

AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM SALAS DE AULA UTILIZANDO TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Guilherme Lisbôa Silveira¹ (IC), Marcelo de Paula Corrêa (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Equilíbrio térmico. Modelo PET. Temperatura.

Introdução

O ser humano, assim como todos os seres vivos, apresenta respostas comportamentais e fisiológicas aos estímulos e variações provocadas pelo ambiente, especialmente no que diz respeito à temperatura. Diversos estudos têm investigado como os humanos reagem às variações térmicas, com o objetivo de compreender os impactos sobre os aspectos psicológicos e fisiológicos, além de buscar estratégias para melhorar o conforto térmico (Batiz *et al.*, 2001). No contexto atual de mudanças climáticas, a investigação sobre o impacto da temperatura em ambientes fechados nos seres humanos reveste-se de importância vital, uma vez que o aumento da temperatura global gera um risco emergente de desconforto, afetando negativamente os índices de conforto térmico devido à possibilidade de calor excessivo em cenários climáticos futuros.

Uma das abordagens para avaliar o conforto térmico é por meio do modelo *Physiological Equivalent Temperature* (PET), que foi empregado neste estudo. A PET é definida como a temperatura do ar em que, em um ambiente interno típico, ou seja, sem a presença de vento e radiação solar, ocorre o equilíbrio do balanço de calor do corpo humano, mantendo a mesma temperatura que seria observada sob condições externas. Assim, a PET possibilita que indivíduos não especializados comparem os efeitos integrados de condições térmicas externas complexas com suas próprias experiências internas (Höppe, 1999).

O índice de conforto térmico apresentado fundamenta-se em um modelo de dois compartimentos do sistema de termorregulação humana, conforme descrito por Gagge *et al.* (1971) e Gagge *et al.* (1986), a partir do qual também foi derivado a *Standard Effective Temperature* (SET). Esses modelos simulam os principais parâmetros utilizados na estimativa do conforto térmico, incluindo a temperatura central, a temperatura da pele e a umidade cutânea resultantes da exposição ao ambiente em análise. O princípio

subjacente consiste em determinar a temperatura de um ambiente de referência que induziria a mesma resposta fisiológica observada no ambiente em estudo. No caso do PET, o ambiente de referência é semelhante a um escritório, caracterizado por baixas velocidades do ar ($0,13 \text{ m.s}^{-1}$) e 50% de umidade relativa. O nível metabólico considerado no PET inclui 80 W de atividade, além do metabolismo basal, que varia de acordo com a idade, sexo e morfologia do indivíduo (Walther e Goetschel, 2018).

Para a realização deste trabalho, foi utilizada uma versão corrigida do modelo PET, incorporando as modificações propostas por Walther e Goetschel (2018), que identificaram e corrigiram discrepâncias e simplificações presentes na rotina original do modelo, além de disponibilizarem o código atualizado.

Uma abordagem alternativa para a avaliação do conforto térmico é a utilização da termografia infravermelha (TIR), frequentemente empregada na avaliação da temperatura corporal e como ferramenta diagnóstica para a detecção de doenças humanas. Embora essa aplicação na medicina seja evidente, a literatura apresenta alguns estudos que indicam o uso da TIR para medir a temperatura corporal como um parâmetro na avaliação do conforto térmico em ambientes internos (Almeida *et al.*, 2022).

Com base nas considerações apresentadas, o objetivo deste estudo foi integrar a utilização da termografia infravermelha e do modelo PET para avaliar o conforto térmico em salas de aula, comparando os resultados obtidos por ambos os métodos.

Metodologia

Para a realização deste estudo, foram utilizados um termohigrômetro HT-70 da Instrutherm e uma câmera infravermelha, modelo FLIR T640, com resolução de 640x480 pixels. As medições foram realizadas em salas de aula, com o registro de imagens em intervalos de 2 a 3 minutos, utilizando o modo time

lapse. A câmera foi configurada com parâmetros de umidade e temperatura obtidos do termohigrômetro, além de uma emissividade correspondente à pele humana ($\epsilon = 0,98$). A figura abaixo mostra um exemplo de imagem feita durante o experimento.



Figura 1: Exemplo de imagem registrada pela câmera infravermelha.

O quadro abaixo mostra os locais e datas das medições realizadas.

Local	Data e Hora
L8104	21/03 9h00 - 10h50
CEPreMG	21/03 15h45 - 16h50
LCM	01/04 13h30 - 15h20
L8104	25/05 15h45 - 17h30
L8104	25/09 10h10 - 11h50
LCM	12/12 15h45 - 16h20

Quadro 1 - Local, data e hora das medições realizadas.

As imagens coletadas foram processadas e analisadas por meio dos softwares *Excel*, *ImageIR* e *Python*. O primeiro passo consistiu na extração da matriz de temperaturas de cada imagem, utilizando o software *ImageIR* (Irujo, 2022), e no salvamento dessas matrizes em arquivos .txt. Em seguida, foi elaborado um script em *Python* com a finalidade de agrupar todas as informações obtidas ao longo de uma medição em um único arquivo, visando agilizar o cálculo das estatísticas. Esse procedimento foi repetido para cada conjunto de dados. Foram determinados a média, o desvio padrão, os valores máximo e mínimo, bem como os percentis P5 e P95. Os percentis foram utilizados no modelo PET, com o objetivo de simular as áreas mais frias e quentes da

sala. Em seguida, aplicou-se a média e os percentis no modelo para calcular a PET, obtendo um valor para cada métrica estatística. Por fim, agrupou-se os dados resultantes do PET e termografia, os quais foram alimentados em um modelo de *machine learning* no *Python* com o intuito de realizar uma regressão linear entre os conjuntos de dados.

Resultados e discussão

Local	Incidência de sol nas paredes ?	Ar condicionado?	Temperatura externa (°C) - máxima e mínima	PET (°C) - média, P95 e P5	Termografia (°C) - média, P95 e P5
L8104	Não	Não	25,6 21,5	24,9 32,2 21,8	24,6 30,4 22
L8104	Sim	Não	33,9 29,7	30,1 34,4 27,3	29,8 33,3 27,4
LCM	Parcial	Sim	26,6 25,3	28,7 32,3 25,6	28 30,9 25,5
L8104	Sim	Não	26,8 24,8	32,3 37,2 29,9	30,3 34 28,4
CEPreMG	Não	Sim	28,5 22,3	25,4 30,4 22,1	25,1 29,2 22,3
LCM	Não	Sim	28,7 27,9	26 28,9 22,8	25,3 27,6 22,7

Quadro 2 - Condições ambientais em cada medição e os resultados do modelo PET e aferição infravermelha.

Com base nas informações apresentadas e no quadro a seguir, que fornece valores de referência para correlacionar o PET à sensação térmica, observamos que, ao analisar a média, foram registrados três casos classificados como quente e agradável (25/09, 12/12 e 21/03) e três casos classificados como neutros (25/05, 21/03 às 15h45 e 1/04). No percentil 95 (P95), identificaram-se duas ocorrências de quente e desagradável (25/09 e 21/03), enquanto as demais foram categorizadas como quente e agradável. No percentil 5 (P5), foram registrados dois casos de quente e agradável (25/09 e 21/03) com os demais sendo classificados como neutros. Nas medições que indicaram maior desconforto,

observou-se a incidência de luz solar direta nas paredes e a ausência de climatização nas salas. Em contrapartida, nas situações em que o ambiente se apresentou mais ameno, não houve exposição à luz solar direta e as salas estavam equipadas com ar-condicionado.

Sensação	PET
Muito quente	>43
Quente, desagradável	>34
Quente, agradável	>26
Neutro	17-26
Fresco	<17
Frio	<11
Muito frio	<3

Quadro 3 - Calibração proposta para o modelo PET (Monteiro e Alucci, 2006)

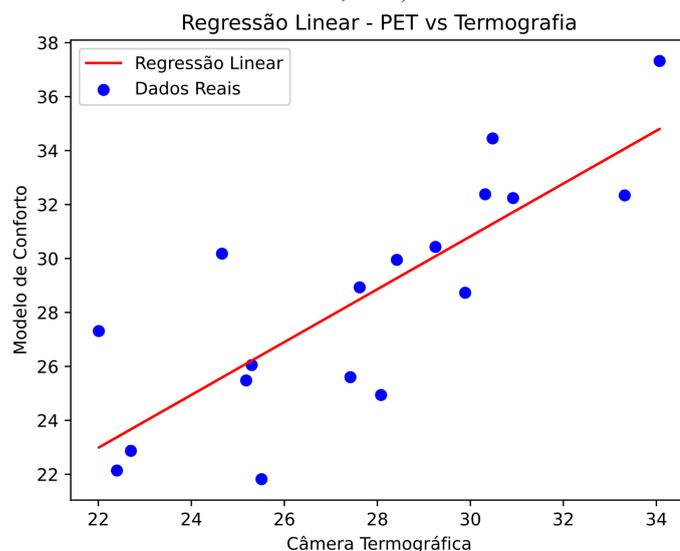


Figura 2 – Regressão linear e dispersão dos dados obtidos por termografia e modelagem

Inclinação	0,98
Intercepto	1,44
R ²	0,65

Quadro 4: Resultados do modelo de regressão linear.

Para compreender a relação entre a temperatura modelada pelo modelo PET e a obtida pela câmera infravermelha, foi utilizado um modelo de regressão

linear, com a termografia como variável independente e os dados da PET como variável dependente. A Figura 2 mostra uma correlação positiva: à medida que a temperatura da termografia aumenta, a temperatura do modelo PET também tende a aumentar, como evidenciado pela inclinação da curva de 0,98 no quadro 4. Contudo, a dispersão dos dados em torno da reta indica uma variabilidade que não pode ser explicada pelo modelo, refletida no valor de R², que é de 0,65. Isso significa que o modelo explica cerca de 65% da variabilidade entre os dois métodos, enquanto 35% é influenciada por fatores externos.

Conclusões

Conclui-se, portanto, que as salas de aula analisadas, na maior parte do tempo, apresentam condições que favorecem o conforto térmico. No entanto, essas condições podem se tornar desconfortáveis em decorrência de determinadas condições ambientais, como, por exemplo, ondas de calor. Dado que o avanço das mudanças climáticas tende a intensificar e aumentar a frequência desse fenômeno, é imperativo que sejam adotadas medidas que visem à mitigação do estresse térmico, como a instalação de sistemas de climatização e a melhoria da ventilação. Entretanto, com o intuito de oferecer uma alternativa mais sustentável para esse desafio, a implementação de telhados e paredes verdes se apresenta como uma proposta interessante, uma vez que o uso dessas soluções tem se destacado como uma estratégia eficaz para a redução da temperatura interna em diversos países, especialmente na Europa (Silva, 2011). Outro aspecto relevante deste estudo foi a capacidade da termografia infravermelha em apresentar a distribuição da temperatura no ambiente, tornando possível a identificação de *hotspots* da mesma. Destaca-se também a alta correlação observada entre a temperatura modelada e a obtida por meio da câmera, o que indica que a termografia pode ser utilizada como uma base para a predição do conforto térmico.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio da Universidade Federal de Itajubá, o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo pelo empréstimo da câmera termográfica utilizada neste trabalho e agradecemos também a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo financiamento da bolsa de iniciação científica ID#7811.

Referências

ALMEIDA, Ricardo MSF *et al.* Infrared thermography to evaluate thermal comfort under controlled ambient conditions. **Applied Sciences**, v. 12, n. 23, p. 12105, 2022.

BATIZ, Eduardo Concepción *et al.* Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Production**, v. 19, p. 477-488, 2009.

GAGGE, A. Pharo; STOLWIJK, Jan AJ; NISHI, Ysaunobu. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. **Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University**, v. 13, n. Suppl, p. 21-36, 1972.

GAGGE, A. Pharo; FOBELETS, A. P.; BERGLUND, LoG. A standard predictive index of human response to the thermal environment. 1986.

HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, v. 43, p. 71-75, 1999.

IRUJO, Gustavo Pereyra. IRimage: open source software for processing images from infrared thermal cameras. **PeerJ Computer Science**, v. 8, p. e977, 2022.

MONTEIRO, Leonardo Marques; ALUCCI, Marcia Peinado. Calibration of outdoor thermal comfort models. In: **International Conference on Passive and Low Energy Architecture**. 2006. p. 515-522.

SILVA, Neusiane da Costa. Telhado verde: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

WALTHER, Edouard; GOESTCHEL, Quentin. The PET comfort index: Questioning the model. **Building and Environment**, v. 137, p. 1-10, 2018.