*clear*);

d) **Materiais**: pré-definidos com características de especularidade, fator M/P e transmitância atribuídos a cada materialidade do ambiente modelado.

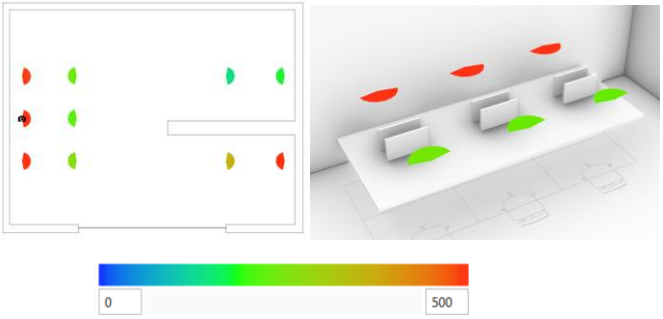
e) **Luminárias**: Luminárias lineares LED (0.60m x 0.06m, 24W, fluxo luminoso de 2450 lm, SPD M/P = 1.0).

f) **Malha**: pontos de cálculo baseados nos postos de trabalho voltados para frente (Figura 3), conforme ângulo de visão estereoscópica humana (120º), a 1.20m do piso, conforme altura média de ponto focal ocular de usuários sentados em estações de trabalho a 0.75m do piso.

g) **Métrica melanópica de referência**: nível EML mínimo 275, conforme certificação WELL.

A metodologia consistiu em duas etapas. Primeiramente, simularam-se diferentes configurações de obstrução até que os níveis de EML caíssem abaixo de 275 encontrando, assim, um cenário crítico. A partir de então, na segunda etapa, testaram-se distribuições de luminárias para restabelecer os níveis mínimos de EML.

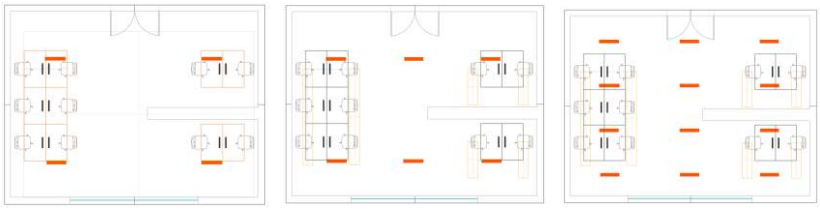
**Figura 3 – (a) Malha de pontos de cálculo em estações de trabalho com ângulos de visão de 120º (b) Perspectiva postos de trabalho com pontos de cálculo a 1.20m do piso.**




Fonte: elaboração própria.

A partir do cenário crítico de obstrução foram realizadas as simulações de sucessivas configurações de luminárias em distribuições espaciais equidistantes e simétricas em relação ao ambiente (Figura 4), a seguir: malha inicial de 2 x 2 luminárias; malha de 2 x 3 luminárias; malha de 3 x 4 luminárias.

**Figura 4 – Configurações de malha de luminárias, (A) 2x2x luminárias, (B) 2x3 luminárias, (C) 4x3 luminárias.**

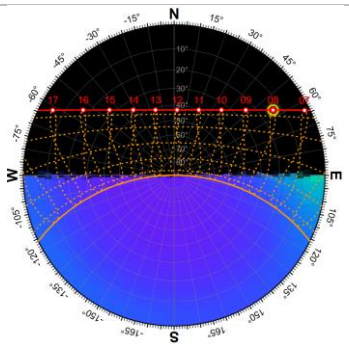
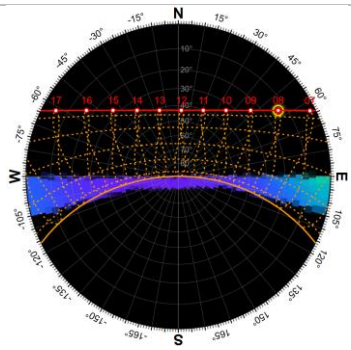


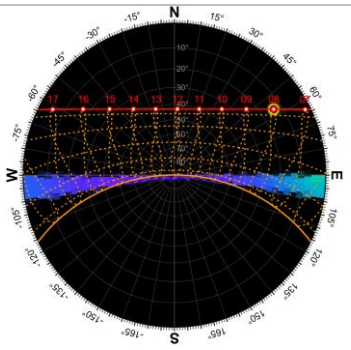
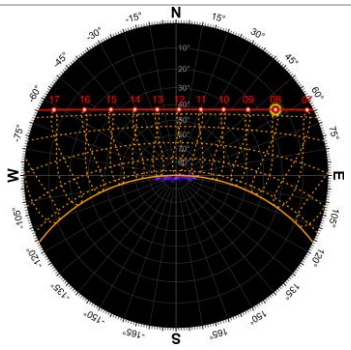
(A) (B) (C)

Fonte: elaboração própria.

Para geração dos mapas de Máscaras de Céu (Figura 5) representativas de cada configuração de obstruções, foi utilizado o *Shading Box* que retorna dados de sombreamento e de obstrução do céu, com a geração de diagramas estereográficos a partir de modelagem e visualização tridimensional. O domo estereográfico foi posicionado, no eixo da janela, a 1,60m do piso, representando o olhar de um observador. O céu selecionado foi do tipo 12 (padrão CIE de céu claro com baixa turbidez), com simulação para 21 de junho às 8h.

**Figura 5 - Máscaras de céu e respectivas percentagens de Obstrução de Céu Uniforme e Sombreamento da Luminância do Céu. Em colorido parcela de céu visível.**

| Obstrução de Céu Uniforme: 50.05%<br>Sombreamento da Luminância do Céu: 66.80% | Obstrução de Céu Uniforme: 93.98%<br>Sombreamento da Luminância do Céu: 94.94% |
|---|---|
|  |  |
| (a) – sem obstruções. | (b) - Configuração 1: obstrução frontal 10m. |

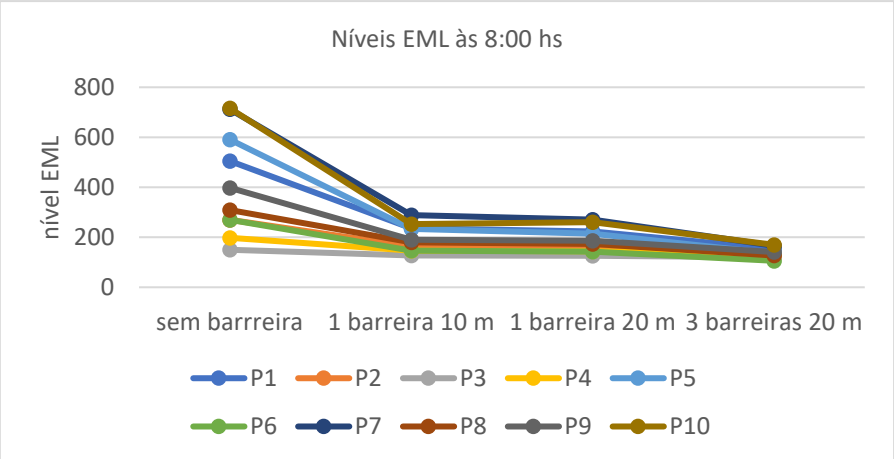
| | |
|---|---|
| Obstrução de Céu Uniforme: 94.58%<br>Sombreamento da Luminância do Céu: 95.14% | Obstrução de Céu Uniforme: 99.57%<br>Sombreamento da Luminância do Céu: 99.87% |
|  |  |
| (c) – Configuração 2: obstrução frontal 20m. | (d) – Configuração 3: obstrução frontal e laterais 20m. |

Fonte: elaboração própria.

## Resultados

As simulações mostraram uma queda drástica dos níveis de EML no cenário com três obstruções, conforme o Gráfico 1, evidenciando o impacto do enclausuramento. A redução foi mais acentuada nos postos P10, P7, P5 e P1, mais próximos à abertura da janela. As máscaras de céu confirmam a limitação da luz natural, com obstrução de 99,57% na Configuração 3.

**Gráfico 1 - níveis EML em cenários de barreiras de obstrução para os 10 postos de trabalho do ambiente às 8hs.**

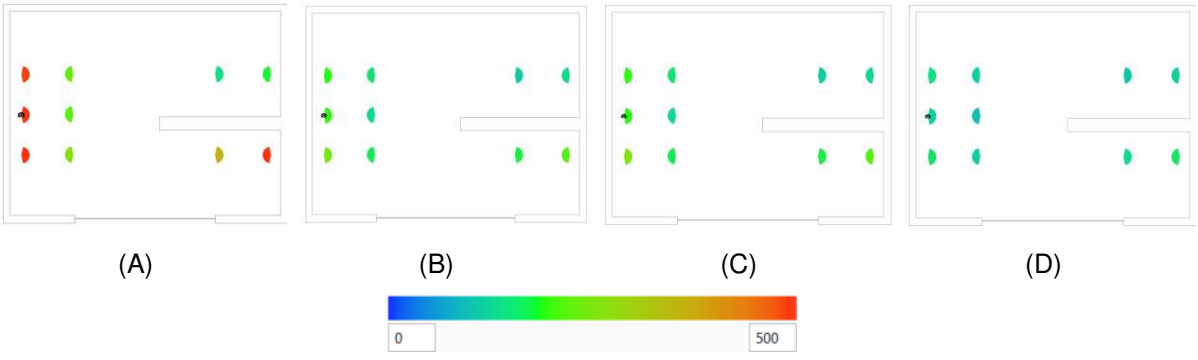



Fonte: elaboração própria.

Diferente do estudo de Hoppe *et al*. (2016), que observou um aumento da luz natural com maior gabarito da obstrução frontal em fachadas sul sob céu claro, esta pesquisa registrou uma queda dos níveis de EML. Essa divergência pode ser explicada pelos diferentes parâmetros analisados, já que Hoppe *et al*. avaliaram iluminância, enquanto neste estudo o foco foi o EML. Mas o resultado corrobora com a observação de Cheng *et al* (2006), onde a influência da verticalidade das edificações adjacentes é relevante, mas não tão impactante para quanto a densidade na ocupação do solo. Isso sugere que a densidade das edificações ao redor tem um impacto mais significativo na disponibilidade de luz natural do que a verticalização isolada em frente à abertura. A maior influência das obstruções laterais em relação às frontais, conforme observado por Laranja (2014), pode estar relacionado ao bloqueio da luz natural pelas obstruções laterais, reduzindo a incidência luminosa no ambiente ao incidir e refletir na superfície da obstrução frontal.

A queda dos níveis de EML foi mais significativa entre as Configurações 2 e 3 do que entre as Configurações 1 e 2. As máscaras de céu (Figura 5) mostram que a Obstrução de Céu Uniforme e o Sombreamento da Luminância do Céu variaram apenas 0,60 e 0,17 pontos percentuais entre as Configurações 1 e 2, mas aumentaram em 4,99 e 4,73 pontos percentuais entre as Configurações 2 e 3, indicando um impacto expressivo.

**Figura 2 - (A-D) Planta baixa com pontos de cálculo em escala de nível EML para os sucessivos cenários de obstrução às 8hs.**



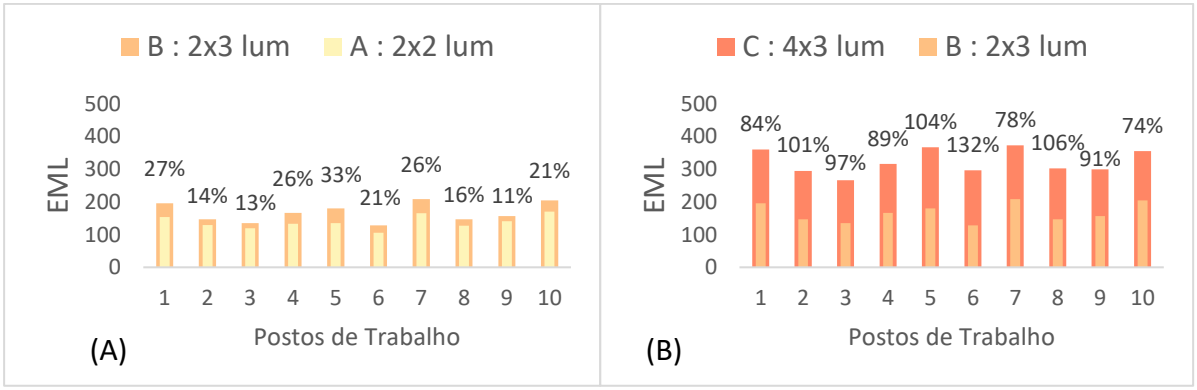

Fonte: elaboração própria.

A privação de luz natural também impactou os postos P2, P3, P4, P6, P8 e P9, mais distantes ou lateralmente opostos à janela (Figura 6), com maior intensidade nos postos P2, P6 e P8, que antes apresentavam níveis satisfatórios de EML, demonstrando que as posições mais

afastadas da janela ou lateralmente opostas sofrem maior impacto na disponibilidade de luz natural.

Na segunda etapa de simulações, partiu-se do cenário crítico com três barreiras de obstrução para testar três configurações de luminárias: **A** (2x2), **B** (2x3) e **C** (4x3). A configuração B apresentou melhora nos níveis de EML em relação à A, mas ainda abaixo do nível de referência (Gráfico 2-A). A configuração C atingiu os 275 EML, e demonstrou um ganho significativo em comparação à B (Gráfico 2-B).

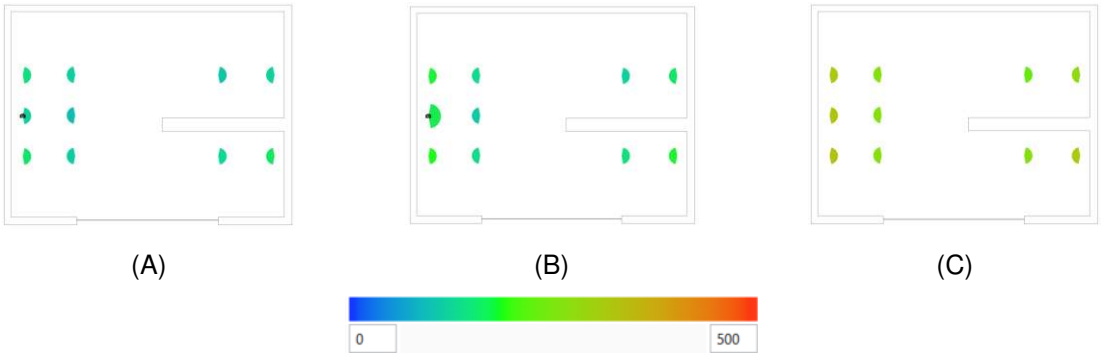
**Gráfico 2 – (A): Comparativo entre configurações A (2x2 luminárias) e B (2x3 luminárias) em relação a A. (B): Comparativo entre configurações B (2x3 luminárias) e C (4x3 luminárias) em relação a B.**




Fonte: elaboração própria.

A figura 7 ilustra a evolução dos níveis EML em planta baixa do ambiente através da plotagem dos pontos de cálculo das sucessivas simulações.

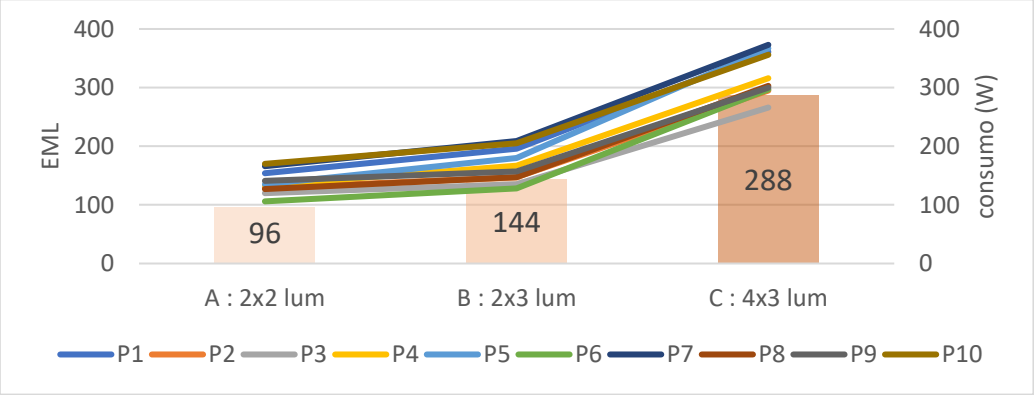
**Figura 7 - Plantas baixas com pontos de cálculo em escala de nível EML para as sucessivas configurações de luminárias às 8hs.**




Fonte: elaboração própria.

Para reestabelecimento dos níveis EML mínimos, foram necessários incrementos sucessivos de luminárias LED, partindo de uma configuração inicial 2x2 até atingir uma configuração 4x3. Embora bem-sucedida em recuperar os níveis EML, esta compensação resultou em aumento de 200% no consumo energético (Gráfico 3).

**Gráfico 3 - Ganho de EML entre as configurações A, B e C, e respectivos consumos energéticos em W.**




Fonte: elaboração própria.

O aumento de 136% nos níveis de EML entre as configurações A e C exigiu um acréscimo de 200% no consumo energético. A compensação com iluminação elétrica pode restabelecer os níveis de EML, mas resulta em maior potência instalada, podendo exceder os limites estabelecidos por normas como a certificação LEED e a norma de desempenho NBR-15575.

## Conclusão

Os resultados demonstram que o mascaramento do céu por adensamento urbano pode comprometer significativamente o bem-estar fotobiológico dos usuários. Embora seja possível compensar tecnicamente através de iluminação elétrica, o impacto energético é considerável.

A pesquisa também evidencia a necessidade de considerar aspectos fotobiológicos no planejamento urbano e em normativas construtivas, bem como a importância de desenvolvimento de soluções mais eficientes energeticamente para iluminação integrativa em ambientes impactados por mascaramento de céu.

A ausência de homologação de uma métrica circadiana pelo Sistema Internacional pode gerar variações no uso e na interpretação de métricas melanópicas, especialmente em aplicações

práticas como na luminotécnica para ambientes de trabalho. Pensamos que a ausência de um marco regulatório global unificado impede que essas métricas sejam amplamente incorporadas em políticas públicas.

Simulações computacionais e análises de mascaramento do céu são essenciais para avaliar a distribuição da luz natural em empreendimentos urbanos. A obstrução do céu, resultante da configuração urbana, deve ser considerada nas avaliações e fiscalizada pelos órgãos competentes. Não podemos normalizar e naturalizar uma possibilidade de 99.57% de céu obstruído devido a adensamento inconsequente na morfologia urbana, e sim refletir para além da inegável importância das aberturas destinadas à entrada da luz natural. O acesso à luz natural não é substituível (e tampouco deveria ser negociável).

Esperam-se a partir desta pesquisa desdobramentos que questionem as problemáticas quanto ao mascaramento de céu de edifícios em vista às diretrizes construtivas envolvendo variáveis urbanísticas e arquitetônicas como afastamentos, coeficiente de aproveitamento, áreas de aberturas.

Evoluímos como espécie expostos à fonte de luz natural solar, com seu espectro de luz completo, mas estamos expostos à iluminação elétrica somente há alguns séculos, e ao LED, especificamente, há poucas décadas. O conhecimento que temos hoje sobre as formas de aferir as especificidades dos estímulos não visuais da luz pela sua distribuição espectral é inicial. Não sabemos se existem outras interações entre diferentes comprimentos de onda com estímulos neurofisiológicos, psicológicos ou comportamentais, a ponto de depositar definitivamente, na suposta compensação com a luz elétrica, a solução para o problema da obstrução de luz natural. Mas pensamos que, diante do cenário atual de adensamento urbano, torna-se importante aliar iluminação com bem-estar nos projetos e pesquisas de arquitetura contemporânea.

## Referências

CHENG, V. et al. Urban form, density and solar potential. *In:* PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 2006. Disponível em: https://www.academia.edu/23715184/Urban_form_density_and_solar_potential. Acesso em: 10 jul. 2024.

CIE – Commission Internationale de l'Éclairage. CIE S 017:2020. ILV*: International Lighting*

*Vocabulary*. 2. ed. Vienna: CIE, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.25039/S017.2020. Acesso em: 10 ago. 2024.

DE VRIES, et al. Lighting up the office: the effect of wall luminance on room appraisal, office workers' performance, and subjective alertness. **Building and Environment**, v. 142, 2018. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.046. Acesso em 05 mai. 2022.

HOPPE, S. B. **A influência da legislação urbana na iluminação natural de edifícios:** um estudo de caso em Domingos Martins-ES. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 2016. Disponível em: https://dspace4.ufes.br/items/f9276088-cf63-449f-b76a-28c1906316f7 Acesso em: 10 jul. 2024

INTERNATIONAL WELL BUILDING INSTITUTE. *WELL Building Standard*: *light*. Versão v2 Q1-Q3 de 2023. Disponível em: https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/light/feature/3. Acesso em: 15 jul. 2023.

LARANJA, A. C. et al. Análise das relações entre a geometria urbana e a orientação das aberturas na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**. Belo Horizonte, MG, v. 20, n. 26, p. 151-167, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.5752/P.2316-1752.2013v20n26p151 Acesso em: 10 jul. 2024.

LUCAS, R. J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. **Trends in Neurosciences**, v. 37, n. 1, p. 1–9, 2013. doi: 10.1016/j.tins.2013.10.004. Acesso em: 10 mar. 2020.

MELLO, M. R. de A. F. **Adensamento Construído e o Desempenho Térmico e Luminoso das Edificações:** A relação entre Orientação, Obstrução e Área Envidraçada. Tese de Doutorado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – São Paulo, SP, 2020. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-30032021-131626/pt-br.php Acesso em: 15 jul. 2023.

SÃO PAULO (Município). Lei nº 16.402, de 22 de março de 2016. **Parcelamento, Uso e Ocupação do solo no Município de São Paulo**. Diário Oficial da Cidade de São Paulo, São Paulo, 23 mar. 2016. Disponível em https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16402-de-22-de-marco-de-2016. Acesso em: 10 mar 2023.

SCHLANGEN L.J.M.; PRICE L.L.A. The Lighting Environment, Its Metrology, and Non-visual Responses. **Frontiers in Neurology**, v. 12, 2021. doi: 10.3389/fneur.2021.624861.

TOMASSONI, R.; GALETTA, G.; TREGLIA, E. Psychology of Light: How Light Influences the Health and Psyche. **Psychology**, v. 6, p. 1216-1222, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.4236/psych.2015.610119 Acesso em: 10 mar. 2020.