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

Impacto da temperatura de cor correlata nas percepções térmicas e visuais: Estudo de caso em câmara climática

Impact of correlated color temperature on thermal and visual perceptions: A case study in a climatic chamber

Natasha Hansen Gapski
UFSC | Florianópolis | Brasil | natasha.gapski@gmail.com
Brenda da Costa Loeser
UFSC | Florianópolis | Brasil | brenda.costa.loeser@gmail.com
Mateus Bavaresco
UFSC | Florianópolis | Brasil | bavarescomateus@gmail.com
Liége Garlet
UFSC | Florianópolis | Brasil | liegegarlet@gmail.com
Ana Paula Melo
UFSC | Florianópolis | Brasil | a.p.melo@ufsc.br
Roberto Lamberts
UFSC | Florianópolis | Brasil | roberto.lamberts@ufsc.br

Resumo

Este estudo avaliou a relação entre a temperatura de cor correlata (TCC) da iluminação e a percepção térmica humana, assim como a relação entre a temperatura do ar e a percepção visual em ocupantes de ambientes internos. O experimento foi conduzido em uma câmara climática, utilizando o protocolo internacional do projeto Round Robin Test Rooms com o objetivo de testar a hipótese *Hue Heat*, que sugere que um ambiente com luz quente causaria sensação de calor. Os participantes foram expostos a três condições de iluminação com diferentes temperaturas de cor correlata (quente – 2850 K, neutra – 3928 K, e fria – 5688 K) durante um período de 30 minutos em cada condição. O experimento foi repetido com diferentes temperaturas do ar (20, 26 e 28°C), durante o qual foram aplicados questionários de conforto, aceitabilidade e percepção térmica e visual. Os resultados, analisados com o método qui-quadrado, indicaram a não observância de diferenças estatísticas significativas entre a temperatura do ar e a percepção visual, nem entre a temperatura de cor correlata da iluminação e a resposta térmica dos ocupantes. O trabalho desenvolvido colabora com os estudos dos fatores que influenciam relações entre os múltiplos domínios do conforto ambiental.

Palavras-chave: Conforto humano. Ambiente térmico. Ambiente lumínico. Multi-domínio

Como citar:
GAPSKI, n. h. Impacto da temperatura de cor correlata nas percepções térmicas e visuais: Estudo de caso em câmara climática. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

This study aims to evaluate the relationship between the correlated color temperature (CCT) of lighting and human thermal perception, as well as the relationship between air temperature and visual perception in occupants of indoor environments. The experiment was conducted in a climatic chamber, using the international protocol of the Round Robin Test Rooms project to test the Hue Heat hypothesis, which suggests that an environment with red light causes a sensation of warmth. Participants were exposed to three lighting conditions with different correlated color temperatures (reddish - 2850 K, yellowish - 3928 K, and bluish – 5688 K) for 30 minutes in each condition. The experiment was repeated with different air temperatures (20, 26, and 28°C). During the experiment, participants answered comfort, acceptability, and thermal and visual perception questionnaires. The results, analyzed with the chi-square method, indicated that no statistically significant differences were observed between air temperature and visual perception, nor between the correlated color temperature of the lighting and the thermal response of the occupants. This work contributes to the studies of the factors that influence the relationships between the multiple domains of environmental comfort.

Keywords: Human Comfort. Thermal environment. Luminous environment. Multi-domain.

INTRODUÇÃO

Garantir a combinação do conforto térmico e lumínico é essencial para promover a saúde, a produtividade e o bem-estar geral das pessoas em diversos ambientes. A pesquisa no campo da percepção ambiental em ambientes internos tem se concentrado predominantemente na análise de estímulos individuais de forma isolada, negligenciando a interação entre diferentes domínios. Schweiker *et al.* [1] revisaram 219 artigos que abordaram pelo menos dois domínios, entre térmico, acústico, visual e qualidade do ar. Eles constataram que, de maneira geral, os resultados das pesquisas são frequentemente inconclusivos, destacando a necessidade de mensurar a interrelação entre domínios e de identificar as variáveis que têm mais peso na percepção de conforto ambiental geral.

Nesse contexto, a influência das propriedades visuais na percepção térmica tem recebido considerável atenção na literatura científica. A hipótese *Hue Heat* sugere que a temperatura percebida por um indivíduo pode ser influenciada pela cor da iluminação ambiente [2]. Segundo esta, as cores com comprimentos de onda mais curtos, como azul e verde, se relacionam com uma percepção de frio, enquanto as tonalidades com comprimentos de onda mais longos, como vermelho e laranja, com uma percepção de calor. A temperatura de cor correlata (TCC) é uma medida usada para descrever a cor de uma fonte de luz em comparação com a cor de uma fonte ideal, que emite uma única temperatura de cor sem variações na sua distribuição espectral.

Pigliautile *et al.* [3] observaram que a luz azulada gerou a percepção de ambiente térmico mais fresco em condições neutras de temperatura, enquanto Winzen, Albers e Marggraf-Micheel [4] constataram que a luz amarelada fazia com que a temperatura do ambiente fosse percebida como mais quente em cabines de aviões.

Por outro lado, Luo *et al.* [5,6] realizaram diferentes experimentos com exposição prolongada a temperaturas de cor (TCC) de 2700 K (quente) e 5700 K (fria). Eles

constataram que a iluminação fria aumentou o conforto térmico, a atenção e o desempenho cognitivo dos participantes [5]. Em um experimento em que os participantes, depois de 70 minutos de exposição à iluminação com TCC fria ou quente, tiveram controle da iluminação, estes notaram o aumento do conforto visual, entretanto, isso não impactou no conforto térmico [6]. Baniya *et al.* [7] também não encontraram evidências para a hipótese *Hue Heat* em seu experimento onde os participantes responderam a questionários após 10 minutos de adaptação em condições de TCC de 2700 K, 4000 K e 6200 K. Segundo Fanger, Breum e Jerking [8], o impacto da cor na percepção térmica é muito pequeno.

Este estudo visa contribuir na discussão da relação entre o domínio visual e térmico testando, empiricamente, a hipótese *Hue Heat*. O objetivo deste trabalho é avaliar a interação entre a TCC e a percepção térmica em um ambiente controlado, bem como se a percepção visual varia com a temperatura do ar.

MÉTODO

O método deste trabalho foi baseado na aplicação de um protocolo desenvolvido para o projeto Round Robin Test Rooms, elaborado em cooperação com outras universidades e integrando atividades previstas na *Subtask* 1 do *Annex* 79 "*Occupant-Centric Building Design and Operation*" (https://annex79.iea-ebc.org/). Nesta seção, apresenta-se a caracterização do ambiente térmico e visual da câmara climática e a apresentação do protocolo de experimento seguido.

CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE

O experimento foi conduzido na câmara climática TR4CS (Test Room for Comfort Studies), em Florianópolis – SC. A câmara possui 9,72 m² de área e foi configurada como um ambiente de trabalho, composto por um conjunto de mesa e cadeira de escritório. O ambiente térmico foi mantido a uma condição térmica estável durante o experimento. Três diferentes *setpoints* de temperatura foram utilizados: no verão, 28 °C; no inverno, 20 e 26 °C. Estas temperaturas foram estabelecidas para representar um ambiente levemente quente no verão (28 °C) e no inverno (26 °C) e levemente frio no inverno (20 °C).

As variáveis ambientais térmicas compostas pela temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperatura de globo, foram monitoradas durante todo o experimento de minuto em minuto com equipamentos localizados próximos ao participante. Os equipamentos utilizados para esse monitoramento incluem um confortímetro SENSU, e outro da Testo 400. Durante todos os testes considerados neste estudo, a temperatura do ar teve variação menor que 1,5 °C do *setpoint* definido no experimento; a temperatura radiante média se manteve próxima da temperatura do ar, e os participantes estiveram expostos à mesma velocidade do ar.

Em relação às condições de iluminação, foram testadas três condições: fria, neutra e quente. Cada uma das condições foi atendida pela configuração das luminárias de LED da sala em condições pré-definidas. A Tabela 1 apresenta a temperatura de cor

correlata e a iluminância no plano de trabalho horizontal (0,75 m) e plano vertical (1,20 m), medidos com o espectroradiômetro MS-720 EKO em cada condição de iluminação aferida.

Tabela 1: Parâmetros assumidos para cada condição de iluminação

	Iluminação		
Parâmetro	Fria	Neutra	Quente
Iluminância no plano de trabalho (horizontal) [lux]	509	499	486
Iluminância à altura do plano de visão (vertical a 120 cm) [lux]	337	342	328
TCC no plano de trabalho (horizontal) [K]	5688	3928	2850
TCC à altura do plano de visão (vertical a 120 cm) [K]	5502	3850	2826

Fonte: os autores.

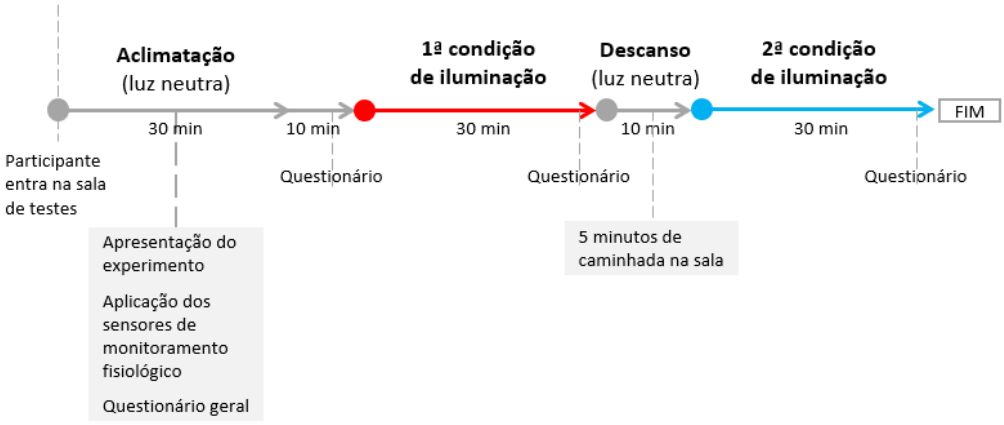
PROTOCOLO DE EXPERIMENTO

Os experimentos de verão ocorreram nos meses de março e abril de 2023, e os de inverno ocorreram entre julho e agosto. Os participantes foram orientados a vestir roupas pré-definidas, garantindo um valor de isolamento térmico semelhante. No verão, a vestimenta estipulada considerou: calça comprida, camiseta, meia e tênis, somando aproximadamente 0,5 clo. No inverno, estipulou-se o uso de calça comprida, camiseta, meias, tênis e casaco grosso, somando aproximadamente 1 clo. Durante o experimento, os participantes puderam realizar atividades leves, mantendo-se sentados e sem acesso a telas (celular, computador), a fim de não influenciar ou sobrepor efeitos às condições de iluminação pré-definidas.

O experimento teve uma duração de 110 minutos, no qual as condições térmicas são mantidas fixas, enquanto as condições de iluminação variaram, conforme o esquema da Figura 1. Cada participante realizou o teste duas vezes em dias diferentes, com pelo menos um dia de intervalo entre as sessões. O experimento ocorreu sempre no período matutino, a fim de manter o mesmo ritmo circadiano. O experimento é dividido em três etapas: aclimatação sob luz neutra (40 minutos), primeira fase do teste (30 minutos), período de descanso e recuperação do metabolismo com luz neutra (10 minutos) e segunda fase do teste (30 minutos). Nas primeira e segunda fases do teste, os participantes foram expostos à iluminação quente ou fria, em ordem aleatória. Após cada fase de exposição à luz, os participantes responderam a um questionário aplicado oralmente sobre conforto e percepção térmica e visual.

O questionário aplicado aos participantes contou com 28 perguntas, das quais 10 são questões antropométricas, 6 sobre comportamento e hábitos, e 12 sobre a percepção ambiental. As questões relacionadas à percepção térmica e visual da sala são apresentadas integralmente no Anexo A. Ressalta-se que o questionário foi aprovado pelo comitê de ética da Universidade Federal de Santa Catarina. O perfil demográfico dos participantes é apresentado na Tabela 2. Buscou-se equilibrar participantes do gênero feminino e masculino em cada rodada de experimento. Os mesmos participantes foram convidados a participar nos experimentos de verão e inverno.

Figura 1: Procedimento do experimento



Fonte: os autores.

Tabela 2: Perfil demográfico dos participantes em cada condição de temperatura do ar

	Feminino	Masculino	Faixa de idade (anos)	Faixa de altura (m)	Faixa de peso (kg)
Verão (28 °C)	12	8	21 - 37	1,54 - 1,89	48 - 92
Inverno (20 °C)	14	15	20 - 35	1,54 - 1,92	48 - 92
Inverno (26 °C)	14	15	20 - 35	1,54 - 1,92	48 - 92

Fonte: os autores.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A interferência do ambiente térmico foi avaliada pelas respostas dos participantes em cada condição de luz e temperatura do ar. O método utilizado para avaliar a existência de diferença estatística entre as respostas foi o qui-quadrado. O teste qui-quadrado é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar a associação entre variáveis categóricas em uma amostra de dados. Ele compara a frequência observada de ocorrências em diferentes categorias com a frequência esperada, assumindo que não há associação entre as variáveis. No caso do teste qui-quadrado, o p-valor é a probabilidade de observar uma estatística igual ou mais extrema do que a observada. Foi assumido um nível de significância de 0,1, dado o tamanho da amostra e o contexto da pesquisa.

Foram feitas duas avaliações:

1. Se existe influência da temperatura de cor correlata nas respostas de sensação, conforto, preferência e aceitabilidade térmica dos participantes;
2. Se existe influência da temperatura do ar nas respostas de percepção, conforto, preferência e aceitabilidade visual dos participantes.

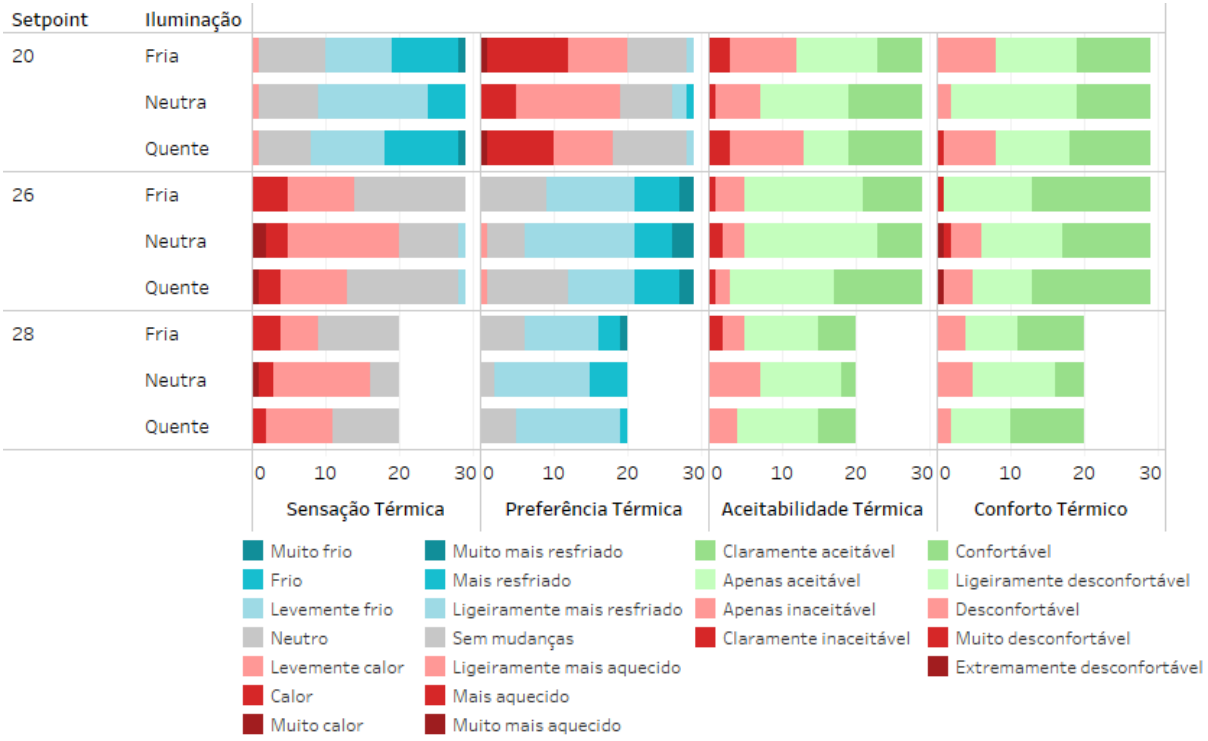
Na primeira situação, a variável independente é a TCC, analisando se as respostas térmicas para as três condições de iluminação apresentaram distribuições diferentes para cada *setpoint* de temperatura testado. Na segunda situação, a variável independente é a temperatura do ar, examinando se as respostas visuais para os três *setpoints* de temperatura apresentaram distribuições diferentes para cada tipo de iluminação.

RESULTADOS

INFLUÊNCIA DA TCC NA PERCEPÇÃO TÉRMICA

A Figura 2 mostra a frequência de respostas de percepção térmica em relação ao *setpoint* de temperatura do ar e à temperatura de cor da iluminação. Observa-se uma diferença nos votos conforme o *setpoint*, como era esperado, devido à alteração do ambiente térmico. Entretanto, a diferença entre os tipos de iluminação é menos evidente.

Figura 2: Respostas de sensação, preferência, aceitabilidade e conforto térmico em cada condição de *setpoint* e iluminação



Fonte: os autores.

A Tabela 3 apresenta os valores do p-valor do teste qui-quadrado calculados para cada tipo de resposta (sensação, conforto, preferência e aceitabilidade) em cada *setpoint*. Este valor, apresentando-se menor que 0,1, indica que existe diferença estatística nas respostas com diferentes condições de iluminação. Observa-se que em nenhum dos tipos de resposta e *setpoints* o p-valor foi menor do que 0,1. Portanto, não há diferença estatística entre as respostas segundo a condição de TCC.

Este resultado indica que a temperatura de cor correlata da iluminação não teve efeito cruzado com o conforto térmico. Os participantes tiveram o mesmo padrão de percepções térmicas independente da iluminação da sala de testes. Neste sentido, para esta configuração de experimento, rejeita-se a hipótese *Hue Heat* testada.

Tabela 3: p-valor da diferença de distribuição de respostas de conforto térmico segundo o *setpoint* de temperatura

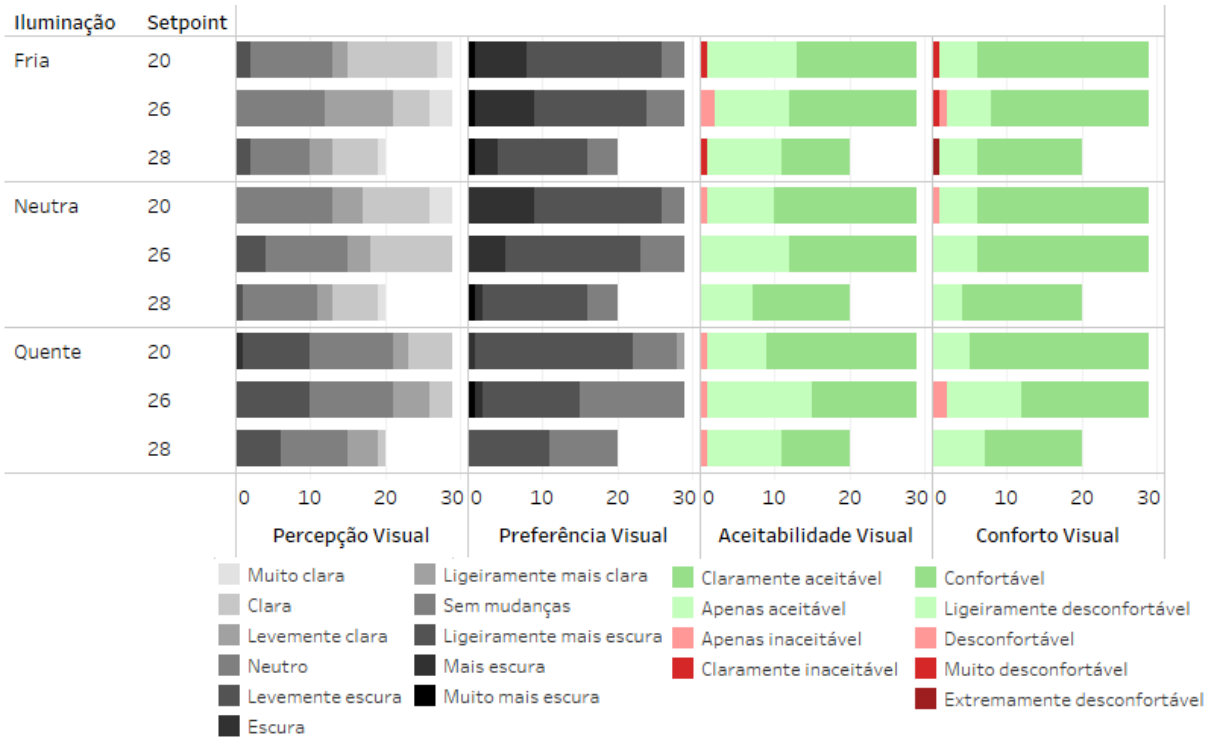
	Sensação térmica	Conforto térmico	Preferência térmica	Aceitabilidade térmica
setpoint 20 °C	0,78	0,24	0,56	0,48
setpoint 26 °C	0,39	0,48	0,74	0,70
setpoint 28 °C	0,13	0,29	0,29	0,28

Fonte: os autores.

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR NA PERCEPÇÃO VISUAL

Na Figura 3, observa-se que o padrão de distribuição das respostas é semelhante independentemente do *setpoint* de temperatura. Porém, como esperado, percepções e preferências visuais variam conforme a condição de iluminação. Por exemplo, alguns participantes perceberam a luz quente como levemente escura, enquanto a luz fria recebeu mais votos como levemente clara e clara. Na preferência visual, essa percepção é confirmada pelo maior número de votos em "mais escura" para a luz fria. Já a variação das respostas em relação ao *setpoint* de temperatura não é evidente.

Figura 3: Respostas de percepção, preferência, aceitabilidade e conforto visual em cada condição de iluminação e *setpoint*



Fonte: os autores.

A Tabela 4 apresenta os valores calculados do p-valor do teste qui-quadrado para cada condição de iluminação e resposta visual. Nota-se que nenhum p-valor foi menor do que 0,1, o que caracterizaria uma diferença estatística entre as respostas conforme o *setpoint* de temperatura. Este resultado indica que não há diferença nas respostas visuais influenciadas pela temperatura do ar. A resposta visual é independente da

temperatura do ar para as condições térmicas avaliadas em que a temperatura do ar variou entre 20 °C, 26 °C e 28 °C.

Tabela 4: p-valor da diferença de distribuição de respostas de conforto visual segundo a TCC

	Percepção visual	Conforto visual	Preferência visual	Aceitabilidade visual
fria (≈5600 K)	0,21	0,67	0,92	0,45
neutra (≈3900 K)	0,40	0,77	0,20	0,69
quente (≈2850 K)	0,62	0,16	0,31	0,44

Fonte: os autores.

CONCLUSÃO

A influência das propriedades visuais na percepção térmica tem recebido considerável atenção na literatura. Este estudo teve como principal objetivo avaliar empiricamente a hipótese *Hue Heat*, que sugere que a cor da iluminação do ambiente pode influenciar a percepção de temperatura. Foi examinada também a possibilidade de a percepção visual dos participantes variar de acordo com a temperatura do ar. O protocolo de experimento foi elaborado em uma colaboração internacional entre universidades no projeto Round Robin Test Rooms. Destaca-se que os resultados neste trabalho apresentados se limitam ao experimento conduzido no Brasil entre março e agosto de 2023.

Baseado em 234 respostas válidas para cada pergunta, constatou-se que a temperatura de cor correlata (TCC) da iluminação não influenciou os votos de percepção térmica, e a temperatura do ar não influenciou a percepção visual dos participantes avaliados. Assim, rejeita-se a hipótese *Hue Heat* testada, indicando que, para esta configuração experimental, a iluminação não teve um efeito cruzado com o conforto térmico. Essas conclusões contribuem para a compreensão dos elementos que influenciam o conforto ambiental e como os diferentes domínios (visual e térmico) interagem entre si.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), e da Saint-Gobain Brasil.

REFERÊNCIAS

[1] SCHWEIKER, M. *et al.* Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour. **Building and Environment**, v. 176, p. 106804, 1 jun. 2020. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106804.

[2] BENNETT, C. A.; REY, P. What's So Hot about Red? **Human Factors**, v. 14, n. 2, p. 149–154, 1 abr. 1972. C.A. https://doi.org/10.1177/001872087201400204.

[3] PIGLIAUTILE, I. *et al.* **Decoding human perception for building indoor environmental comfort**: Testing the Hue-Heat-Hypothesis via physiological and psychological response analysis. E3S Web of Conferences, v. 396, p. 01029, 2023.I. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339601029.

[4] WINZEN, J.; ALBERS, F.; MARGGRAF-MICHEEL, C. The influence of coloured light in the aircraft cabin on passenger thermal comfort. **Lighting Research & Technology**, v. 46, n. 4, p. 465–475, 1 ago. 2014. https://doi.org/10.1177/1477153513484028.

[5] LUO, W. *et al*. Personal control of correlated color temperature of light: Effects on thermal comfort, visual comfort, and cognitive performance. **Building and Environment**, v. 238, p. 110380, 15 jun. 2023. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110380.

[6] LUO, W. *et al.* Effects of correlated color temperature of light on thermal comfort, thermophysiology and cognitive performance. **Building and Environment**, v. 231, p. 109944, 1 mar. 2023. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109944.

[7] BANIYA, R. R. *et al.* The effect of correlated colour temperature of lighting on thermal sensation and thermal comfort in a simulated indoor workplace. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 3, p. 308–316, 1 mar. 2018. https://doi.org/10.1177/1420326X16673214.

[8] FANGER, P. O.; BREUM, N. O.; JERKING, E. Can Colour and Noise Influence Man's Thermal Comfort? **Ergonomics**, v. 20, n. 1, p. 11–18, 1 jan. 1977. https://doi.org/10.1080/00140137708931596.

ANEXO A

QUESTIONÁRIO DE PERCEPÇÃO

4.1. Como você se sente nesse momento?

(1) Com muito frio; (2) Com frio; (3) Levemente com frio; (4) Neutro; (5) Levemente com calor; (6) Com calor; (7) Com muito calor

4.2. Você considera essa sensação...?

(1) Confortável; (2) Ligeiramente desconfortável; (3) Desconfortável; (4) Muito desconfortável; (5) Extremamente desconfortável

4.3. Neste momento, como você preferiria estar se sentindo?

(1) Muito mais resfriado; (2) Mais resfriado; (3) Ligeiramente resfriado; (4) Sem mudança; (5) Ligeiramente mais aquecido; (6) Mais aquecido; (7) Muito aquecido

4.7. Neste momento, você considera este ambiente térmico...?

(1) Claramente aceitável; (2) Apenas aceitável; (3) Apenas inaceitável; (4) Claramente inaceitável

4.8. Neste momento, você considera que esta sala...?

(1) Muito escura; (2) Escura; (3) Levemente escura; (4) Neutro; (5) Levemente clara; (6) Clara; (7) Muito clara

4.9. Você considera essa sensação...?

(1) Confortável; (2) Ligeiramente desconfortável; (3) Desconfortável; (4) Muito desconfortável; (5) Extremamente desconfortável

4.10. Neste momento, como você preferiria que esta sala estivesse?

(1) Muito mais escura; (2) Ligeiramente mais escura; (3) Sem mudanças; (4) Ligeiramente mais clara; (5) Mais clara

4.11. Neste momento, você considera este ambiente visual...?

(1) Claramente aceitável; (2) Apenas aceitável; (3) Apenas inaceitável; (4) Claramente inaceitável