ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Métricas de iluminação integrativa com eficiência energética: Revisão Sistemática de Literatura

Energy-efficient integrative lighting metrics: Systematic Literature Review

Carmelina Suquere de Moraes
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre | Brasil | carmelinasuquere@gmail.com
Betina Tschiedel Martau
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre | Brasil | betina.martau@ufrgs.br

Resumo

A luz não apenas afeta a visão, mas também tem impacto nos ritmos circadianos humanos e no consumo de energia nos edifícios. Portanto, é essencial buscar soluções de projetuais que atendam aos requisitos visuais e circadianos, ao mesmo tempo em que minimizam as demandas energéticas da iluminação. Deste modo, através de uma investigação exploratória, este estudo busca investigar as métricas existentes de iluminação integrativa, a fim de identificar critérios e estratégias capazes de suprir a demanda da energia sem afetar a saúde do usuário. Como método, empregou-se a revisão sistemática da literatura utilizando as bases de dados da SCOPUS e SCIENCE DIRECT. A partir das palavras-chave, como "métrica eficiente", "efeito não visual", "não formação da imagem"e "estímulo circadiano", foram encontrados 30 artigos, dos quais 7 foram selecionados como relevantes para a pesquisa. Os resultados indicaram que a métrica mais utilizada foi o conceito de Luz Melanópico Equivalente (EML). Além disso, o critério mais adotado nos projetos de iluminação é a direcionalidade da luz, pois permite flexibilidade, ajustes de direção e redução do consumo de energia elétrica. No entanto, há uma carência de estudos aplicáveis que consigam sintetizar os aspectos visuais e não visuais da iluminação, orientando-se de maneira mais assertiva para as questões de eficiência energética.
Palavras-chave: Iluminação Circadiana. Eficiência Energética. Ciclo Circadiano.

Abstract

Light not only affects vision, but also impacts human circadian rhythms and energy consumption in buildings. Therefore, it is essential to seek design solutions that meet visual and circadian requirements, while minimizing the energy demands of lighting. Therefore, through an exploratory investigation, this study seeks to investigate existing integrative lighting metrics, in order to identify criteria and strategies capable of meeting energy demand without affecting the user's health. As a method, a systematic literature review was used using the SCOPUS and

SCIENCE DIRECT databases. Using keywords such as "efficient metrics", "non-visual effect", "non-image formation" and "circadian stimulus", 30 articles were found, of which 7 were selected as relevant to the research. The results indicated that the most used metric was the concept of Equivalent Melanopic Light (EML). Furthermore, the most adopted criterion in lighting projects is the directionality of the light, as it allows flexibility, direction adjustments and reduced electricity consumption. However, there is a lack of applicable studies that can synthesize the visual and non-visual aspects of lighting, orienting themselves more assertively towards energy efficiency issues.

Keywords: Circadian Lighting. Energy Efficiency. Circadian Cycle.

INTRODUÇÃO

Desde tempos remotos, a luz natural tem desempenhado um papel crucial no interior dos ambientes construídos, influenciando diretamente as características das habitações. Essa influência abrange tanto o conforto dos usuários quanto a qualidade das construções. Há mais de duas décadas, pesquisadores identificaram que os olhos não apenas captam a luz e a convertem em sinais elétricos para formar imagens no cérebro, mas também atuam como um centro de comando do corpo, estabelecendo uma comunicação essencial com o cérebro.

Além das questões estritamente relacionadas à visão, a luz exerce uma influência muito mais ampla, regulando o ciclo circadiano. Esse ritmo de 24 horas afeta diversos processos fisiológicos nos seres humanos, como o sono, a vigília, a temperatura corporal e a liberação de hormônios. Portanto, compreender a complexidade dos efeitos da luz no ambiente construído é fundamental para promover o bem-estar e a saúde das pessoas [1]

Atualmente, projetos de iluminação que consideram o conforto visual, os impactos na saúde dos usuários e a eficiência energética são amplamente explorados. Em um estudo recente, [2] investigaram como projetos luminotécnicos que abordam tanto questões visuais quanto não visuais afetam o consumo energético. Os resultados indicam que projetos que atendem às normas de iluminação para o desempenho visual tendem a resultar em alto consumo de energia.

De fato, projetar iluminação considerando as questões visuais e não visuais é um desafio, dado aos conhecimentos relacionados a saúde estarem desconectados das metodologias de cálculos luminotécnicos presentes nos softwares de iluminação mais conhecidos.

Nesse contexto, faz-se necessária a investigação sobre o que tem sido produzido de conhecimento e pesquisa sobre o emprego das métricas de iluminação. Atualmente há várias métricas existentes relacionadas aos efeitos não visuais da luz, o Circadian Estímulus (CS) [3], o Equivalent Melanopic Lux (EML) [4] e Melanopic Equivalent Daylight Illuminance - mEDI [5].

O objetivo deste artigo é apresentar a revisão sistemática de literatura sobre métricas de iluminação integrativa existentes que levam em consideração questões de eficiência energética, realizada como parte de um estudo de doutorado que analisará as métricas de iluminação existentes em estudos mais recentes que procuram atender

aos parâmetros tanto do ponto de vista da saúde do usuário quanto do ponto de vista da eficiência energética, visto que descobrir como projetar iluminação integrativa, sem aumentar o consumo energético, é algo que precisa ser investigado.

METODOLOGIA

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) que abrangeu aspectos teóricos conceituais, bem como os metodológicos de aplicação nos estudos. Segundo [6] “a revisão sistemática é uma modalidade de pesquisa, que segue protocolos específicos e busca dar alguma logicidade a um grande corpus documental”.

As fases desta revisão sistemática foram fundamentadas em [7] A primeira fase consistiu na definição do objetivo da revisão, que se originou da seguinte indagação: Considerando a existência de diversos modelos de métricas de iluminação integrativa, o objetivo foi investigar as aplicações mais recentes e aplicáveis em projetos de iluminação que correlacionam os efeitos não visuais com o consumo energético. Assim, foram elencadas as informações a serem pesquisadas:

- Parâmetros de eficiência energética e sua relação com efeitos não visuais da luz.
- Métricas mais adotadas pelos pesquisadores;
- Métodos de aferição quanto aos efeitos não visuais e visuais e sua relação com eficiência energética, especificamente em ambientes de escritórios.

A segunda etapa consistiu na revisão da literatura por meio de um protocolo de busca, baseado nas respostas às seguintes perguntas:

Onde encontrar os estudos? Adotou-se a base de pesquisa científicas como SCOPUS e SCIENCE DIRECT. A escolha dessas bases ocorreu por serem utilizadas mais utilizadas na área da arquitetura mundialmente e de fácil acesso [7].

Quais critérios de exclusão? O critério temporal foi determinado pelos últimos três anos (2021/202), incluindo também os artigos encontrados de 2024 até o momento. O critério de filtragem segui os seguintes parâmetros: documento tipo artigo e artigo de revisão; apenas em idioma inglês; publicação em periódico. Uso de palavras-chave como: efficient metric, “non-visual effect, “non image-forming”, NIF, “circadian light”, efficient integrative lighting, "human centric lighting", "integrative lighting", "circadian lighting", "circadian stimulus", "lighting projects".

Após as etapas iniciais, iniciou os critérios de exclusão com a leitura prévia quanto à adesão ao tema pesquisado. Dessa forma, excluiu-se os artigos que tratavam os assuntos de eficiência energética e iluminação integrativa (luz circadiana, ritmo circadiano) separadamente, artigos focados em eficiência energética e desempenho térmico; artigos focados somente no tratamento de doenças em geral, métodos não relacionados ao objetivo da pesquisa. incluídos casos relacionados a saúde do usuário quanto ao efeito da luz do dia com enfoque no ambiente construído.

Definição dos desfechos de interesse: concentrou-se na coleta de informações sobre as métricas de iluminação integrativa aplicadas que obtiveram ganhos ou parâmetros testados e sugeridas quanto ao consumo energético.

Análise da estatística utilizada: a estatística utilizada foi a partir da utilização da base Parsifal[1]

Prosseguindo a metodologia, na terceira etapa procedeu-se a análise dos artigos, qualitativa e quantitativamente de maneira manual. Bem como, na quarta etapa ocorreu a leitura dos artigos que foram analisados com intuito de obter as respostas quanto as perguntas de pesquisa elencadas no objetivo.

RESULTADO E DISCUSSÕES

Inicialmente, foram encontrados 30 artigos nas plataformas. Destes foram selecionados 7 após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Destes selecionados, o Quadro 1 mostra a distribuição das obras, bem como a métrica adotada.

Quadro 1: Resumo dos 8 artigos analisados depois da revisão sistemática da literatura

Título	Autor e ano	Palavras - chaves	O que descreve
A proposal on residential lighting design considering visual requirements, circadian factors and energy performance of lighting	Egemen Kaymaz, Banu Manav, 2022	Residential lighting; visual requirements; energy performance; circadian lighting design	O estudo avaliou os espaços residenciais que foram convertidos em escritórios e/ou áreas de estudo durante e após a pandemia de Covid-19 em termos de seus requisitos de desempenho visual, não visual e energético da iluminação.
Role of architectural design in creating circadian-effective interior settings	Baraa J. Alkhatatbeh, Somayeh Asadi, 2021	Baraa J. Alkhatatbeh, Somayeh Asadi	O artigo revisa parâmetros essenciais do projeto arquitetônico e seus impactos no projeto de iluminação circadiana, considera o processo de projeto da HCL e explora o circadiano mais amplamente utilizado
Influences of spectral power distribution on circadian energy, visual comfort and work performance	Jack Ngarambe, Inhan Kim, Geun Young Yun, 2021	solid-state lighting; circadian rhythms; discomfort glare; OLED; LED; visual comfort	O presente estudo avaliou as potenciais influências do SPD sobre o consumo de energia (isto é, considerando a energia circadiana), o conforto visual, o desempenho no trabalho e o humor.
Photopic illuminance-based black-box model for regulation of human circadian rhythm via daylight control	Su-In Yun,Jae-Weon Jeong, Anseop Choi, 2021	Circadian rhythmLighting controlBlack-box model	O artigo propõe uma metodologia para derivar um modelo de caixa-preta que pode prever lux melanópico equivalente (EML) usando iluminância fotópica como entrada.

[1] Plataforma online utilizada para realização de revisões sistemáticas de literatura. Ela possui como banco de dados as principais revistas científicas.

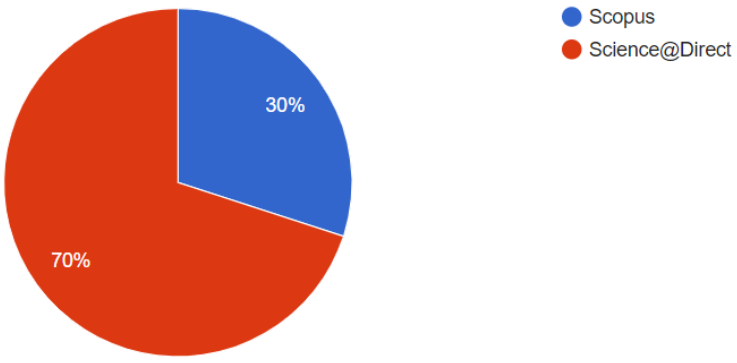
			Usando este modelo de caixa-preta, mudamos apenas os algoritmos para edifícios existentes equipados com iluminação controlada com base na iluminância fotópica.
Simulating the annual energy demand to meet non-visual health recommendations from a luminaire level lighting control system	Siobhan Rockcastle, Alen Mahic, 2024	Non-visual healthEnergy DemandLighting controlsShading controlsDaylightBuilding Simulation	Este artigo discute os desafios de atender aos objetivos de saúde não visual em um espaço de escritório com iluminação lateral, minimizando a demanda de energia de sistemas de iluminação elétrica suplementares que são necessários quando os sistemas de sombreamento reduzem a disponibilidade de luz do dialuz do dia.
Optimized lighting energy consumption for non-visual effects: A case study in office spaces based on field test and simulation	Yunyi Zeng, Hongli Sun, Borong Lin, 2021	Light environment, Non-visual effects, Lighting control, Daylight harvesting, Energy consumption	Portanto, este estudo teve como objetivo apresentar um fluxo de trabalho para a obtenção de saídas ótimas de luz considerando os requisitos de iluminação não visual, além dos requisitos visuais tradicionais. Esse fluxo de trabalho foi implementado para calcular o consumo anual de energia de iluminação sob diferentes temperaturas de cor correlatasà luz (TCCs), condições de luz do dia e requisitos padrão para um cenário de escritório real.
Light-environment interactions and integrative lighting design: Connecting visual, non-visual and energy requirements in a case study experiment	Laura Bellia, Urszula Błaszczak, Francesca Diglio, Francesca Fragliasso, 2024	Circadian stimulus, Melanopic equivalent daylight illuminance, Integrative lighting, Lighting energy consumption, Spectral reflectance, Spectral irradiance measurements	Aqui, o impacto das características espectrais das paredes no ambiente luminoso geral e nas demandas de energia é analisado em uma sala de teste, combinando sete cores das paredes e temperaturas de cor correlacionadas (TCCs) de três fontes.

Evaluation of integrated daylighting and electric lighting design projects: Lessons learned from international case studies	Niko Gentile, Eleanor S. Lee, Werner Osterhaus, Sergio Altomonte, Cláudia Naves David Amorim , Giovanni Ciampi, Veronica Garcia-Hansen, Marshal Maskarenj, Michelangelo Scorpio, Sergio Sibilio, 2022	Daylighting, Electric lighting, Shading, Lighting control, Case studies, Energy saving, View out Non-visual effects, Integrative lighting, Monitoring and verification	O estudo apresenta uma análise abrangente de 25 estudos de caso internacionais integrados de iluminação natural e iluminação elétrica. O objetivo foi reunir uma compreensão mais profunda de como os edifícios podem alcançar objetivos de eficiência energética e de fator humano: ou seja, quais estratégias de projeto, tecnologias de fachada e iluminação, controles, práticas de comissionamento, educação do usuário final, práticas operacionais, etc. estratégias e práticas funcionam em edifícios reais.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os artigos mais aderentes a pesquisa foram encontrados na plataforma *Science Direct,* conforme Figura 1.

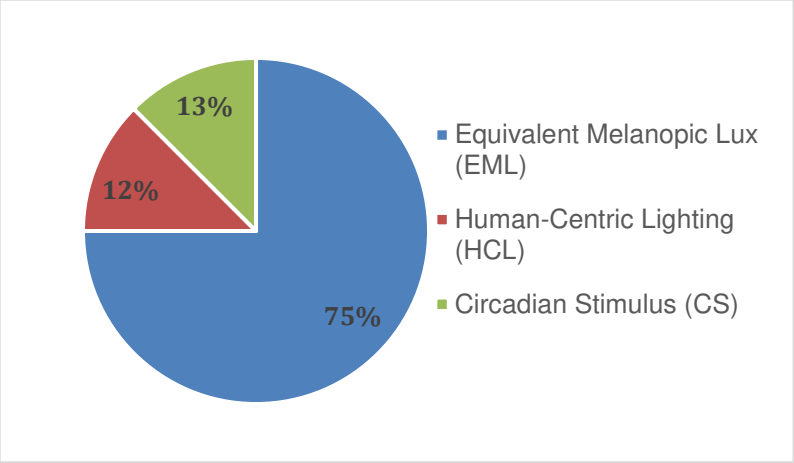
Figura 011: Gráfico indicando percentual de artigos selecionados na rede Scopus e Science Direct



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Posteriormente, nos artigos analisados foi possível identificar quais foram as métricas mais adotadas nas pesquisas relacionadas a iluminação integrativa. Conforme Figura 41, dos 8 artigos analisados, 6 (75%) deles utilizaram a métrica de Lux Melanópico Equivalente (EML) [4]. Os autores utilizaram como referência a plataforma da Certificação WELL [8] para estudo dos requisitos de iluminação do dia.

Figura 2: Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quanto as análises acerca dos parâmetros de eficiência energética e sua relação com efeitos não visuais da luz, diferentes resultados foram encontrados em sua maioria os critérios foram relativos à direcionalidade da iluminação, permitindo além da economia de energia melhores resultados quanto as questões não visuais da luz, como pode ser observado no Quadro 02.

Tabela 1: Resumo dos 8 artigos quanto aos parâmetros de eficiência e iluminação integrativa

Autor e Ano	Cor e refletância dos Materiais	Direcionalidade da luz	Temperatura de Cor Correlata	SPD das fontes de luz
Egemen Kaymaz, Banu Manav, 2022		X	X	
Qi Dai, Yingying Huang, Luoxi Hao, Yi Lin, Kaixuan Chen, 2023		X		
Baraa J. Alkhatatbeh, Somayeh Asadi, 2021	X	X		
Jack Ngarambe, Inhan Kim, Geun Young Yun, 2021				X
Su-In Yun,Jae-Weon Jeong, Anseop Choi, 2021		X		
Siobhan Rockcastle, Alen Mahic, 2024		X		
Yunyi Zeng, Hongli Sun, Borong Lin, 2021			X	
Laura Bellia, Urszula Błaszczak, Francesca Diglio, Francesca Fragliasso, 2024	X			

Niko Gentile, Eleanor S. Lee, Werner Osterhaus, Sergio Altomonte, Cláudia Naves David Amorim , Giovanni Ciampi, Veronica Garcia-Hansen, Marshal Maskarenj, Michelangelo Scorpio, Sergio Sibilio, 2022		X		

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base nas pesquisas de [9], o projeto de iluminação deve ser elaborado de maneira a permitir flexibilidade, seja por meio de dimerização, ajustes de direção ou até mesmo adaptações. Além disso, [10] reforçam o uso de iluminações indiretas, pois, além de serem eficientes energeticamente devido à não utilização de toda a iluminação do espaço, também são eficientes no estímulo circadiano. Essas abordagens contribuem para o equilíbrio entre conforto visual, eficiência energética e saúde dos ocupantes.

Assim os fatores como a área da janela, orientação, tipo de vidro e refletância dos materiais também influenciam nas características da luz do dia e elétrica no interior dos edifícios [10]. Em uma pesquisa, [11] afirmam que a escolha de superfícies altamente refletoras é crucial para aumentar a iluminância tanto no plano de trabalho como ao nível dos olhos, de modo a ajudar a reduzir a emissão de luz das luminárias e, ao mesmo tempo, aumentar a resposta circadiana.

Como estratégias para aumentar o estímulo circadiano nos interiores dos edifícios, os autores sugerem pintar as paredes com cores neutras, como branco e cinza, um método fácil e econômico. Por outro lado, cores quentes, como vermelho, amarelo e laranja, reduzem significativamente o estímulo circadiano, especialmente quando combinadas com vidros não transparentes, como aqueles na cor bronze [10].

Estudos de [9] afirmam que, para manter o ritmo circadiano durante os meses de inverno com céu nublado, é necessário aumentar a iluminância melanópica e/ou as temperaturas de cor das fontes de luz. Contudo, é importante notar que uma intensidade luminosa excessiva pode causar ofuscamento e aumentar o consumo de energia, enquanto temperaturas de cor mais altas podem afetar adversamente a fisiologia e o bem-estar psicológico dos usuários.

Acerca da influência do SPD, apenas um trabalho tomou como referência [12] em suas pesquisas os resultados mostraram que são necessários valores de potência

mais elevados para atingir o estímulo circadiano (CS) e iluminância diurna (mel-EDI) = 250 lx, e por vezes para atingir mel-EDI = 136 lx.

Por outro lado, pesquisadores [2] explicam que, quando o foco está nos requisitos não visuais, o projeto de iluminação baseado apenas em iluminação elétrica, resulta em alto consumo de energia. Um projeto de iluminação integrativa bem equilibrado deve garantir valores elevados (definir os valores, elevado é uma palavra relativa de mEDI, CS ou EML e relação M/P durante o dia.

CONCLUSÕES

Conforme pesquisa, lamentavelmente, há uma carência de estudos aplicáveis que conseguem sintetizar os aspectos visuais e não visuais da iluminação, orientando-se de maneira mais assertiva para as questões de eficiência energética. Segundo a revisão sistemática da literatura científica, foram identificados somente oito artigos que abordam diretamente essas questões, contudo, ainda sem resultados robustos que estabeleçam parâmetros exclusivos que corroborem com o objetivo do trabalho.

Assim como, através destas pesquisas nota-se que não há um consenso quanto ao uso dos softwares de simulações computacionais e medição in loco para avaliação dos efeitos não visuais no ambiente. As metodologias que contemplam as questões de consumo energético e iluminação integrativa são apresentadas de maneira segregada, fundamentadas, em sua maioria, na análise do local com a utilização de softwares distintos, tais como Dialux, DesignBuilder, Ladybug, Grasshopper 3D, LARK, DAYSIM, ECOTECT. Isso implica a necessidade de conhecimentos diferenciados para sua aplicabilidade em escritórios de projetos de iluminação. De fato, não existem ferramentas de avaliação de luz circadiana que adotem ambos os métodos de maneira satisfatória; quando presentes, como na adotada neste estudo, elas são segregadas dos demais programas de simulação de iluminação ou desempenho energético. A integração de todas as métricas, seja de iluminação integrativa ou de eficiência energética, em um único software seria o cenário ideal.

REFERÊNCIAS

[1] CHAVES, Nathali Pimentel. Novos processos de projeto: explorando a iluminação integrativa. 2020. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2020, p.155. Disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=001120284&loc=2020&l=288470491953f8e4. Acesso em: 27 out. 2021.

[2] GENTILE, Niko et al. Evaluation of integrated daylighting and electric lighting design projects: Lessons learned from international case studies. Energy and Buildings, [s. l.], v. 268, p. 112-191, 2022.

[3] REA, MS; FIGUEIRO, MG. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. Lighting Research & Technology, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 497–510, 2018.

[4] LUCAS, Robert J. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. Trends in neurosciences, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 1–9, 2014.

[5] CIE (Commission Internationale d'Eclairage). CIE S026/E:2018 – CIE System for metrology of optical radiation for ipRGC-influenced responses to light. 2018b. Disponível em: https://cie.co.at/publications/cie-system-metrology-optical-radiation-iprgc-influenced-responses-light-0. Acesso em: 28 abril. 2024.

[6] GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: CONCEITUAÇÃO, PRODUÇÃO E PUBLICAÇÃO. Logeion: Filosofia da Informação, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 57–73, 2019.

[7] DALTROZO, Jenifer Godoy; MARTAU, Betina Tschiedel. Ensino de Arquitetura e Urbanismo em tempos de pandemia: revisão sistemática de literatura. [s. l.], 2023, p.155.

[8] WELL. WELL Building StandardTM version 2. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.wellcertified.com/home. Acesso em: 29 abr. 2024.

[9] KAYMAZ, Egemen; MANAV, Banu. A proposal on residential lighting design considering visual requirements, circadian factors and energy performance of lighting. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 2851–2866, 2023.

[10] KAYMAZ, Egemen; MANAV, Banu. A proposal on residential lighting design considering visual requirements, circadian factors and energy performance of lighting. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 2851–2866, 2023.

[11] BELLIA, Laura et al. Light-environment interactions and integrative lighting design: Connecting visual, non-visual and energy requirements in a case study experiment. Building and Environment, [s. l.], v. 253, p. 111323, 2024.

[12] NGARAMBE, Jack; KIM, Inhan; YUN, Geun Young. Influences of Spectral Power Distribution on Circadian Energy, Visual Comfort and Work Performance. Sustainability, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 4852, 2021.