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

Avaliação comparativa dos efeitos não visuais da iluminação natural: espaço real, maquete e simulação

Comparative evaluation between the non-visual effects of natural lighting: measurements in real space, scale model and computer simulation

Amanda Camuzato de Quadros
amanda.camuzato@grad.ufsc.br
Suelem Schier de França
suelem0802@gmail.com
Raphaela Walger da Fonseca
rwfonseca@utfpr.edu.br
Fernando Ruttkay Pereira
ruttkay.pereira@ufsc.br

Resumo

A luz natural recebida pela retina auxilia na sincronização do ciclo circadiano humano, influenciando o estado de alerta e a produtividade ao longo do dia. A maneira de estimar tal influência pode ser por simulação computacional ou medição. O objetivo foi realizar uma avaliação comparativa entre os valores de razão melanópica equivalente medida em ambiente real, em modelo em escala, e simulada computacionalmente. O método utiliza de medições de iluminância melanópica in loco de um modelo em escala reduzida, simultaneamente realizadas no ambiente real e posteriores simulações em modelo digital no programa ALFA. Embora as magnitudes variem, as linhas de tendência dos resultados do programa demonstram um comportamento similar. É importante considerar que o programa apresenta restrições quanto ao tipo de céu, distinguindo entre céu estático e real. Apesar disso, o ALFA se configura como uma ferramenta de direcionamento de projeto, pois permite ao arquiteto compreender como a edificação vai se comportar sob as condições de luz natural, e que estímulos o ambiente pode fornecer segundo as métricas do ciclo circadiano.

Palavras-chave: Iluminação natural. Ciclo circadiano. Projeto. Edificações. Simulação computacional.

Abstract

Natural light received by the retina aids in synchronizing the human circadian cycle, influencing alertness and productivity throughout the day. This influence can be estimated through computational simulation or measurement. The objective was to perform a comparative evaluation of the equivalent melanopic ratio values measured in a real environment, in a scale model, and simulated computationally. The method involves in situ measurements of melanopic illuminance from a reduced-scale model, simultaneously conducted in the real environment,

Como citar:
QUADROS, A. C. Avaliação comparativa dos efeitos não visuais da iluminação natural: espaço real, maquete e simulação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

followed by subsequent simulations in a digital model using the ALFA program. Although the magnitudes vary, the trend lines of the program's results show similar behavior. It is important to note that the program has limitations regarding the type of sky, distinguishing between static and real sky conditions. Despite this, ALFA proves to be a useful project guidance tool, as it enables architects to understand how a building will behave under natural light conditions and what stimuli the environment can provide according to circadian cycle metrics.

Keywords: Natural lighting. Circadian cycle. Design. Buildings. Computer simulation.

INTRODUÇÃO

O impacto dos efeitos não visuais da luz na fisiologia humana está sendo cada vez mais considerado, e essa preocupação já está sendo aplicada no projeto de iluminação. Desde a descoberta de dois grupos médicos - o primeiro estabeleceu a conexão necessária para compreender os mecanismos dos efeitos biológicos controlados pelo ciclo claro e escuro [1], o segundo descobriu os mecanismos moleculares que controlam o ritmo circadiano [2] - a qualidade e a quantidade da luz que entra em um ambiente não são os únicos aspectos considerados. Outros fatores, como a geometria do espaço, o tamanho das aberturas e as propriedades dos materiais, também têm um grande impacto na caracterização do ambiente luminoso [3]. A luz já não é vista apenas como um elemento para a visão, mas como um recurso para regular o ritmo circadiano, responsável por variações nas funções biológicas em resposta à alternância de claridade e escuridão.

As características do ambiente luminoso, como o comprimento de onda da luz e a intensidade luminosa, afetam a eficiência do trabalho e a estabilidade psicológica dos ocupantes [4]. A classe de fotorreceptores na retina, chamada de células ganglionares da retina intrinsecamente fotossensíveis (ipRGCs), converte luz em sinais neurais por meio da fotorrecepção intrínseca da melanopsina e da mediação de sinais extrínsecos originados em fotorreceptores clássicos [5]. A exposição insuficiente ou excessiva à luz com características espectrais inadequadas para o horário do dia pode interromper o ritmo circadiano regular [6], comprometendo a qualidade do sono, o desempenho e a saúde a longo prazo, aumentando o risco de doenças mais graves [7].

Atualmente, estima-se o potencial oferecido por um ambiente para a manutenção de um ritmo circadiano saudável por meio de simulação computacional ou medições das condições luminosas no ambiente real. A métrica mais difundida é o Lux Melanópico Equivalente (LME), utilizado na certificação de edifícios pela *WELL Building Certification* [8][9][10]. Contudo, os critérios de desempenho para uma iluminação circadiana eficaz estão em estágios iniciais de desenvolvimento. Neste cenário, esta pesquisa objetiva realizar uma avaliação comparativa dos valores de razão melanópica equivalente entre o modelo em escala, o ambiente real e a simulação computacional. O método emprega medições de iluminância melanópica no local, usando um modelo em escala reduzida. Além de proporcionar dados representativos de um ambiente real, os modelos em escala reduzida são uma ferramenta familiar para a maioria dos arquitetos. Pesquisas indicam uma alta correlação entre modelos em escala e análises de iluminação na faixa de sensibilidade visual [11][12]. Este estudo busca, portanto, compreender a correlação desses modelos com a simulação computacional.

MÉTODO

Para alcançar o objetivo proposto, a metodologia foi dividida em dois momentos. O primeiro consistiu em uma verificação da relação entre o modelo em escala e o ambiente real. Nessa etapa, medições foram realizadas simultaneamente tanto no ambiente real quanto no modelo em escala, utilizando as mesmas refletâncias. No segundo momento, o mesmo ambiente foi simulado computacionalmente e realizada a verificação da relação entre os resultados obtidos com base no modelo em escala, no ambiente real e pela simulação computacional.

PROGAMAS E APARELHOS UTILIZADOS

A métrica selecionada para a avaliação do desempenho dos ambientes foi a Iluminância Melanópica Equivalente. Para sua estimativa, tanto no ambiente real quanto no modelo em escala, foi utilizado o espectrofotômetro MK350S Premium [13], fornecido pelo Laboratório de Conforto Ambiental – LabCon – da UFSC. Com dimensões de 8 cm de largura por 15 cm de comprimento e uma espessura de 3 cm, este aparelho possui um fotosensor de imagem linear CMOS localizado na parte frontal, permitindo medições na faixa de comprimento de onda de 380 a 780 nm. O aparelho oferece múltiplos parâmetros de medição, como iluminância, temperatura de cor correlata e espectro da luz. Além disso, fornece métricas relacionadas aos efeitos não visuais da luz (*Human Centric Lighting – HCL*). Baseado na Iluminância Melanópica Equivalente estabelecida por Lucas et al. (2014) e adotada pela certificação *WELL – International WELL Building Institute* – e pela *International Commission on Illumination* TN 003-2015 [14], o espectrofotômetro informa a quantidade fotométrica da luz que afetará o fotopigmento da melanopsina, no comprimento de onda de 480 nm, conhecido como lux melanópico. Apresenta também a razão entre a iluminância melanópica e a fotópica, bem como a iluminância de outros fotopigmentos da retina.

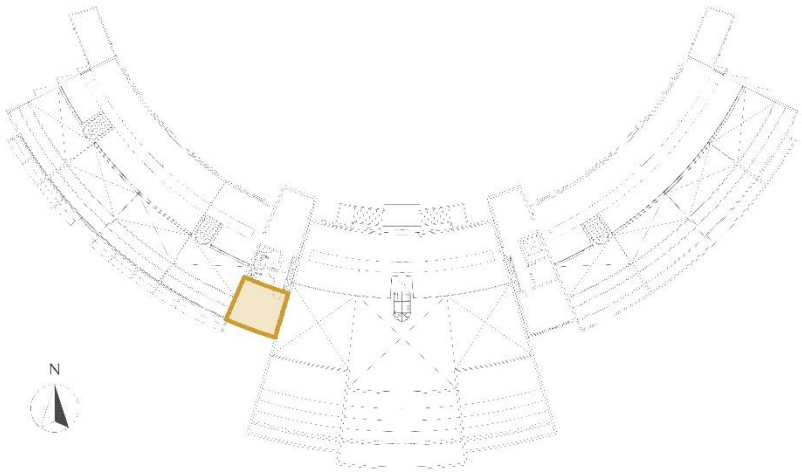
Para a simulação computacional, utilizou-se o programa ALFA (*Adaptive Lighting for Alertness*). Projetado para contornar a particularidade do sistema não visual, que apresenta sensibilidade a comprimentos de onda específicos da luz azul [15], expande o mecanismo de iluminação do Radiance, software base do ALFA, para possibilitar a renderização do ambiente em espectros compostos por 81 cores. Seu funcionamento ocorre através de uma interface incorporada ao ecossistema Rhinoceros 3D, caracterizando-se como um *plug-in*. Para realizar simulações precisas do céu diurno, o programa ALFA utiliza cálculos espectrais baseados em uma biblioteca de transferência radiativa denominada libRadtran. O programa oferece um catálogo de mais de 500 materiais espectrais medidos, derivados de medições espectrofotométricas de objetos arquitetônicos reais. A simulação fornece os resultados das métricas de alerta, conforto visual e iluminância do plano de trabalho. O ALFA utiliza a métrica espectral da Razão M/F, relação entre os valores de iluminância melanópica e fotópica, que passou a ser utilizada para avaliar as consequências da luz no impacto da saúde, relacionando o bem-estar e estados de relaxamento, sono ou alerta [16]. Para interpretar os resultados, considera-se o estado

de alerta quando a Razão M/F é maior que 0,9, o estado de relaxamento quando é menor que 0,35 e o estado neutro quando está entre 0,35 e 0,9.

PARÂMETROS ADOTADOS

O estudo de caso adota uma parte da sala onde se encontra o céu artificial, pertencente ao Laboratório de Conforto Ambiental – LabCon – do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, localizado na Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC, em Florianópolis. Na Figura 1 é indicada a posição da sala no edifício.

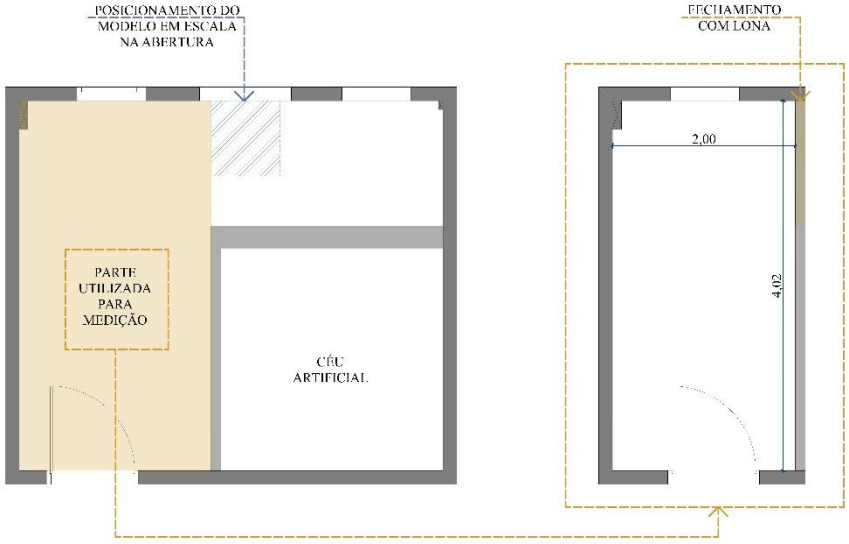
Figura 1: Planta baixa do quinto pavimento do prédio de Arquitetura e Urbanismo



Fonte: Planta baixa fornecida pelo Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia (DPAE).

Para facilitar a análise do comportamento luminoso utilizou-se apenas uma parte da sala, com somente uma abertura (Figura 2). Com largura de 2 m e comprimento de 4,02 m, e uma abertura frontal de 0,75 x 0,75 m e peitoril de 1 m, voltada para o sudoeste. O vão que dá acesso à outra parte do ambiente foi coberto por um tecido blecaute branco, com refletância semelhante às paredes. O mesmo tecido foi aplicado na parede correspondente da maquete. Na abertura ao lado, na outra parte da sala, posicionou-se o modelo em escala reduzida possibilitando medições simultâneas.

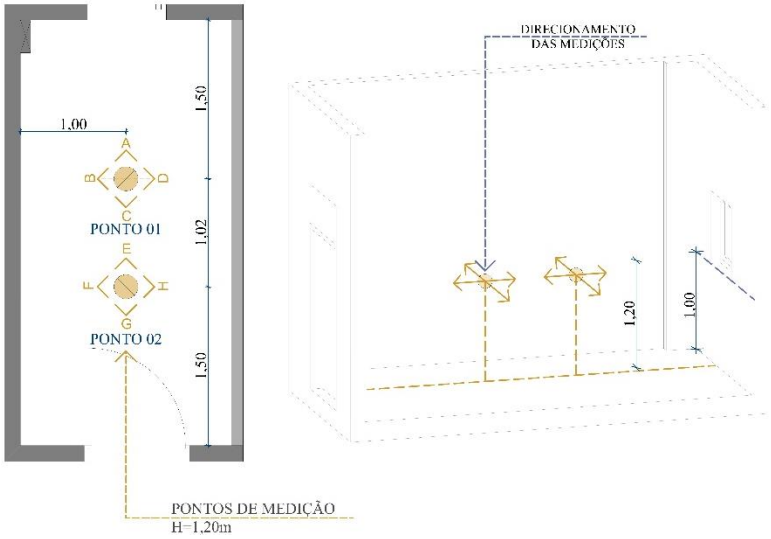
Figura 2: Planta da sala e posicionamento do modelo em escala reduzida



Fonte: [17]

Adotaram-se dois pontos de medição: um a 1,50 m da abertura e outro a 1,50 m da parede dos fundos, distribuídos a 1 m das paredes laterais. Cada um desses pontos possui quatro sentidos de medição: frente, fundos e as duas paredes laterais, correspondendo a possíveis direções do olhar de um usuário (Figura 3). A altura da medição foi estipulada a 1,20 m do piso, altura da visão de uma pessoa sentada conforme protocolo de medição estabelecido pela certificação *WELL* [18]. Em ambos, ambiente real e maquete em escala reduzida, foi utilizado um tripé para suporte do equipamento.

Figura 3: Pontos de medição no ambiente real e maquete em escala



Fonte: [17]

Através do uso de um luxímetro digital MLM-1011 Minipa [19][20], obteve-se um valor aproximado das refletâncias das paredes (Tabela 1). As refletâncias melanópicas foram determinadas utilizando o espectrofotômetro MK350S Premium [13].

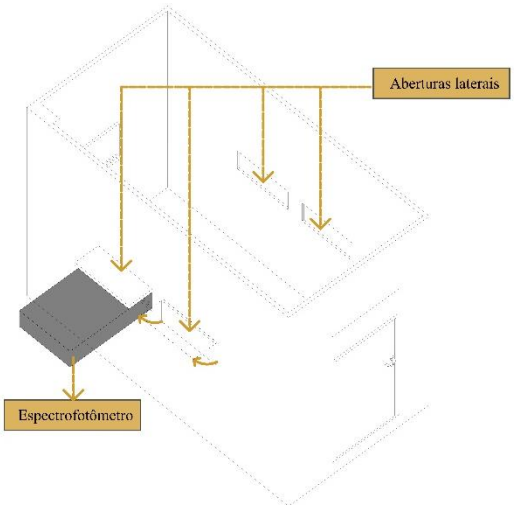
Tabela 1: Refletância Fotópica e Melanópica dos materiais presentes no estudo de caso

Superfície	Revestimento	Refletância Fotópica (ρf)	Refletância Melanópica (ρm)
Parede	Pintura Branca	60%	60%
Teto	Concreto Cinza	30%	25%
Piso	Porcelanato Bege	55%	50%

Fonte: [17]

A maquete em madeira balsa, na escala 1:10, representa o ambiente real, com as mesmas características reflexivas dos materiais indicados na Tabela 1. Para posicionar o sensor na mesma posição que no ambiente real foram feitas 4 aberturas na maquete, duas em cada uma das laterais. Tais aberturas foram fechadas quando não usadas durante a medição, de forma a diminuir o impacto das mesmas nos resultados (Figura 4).

Figura 4: Aberturas para encaixe do espectrofotômetro na maquete



Fonte: [17]

As medições foram realizadas com a janela aberta, pela dificuldade de replicar as características do vidro no modelo em escala reduzida. A iluminância do céu, bem como o seu espectro foram medidos no início e no fim de cada intervalo de medição (Tabela 2). Para minimizar a diferença entre os pontos de medição equivalentes de ambos os modelos primeiramente eram medidas as iluminâncias verticais fotópicas e melanópicas dos quatro pontos frontais do ambiente real para depois medir os quatro pontos frontais do modelo em escala reduzida. Posteriormente eram medidos os 4 pontos do fundo no ambiente real, e os correspondentes na maquete.

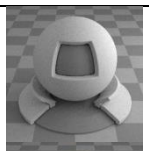
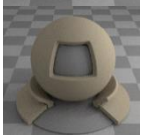
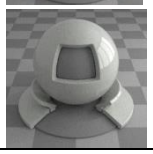
Tabela 2: Dados de medição adotados

Dia 14/07		Horário
Iluminância inicial	5193,5 lux	13:59
Iluminância final	1591 lux	13:51
Dia 21/07		Horário
Iluminância inicial	22063,7	09:30
Iluminância final	25705,6	11:30

Fonte: [17]

Para a simulação elencou-se materiais presentes no catálogo do ALFA (Tabela 3), como seria realizado por um profissional na etapa de projeto, com as informações similares de cada material do ambiente real. Considerando as iluminâncias de céu obtidas, o tipo de céu simulado para o dia 14 de julho foi o céu encoberto e céu claro no dia 21 de julho [14].

Tabela 3: Refletância Fotópica e Melanópica dos materiais adotados para a simulação

Superfície	Material		Refletância Fotópica (ρf)	Refletância Melanópica (ρm)
Parede		Macbeth Neutral 0.8	60,5%	60,2%
Teto		Rock 4	32,7%	27,6%
Piso		Stop Sign (White)	55,8%	55,1%

Fonte: a autora.

Com os dados levantados, utilizou-se o *software* R 4.2.1 para Windows [21] para análise de correlação através do pacote R Commander. Primeiramente, foi executado um diagrama de dispersão tanto para a iluminância fotópica quanto para a melanópica para cada uma das análises acima. Posteriormente, foi calculada a força da correlação através da Correlação Linear de Pearson [22], os parâmetros estabelecidos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Força da correlação linear de Pearson

Força da Correlação	Interpretação
0,9 a 1,00	Correlação muito forte
0,7 a 0,9	Correlação forte
0,5 a 0,7	Correlação moderada
0,3 a 0,5	Correlação baixa
0,0 a 0,3	Correlação desprezível

Fonte: [22]

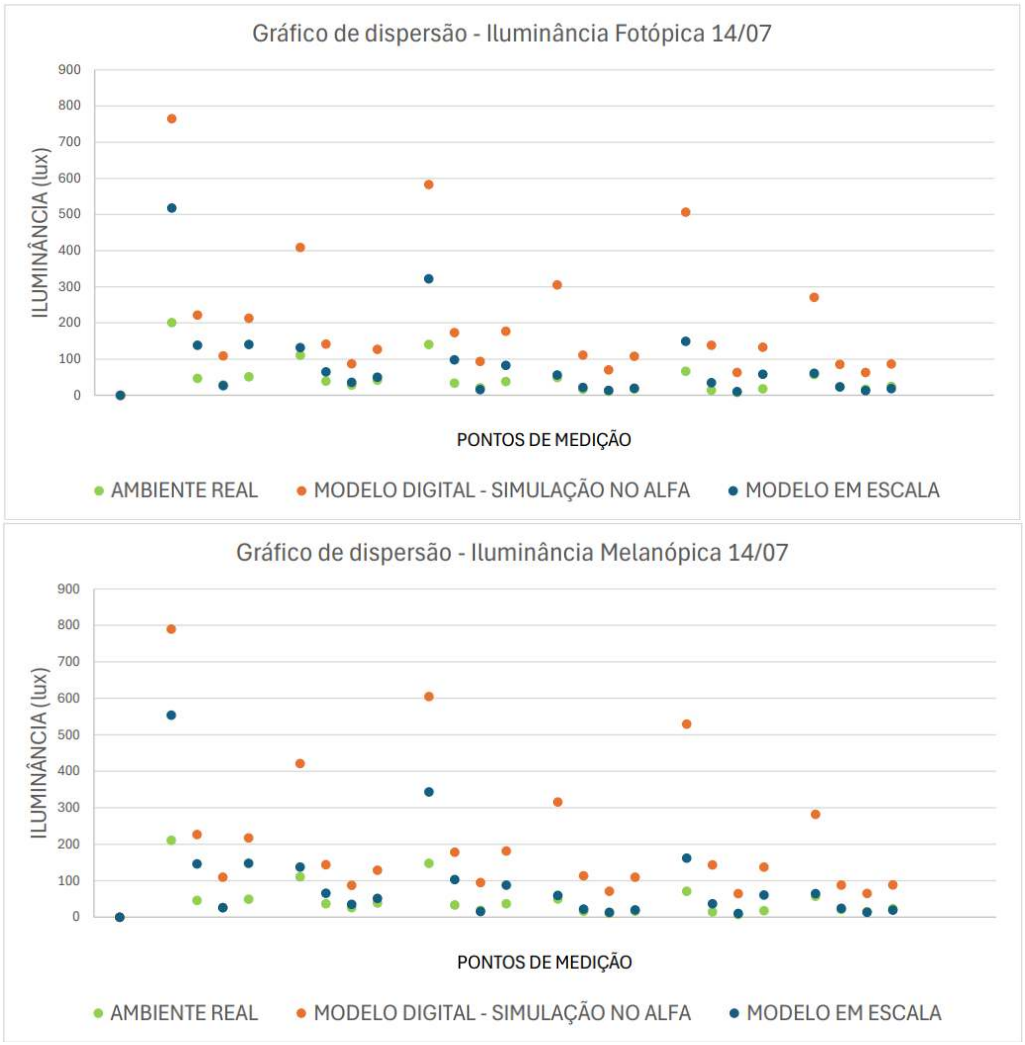
Foi utilizado o modelo de regressão linear simples para verificar o grau de confiabilidade da base de dados, através do coeficiente de determinação (R^2). Foram elaboradas as seguintes hipóteses:

H0 = não existe relação linear entre a iluminância;
H1 = existe relação linear entre a iluminância, ao nível de 5% de significância.

RESULTADOS

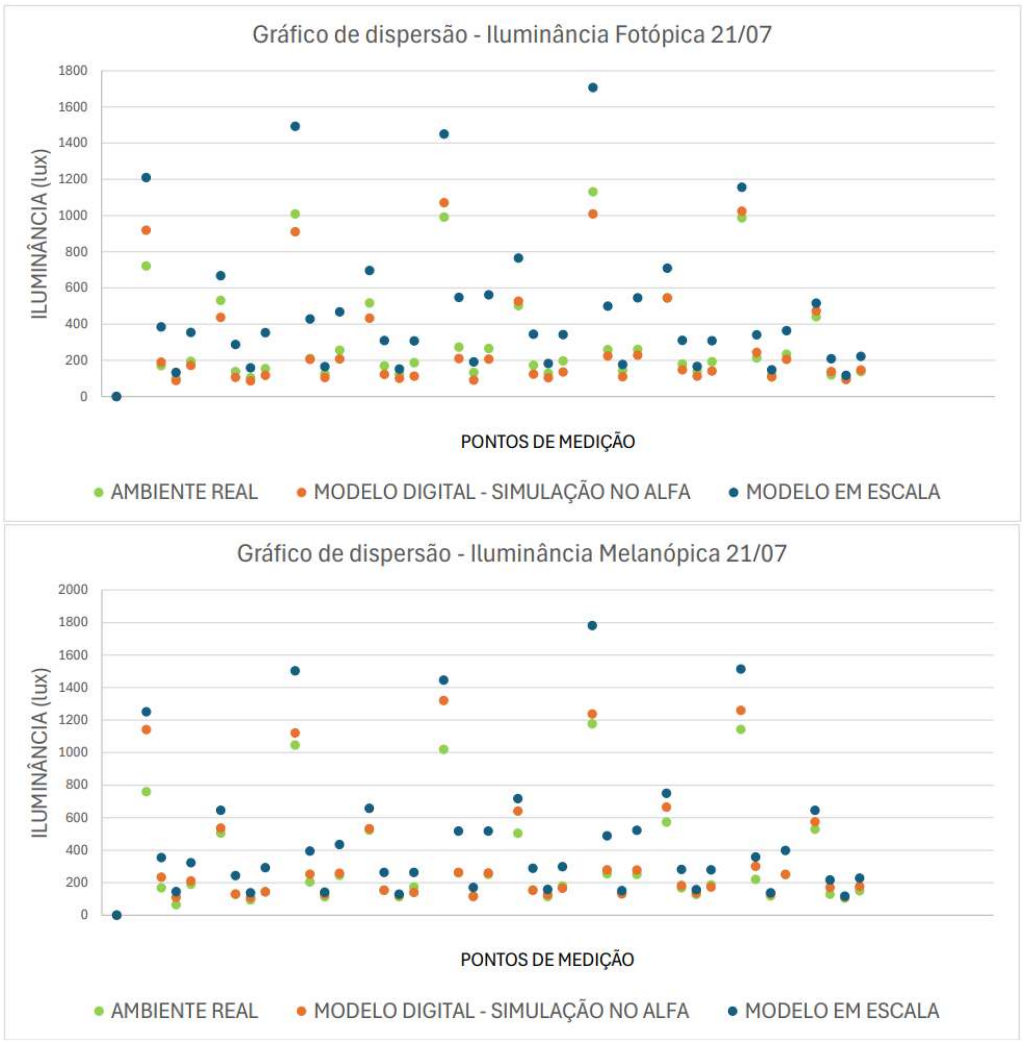
Graficamente, os valores de iluminância fotópica e melanópica obtidos no ambiente real, no modelo em escala e na simulação apresentam uma similaridade notável. Nas figuras 5 e 6, referentes aos dias 14 e 21 de julho, respectivamente, são apresentados os valores obtidos em todas as direções dos pontos de medição.

Figura 5: Gráfico de dispersão em 14 de julho



Fonte: a autora.

Figura 6: Gráfico de dispersão em 21 de julho

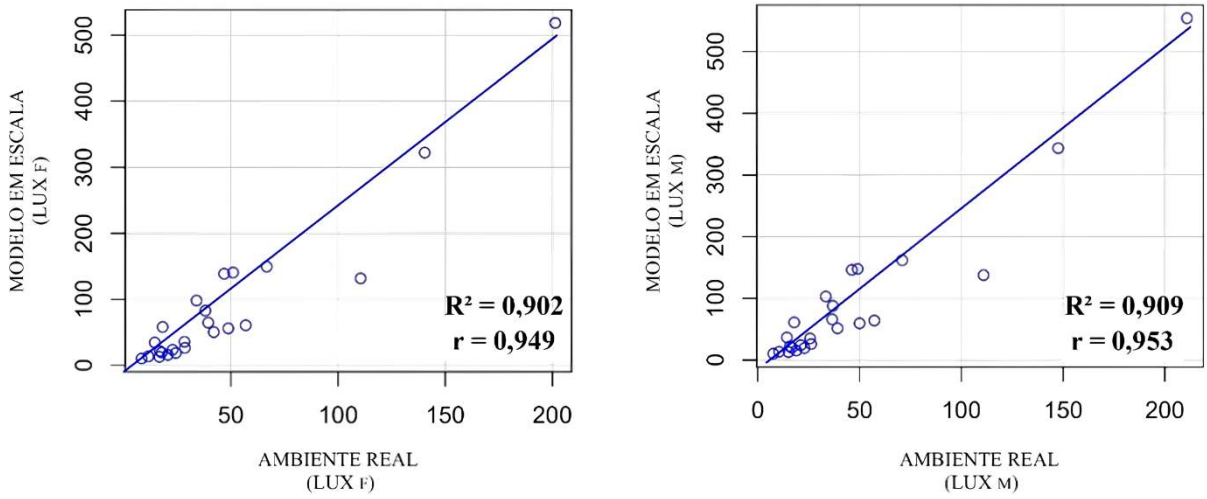


Fonte: a autora.

Os dados do dia 14 de julho mostram que, para ambas as iluminâncias, os valores mais altos foram obtidos por meio da simulação computacional (representados pelos pontos laranjas). Por outro lado, os valores registrados no ambiente real (pontos verdes) e no modelo em escala (pontos azuis) são mais próximos entre si na maioria dos pontos e direções avaliados. Já para os dados do dia 21 de julho, observa-se que o modelo em escala apresentou valores mais elevados para ambas as iluminâncias. Além disso, o modelo digital exibiu valores de iluminância mais alinhados com os do ambiente real. Essa correspondência pode ser explicada pela configuração do tipo de céu utilizada na simulação, que possivelmente conseguiu replicar com maior precisão as condições observadas nas medições realizadas in loco no dia 21 de julho, considerando as diferenças entre céu estático e real.

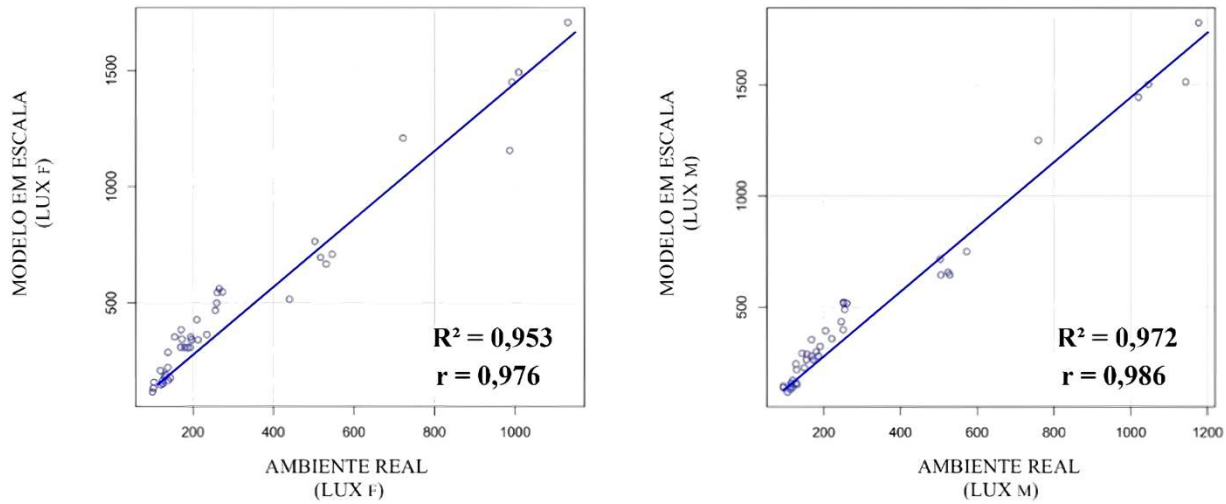
Os diagramas de dispersão e o índice de correlação entre o modelo em escala e o ambiente real para as iluminâncias fotópica (lux F) e melanópica (lux M), considerando os pontos de vista agrupados, estão representados nas Figuras 7 e 8.

Figura 7: Gráfico de dispersão para o dia 14/07



Fonte: [17]

Figura 8: Gráfico de dispersão para o dia 21/07

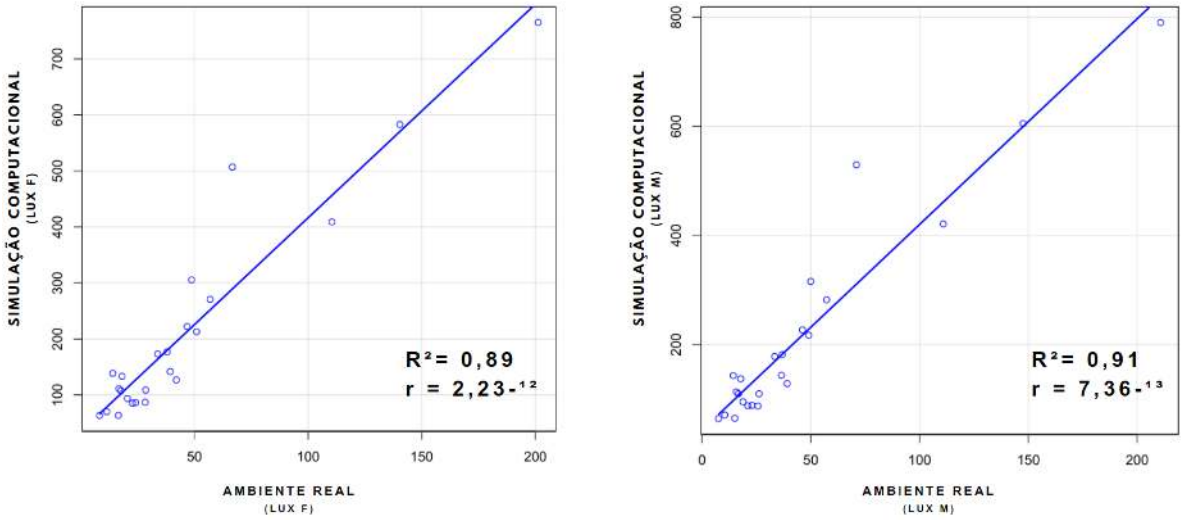


Fonte: [17]

Os valores do coeficiente de correlação (R^2) entre o ambiente real e o modelo em escala foram superiores a 0,9, o que indica uma correlação muito forte. Esses resultados reforçam a confiabilidade do uso de modelos em escala para estimativas de iluminância. A elevada correlação justifica a rejeição da hipótese nula (H0), evidenciando que as variações de iluminância no modelo em escala refletem as do ambiente real.

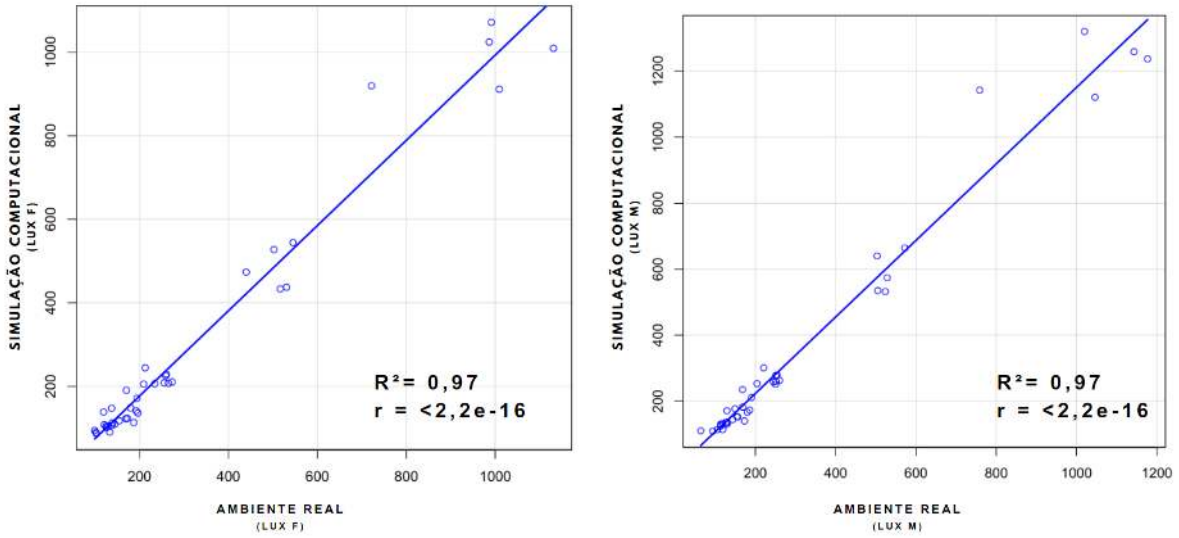
Os diagramas de dispersão e os índices de correlação entre os dados de simulação computacional e os do ambiente real, tanto para a iluminância fotópica (lux F) quanto para a melanópica (lux M), estão apresentados nas Figuras 9 e 10. Esses diagramas demonstram a consistência dos resultados ao comparar simulação e medições reais, considerando todos os pontos de vista agrupados.

Figura 9: Gráfico de dispersão para o dia 14/07



Fonte: a autora.

Figura 10: Gráfico de dispersão para o dia 21/07



Fonte: a autora.

Com exceção do coeficiente de correlação (R^2) para a iluminância fotópica no dia 14 de julho, que apresentou um valor de 0,89 (indicando uma correlação forte), os coeficientes de correlação entre o ambiente real e a simulação computacional foram superiores a 0,9, demonstrando uma correlação muito forte. Similarmente aos dados obtidos no modelo em escala, a correlação da simulação com o ambiente real não atingiu o nível de significância de 95%. No entanto, a elevada correlação sugere que os modelos simulados podem replicar as condições lumínicas observadas no ambiente real.

Os valores de correlação para ambas as iluminâncias, melanópica e fotópica, foram superiores no dia 21 de julho. Essa diferença pode ser atribuída ao maior número de pontos de medição, com 40 pontos avaliados no dia 21 em comparação a 24 pontos no dia 14, além da possível melhor representação das condições de céu no dia 21.

Ao realizar a análise de regressão linear (r) das correlações entre o ambiente real e a maquete, e entre o ambiente real e a simulação computacional, para os dias analisados separadamente, observa-se que, em ambos os casos, a hipótese nula (H0) foi rejeitada ao nível de significância de 5%. Isso confirma a existência de uma relação linear significativa tanto entre a iluminância medida na maquete e no ambiente real quanto entre a simulação computacional e o ambiente real. No entanto, observou-se que o valor de r para a correlação entre o ambiente real e a simulação computacional foi inferior ao valor de r para a correlação entre o ambiente real e a maquete física. Esse resultado sugere uma maior correspondência linear entre o modelo digital e o ambiente real.

Os dados não apresentam distribuição normal e devem ser tratados de forma não paramétrica. Um dos motivos para tal comportamento pode ser a grande diferença entre a iluminância dos pontos voltados para a janela em relação aos pontos laterais e de fundos.

CONCLUSÕES

Conclui-se que há uma correlação de forte a muito forte entre os valores obtidos no ambiente real e modelo digital, e ambiente real e modelo em escala. A análise conjunta dos coeficientes de correlação e dos diagramas de dispersão sugere que tanto os modelos em escala quanto as simulações computacionais são métodos eficazes para prever a distribuição de iluminância melanópica e fotópica. Embora as magnitudes das correlações variem, as linhas de tendência dos resultados demonstram um comportamento similar entre a maquete, a simulação computacional e o ambiente real. Os resultados indicam que é possível realizar estudos representativos utilizando o modelo em escala e o modelo digital através do programa ALFA.

Embora a maquete apresente valores de iluminância relativamente maiores do que o ambiente real, ela continua sendo representativa deste. A simulação computacional mostrou-se ainda mais representativa, apresentando valores de r significativamente inferiores em comparação com a correlação entre o ambiente real e a maquete, indicando uma maior relação linear entre o modelo digital e o ambiente real. A diferença na iluminância dos pontos voltados para a janela em relação aos pontos laterais e de fundo influencia a análise de correlação entre os valores obtidos, sendo indicada uma análise de regressão linear para cada um dos pontos de medição, com os dias agrupados, para uma análise mais detalhada. Deve-se considerar ainda que o programa apresenta restrições quanto ao tipo de céu, distinguindo entre céu estático e real.

Assim, tanto o modelo em escala quanto a simulação computacional podem ser instrumentos eficazes para a avaliação da iluminância melanópica e fotópica, auxiliando os arquitetos a considerarem a iluminação circadiana em suas análises. Vale ressaltar que apenas um ambiente foi utilizado no estudo, sendo necessária uma análise mais abrangente em outros estudos de caso, com diferentes texturas, tamanhos de abertura e revestimentos, para uma compreensão mais completa da correlação entre o ambiente real, o modelo em escala e a simulação computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS

[1] BERSON, David M; DUNN, Felice A; TAKAO, Motoharu. **Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock**. Science, 2002. DOI: 10.1126/science.1067262.

[2] THE NOBEL PRIZE. Press Release. Disponível em: https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2017/press-release/. Acesso em: 20 de fevereiro de 2022

[3] POTOČNIK, J.; KOŠIR, M. Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office. **Building and Environment**, v. 171, 15, 2020.

[4] KIM; CHOI; SUNG. Accuracy evaluation of a calculation tool based on the spectral colour property of indoor luminous environments. **Building and Environment**, v. 139, 2018, p. 157-169, ISSN 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.028.

[5] DAI; HUANG, HAO; LIN; CHEN. Spatial and spectral illumination design for energy-efficient circadian lighting. **Building and Environment**, v. 146, 2018, p. 216-225, ISSN 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.004.

[6] KONIS, Kyle. A circadian design assist tool to evaluate daylight access in buildings for human biological lighting needs. **Solar Energy**, v. 191, 2019, p. 449-458, ISSN 0038-092X. DOI: 10.1016/j.solener.2019.09.020.

[7] FIGUEIRO M; NAGARE R; PRICE L. Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness. **Lighting Research & Technology**, v. 50, n. 1, p. 38–62, 2018. DOI:10.1177/1477153517721598.

[8] CHAVES, Nathali Pimentel; MARTAU, Betina Tschiedel. Repensando o Projeto de Iluminação: avaliação de métricas de luz circadiana. **VI Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído**, 2019. DOI:10.14393/sbqp19050.

[9] WELL. Circadian Lighting Design. V2, 2023. Disponível em:<https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/light/feature/3>. Acesso em: 07 de junho 2022.

[10] 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.

[11] CASTAÑO, Alexander González. **Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para estudos de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida**. 2007. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

[12] PEREIRA, F. O. R. P.; CASTAÑO, A. G. Quão confiáveis podem ser os modelos físicos em escala reduzida para avaliar a iluminação natural em edifícios? How reliable are small-scale physical models in the evaluation of daylight in buildings?. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 131–147, 2012a.

[13] UPRTEK. United Power Research and Technology. **Espectrofotometro MK350S Premium**. Taiwan, 2010.

[14] CIE, 20015. CIE TN003:2015. **Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry**, 2013. Vienna: CIE.

[15] SOLEMMA. **ALFA video**, 2022. Disponível em: https://www.solemma.com/alfa/#ALFAvideo. Acesso em: 18 de novembro de 2022.

[16] MILLER, N.J.; IRVIN, A.L. M/P ratios – Can we agree on how to calculate them? **IES: Illuminating Engineering Society**, [S.I.], 2019. Disponível em: https://bit.ly/2RmXqIF. Acesso em: 15 de julho de 2022.

[17] FRANÇA, Suelem Schier de. **Influência da componente refletida da luz natural na iluminação circadiana**. 2024. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

[18] IWBI. **International Workshop on Bioimaging**. 2019. Yoto Campus, Utsunomiya University.

[19] FONTOYNONT, M. (Ed.). **Daylight Performance of Buildings** (1st ed.). Routledge. 1999.

[20] CARTANA, Rafael Prado. **Desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar para fachadas desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.

[21] R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2022.

[22] MUKAKA, M. M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**. 2012.