

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**INAIELE MENDES DA LUZ**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO  
RELACIONADOS À PRODUTIVIDADE NO ÂMBITO INTELECTUAL**

**PONTA GROSSA**

**2023**

**INAIELE MENDES DA LUZ**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO  
RELACIONADOS À PRODUTIVIDADE NO ÂMBITO INTELECTUAL**

**Comparative analysis of thermal comfort models related to productivity in the  
intellectual sphere**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Evandro Eduardo Broday

**PONTA GROSSA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**INAIELE MENDES DA LUZ**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO  
RELACIONADOS À PRODUTIVIDADE NO ÂMBITO INTELECTUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 29/novembro/2023

---

Evandro Eduardo Broday  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ana Maria Bueno  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Iasmin Lourenço Niza  
Mestrado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**

**2023**

Pelo amor incondicional, pelo apoio que nunca me faltou e pelo incentivo que fez todo o meu caminho possível, dedico este trabalho à minha amada família.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a meu pai e mãe, verdadeiros pilares na minha vida que não apenas me deram a oportunidade de estudo, mas dedicaram incessantes esforços para me apoiar e incentivar ao longo de toda minha jornada acadêmica. A eles e minhas irmãs, minha família querida, agradeço por sempre acreditarem em mim.

Aos meus amigos - Fábio, Isabella, Tatiana e Luis - que estiveram ao meu lado durante toda a trajetória, meu mais sincero agradecimento pelo carinho, pelas palavras de encorajamento e apoio, que foram fundamentais para superar desafios e celebrar conquistas.

Ao meu orientador, professor Evandro, pela orientação, por ter me proporcionado a valiosa oportunidade de participar do Programa de Iniciação Científica e pelo exemplo de dedicação à pesquisa.

À lasmin e Ana, quero expressar minha profunda gratidão pelo carinho, companheirismo e apoio ao longo de toda nossa colaboração no grupo de pesquisa.

Aos três - Evandro, Ana e lasmin - como membros do grupo "Qualidade Ambiental Interior para a Melhoria da Saúde e Produtividade", agradeço pelas valiosas contribuições profissionais e, especialmente, por contribuírem para a construção de um ambiente de trabalho positivo, bem-humorado e colaborativo.

A todos os professores e demais funcionários da universidade, cujo empenho e dedicação tornam possível o ambiente propício para ensino e pesquisa dentro dos muros da instituição.

Cada um desempenhou um papel crucial nesta jornada, e por isso, expresso meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Pesquisadores tem enfrentado desafios na modelagem da produtividade em função do conforto térmico devido à complexidade da relação. Reunir conhecimento da literatura, comparar modelos por meio de abordagens estatísticas pode contribuir para compreensão das lacunas nessa relação, no ambiente educacional e de trabalho. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar uma abordagem comparativa dos modelos de conforto térmico relacionados à produtividade no âmbito intelectual presentes na literatura. A abordagem foi realizada em três partes. Primeiramente, foi realizada uma busca na literatura por modelos que pudessem ser utilizados para as análises. A análise dos modelos foi realizada de maneira qualitativa, com a discussão das principais características dos seus estudos de origem. Após, realizou-se a análise do desempenho dos modelos selecionados pela aplicação dos mesmos aos dados de um estudo de caso em uma universidade no Sul do Brasil. Por fim, realizou-se a análise de cluster hierárquicos dos modelos conforme suas similaridades. Com a análise da literatura verificou-se uma grande variedade metodológica no escopo analisado, no qual destaca-se o uso de métodos objetivos para avaliação da produtividade no âmbito intelectual e o uso da análise de regressão para modelagem. Com a análise do desempenho, discutiu-se a possível influência das variáveis independentes utilizadas nos modelos para sua abrangência. A análise de cluster permitiu identificar as possíveis motivações por trás das diferenças observadas no desempenho dos modelos. Essa análise pode fornecer novas percepções valiosas sobre as melhores abordagens e práticas na representação da relação entre conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual e auxiliar no desenvolvimento de novos modelos.

Palavras-chave: conforto humano; produtividade; ambiente de sala de aula; ambiente de trabalho.

## **ABSTRACT**

Researchers have faced challenges in modeling productivity as a function of thermal comfort due to the complexity of the relationship. Gathering knowledge from the literature and comparing models using statistical approaches can contribute to understanding the gaps in this relationship in the educational and work environment. With this in mind, the aim of this study was to carry out a comparative approach to thermal comfort models related to productivity in the intellectual sphere in the literature. The approach was divided into three parts. Firstly, the literature was searched for models that could be used for analysis. The models were analyzed qualitatively, discussing the main characteristics of their original studies. The performance of the selected models was then analyzed by applying them to data from a case study at a university in southern Brazil. Finally, a hierarchical cluster analysis of the models according to their similarities was carried out. The literature review revealed a wide variety of methods in the scope analyzed, including the use of objective methods to assess productivity in the intellectual sphere and the use of regression analysis for modeling. With the analysis of performance, the possible influence of the independent variables used in the models on its scope was discussed. Cluster analysis made it possible to identify the possible motivations behind the differences observed in the performance of the models. This analysis can provide valuable new insights into the best approaches and practices in representing the relationship between thermal comfort and productivity in the intellectual sphere and assist in the development of new models.

Keywords: human comfort; productivity; classroom environment; work environment.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – PPD como uma função do PMV .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 2 – Etapas da metodologia .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 3 – PRISMA.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 4 – Modelo 4.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 5 – Modelo 12.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 6 – Raiz do erro quadrado médio para cada modelo.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 7 – Dendrograma .....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de sensação térmica de sete pontos .....	21
Tabela 2 – Intervalos para aplicação do PMV .....	22
Tabela 3 – Distribuição dos votos de sensação térmica individuais para diferentes valores de voto médio .....	23
Tabela 4 – Adaptação dos modelos.....	33
Tabela 5 – Desempenho dos modelos.....	46
Tabela 6 – Matriz de proximidade .....	48
Tabela 7 – Estágios do agrupamento .....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEQ	<i>Indoor Environmental Quality</i> (Qualidade Ambiental Interior)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (Previsão de Voto Médio)
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (Porcentagem Prevista de Insatisfeitos)
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i> (Itens de Relato Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Metanálises)
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (Raiz do Erro Quadrado Médio)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	Problema .....	11
1.2	Justificativa .....	12
1.3	Contextualização na Engenharia de Produção .....	14
1.4	Objetivo geral.....	15
1.5	Objetivos específicos.....	15
1.6	Divisão do trabalho .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	<b>Conforto térmico</b> .....	<b>17</b>
2.1.1	<i>Indoor Environmental Quality</i> (IEQ).....	17
2.1.2	Definição de conforto térmico .....	19
2.1.3	Modelos de conforto térmico .....	19
2.1.3.1	<u>ISO 7730 e Previsão de Voto Médio (PMV)</u> .....	<u>20</u>
2.1.4	Fatores que influenciam o conforto térmico.....	24
2.2	<b>Conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual</b> .....	<b>26</b>
2.2.1	Fatores de influência .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>29</b>
3.1	<b>Classificação da pesquisa</b> .....	<b>29</b>
3.2	<b>Fluxograma</b> .....	<b>30</b>
3.3	<b>Analisar a literatura existente</b> .....	<b>31</b>
3.4	<b>Comparar o desempenho de modelos</b> .....	<b>33</b>
3.5	<b>Categorizar modelos</b> .....	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>
4.1	<b>Análise da literatura existente</b> .....	<b>36</b>
4.2	<b>Comparação do desempenho de modelos</b> .....	<b>44</b>
4.3	<b>Categorização dos modelos</b> .....	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
5.1	<b>Considerações finais e contribuições</b> .....	<b>52</b>
5.2	<b>Limitações do estudo</b> .....	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com o bem-estar humano no contexto do ambiente construído de edifícios comerciais e escritórios tem recebido cada vez mais atenção. Principalmente considerando o crescente conhecimento sobre os benefícios financeiros com eficiência ao melhorar a qualidade ambiental interior (LIU *et al.*, 2023).

Segundo Appel-Meulenbroek, Clippard e Pfnür (2018) “a alavanca para criar valor por meio de uma maior produtividade do trabalho causada por recursos imobiliários eficientes é tão alta quanto a alavanca para destruir valor em caso de ambientes de escritório insuficientemente projetados” e esta relação causal é sistematicamente complexa. Assim, o estudo desta realidade se mostra como um importante objeto de estudo.

Considerando que as atividades desempenhadas em universidades e escolas são essencialmente cognitivas assim como trabalhos em escritórios, os mesmos benefícios são esperados para ambientes educacionais. No entanto, a compreensão das relações entre o ambiente interior e a produtividade neste âmbito ainda é limitada (LIU *et al.*, 2023).

Na busca por compreender a relação complexa entre produtividade e conforto térmico, os pesquisadores têm enfrentado desafios em sua modelagem devido às múltiplas variáveis envolvidas e às particularidades de cada estudo de caso. Dessa forma, reunir o conhecimento presente na literatura torna-se essencial para concentrar os principais achados e a modelagem de diferentes aspectos da realidade. Para isso, abordagens estatísticas são úteis para a identificação de padrões comuns e lacunas de conhecimento dentre os modelos, o que pode contribuir para uma compreensão mais completa da relação produtividade-conforto térmico no ambiente educacional e de trabalho e permitir o desenvolvimento modelos mais abrangentes.

### 1.1 Problema

Apesar da existência de estudos que demonstram consistentemente o potencial da Qualidade Ambiental Interior (IEQ, do inglês, Indoor Environmental Quality) em promover o aumento da produtividade dos indivíduos e gerar impactos econômicos positivos, é preocupante que essa relação muitas vezes não é devidamente considerada nos cálculos convencionais de custo-benefício relacionados ao projeto e operação de edifícios e, uma das causas para este problema é a

necessidade de relações confiáveis entre IEQ e produtividade (LAN; WARGOCKI; LIAN, 2012). Para superar esse problema, é necessário realizar pesquisas adicionais, análises abrangentes e avaliações rigorosas que permitam estabelecer métodos sólidos de mensuração e avaliação (LAN; WARGOCKI; LIAN, 2012).

Uma abordagem que pode ser caracterizada como uma análise abrangente que pode permitir o estabelecimento de métodos aprimorados é a análise de modelos já existentes. A análise comparativa de estudos da área produtividade relacionada ao ambiente interior é uma lacuna de pesquisa já identificada por Appel-Meulenbroek, Clippard e Pfnür (2018). Os autores verificaram por meio de uma análise da literatura que não existiam estudos que avaliassem os conhecimentos e experimentos da relação produtividade e ambiente interior quanto aos fatores: quais variáveis ambientais do local de trabalho foram avaliadas, quais os resultados conhecidos dos ocupantes, quais metodologias foram usadas nos estudos e quais as disciplinas acadêmicas envolvidas. Desta maneira encontraram uma lacuna de pesquisa para explorar e demonstrar uma perspectiva nos estudos da área que não é comumente abordada: análise dos estudos já existentes e verificação de lacunas na área.

Neste contexto, emerge o problema de pesquisa:

- Qual é a abrangência dos modelos existentes que relacionam produtividade e conforto térmico, considerando a adequação desses modelos a diferentes realidades além daquelas em que foram originalmente desenvolvidas? Como identificar similaridades e diferenças na abrangência dos modelos por meio de uma análise estatística?

## **1.2 Justificativa**

Desde os primórdios da evolução humana, os indivíduos empenharam-se em encontrar meios de resguardar-se das intempéries climáticas, tais como o frio, as chuvas e o calor extremo, valendo-se de conhecimentos aplicados para desenvolver tecnologias capazes de proporcionar um ambiente cada vez mais propício ao conforto térmico. A qualidade do ambiente interno, onde as pessoas habitam, tem se mostrado um dos desafios mais complexos no contexto da existência humana. (LAN; WARGOCKI; LIAN, 2011)

Nos últimos anos, o campo de pesquisa em conforto térmico tem despertado um interesse crescente entre pesquisadores em todo o mundo, impulsionado, em

parte, pelo aumento das discussões públicas sobre as mudanças climáticas (RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015). À medida que os efeitos das mudanças climáticas se intensificam, com temperaturas extremas, ondas de calor mais frequentes e eventos climáticos cada vez mais imprevisíveis, compreender a relação entre conforto térmico e produtividade se torna ainda mais crucial. Nesse contexto, é importante aprofundar a investigação sobre as interações complexas entre variáveis ambientais, fatores pessoais e desempenho humano, a fim de fornecer diretrizes e soluções práticas para garantir ambientes confortáveis e produtivos diante das mudanças climáticas em curso.

Para o caso de ambientes de trabalho, a melhoria na qualidade ambiental interior se reverte na prevenção da incidência de sintomas da Síndrome do Edifício Doente e, conseqüentemente, menores taxas de absenteísmo. Assim, melhora-se significativamente o desempenho dos indivíduos e o conseqüente impacto econômico de suas atividades. Estimativas mostram que a melhoria na qualidade interior de escritórios nos Estados Unidos poderia gerar benefícios econômicos anuais de US\$ 26 bilhões, além de também poder propiciar redução no consumo de energia (FISK; BLACK; BRUNNER, 2011).

É evidente, portanto, a importância do tema para diversas esferas do conhecimento. Destaca-se aqui a relação entre os estudos de conforto térmico e produtividade e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (“THE 17 GOALS | Sustainable Development”, 2015):

- ODS 3 - Saúde e Bem-Estar: O conforto térmico adequado nos ambientes de trabalho tem um impacto direto na saúde e bem-estar dos trabalhadores. Melhorar a qualidade do ambiente interno e promover o conforto térmico contribui para reduzir a incidência de doenças relacionadas ao clima e melhorar a qualidade de vida dos indivíduos.
- ODS 4 - Educação de Qualidade: A melhoria da Qualidade Ambiental Interior (IAQ) nos ambientes educacionais pode contribuir para a promoção de uma educação de qualidade. Ambientes confortáveis e saudáveis favorecem o bem-estar dos alunos e professores, proporcionando condições adequadas para o aprendizado e o desenvolvimento cognitivo. Portanto, ao considerar o conforto térmico e a produtividade nos espaços educacionais, contribui-se para o alcance do ODS 4.

- ODS 8 - Trabalho Decente e Crescimento Econômico: A relação entre conforto térmico e produtividade está diretamente ligada ao objetivo de promover o trabalho decente e alcançar o crescimento econômico sustentável. Melhorar a qualidade ambiental interna dos escritórios e outros ambientes, incluindo o aspecto conforto térmico, pode aumentar a produtividade dos trabalhadores, reduzir o absenteísmo e gerar benefícios econômicos significativos.
- ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima: A relação entre conforto térmico e produtividade está diretamente ligada aos efeitos das mudanças climáticas e à necessidade de adaptação a condições térmicas extremas. Compreender essa relação e adotar práticas que promovam o conforto térmico sustentável contribui para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

### **1.3 Contextualização na Engenharia de Produção**

O presente trabalho de conclusão de curso para o curso de Engenharia de Produção está relacionado principalmente à subárea desta engenharia referente à engenharia do trabalho, pois têm sua essência na interação indivíduo-ambiente dentro do escopo ocupacional, e também educacional. Entretanto, a aplicação de estudos de modelagem na área de conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual podem ter implicações em outras subáreas, como gestão organizacional, engenharia da sustentabilidade e engenharia econômica.

Os estudos em questão se relacionam à gestão organizacional pelo aspecto da produtividade. O estudo da produtividade e fatores que a influenciam, tem relação com a eficiência de processos cognitivos que ocorrem no âmbito organizacional, que são base para atividades como o aprendizado, a geração de capital intelectual, o desenvolvimento de ideias criativas, entre outras.

Já em relação à sustentabilidade, uma das implicações práticas dos estudos na área é a influência na eficiência energética de edifícios, pois podem fornecer conhecimento teórico para embasar o desenvolvimento de edifícios que irão atender às necessidades dos ocupantes de maneira passiva, ou seja, sem uso de energia. Estas necessidades incluem o conforto térmico e, a depender das atividades

desenvolvidas dentro do ambiente, incluem também o ótimo desempenho em atividades cognitivas.

Por fim, os estudos são abrangidos pela engenharia econômica quando as perdas de produtividade, investimentos no ambiente construído e consumo de energia referente ao ambiente térmico são quantificados financeiramente. Um exemplo é o estudo de viabilidade econômica de um projeto de reforma de um edifício visando a otimização da produtividade humana, em que o payback se aproxima conforme os ganhos em produtividade compensam os investimentos em reformas.

#### **1.4 Objetivo geral**

Realizar uma abordagem comparativa dos modelos de conforto térmico relacionados à produtividade no âmbito intelectual presentes na literatura.

#### **1.5 Objetivos específicos**

1. Comparar o desempenho de modelos selecionados na aplicação em dados coletados em um estudo de caso em uma universidade da região sul do Brasil com ambientes naturalmente ventilados.
2. Categorizar modelos conforme suas similaridades e diferenças a partir de uma análise *cluster* de variáveis.

#### **1.6 Divisão do trabalho**

No segundo capítulo, são explorados temas como conforto térmico, qualidade ambiental interior, definições e modelos, abrangendo normas e fatores influenciadores, seguido pela análise da relação entre conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual, com detalhamento de seus fatores de influência.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia, iniciando com a classificação da pesquisa e um fluxograma que guia o processo. Em seguida, são detalhadas as partes da metodologia, que incluem a análise da literatura existente, a comparação de desempenho entre modelos e a categorização desses modelos.

O quarto capítulo revela os resultados da aplicação da metodologia e a discussão sobre as análises da literatura, a comparação de desempenho dos modelos e a categorização dos mesmos.

Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do estudo, incluindo considerações finais e a identificação das limitações do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção aborda a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho, abrangendo conceitos fundamentais sobre a área de estudo do conforto térmico e da produtividade humana no âmbito intelectual, que são temas relevantes para a compreensão dos efeitos do ambiente de trabalho na saúde e desempenho dos indivíduos.

Inicialmente, é apresentado um panorama geral sobre a área de estudo do conforto térmico, que inclui a contextualização e definição deste conceito, bem como os modelos utilizados para modelar o conforto térmico, de acordo com os principais padrões internacionais relacionados, além de outros modelos disponíveis no contexto acadêmico.

Em seguida, são apresentados alguns fatores que influenciam o conforto térmico além dos parâmetros comumente utilizados nos modelos. A discussão desses fatores visa proporcionar uma visão mais ampla sobre o tema, uma vez que o conforto térmico é influenciado por diversos fatores, e sua avaliação deve levar em consideração essa complexidade.

Posteriormente, é apresentado um panorama geral sobre a área de estudo da relação entre conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual. Tal abordagem visa ampliar o conhecimento sobre a importância da produtividade humana no ambiente de trabalho, uma vez que a produtividade é um dos principais indicadores de desempenho no ambiente de trabalho.

### 2.1 Conforto térmico

Para aprimorar a compreensão sobre o tema do conforto térmico e sua importância, é fundamental situá-lo em um contexto mais amplo. Para isso, se faz necessário apresentar informações sobre a definição de qualidade ambiental interior (QAI), bem como sobre os aspectos que a compõem.

Portanto, antes de entrar propriamente na área de estudo do conforto térmico, é necessário entender a qualidade ambiental interior como um todo.

#### 2.1.1 *Indoor Environmental Quality* (IEQ)

Um estudo realizado por Ott (1988), revelou que é estimado que as pessoas passam menos de 10% do tempo no ambiente exterior, mas na maioria dos países,

a taxa estimada é menor que 5%. Isso significa que, em média, as pessoas passam mais de 90% do tempo em ambientes interiores. Ainda segundo o autor:

Existem pequenas diferenças de um país para outro nos padrões de atividades humanas, provavelmente resultantes de diferenças culturais, sistemas de transporte e clima. No entanto, as similaridades são mais marcantes do que as diferenças. A conclusão que emerge é que somos essencialmente animais de ambiente interno. Quando não estamos dentro de casa, estamos dentro de nossos empregos, lojas ou outros locais fechados. Quando não estamos em algum cômodo ou edifício, geralmente estamos em um microambiente de transporte, como trem, ônibus ou automóvel. Em uma sociedade moderna, o tempo total gasto ao ar livre é a parte mais insignificante do dia, muitas vezes tão pequena que mal é perceptível no total. (OTT, 1988)

Embora a estimativa de que as pessoas passam menos de 10% do tempo em ambientes externos tenha sido realizada na década de 1980, estudos mais recentes confirmam que essa tendência continua sendo uma realidade. Outro estudo, de Klepeis *et al.* (2001) confirmou que a taxa de tempo no ambiente exterior é, em média, 7% nos Estados Unidos. Além disso, o estudo mencionado também aponta que, com base em estudos sociológicos, o tempo que os americanos passam em ambientes fechados tem se mantido relativamente constante nas últimas décadas.

A avaliação da qualidade ambiental interior é fundamental para garantir que um edifício seja projetado de forma eficiente, considerando o consumo de energia ao mesmo tempo que considera o bem-estar dos ocupantes (NICO; LIUZZI; STEFANIZZI, 2015).

Quando se trata de ambientes de trabalho e estudo, como escritórios, escolas e universidades, é particularmente importante garantir a qualidade do ambiente interno, pois ela pode afetar significativamente a produtividade e o aprendizado dos ocupantes (FELGUEIRAS *et al.*, 2022; KANG; OU; MAK, 2017; SADICK; KPAMMA; AGYEFI-MENSAH, 2020).

Leccese *et al.* (2021), realizou uma análise de 21 estudos que administraram mais de 122.000 questionários em 18 países para determinar a relação entre os fatores ambientais e a qualidade ambiental interior. Os autores concluíram que os fatores ambientais mais significativos identificados foram o ambiente térmico, a qualidade do ar, a acústica e a iluminação. O estudo ainda mostrou que, quando se trata de escritórios e escolas, o peso da importância de cada um dos quatro fatores pode variar, no entanto, para ambos os ambientes, o ambiente térmico foi identificado como o fator mais relevante para a qualidade ambiental interior.

De fato, Frontczak e Wargocki (2011) destacam que, dentre os diversos aspectos que compõem a qualidade ambiental interior, o conforto térmico é considerado por muitos estudos como um dos fatores mais importantes para a satisfação em geral dos usuários em relação ao ambiente (FRONTCZAK; WARGOCKI, 2011). Isso reforça a importância de compreender e estudar o conforto térmico de forma mais aprofundada.

### 2.1.2 Definição de conforto térmico

É fundamental compreender as definições de conceitos em diferentes áreas, incluindo a área de conforto térmico. De acordo com a norma ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 (2004), uma das principais normas da área, o conforto térmico é definido como "uma condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico e é avaliado por meio de uma avaliação subjetiva". Por outro lado, o ambiente térmico consiste nas "características do ambiente que afetam a perda de calor de uma pessoa".

A norma em questão também destaca o fato de que é extremamente desafiador atender às necessidades de todos os ocupantes de um mesmo ambiente, visto que há uma grande variação de fatores fisiológicos e psicológicos entre as pessoas. Isso significa que as condições de conforto não podem ser padronizadas para todos os indivíduos. Em virtude disso, a busca pelo conforto se traduz na tentativa de estabelecer condições que possam ser consideradas termicamente confortáveis para a maior parte dos ocupantes, levando em conta suas particularidades.

### 2.1.3 Modelos de conforto térmico

Padrões internacionais como a já mencionada ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 (2004) e a ISO 7730 (2005) consideram duas diferentes abordagens, referentes aos principais modelos para prever o conforto térmico de uma maioria de ocupantes.

A ISO 7730 (2005) considera o modelo de Previsão de Voto Médio, do inglês, *Predicted Mean Vote* (PMV). Além de considerar o PMV, a norma ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 (2004) também inclui o modelo de conforto adaptativo como uma opção para avaliar o conforto em edifícios naturalmente condicionados, tais como aqueles que são naturalmente ventilados. Esse modelo leva em conta a capacidade do corpo humano de se adaptar às variações ambientais, permitindo uma análise mais

abrangente do conforto térmico em edificações que não possuem sistemas de climatização artificiais.

É importante ressaltar que, como as normas de conforto térmico são desenvolvidas com o objetivo de explicar a média de conforto térmico de uma grande amostra populacional, elas não consideram as diferenças individuais em termos de necessidades de conforto e, portanto, geralmente não conseguem prever com precisão o conforto térmico de um determinado ocupante ou grupo de ocupantes em um ambiente específico dentro do edifício (CHEUNG *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2022).

#### 2.1.3.1 ISO 7730 e Previsão de Voto Médio (PMV)

A norma ISO 7730 (2005) é uma norma técnica desenvolvida *pela International Organization for Standardization (ISO)* que estabelece métodos para avaliação do conforto térmico em ambientes internos. A norma fornece diretrizes e procedimentos para medir e avaliar as condições ambientais, levando em conta diversos fatores que influenciam a percepção térmica dos ocupantes.

Os métodos apresentados são usados para prever a sensação térmica geral e grau de desconforto dos ocupantes. Tais métodos viabilizam uma determinação analítica e interpretação do conforto térmico usando os índices de *Predicted Mean Vote (PMV)* e Porcentagem Prevista de Insatisfeitos, do inglês, *Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)*, que permitem prever a sensação térmica média de um grupo de pessoas e a porcentagem de pessoas insatisfeitas com as condições.

Frontczak e Wargocki (2011) resumem as particularidades da norma:

A norma define o ambiente térmico como uma função de quatro variáveis físicas (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade relativa do ar e umidade do ar) e duas variáveis relacionadas às pessoas (nível de atividade e vestuário). Além disso, os requisitos de conforto térmico só podem ser atendidos se não houver desconforto local, ou seja, se os usuários do edifício não forem incomodados por correntes de ar, assimetria de temperatura radiante muito alta, temperaturas de superfície interna muito baixas ou muito altas ou diferença de temperatura vertical do ar muito alta. (FRONTCZAK; WARGOCKI, 2011)

O índice PMV se refere ao voto de sensação térmica, o qual está principalmente relacionado com o balanço de calor do corpo do ocupante como um todo e é avaliado com base na escala de sete pontos de sensação térmica. Os votos da escala são apresentados na tabela 1.

**Tabela 1 – Escala de sensação térmica de sete pontos**

Voto	Sensação térmica
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro
1	Levemente frio
2	Frio
3	Muito frio

Fonte: ISO 7730 (2005)

O cálculo do PMV é realizado usando a equação (1). As equações (2), (3) e (4) apresentam o cálculo de variáveis usadas na equação (1).

$$PMV = [(0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028)] \cdot (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \} \quad (2)$$

$$h_c = 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} \text{ para } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ h_c = 12,1\sqrt{v_{ar}} \text{ para } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \quad (3)$$

$$f_{cl} = 1 + 1,29 \cdot I_{cl} \text{ para } I_{cl} \leq 0,078 \\ f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \text{ para } I_{cl} > 0,078 \quad (4)$$

Em que:

$M$  é a taxa metabólica de acordo com a atividade realizada pelo indivíduo (W/m<sup>2</sup>);

$W$  é o trabalho mecânico efetivo (W/m<sup>2</sup>);

$I_{cl}$  é o isolamento da vestimenta (m<sup>2</sup> . K/W);

$f_{cl}$  é o fator de área da vestimenta;

$t_a$  é a temperatura do ar (°C);

$\bar{t}_r$  é a temperatura média radiante (°C);

$v_{ar}$  é a velocidade do ar (m/s);

$p_a$  é a pressão parcial de vapor de água (Pa);

$h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m<sup>2</sup> . K)];

$t_{cl}$  é a temperatura de superfície da vestimenta (°C).

A ISO 7730 (2005) estabelece que “o índice deve ser usado apenas para valores de PMV entre -2 e +2, e quando os seis parâmetros principais estão dentro dos seguintes intervalos”, intervalos estes apresentados na tabela 2.

**Tabela 2 – Intervalos para aplicação do PMV**

Parâmetro	Intervalo
M	46 a 232 W/m <sup>2</sup> (0,8 a 4 met)
$I_{cl}$	0 a 0,310 m <sup>2</sup> . K/W (0 a 2 clo)
$t_a$	10 a 30 °C
$t_r$	10 a 40 °C
$v_{ar}$	0 a 1 m/s
$p_a$	0 a 2700 Pa

**Fonte: ISO 7730 (2005)**

O PMV prevê o valor médio da sensação térmica de um grande grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente, portanto os votos individuais oscilam em torno deste valor. Para a norma, pessoas insatisfeitas são aquelas que sentem o ambiente como muito frio (-3), frio (-2), quente (+2) ou muito quente (+3), e satisfeitas são aquelas que sentem o ambiente como levemente quente (+1), neutro (0) ou levemente frio (-1).

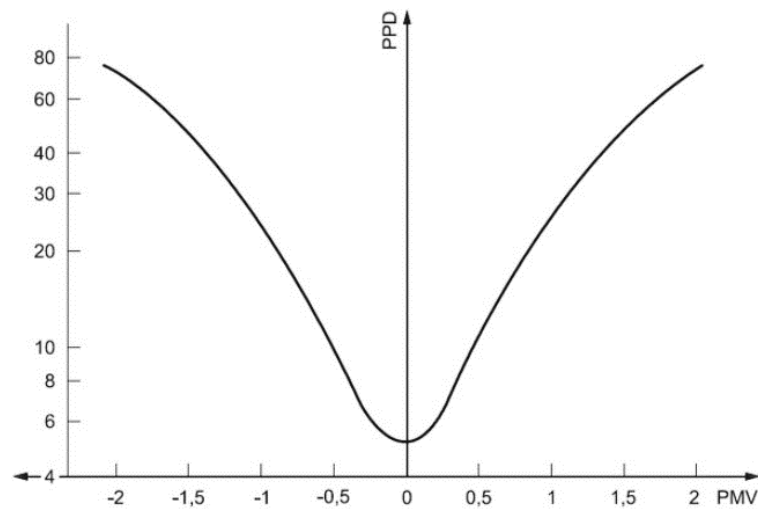
A partir do índice PMV, é possível obter o índice Porcentagem Prevista de Insatisfeitos (PPD), ou seja, é possível prever qual a porcentagem de pessoas que se sentem insatisfeitas com a ambiente térmico.

A equação (5) apresenta o cálculo do índice PPD em função do PMV.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2149 \cdot PMV^2) \quad (5)$$

A representação gráfica da função é apresentada na figura 1.

**Figura 1 – PPD como uma função do PMV**



Fonte: ISO 7730 (2005)

De acordo com o modelo, quando o PMV é 0, a porcentagem de insatisfeitos é a mínima, sendo igual a 5%. Para esta situação, 60% das pessoas se encontram em sensação térmica neutra e 35% levemente quente ou levemente frio. Esta relação é apresentada na tabela 3.

**Tabela 3 – Distribuição dos votos de sensação térmica individuais para diferentes valores de voto médio**

PMV	PPD	Pessoas previstas a votar (%)		
		0	-1, 0 ou +1	-2, -1, 0, +1 ou +2
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
+0,5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
-0,5	10	55	90	98
+1	25	30	75	95
+2	75	5	25	70

Fonte: ISO 7730 (2005)

Estes valores demonstram a variedade de sensações entre ocupantes de um mesmo ambiente. Não é considerado pelo modelo a existência de uma situação em que 100% dos ocupantes estarão em neutralidade térmica (voto 0) ou ainda em conforto térmico pela definição da norma (votos -1, 0 ou +1).

A norma também menciona a questão da adaptação, um fator importante a ser considerado ao avaliar o conforto térmico em ambientes, o qual pode causar uma diferença significativa entre o modelo previsto e a realidade, principalmente em edifícios com ambiente controlado pelos ocupantes, como os naturalmente ventilados,

em climas quentes ou durante períodos quentes. Isso ocorre porque os ocupantes adaptam-se ao ambiente e, portanto, as temperaturas aceitáveis são mais altas do que as previstas pelo índice do PMV. Segundo a norma:

Em ambientes quentes ou frios, pode haver uma influência devido à adaptação. Além do vestuário, outras formas de adaptação, como a postura corporal e a diminuição da atividade, que são difíceis de quantificar, podem resultar na aceitação de temperaturas internas mais altas. Pessoas acostumadas a trabalhar e viver em climas quentes podem mais facilmente aceitar e manter um desempenho de trabalho mais alto em ambientes quentes do que aqueles que vivem em climas frios. (ISO 7730, 2005)

O trecho em questão destaca como o histórico pessoal de um indivíduo pode influenciar no seu conforto térmico e, conseqüentemente, na relação entre conforto térmico e desempenho no trabalho.

A capacidade de adaptação de cada indivíduo é um fator importante a ser considerado, uma vez que o corpo humano pode ajustar-se a diferentes condições ambientais ao longo do tempo.

#### 2.1.4 Fatores que influenciam o conforto térmico

Considerando que o conforto térmico se refere à sensações e percepções de seres humanos, é compreensível que seja uma questão complexa influenciada por vários fatores além dos fisiológicos, considerados no PMV através do balanço de calor entre corpo e ambiente. Os demais fatores incluem, por exemplo, fatores psicológicos, demográficos, antropométricos, entre outros.

Em um artigo de revisão de literatura de mais de 300 documentos sobre Qualidade Ambiental Interior (QAI) e produtividade em escritórios, a análise de Al Horr *et al.* (2016) destaca dois aspectos do conforto térmico, os quais serão detalhados a seguir. O primeiro aspecto destacado pelos autores se refere a condições e fatores do estado térmico denominados como tangíveis, como a temperatura do ar, a temperatura média radiante e umidade relativa do ar. O estado térmico pode desencadear diversas respostas humanas, devido à natureza subjetiva do conforto térmico. Nesse contexto se insere o segundo aspecto destacado, o qual se refere ao aspecto humano do conforto térmico. O aspecto humano destacado pelos autores inclui a percepção, aceitação e preferências em relação ao estado térmico. Após a revisão, os autores afirmam que o conforto térmico de um ocupante “depende muito

da idade, gênero, taxa metabólica, vestuário e padrão de atividade dos ocupantes (condições sedentárias ou estáveis) e do clima regional” (AL HERR *et al.*, 2016).

Em um levantamento de literatura sobre fatores que influenciam conforto humano em ambientes interiores, Frontczak e Wargocki (2011) concluíram que o tipo de edificação, clima externo e estação influenciam no conforto térmico, citando a seguinte situação: “Comparado a edifícios com ar-condicionado, as temperaturas neutras geralmente são mais altas em edifícios com ventilação natural e aumentam com a temperatura externa” (FRONTCZAK; WARGOCKI, 2011). Visto que os fatores são variados, é interessante saber mais sobre quais os fatores mais comumente estudados e quais as suas particularidades.

Uma das diferenças estudadas no âmbito do conforto térmico é a diferença entre gêneros. Alguns estudos demonstraram diferenças na sensação e preferências térmicas, além de diferenças no comportamento como por exemplo a vestimenta utilizada. No estudo de Nico, Liuzzi e Stefanizzi (2015), uma análise envolvendo 126 universitários foi realizada para avaliar o conforto térmico sob diferentes abordagens com foco na diferença entre gênero. Os resultados demonstraram que as mulheres tendem a sentir frio mais do que os homens, têm tendência a vestir roupas mais quentes e, portanto, preferem um ambiente mais quente. De acordo com a análise das respostas do questionário aplicado, 31,4% das mulheres acreditavam que a sala que ocupavam estava em estado de desconforto, em comparação com 8,9% dos homens. Resultados coerentes com o estudo anterior foram encontrados no estudo de Rupp *et al.* (2018). Os autores descobriram que para o caso em questão, em edifícios públicos de escritórios, as mulheres frequentemente sentem-se desconfortáveis devido à sensação de frio. Já para homens, a tendência é sentir desconforto pela sensação de calor mais do que as mulheres.

Considerando que o balanço térmico com o ambiente é o principal componente do conforto térmico, faz sentido olhar com mais atenção às peculiaridades do corpo humano já que estas podem influenciar na perda de calor para o ambiente. No estudo de Rupp *et al.* (2018), concluiu-se a depender da classificação do peso do ocupante (sobrepeso, peso normal ou abaixo do peso), há uma tendência a sentir desconforto devido às sensações diferentes: ocupantes com sobrepeso têm mais probabilidade de se sentir desconfortáveis pela sensação de calor enquanto que os demais têm mais probabilidade de se sentir desconfortáveis pela sensação de frio.

As experiências anteriores dos ocupantes, considerando a quais condições estes foram expostos, podem influenciar o conforto térmico na condição atual. Outro achado do estudo já citado de Rupp *et al.* (2018), se refere ao histórico pessoal com uso de sistemas de ar-condicionado. Os ocupantes que frequentemente usam ar-condicionado têm mais probabilidade a expressar desconforto devido à sensação de calor, enquanto que os que usam o sistema com menor frequência, tendem a sentir desconforto pela sensação de frio.

Como foi apresentado na seção sobre Qualidade Ambiental Interior, são vários os aspectos que a compõem além do conforto térmico. Existem evidências de que estes aspectos influenciam na avaliação uns dos outros. Um exemplo é apresentado no estudo de Yang *et al.* (2021), cujos resultados apresentaram uma relação entre a temperatura de correlação de cor (que se refere a aparência da cor da luz) e a percepção térmica. Para uma mesma temperatura do ar (igual a 26 °C ou 28 °C, consideradas dentro da faixa de conforto dos ocupantes), uma temperatura de correlação de cor alta (luz com aparência de cor mais “azulada”) faz com que o voto de sensação térmica das pessoas seja mais baixo. Ou seja, nestas temperaturas, quando a luz é mais “azulada”, o aspecto iluminação tem a capacidade de mudar a sensação térmica dos ocupantes, fazendo com estes tenham uma sensação mais fria do que teriam sem esta luz. Quando a diferença na temperatura de correlação de cor atinge 3000 K, há uma diferença significativa na sensação térmica experimentada em cada condição. Por exemplo, em 28°C, com uma iluminação de 3000 K (luz com aparência de cor mais “amarelada”), a maioria dos ocupantes, mais de 70%, sentiam-se levemente com calor (sensação de levemente quente). Quando a iluminação é alterada para 6000 K (luz com aparência de cor mais azulada), sob a mesma temperatura do ar, a maior parte dos ocupantes, mais de 80%, passa a ter sensação térmica neutra. Esta pesquisa demonstra claramente a influência de um aspecto de QAI sobre o conforto térmico.

## **2.2 Conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual**

Levando em consideração a variedade de concepções existentes sobre produtividade humana, é inevitável que surjam diferentes métodos de avaliação, sejam eles objetivos ou subjetivos, para contemplar os distintos aspectos que podem estar envolvidos. Esta multiplicidade de perspectivas pode dificultar o estudo da produtividade humana, especialmente no que se refere à compreensão do impacto do

ambiente sobre ela. Afinal, as formas de mensuração podem variar significativamente, e essa variabilidade pode trazer desafios para comparar e interpretar dados provenientes de diferentes estudos e contextos. Dessa forma, é importante considerar cuidadosamente as definições adotadas e os métodos utilizados ao se investigar a produtividade humana, a fim de garantir uma compreensão mais abrangente e precisa do fenômeno.

Conforme mencionado por Soto Muñoz *et al.* (2022), a produtividade auto-percebida é a melhor forma de reconhecer como o ambiente afeta as atividades diárias do ocupante, especialmente quando não há indicadores objetivos disponíveis. Portanto, é importante considerar a percepção subjetiva do indivíduo para avaliar o impacto do ambiente em suas atividades.

De acordo com Nico, Liuzzi e Stefanizzi (2015), o histórico das pesquisas envolvendo conforto térmico e produtividade inicia na década de 1960, quando Pepler e Warner (1968) foram os primeiros a investigar a relação entre ambiente térmico e performance intelectual de estudantes, com um estudo foi realizado em câmaras climáticas.

No estudo em questão, concluiu-se que a relação entre tempo para completar uma determinada tarefa e temperatura se mostrou como uma função de formato em “U” invertida, sendo que o maior tempo foi na temperatura igual a 26,7 °C. Entretanto, é a temperatura correspondente à menor taxa de erro (SEPPANEN; FISK; FAULKNER, 2003).

Os resultados deste primeiro estudo já evidenciaram a complexidade da relação estudada. Ao mesmo tempo que uma temperatura levou à uma baixa velocidade para completar uma tarefa, o que poderia ser considerado baixa performance, nesta mesma situação a taxa de acertos foi maior, o que pode ser considerada uma alta performance.

Neste contexto, faz-se compreensível a variedade de definições para produtividade, performance e desempenho, a depender da situação analisada. Somando a isso as dificuldades de avaliar o conforto térmico, percebe-se a complexidade em modelar a relação entre o conforto térmico e a produtividade no âmbito intelectual.

Outra questão se refere às suposições sobre a relação. É intuitivo supor que a produtividade será maior quando o indivíduo está mais confortável e que, considerando o ambiente térmico, este conforto é obtido numa sensação térmica

neutra, em que não se sente nem frio, nem calor. Entretanto, é possível que a realidade seja contraintuitiva. De acordo com Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023), muitos estudos demonstraram que a produtividade não é máxima quando o ambiente é confortável e neutro.

### 2.2.1 Fatores de influência

Os fatores de influência para o conforto térmico apresentados em seções anteriores, além de outros fatores não mencionados, evidentemente se refletem na relação conforto térmico e produtividade.

O fator gênero é exemplificado nas conclusões de Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023), onde afirma-se que homens eram mais produtivos quando a sensação era levemente com frio do que quando a sensação térmica era neutra. A maior produtividade para homens corresponde ao voto -0,61, entre levemente com frio (+1) e neutro (0). Já mulheres eram mais produtivas quando a sensação era levemente quente do que quando a sensação térmica era neutra. A maior produtividade para mulheres corresponde ao voto +0,26, entre neutro (0) e levemente com quente (+1). No estudo de Yeon e Delogu (2021), foram apresentados resultados coerentes com os do estudo anterior, no qual confirmou-se que há diferenças significantes entre os gêneros em relação à performance cognitiva e também em relação a sinais fisiológicos sob uma mesma temperatura. Este estudo ainda destacou que esta diferença pode ser mais ou menos significativa a depender de qual aspecto da produtividade em âmbito intelectual está sendo avaliado, por exemplo se é a capacidade de memória de trabalho ou a vigilância (referente ao tempo de resposta a um estímulo visual).

A influência de outro fator relevante, a idade do ocupante, é exemplificado pelo estudo de Jiang *et al.* (2018), que concluiu que o voto de sensação térmica que levou à performance ótima de estudantes de  $12.5 \pm 0.7$  anos é diferente do que o voto correspondente à maior produtividade de adultos. Para os estudantes, o voto é de -1,4, pois eles obtiveram a melhor performance quando a sensação estava entre levemente com frio (-1) e com frio (-2). Já para adultos, este voto está entre -1 e 0, ou seja, quando a sensação térmica está entre levemente com frio e neutra.

### 3 METODOLOGIA

A presente seção apresenta a metodologia proposta e tem como finalidade fornecer uma descrição detalhada de como abordou-se o problema de pesquisa em questão. Na metodologia será apresentada a classificação da pesquisa, quanto à natureza, objetivo, abordagem e técnica de coleta de dados. Em seguida, será apresentado um fluxograma com as principais etapas a serem realizadas. Por fim, serão apresentados os métodos, técnicas e procedimentos que serão utilizados visando a obtenção resultados confiáveis para responder às questões levantadas no problema de pesquisa.

#### 3.1 Classificação da pesquisa

As classificações pontuais da presente pesquisa, conforme o aspecto considerado, são apresentadas no quadro 1.

**Quadro 1 – Classificação da pesquisa**

<b>Aspecto</b>	<b>Classificação</b>
Natureza	Teórica
Objetivo	Explicativa
Abordagem	Mista
Método	Empírico-analítica, descritiva e bibliográfica
Técnica de coleta	Dados secundários

**Fonte: Autoria própria (2023)**

A pesquisa tem natureza teórica, pois revisa modelos e teorias e visa contribuição para o conhecimento científico atual. Em relação ao objetivo, visto que o objetivo se refere a comparar modelos para obter explicações particulares sobre a realidade, a pesquisa é explicativa e busca as causas de um efeito. Segundo Lozada e Nunes (2019), “a pesquisa explicativa é o tipo de abordagem que mais aprofunda o conhecimento da realidade, já que busca explicar por que os fenômenos ocorrem”. A presente pesquisa apresenta uma abordagem mista, envolvendo elementos tanto qualitativos quanto quantitativos. Ao listar, descrever e analisar os modelos existentes dentro do tema delimitado, a partir de uma revisão sistemática, a pesquisa demonstra a abordagem qualitativa. E, ao utilizar métodos estatísticos para mensurar erros e agrupar dados em *clusters*, a pesquisa demonstrará a abordagem quantitativa.

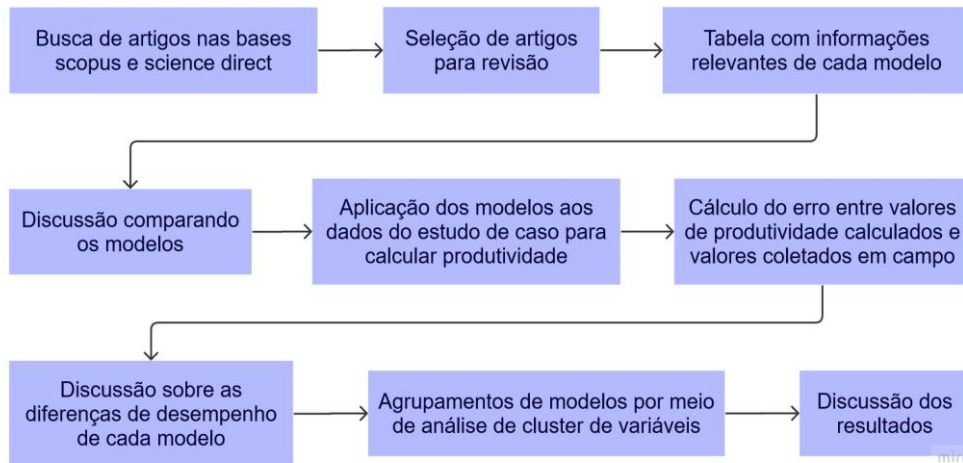
A pesquisa pode ser enquadrada nas seguintes classificações apresentadas por Matias-Pereira (2016): empírico-analítica, descritiva e bibliográfica. Bibliográfica pelo objetivo relacionado à revisão da literatura. Descritiva pelo estudo das características do fenômeno e dos modelos propostos para o mesmo. Empírico-analítica porque envolve coleta, tratamento e análise de dados quantitativos.

Segundo Matias-Pereira (2016), “técnicas de investigação são os procedimentos específicos por meio dos quais o pesquisador reúne e ordena os dados antes de submetê-los a operações lógicas ou estatísticas”. Neste trabalho, a técnica se refere à coleta de dados já realizada no estudo de caso em uma universidade no Sul do Brasil e à coleta de dados secundários em artigos científicos após uma revisão sistemática. A técnica a ser utilizada é, portanto a coleta de dados secundários. A coleta foi feita através da revisão sistemática em bases de periódicos científicos para seleção de modelos da relação entre conforto térmico e produtividade, identificação das técnicas de modelagem usadas para o desenvolvimento dos mesmos e outras informações particulares de cada modelo. Outros dados coletados são os dados do estudo de caso realizado por Bueno *et al.* (2023), que incluem variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa) e um questionário obtenção de dados relativos à produtividade, conforto térmico e características pessoais, como idade, gênero, etc.

### **3.2 Fluxograma**

As principais etapas a serem executadas são apresentadas no fluxograma da figura 2.

**Figura 2 – Etapas da metodologia**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.3 Analisar a literatura existente

Para realizar a busca na literatura modelos matemáticos e técnicas de modelagem utilizadas para representar a relação entre conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual utilizou-se como protocolo de revisão sistemática de literatura o PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, que significa Itens de Relato Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Metanálises) (PAGE *et al.*, 2021). Para contemplar o assunto da pesquisa, foi utilizada a seguinte combinação de palavras-chave: ("produtividade" OU "desempenho intelectual" OU "desempenho acadêmico" OU "desempenho de aprendizagem" OU "desempenho estudantil" OU "desempenho cognitivo" ) E ( ( "conforto térmico" OU "conforto adaptativo" OU "sensação térmica" OU "satisfação térmica" ) E ( "ensino médio" OU "universidade" OU "sala de aula" OU "escritório" OU "prédios educacionais" OU "ambientes educacionais" OU "câmara" ) ).

Considerando que a busca será restringida a artigos em inglês, a combinação a ser de fato inserida na ferramenta de busca das bases é: ("productivity" OR "intellectual performance" OR "academic performance" OR "learning performance" OR "student performance" OR "cognitive performance") AND ( ( "thermal comfort" OR "adaptive comfort" OR "thermal sensation" OR "thermal satisfaction" ) AND ( "high school" OR "university" OR "classroom" OR "office" OR "educational buildings" OR "educational environments" OR "chamber" ) ).

O uso de “produtividade” e “performance” como parte dos termos de busca teve como fim abranger as diferentes abordagens para avaliação de atividades intelectuais. Apesar de diferenças, eventualmente são consideradas como sinônimos. A partir de uma análise da literatura sobre ambiente física de escritórios e resultados dos funcionários, Appel-Meulenbroek, Clippard e Pfnür (2018) comentam sobre as definições utilizadas para estes resultados, como desempenho (performance) e produtividade:

O desempenho descreve como alguém é capaz de realizar algo e geralmente é medido subjetivamente por meio da autopercepção ou avaliações de supervisores. [...] A produtividade é um parâmetro mais tangível em tarefas repetitivas, pois mostra a taxa de entrada e saída, mas geralmente também é medida de maneira percebida para trabalhadores de escritório. A subdivisão entre desempenho e produtividade gerou muita discussão entre os autores, uma vez que muitos estudos usam desempenho e produtividade como itens redundantes. (APPEL-MEULENBROEK; CLIPPARD; PFNÜR, 2018).

Este estudo tem como um objetivo comparar estatisticamente os modelos selecionados partindo da ideia de que todos se enquadram na definição de modelagem da produtividade no âmbito intelectual, independente das diferenças em definições utilizadas em cada estudo. Logo, nas discussões deste estudo a variação em definições é desconsiderada, e o termo produtividade é utilizado para se referir tanto à produtividade quanto à performance.

A busca foi realizada em bases de dados científicas Science Direct e Scopus utilizando as palavras-chave selecionadas. Foram incluídos estudos classificados como artigos publicados em periódicos, sem recorte temporal, considerando apenas artigos em inglês.

Foram removidos estudos duplicados ou com informações incompletas. Em seguida, pela leitura dos resumos, foram excluídos estudos que não abordem diretamente a relação entre conforto térmico em ambientes internos e produtividade no contexto intelectual, além de artigos que não apresentem modelos matemáticos ou técnicas de modelagem aplicáveis. Pela leitura completa dos estudos remanescentes, foram selecionados modelos que usaram parâmetros compatíveis com os dados disponíveis para este estudo, ou seja, os dados coletados no estudo de caso em uma universidade no sul do Brasil. Os parâmetros considerados incluem temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa, isolamento térmico da vestimenta, velocidade do ar, e índice de conforto térmico previsto, entre outros relevantes.

Após a definição dos estudos incluídos, foi realizada uma comparação entre os métodos utilizados. Construiu-se um quadro com informações relevantes como: método de avaliação do conforto térmico, método de avaliação da produtividade, modelos desenvolvidos, participantes, local do estudo. Discutiu-se as semelhanças, diferenças, e características prevalentes entre os estudos.

A análise dos resultados obtidos a partir da revisão sistemática é qualitativa, destacando e discutindo os modelos matemáticos.

### 3.4 Comparar o desempenho de modelos

Para a comparação dos modelos selecionados, estes foram aplicados a dados de um estudo de caso real. O estudo de caso em questão foi realizado em uma universidade localizada na região sul do Brasil por Bueno *et al.* (2023). Substituindo as variáveis independentes de cada modelo pelos valores da variáveis independentes coletados no estudo de caso, calcula-se a produtividade de cada caso conforme cada modelo. Os valores de produtividade calculados pelos modelos a partir dos valores de campo, foram comparados utilizando medida de erro, sendo esta a raiz do erro quadrado médio (RMSE, do inglês, *Root Mean Square Error*). Essa medida permite avaliar as diferenças existentes entre as estimativas de produtividade fornecidas pelos modelos e os valores reais observados no ambiente de estudo.

Para comparar o desempenho dos modelos selecionados foram necessárias algumas adaptações e considerações. O valor da produtividade equivalente a 100% calculado por meio dos modelos, resulta em 100 ou 1, a depender do modelo. Para comparação, as equações que calculavam produtividade em escala 0 a aproximadamente 100 foram alteradas para que resultassem em escala de 0 a aproximadamente 1. Outra adaptação necessária foi feita nas equações dos modelos 5 e 6, conforme apresentado na tabela 4.

**Tabela 4 – Adaptação dos modelos**

<b>Modelo</b>	<b>Original</b>	<b>Adaptado</b>
5	$Pm = -0.07(TSV - 0.23)^2 + 6.54$	$Pm = \{[-0.07(TSV - 0.23)^2 + 6.54] * 0,1\} + 0,3$
6	$Ph = -0.09(TSV + 0.61)^2 + 7.16$	$Ph = \{[-0.09(TSV + 0.61)^2 + 7.16] * 0,1\} + 0,3$

**Fonte: Aatoria própria (2023)**

Os modelos resultavam em uma pontuação em uma escala de variação da produtividade que vai de 1 a 13, avaliando variação na produtividade de -60% em relação ao usual (pontuação 1) até +60% em relação ao usual (pontuação 13), em intervalos de 10%. A pontuação 7 equivale à ausência de variação, ou seja, a

produtividade usual. A equação foi adaptada conforme a tabela 4, para que resultasse diretamente no valor de variação que a escala representa, acrescido de 100%. Ou seja, para a pontuação 7, sem variação, o valor de produtividade resultante é 100%, e para a pontuação 13, 160%. Desta maneira, a escala considerada se assemelha às escalas de outros 4 estudos que tomam como valor de referência a produtividade média de cada indivíduo.

### 3.5 Categorizar modelos

Para categorizar os modelos de acordo com suas similaridades e diferenças, é usada a análise de *cluster* hierárquico de variáveis. Nesse contexto, as variáveis consideradas são os valores de produtividade calculados pelos diferentes modelos.

Optou-se por utilizar o cluster hierárquico de variáveis. Para as demais técnicas, o número de cluster é definido inicialmente pelo analista e o resultado é este número fixo de clusters, como o k-means (que se refere a k clusters) (MAROCO, 2003). Desta maneira não seria possível observar os estágios de agrupamento. Com o cluster hierárquico há a possibilidade de visualizar inúmeras soluções (clusters) num mesmo gráfico, e avaliar os estágios de agrupamento. Assim, é possível verificar os níveis crescentes de similaridade entre as variáveis, observando a formação dos clusters de variáveis menos e mais abrangentes.

O processo que caracteriza a análise de cluster hierárquico é explicado por Bridges (1966) é descrito a seguir:

- A análise de cluster é iniciada pela criação de uma matriz de proximidade entre as variáveis. A medida de similaridade é obtida para todos os possíveis pares de variáveis. Os valores se referem à distância euclidiana quadrática, logo os menores valores se referem à maior proximidade e vice-versa.
- Após, os agrupamentos se iniciam. São obtidas as medidas de similaridade para as combinações de grupos, considerando como grupo os pares ou a variável individual. A cada estágio é avaliado se entre dois grupos o nível de similaridade é o máximo. Se sim, então estes dois grupos são combinados em um.

- No estágio seguinte, avalia-se se algum grupo pode ser incluído na combinação anterior, por ter o máximo nível de similaridade com a combinação.
- Estes estágios se desenvolvem, agrupando as variáveis até que haja apenas um grupo combinando todas as variáveis.

Com os valores de proximidade e desenvolvimento dos estágios é possível obter uma representação gráfica do processo. Esta representação é o dendrograma. Nele, apresenta-se “um conjunto de categorias aninhadas que mostram como organismos individuais são agrupados em categorias sucessivamente maiores e mais abrangentes.”

Com a análise de *cluster*, foram agrupados grupos de modelos que possuem similaridades entre si em termos de suas estimativas de produtividade. Realizou-se uma discussão dos agrupamentos identificados, investigando padrões e se estes podem ser atribuídos a algum fator específico que possa ter influenciado no cálculo da produtividade.

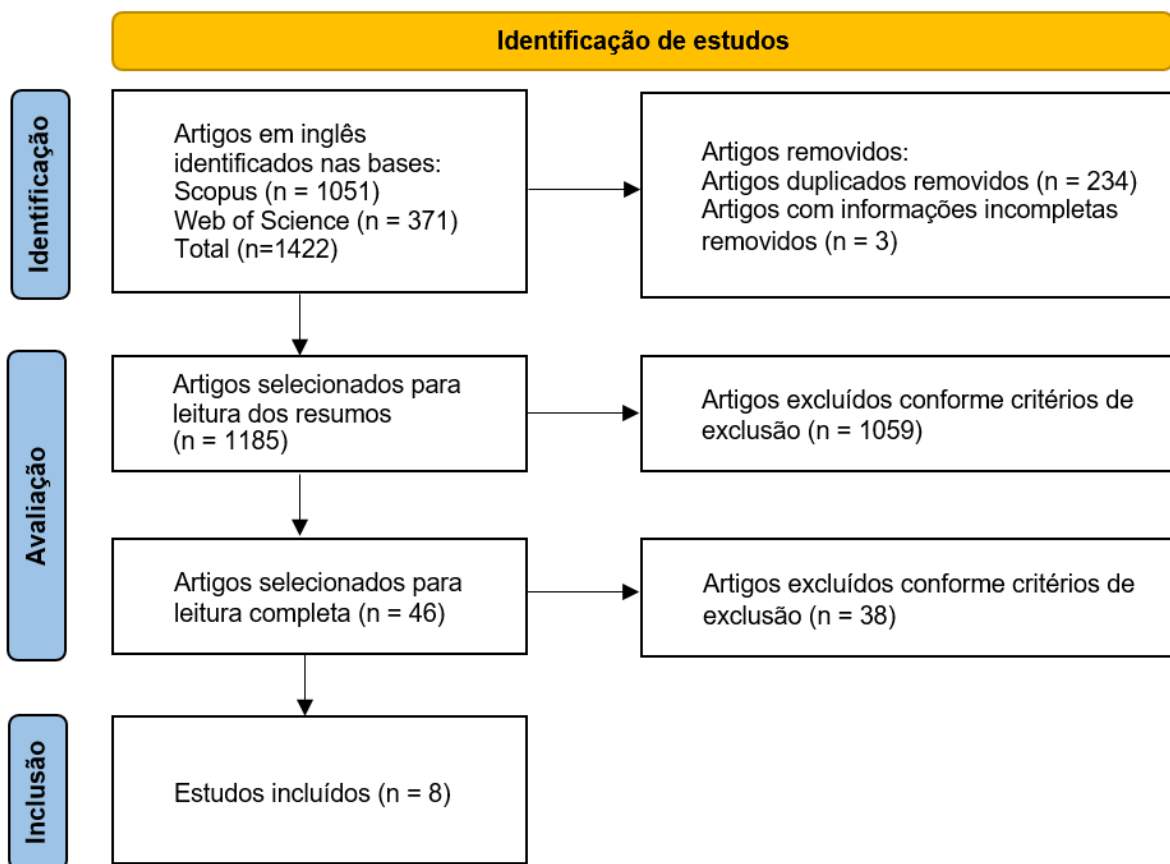
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas etapas da metodologia relacionadas a cada um dos objetivos específicos.

### 4.1 Análise da literatura existente

O resultado da busca realizada nos periódicos de artigos científicos utilizando a combinação de palavras-chave definida e utilizando o método PRISMA é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – PRISMA



Fonte: Autoria própria (2023)

Foram obtidos 1422 artigos na busca nas bases de dados. Em seguida, foram retirados 234 estudos duplicados, ou seja, artigos que estavam nas duas bases de dados e 3 artigos com informações incompletas, restando 1185 artigos. Após a leitura dos resumos destes artigos, foram excluídos aqueles que não abordavam diretamente a relação entre conforto térmico em ambientes internos e produtividade no âmbito intelectual ou que não apresentavam modelos matemáticos com as variáveis do estudo de caso ou técnicas de modelagem aplicáveis. Restaram 46 artigos para serem

lidos na íntegra. Durante a leitura, considerou-se os mesmos critérios de exclusão anteriores. Entretanto, viu-se a necessidade de adicionar outros critérios, relacionados à escala da avaliação de produtividade e uso de temperaturas extremas. Considerando que o estudo de caso utilizou uma escala percentual, foram excluídos estudos que utilizaram escalas absolutas de pontuação em testes cognitivos, ou outras escalas que dificultariam a análise comparativa. Estudos que analisavam os efeitos de condições extremas sobre atividades cognitivas foram excluídos, visto que não são coerentes com o estudo de caso. Finalmente, foram selecionados 8 estudos, que ao todo apresentaram 13 modelos.

As informações relevantes dos estudos selecionados para análise dos modelos são apresentadas no quadro 2. Foram extraídas informações quanto ao método de avaliação do conforto térmico, método de avaliação da produtividade, modelos desenvolvidos, participantes, local do estudo. No quadro,  $TSV$  é o voto de sensação térmica na escala de 7 pontos da ASHRAE e  $t$  é a temperatura do ar em °C.

Quadro 2 – Modelos selecionados

Referência	Métodos de avaliação do conforto térmico e da produtividade	Modelos desenvolvidos	Participantes e informações sobre local
Cui <i>et al.</i> (2013)	O TSV foi coletado em cinco condições de estado estacionário (22 °C, 24 °C, 26 °C, 29 °C, 32 °C). A performance foi considerada pelo número de letras corretas em um teste de memória para digitação, usado como simulação de trabalho de escritório. PR é a performance relativa calculada com base na performance normalizada máxima do indivíduo. Foi utilizada análise de regressão. Medidas repetidas.	Modelo 1: $PR = -0,7315 TSV^2 - 0,2038 TSV + 99,67$ $R^2 = 0,9697$	Estudantes universitários chineses (n=20, 10 homens e 10 mulheres) recrutados para o experimento. Idade média de 22,3 anos.  Câmara climática.
Geng <i>et al.</i> (2017)	O TSV foi coletado em sete condições (temperatura de 16 a 28°C, variando em intervalos de 2°C). A produtividade considerou o tempo de resposta e acurácia em três testes, os quais envolveram soma de dígitos, discernir informação gráfica, memória de curto prazo de texto para digitação. PR é a performance relativa normalizada do indivíduo, ou seja, a sua performance em uma condição determinada sobre a sua performance média em todas as condições. Medidas repetidas.	Modelo 2: $PR = -0,0027 t^2 + 0,1262 t - 0,4134$ $R^2 = 0,8968$  Modelo 3: $PR = -0,012 TSV^2 - 0,0005 TSV + 1,0242$ $R^2 = 0,903$	Participantes voluntários da Universidade Tsinghua (n=21, 12 homens e 9 mulheres). Idade média de 21,7 anos.  Ambiente de escritório controlado com 2 ar-condicionados na Universidade Tsinghua, em Pequim, China. Transição outono-inverno.
Jiang <i>et al.</i> (2018)	Um total de seis condições de temperatura, variando de 10 °C a 20 °C, foi utilizado durante o experimento. A performance considerou o tempo de resposta e acurácia em testes cognitivos de aprendizagem, divididos nas seguintes categorias: atenção, percepção, compreensão e dedução. PR é a performance relativa normalizada do indivíduo, ou seja, a sua performance em uma condição determinada sobre a sua performance média em todas as condições. Medidas repetidas.	Modelo 4: $PR = 0,30 t^3 - 14,75 t^2 + 234,75 t - 1096,70$	Alunos chineses selecionados (n=12). Faixa etária de 9 a 16 anos.  Ambiente de sala de aula controlado com 2 ar-condicionados em uso.

Referência	Métodos de avaliação do conforto térmico e da produtividade	Modelos desenvolvidos	Participantes e informações sobre local
Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023)	<p>O TSV foi coletado em duas condições (ar-condicionado ajustado para PMV = 0, com distribuição de temperatura do ar de 22 a 25°C e ajustado para PMV = 0,5, com distribuição de temperatura do ar de 24 a 27°C). A variação na produtividade em comparação com um dia usual de trabalho foi reportada pelos participantes. Pm é a pontuação em uma escala de variação na produtividade para mulheres e Ph é a pontuação em uma escala de variação na produtividade para homens. Foi aplicada análise multinível utilizando um modelo linear hierárquico (MLH). Medidas repetidas.</p>	<p>Modelo 5:  <math display="block">Pm = -0.07(TSV - 0.23)^2 + 6.54</math> </p> <p>Modelo 6:  <math display="block">Ph = -0.09(TSV + 0.61)^2 + 7.16</math> </p>	<p>Trabalhadores do edifício foram recrutados (n = 21, 17 homens e 4 mulheres). Mais de 75% têm entre 40 e 60 anos.</p> <p>Escritório com ar-condicionado em Tóquio, Japão. O clima local é (Cfa) de acordo com a classificação climática de Köppen. Início do verão.</p>
Kim <i>et al.</i> (2020)	<p>O TSV foi coletado utilizando uma escala adaptada, de 13 pontos, incluindo valores medianos (-2,5, -1,5, -0,5, 0,5, 1,5 e 2,5). Foram utilizadas cinco condições térmicas, ajustando a câmara climática para PMV -2, -1, 0, 1 e 2. A performance considerou o tempo de resposta e acurácia em quatro testes cognitivos, para avaliar a capacidade de atenção, capacidade perceptual, capacidade de memória de trabalho e capacidade executiva. PR é a performance relativa calculada com base na performance normalizada máxima do indivíduo. Foi utilizada regressão polinomial. Medidas repetidas.</p>	<p>Modelo 7:  <math display="block">PR = -0,0013 t^2 + 0,0674 t + 0,1354</math> </p> <p>Modelo 8:  <math display="block">PR = -0,0059 TSV^2 + 0,0055 TSV + 0,9987</math> </p>	<p>Estudantes universitários voluntários para o experimento (n=20, 16 homens e 4 mulheres). Faixa etária de 23 a 32 anos, com idade média de 26,65 anos.</p> <p>Câmara climática localizada na Universidade Yonsei em Seul.</p>
Lan, Wargocki e Lian (2011)	<p>O TSV foi coletado em duas condições térmicas (temperatura do ar 22°C e 30°C, que resultaram em TSV igual a 0,01 e 2,14). A performance considerou o tempo de resposta e acurácia em atividades simuladas de escritório, como digitação de texto e adição, e em uma variedade de testes neurocomportamentais que examinaram diferentes habilidades, incluindo redirecionamento, raciocínio gramatical, memória de dígitos, memória de aprendizado visual, cálculos numéricos (adição, subtração e multiplicação), Teste de Stroop, tempo de reação de escolha, lógica e imaginação espacial. PR é a performance relativa calculada com base na performance normalizada máxima do indivíduo. Foi utilizada regressão polinomial. Medidas repetidas com repetição.</p>	<p>Modelo 9:  <math display="block">PR = -0,0351 TSV^3 - 0,5294 TSV^2 - 0,215 TSV + 99,865</math> </p>	<p>O estudo combinou dados de diferentes experimentos, sendo 3 amostras consideradas. Voluntários (n=12, 6 mulheres e 6 homens), estudantes universitários (n=24, 12 mulheres e 12 homens), estudantes (n=21, 6 mulheres e 15 homens). Idade média de 23 anos, 25 anos (com faixa de 19 a 30) e 19 anos (com faixa de 18 a 20), respectivamente.</p> <p>Escritórios comuns adaptados para os experimentos.</p>

Referência	Métodos de avaliação do conforto térmico e da produtividade	Modelos desenvolvidos	Participantes e informações sobre local
Liu <i>et al.</i> (2021)	<p>O TSV foi coletado em quatro condições, após transição entre ambientes com diferentes temperaturas (34 °C para 28 °C, 34 °C para 26 °C, 34 °C para 24 °C, 34 °C para 22 °C). A performance considerou o tempo de resposta e acurácia em testes cognitivos. Foram usadas 2 tarefas para cada habilidade: atenção, memória, percepção e pensamento.</p> <p>PR é a performance relativa normalizada do indivíduo, ou seja, a sua performance em uma condição determinada sobre a sua performance média em todas as condições. Foi utilizada análise de regressão.</p>	<p>Modelo 10:  <math>PR = -0,19 t^2 + 9,63 t - 20,952</math>  <math>R^2 = 0,847</math></p> <p>Modelo 11:  <math>PR = -0,283 TSV^3 - 0,902 TSV^2 - 0,581 TSV + 99,959</math>  <math>R^2 = 0,813</math></p>	<p>Estudantes universitários voluntários (n=16, 8 homens e 8 mulheres). Idade média 23,5 anos.</p> <p>Salas climatizadas para simular a situação de estudantes entrando na sala de aula vindo do exterior no verão quente, usando ar-condicionado e aquecedores. Wuhan, China. Transição primavera-verão.</p>
Wang <i>et al.</i> (2018)	<p>O TSV foi coletado em seis condições (temperatura do ar igual a 22 °C, 24 °C, 26 °C, 27 °C, 29 °C e 30 °C). A performance considerou o tempo de resposta e acurácia em testes de aprendizado. Foram usadas 12 tarefas no teste de aprendizado, que abordaram os quatro aspectos de percepção, atenção, memória-aprendizado e pensamento.</p> <p>PR é a performance relativa normalizada do indivíduo, ou seja, a sua performance em uma condição determinada sobre a sua performance média em todas as condições.</p>	<p>Modelo 12:  <math>PR = -0,062t^3 + 4,691t^2 - 115,898t + 1039,842</math></p> <p>Modelo 13:  <math>PR = -0,100 TSV^3 - 0,804 TSV^2 + 2,035 TSV + 102,675</math></p>	<p>Alunos selecionados por suas similaridades e outros critérios (n = 12). Faixa etária de 12 a 14 anos.</p> <p>Ambiente de sala de aula simulada. Henan Province, China.</p>

Fonte: Autoria própria (2023)

A busca inicial para obtenção de artigos considerou três fatores:

- produtividade no âmbito intelectual, por meio dos termos de busca *productivity, intellectual performance, academic performance, learning performance, student performance, cognitive performance*;
- conforto térmico, por meio dos termos de busca *thermal comfort, adaptive comfort, thermal sensation, thermal satisfaction*;
- e ambiente considerado, por meio dos termos de busca *high school, university, classroom, office, educational buildings, educational environments, chamber*.

Em relação ao fator produtividade no âmbito intelectual, dos 8 estudos selecionados, 7 utilizaram métodos objetivos (desempenho em testes cognitivos e testes equivalentes) e 1 utilizou método subjetivo (auto-avaliação) para mensurar a produtividade.

Métodos objetivos se referem ao desempenho real dado pela pontuação em testes aplicados para avaliar habilidades cognitivas específicas. Já no caso dos métodos subjetivos, estes se referem à percepção do indivíduo quanto à sua produtividade atual, ou seja, o quão produtivo o indivíduo se sente naquele momento. Esta produtividade pode ser avaliada subjetivamente de maneira direta, perguntando ao indivíduo o quão produtivo ele sente em uma escala percentual, ou o quanto a produtividade dele naquele momento está acima ou abaixo do usual, como é o caso do estudo de Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023), o único selecionado que utilizou método subjetivo para avaliação. Outra maneira de obter produtividade por método subjetivo, mas de maneira indireta, é pelo uso de ferramentas que consideram não só a auto-percepção quanto à produtividade atual mas também outros fatores que podem influenciar na mesma, como é o caso da ferramenta utilizada no estudo de caso de (BUENO *et al.*, 2023). A ferramenta calcula uma pontuação com base em perguntas que abordam, entre outros fatores, a sensação de cansaço, estado de humor, sintomas físicos (dor de cabeça, tontura) e satisfação com o próprio desempenho.

Apesar da seleção dos modelos ter sido limitada ao uso de escala percentual para avaliar a produtividade, existem diferenças relevantes na metodologia para obtenção dos resultados. Em 3 estudos, o valor de referência para cálculo da porcentagem é o valor da produtividade máxima do indivíduo, ou seja, cada indivíduo tem sua produtividade percentual calculada com base na sua própria produtividade

máxima. Em outros 5 estudos, incluindo aquele que utilizou avaliação subjetiva, o valor de referência é a produtividade média de cada indivíduo. Assim, em alguns casos o modelo foi desenvolvido para uma escala até 100%, e em outros casos para uma escala que ultrapassa 100%. Em todo caso, a metodologia foi definida para reduzir as diferenças entre indivíduos. No caso do estudo de caso, a porcentagem é baseada na pontuação máxima de produtividade que pode ser obtida.

Em relação ao fator conforto térmico, os termos de busca utilizados permitiram obter estudos que tratam do conforto térmico por meio de escalas que avaliam diretamente o conforto térmico, como é o exemplo da escala de satisfação térmica, e pela escala de sensação térmica (que resulta no TSV). Entretanto, o TSV não se refere ao conforto diretamente, pois um mesmo voto de sensação térmica pode significar conforto para um indivíduo e desconforto para outro, como já mencionado no referencial teórico. Isto é explicitado pelo PPD (porcentagem prevista de insatisfeitos), que determina que o mínimo de insatisfeitos em um grupo exposto ao mesmo ambiente térmico é 5%. Outra questão que aborda esta diferença é a diferença entre gêneros. Assim, a utilização do TSV em alguns modelos leva a uma ligeira divergência quanto a definição original do estudo, que passa de modelos de conforto térmico e produtividade para modelos de sensação térmica e produtividade. Dos 13 modelos selecionados, 8 utilizam o TSV como variável independente. Nos outros 5, utiliza-se a temperatura, situação esta que leva a uma divergência ainda maior. Para que a temperatura resulte em um determinado estado de conforto térmico, existem fatores que devem ser levados em consideração. O mais óbvio é o isolamento da roupa. Por este motivo, nos estudos de Geng *et al.* (2017), Kim *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2018) foram dadas orientações para que as vestimentas dos participantes estivessem em determinado padrão, a fim de manter o mesmo nível de isolamento térmico (1,0 clo, 0,61 clo e 0,41 clo, respectivamente). No estudo de Jiang *et al.* (2018), foi solicitado que os participantes utilizassem vestimentas de maneira que se sentissem ou em estado neutro ou levemente aquecido, conforme se sentissem confortáveis, sendo a média de isolamento térmico resultante igual a 1,5 clo. No estudo de Liu *et al.* (2021), foi solicitado que os participantes usassem roupas que garantissem seu conforto conforme a temperatura externa, que era aproximadamente 34°C, sendo a média de isolamento térmico resultante igual a 0,5 clo. No estudo de caso, entretanto, não houve interferência no uso das vestimentas. Por um lado, padronizar as vestimentas auxilia na avaliação do efeito da temperatura sobre a produtividade, pois mantém a variável

isolamento térmico fixa. Por outro lado, desconsidera os pressupostos do conforto adaptativo, que diz respeito às medidas adaptativas que o indivíduo usa, como por exemplo adicionar ou remover peças de roupa.

Por último, quanto ao fator ambiente considerado, dois os estudos foram realizados em câmaras climáticas, três em salas de aula simuladas/adaptadas e dois em escritórios simulados/adaptados. Apenas um estudo (KAWAKUBO; SUGIUCHI; ARATA, 2023) foi realizado em ambiente real com os indivíduos frequentadores do respectivo ambiente. Para este estudo, foram recrutados trabalhadores do edifício e a única interferência no cenário foi no ajuste do ar-condicionado dos andares de escritórios envolvidos na pesquisa. O questionário era aplicado online 3 vezes no dia. Neste sentido, o estudo de Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023) se assemelha com o estudo de caso, o qual também foi aplicado em um ambiente real, com questionário online e com os frequentadores do ambiente.

Quanto à modelagem dos dados, todos fizeram uso da análise de regressão, com destaque para o estudo de Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023) que utilizou análise multinível para considerar a estrutura hierárquica dos dados, pois “dados hierárquicos desse tipo muitas vezes não atendem à suposição de independência das amostras, o que tende a causar um erro do Tipo I ao realizar uma análise de regressão comum” (KAWAKUBO; SUGIUCHI; ARATA, 2023).

A consideração da estrutura hierárquica dos dados, como feito por Kawakubo, Sugiuchi e Arata (2023), demonstra uma abordagem metodológica mais refinada, reconhecendo as limitações das análises de regressão convencionais, que pode aumentar a acurácia do modelo. O cálculo de performance normalizada para cada indivíduo realizada em outros estudos, pode ser utilizado para reduzir as diferenças individuais em níveis de performance e avaliar a variação da performance conforme condições ambientais.

Outros aspectos relevantes se referem ao pagamento aos participantes, feito nos estudos de Cui *et al.* (2013); Geng *et al.* (2017); Jiang *et al.* (2018) e Lan, Wargocki e Lian (2011). No caso do estudo de (2013); Geng *et al.* (2017) os participantes eram informados que o pagamento dependia da pontuação obtida nos testes, portanto haveria bônus. Este fator pode influenciar significativamente nos resultados. No estudo de Cui *et al.* (2013), foram avaliadas as variáveis temperatura, motivação e performance, entre outras. Por meio das análises, os autores concluíram que a motivação influencia mais na performance que a temperatura, e adicionam que “se a

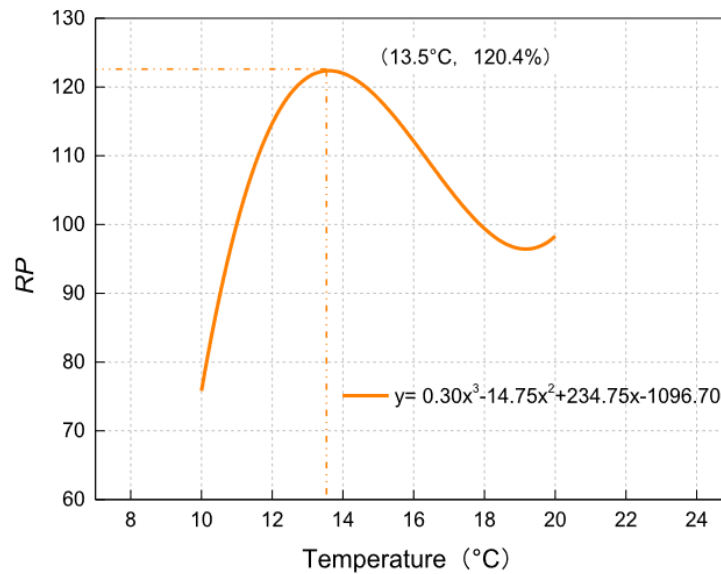
motivação for mantida inalterada utilizando outros fatores (como bônus), a mudança na temperatura do ar não teria muito impacto no desempenho”. Neste caso, a afirmação se refere às conclusões tiradas com o estudo realizado em condições aceitáveis, e pode não ser aplicável para condições térmicas extremas (CUI *et al.*, 2013).

A variedade de métodos e definições para abordar a produtividade, de condições ambientais consideradas, de escalas e variáveis utilizadas nos modelos, identificada durante a análise dos estudos revelou dificuldades potenciais para a análise comparativa. Ações para contornar estas e outras diferenças entre os modelos são apresentadas na seção seguinte.

## **4.2 Comparação do desempenho de modelos**

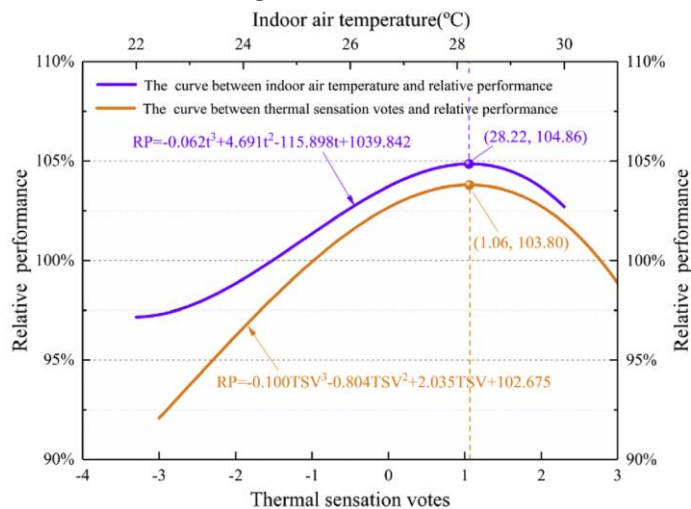
Considerando a metodologia de cada estudo e a natureza das equações dos modelos, alguns destes não podem ser aplicados integralmente aos dados deste estudo de caso. É o caso dos modelos 12 e 4, com equações de 3º grau desenvolvidas para uma faixa específica de temperatura. O modelo 12 foi desenvolvido para representar dados obtidos em experimento realizado na faixa de 22 a 30°C. O modelo 4 foi desenvolvido para representar dados obtidos em experimento realizado na faixa de 10 a 20°C. Desta maneira, a curva projetada pela função nesta faixa se assemelha à curva típica para esse tipo de estudo, ou seja, se assemelha à parábola de uma função quadrática, conforme apresentado na figura 4 e 5. Entretanto, fora da faixa, o comportamento da função se altera e os resultados não são válidos. Esta discrepância não pode ser considerada para o desempenho do modelo, visto que é uma particularidade de seu desenvolvimento e os erros gerados seriam resultados da aplicação inadequada. Assim, optou-se para estes casos aplicar o modelo apenas dentro da faixa de temperatura equivalente à faixa utilizada no estudo original.

Figura 4 – Modelo 4



Fonte: Jiang et al. (2018)

Figura 5 – Modelo 12



Fonte: Wang et al. (2018)

Para o caso dos modelos 5 e 6, desenvolvidos para cada gênero, foram aplicados aos dados dos respectivos gêneros. Optou-se por utilizar como medida de desempenho a raiz do erro quadrado médio, referenciado por RSME (*Root Square Mean Error*), calculado para cada modelo aplicado aos dados originais.

Apesar das adaptações realizadas para aumentar a semelhança entre as escalas, optou-se por realizar a análise de desempenho comparando os dados percentuais (brutos) e os dados padronizados. A padronização dos dados em *z score* elimina as unidades originais e as substitui por uma unidade universal, o desvio padrão (PAGANO, 2009). Desta maneira, a diferença entre escalas baseadas no valor

máximo ou valor médio de produtividade é eliminada e todos os dados passam a ter a mesma média. Neste cenário, é possível analisar o desempenho por meio do RMSE dos dados padronizados como equivalente ao desempenho que os modelos teriam se utilizassem uma mesma escala, baseada na produtividade média. A comparação dos valores padronizados pode revelar então a diferença na distribuição dos dados. O ideal é que a diferença seja nula, conforme o cenário descrito por Pagano (2009):

Se as pontuações emparelhadas ocupam a mesma posição relativa dentro de suas próprias distribuições, então a correlação deve ser perfeita ( $r \approx 1$ ), pois conhecer um dos valores emparelhados nos permitirá prever exatamente o outro valor. Se a previsão é perfeita, a relação deve ser perfeita. (PAGANO, 2009)

Ao utilizar os dados brutos, as relações analisadas neste trabalho (entre o que é observado e o que é predito pelos modelos) podem ser obscurecidas devido às diferentes referências que as escalas utilizam, mas com a padronização estas relações podem ser esclarecidas. Assim, após a aplicação dos modelos, calculou-se o *z score* para as séries dos dados originais do estudo de casos selecionados para aplicação de cada modelo e para as séries resultantes da aplicação.

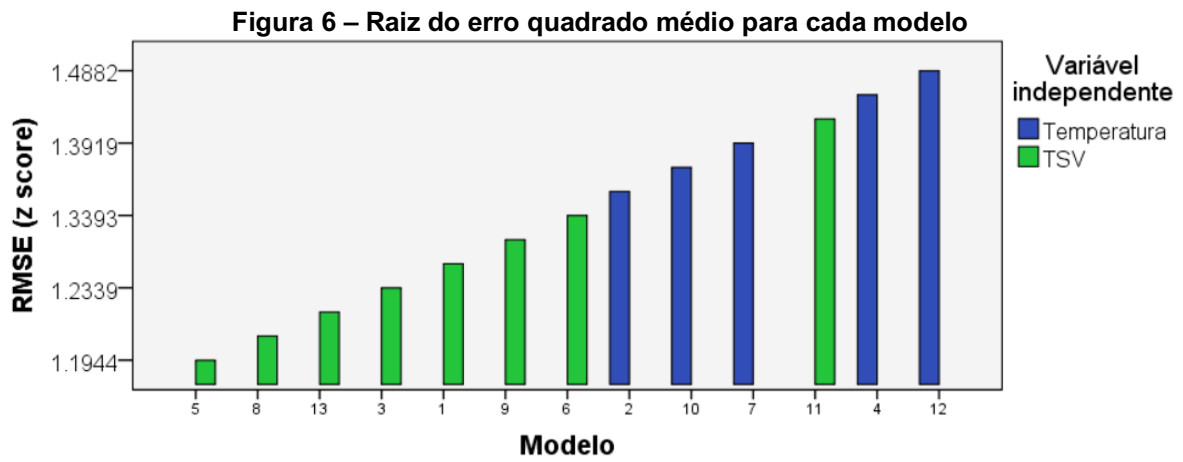
Na tabela 5 são apresentados os resultados da aplicação dos modelos aos dados originais, a média e desvio padrão da produtividade observada e calculada e o valor do RSME para dados brutos e dados padronizados. A produtividade observada se refere aos dados originais, e sua média e desvio variam para os casos em que o modelo é aplicável em dados específicos.

**Tabela 5 – Desempenho dos modelos**

Modelo	Dados aplicáveis	Média (Desvio padrão)		RMSE	
		Produtividade observada (%)	Produtividade predita (%)	Dados não padronizados (%)	Dados padronizados (z score)
1			99,1195 (0,9101)	42,2271%	1,2465
2	519	59,6773 (15,2712)	102,4153 (4,7033)	45,5523%	1,3811
3			101,4374 (1,6020)	44,3581%	1,2339
4	231	59,3074 (15,5290)	100,7264 (7,3521)	45,0041%	1,4597
5	167	56,8862 (16,6273)	94,4155 (1,4789)	40,8856%	1,1945
6	352	61,0014 (14,4205)	100,8755 (0,9999)	42,3723%	1,3394
7			96,4729 (3,7690)	39,9686%	1,3920
8			99,2264 (1,1247)	42,3016%	1,2197
9	519	59,6773 (15,2712)	99,5151 (0,5700)	42,6233%	1,2674
10			95,6948 (4,9864)	39,3702%	1,3903
11			99,6116 (0,9967)	42,7587%	1,4083
12	184	60,0136 (14,1675)	102,2320 (2,7016)	44,6980%	1,4882
13	519	59,6773 (15,2712)	101,5234 (2,2213)	44,4081%	1,2264

Fonte: Autoria própria (2023)

A comparação do desempenho dos modelos quanto à variável independente utilizada é apresentada no gráfico x, com os modelos ordenados conforme o RMSE crescente. Como discutido na seção anterior, o uso da temperatura como base para predição da produtividade deve ser realizado de maneira a fixar variáveis que interferem na influência entre os fatores. Como no estudo de caso usado como base para comparação não foi realizado interferência nas vestimentas utilizadas pelos participantes, é compreensível que os modelos baseados em temperatura demonstrassem menor desempenho (maior RMSE).



Fonte: Autoria própria (2023)

Uma maneira de possivelmente reduzir o erro neste tipo de modelagem, é incluir a variável de isolamento das vestimentas, em uma análise de regressão múltipla não linear. Desta maneira, a relação entre temperatura e isolamento das roupas, que é de grande influência na sensação térmica resultante, pode ser contemplada na modelagem.

### 4.3 Categorização dos modelos

Para a análise cluster das variáveis, os modelos que não se aplicam a todos os dados foram desconsiderados. Para realizar a análise, é necessário que todas as variáveis possuam dados para cada um dos casos. Assim, não é possível incluir na mesma análise os modelos que se aplicam a faixas de temperatura não coincidentes ou que se aplicam a cada gênero. Logo, os modelos 4, 5, 6, e 12 foram desconsiderados. A matriz de proximidade para os modelos avaliados é apresentada na tabela 6.

**Tabela 6 – Matriz de proximidade**

	Dados originais	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 7	Modelo 8	Modelo 9	Modelo 10	Modelo 11	Modelo 13
Dados originais	0	806,37	989,998	790,131	1005,627	772,105	833,657	1003,133	1029,292	780,545
Modelo 1	806,37	0	744,722	10,626	773,2	145,628	29,32	767,748	675,007	336,526
Modelo 2	989,998	744,722	0	718,034	35,238	679,467	802,052	25,537	1124,859	690,713
Modelo 3	790,131	10,626	718,034	0	737,922	79,096	70,945	733,613	797,392	235,123
Modelo 7	1005,627	773,2	35,238	737,922	0	674,243	841,732	0,791	1180,087	667,12
Modelo 8	772,105	145,628	679,467	79,096	674,243	0	282,84	673,45	1150,488	46,274
Modelo 9	833,657	29,32	802,052	70,945	841,732	282,84	0	834,888	456,613	508,672
Modelo 10	1003,133	767,748	25,537	733,613	0,791	673,45	834,888	0	1172,374	669,07
Modelo 11	1029,292	675,007	1124,859	797,392	1180,087	1150,488	456,613	1172,374	0	1363,079
Modelo 13	780,545	336,526	690,713	235,123	667,12	46,274	508,672	669,07	1363,079	0

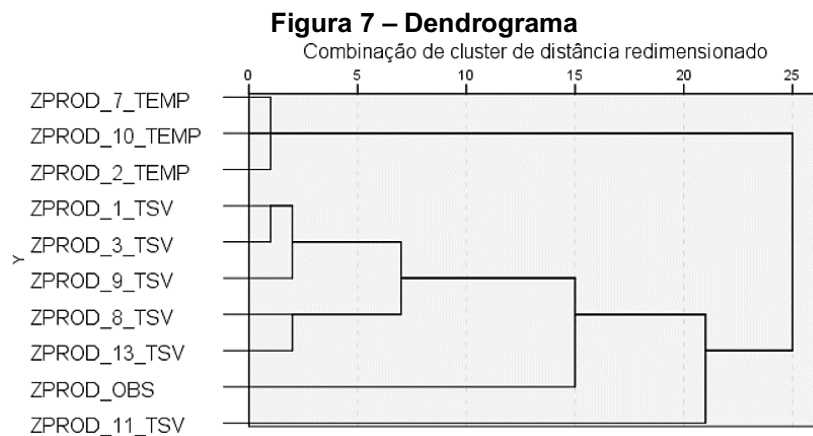
**Fonte: Autoria própria (2023)**

Os estágios de agrupamento e as respectivas medidas de similaridade consideradas são apresentadas na tabela 7.

Estágio	Combinação		Coeficientes	Próximo estágio
	Cluster 1	Cluster 2		
1	7	10	0,791	3
2	1	3	10,626	4
3	2	7	20,521	9
4	1	9	36,963	6
5	8	13	46,273	6
6	1	8	174,504	7
7	OBS	1	381,857	8
8	OBS	11	533,320	9
9	OBS	2	638,785	0

**Fonte: Autoria própria (2023)**

A representação gráfica da evolução do agrupamento é apresentada pelo dendrograma na figura 7. Para melhor visualização dos padrões ao longo das análises, a variável independente utilizada pelo modelo foi inserida ao nome da série, sendo este padronizado da seguinte maneira: ZPROD\_[número do modelo]\_[variável independente]. Para os dados originais, relacionados à produtividade observada, utilizou-se ZPROD\_OBS.



**Fonte: Autoria própria (2023)**

A partir do dendrograma obtido com a análise de cluster dos modelos é possível visualizar que os agrupamentos são coerentes com a semelhança em desempenho de cada modelo na aplicação aos dados do estudo de caso.

Os agrupamentos iniciais unem modelos que são sequenciais no ranking de desempenho, conforme segue em ordem crescente: modelo 8, 13, 3, 1, 9, 2, 10, 7, 11. Observa-se que conforme os clusters são combinados, modelos que utilizam a mesma variável são agrupados.

Os modelos 2, 10 e 7 apresentam maior similaridade e são agrupados juntos inicialmente (estágios 1 e 3), assim como os modelos 3, 1 e 9 em outro cluster (estágios 2 e 4) e os modelos 8 e 13 em outro (estágio 5). Pode-se interpretar esta evolução da seguinte maneira:

- Modelos que utilizaram temperatura são agrupados: Os modelos 2, 10 e 7 utilizam a temperatura;
- Modelos que utilizaram TSV baseados em estudos com faixa etária similar: Os modelos 3, 1 e 9 são provenientes de estudos com participantes na faixa etária similar. Para o estudo 3 a idade média é 21,7 anos. Para o modelo 2 a idade média é 22,3 anos. Para o modelo 3 foram utilizados dados de três coletas diferentes para a idade média em cada uma é conhecida, mas a idade média entre as três não é conhecida. As idades em média são 23, 25 e 19 anos.
- Modelos que utilizaram TSV baseados em estudos com faixa etária diferentes do cluster anterior: Os modelos 8 e 13 são provenientes de estudos com participantes de idade igual a 26,6 anos e 12 a 14 anos, respectivamente.

No estágio 8, o modelo 11 é a última variável a ser agrupada com outros modelos que usam o TSV, o que é coerente com a análise anterior visto que o modelo 11 teve o pior desempenho comparado aos demais modelos que entraram na análise. O motivo pode estar relacionado ao objetivo do estudo, no qual avaliou-se como a mudança entre ambientes com temperaturas diferentes pode impactar a produtividade. O estudo simulou a situação em que alunos estão no ambiente exterior, de temperatura igual a 34°C, e entram em salas de aula climatizadas. A temperatura é característica do verão da região do estudo. Logo, avaliou-se a relação entre produtividade e conforto com base em dados obtidos durante um processo de adaptação, o que difere dos demais estudos.

Outro ponto demonstrado pelo dendrograma é a inclusão da variável dos dados originais (produtividade observada) no cluster dos modelos que utilizam o TSV, antes do agrupamento com o cluster de modelos que utilizam a temperatura. Pela análise anterior, este é outro ponto coerente, considerando que os modelos que usam o TSV tiveram melhor desempenho. Por fim, no estágio 9, o cluster dos modelos que usam a temperatura é agrupado formando o cluster final, por meio da similaridade entre o modelo 2 e a variável dos dados originais, o que também é coerente pois

dentre os modelos que usam a temperatura o modelo 2 é o que tinha demonstrado melhor desempenho.

As semelhanças entre os resultados da análise de cluster e da análise do desempenho dos modelos revela um potencial uso do dendrograma para a análise exploratória do desempenho de modelos presentes na literatura, podendo ser interpretado como um guia de modelos que exploram o mesmo aspecto do fenômeno. Neste caso, as limitações estabelecidas na busca por modelos da literatura resultaram em um número reduzido de modelos e que exploram apenas 2 variáveis. O uso desta análise pode ser mais bem explorado com um número maior de modelos, que contemplem outros métodos de modelagem e que usem outras variáveis. A visualização das semelhanças das correlações entre variáveis (e, portanto, desempenho similar para o caso estudado) pode ser utilizada para fazer uma varredura inicial e selecionar modelos para melhor investigação.

## 5 CONCLUSÃO

A seguir são apresentadas as considerações finais e as limitações do estudo.

### 5.1 Considerações finais e contribuições

Pesquisadores tem enfrentado desafios na modelagem da produtividade em função do conforto térmico devido à complexidade da relação. Reunir conhecimento da literatura, comparar modelos por meio de abordagens estatísticas pode contribuir para compreensão das lacunas nessa relação, no ambiente educacional e de trabalho. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar uma abordagem comparativa dos modelos de conforto térmico relacionados à produtividade no âmbito intelectual presentes na literatura.

Com a análise da literatura, verificou-se uma grande diversidade metodológica e conceitual para abordar produtividade intelectual e conforto térmico, a qual traz desafios significativos na análise comparativa entre os estudos.

A modelagem dos dados foi predominantemente realizada por meio da análise de regressão, gerando modelos baseados em equações de segundo e terceiro grau, com única variável dependente. Apesar da inclusão de mais variáveis dificultar o desenvolvimento de um modelo, por meio de regressão não linear, esta consideração pode aumentar a abrangência e acurácia do modelo. Tal abordagem pode ser vantajosa para modelos que busquem utilizar como base medições objetivas como a temperatura ao invés de respostas individuais e subjetivas como o TSV. A inclusão da variável de isolamento térmico das vestimentas garante que o modelo seja aplicado em condições diferentes daquelas nas quais foi desenvolvido, onde as vestimentas geralmente são padronizadas de alguma maneira.

Quanto aos métodos de avaliação da produtividade, verificou-se a predominância de métodos objetivos, em contraste com o método utilizado para a produtividade observada oriunda do estudo de caso. A não possibilidade de incluir na análise de cluster os modelos que utilizaram avaliações subjetivas e em ambiente real com frequentadores do ambiente se mostra como uma limitação.

A clusterização revelou padrões relacionados à modelagem dos dados, o que é explicado pela predominância do uso de ambientes controlados para realização dos experimentos. Propõe-se para estudos futuros a clusterização de modelos de avaliação subjetiva provenientes de diferentes estudos.

A análise de cluster permitiu identificar as possíveis motivações por trás das diferenças observadas no desempenho dos modelos. Essa análise pode fornecer novas percepções valiosas sobre as melhores abordagens e práticas na representação da relação entre conforto térmico e produtividade no âmbito intelectual e auxiliar no desenvolvimento de novos modelos.

O estudo demonstrou o uso da análise de cluster para análise comparativa de modelos de conforto térmico relacionados à produtividade intelectual, destacando o potencial desta abordagem de aprofundar os estudos sobre as dificuldades na modelagem do fenômeno.

## **5.2 Limitações do estudo**

O trabalho foi delimitado pelos seguintes aspectos: população considerada nos dados do estudo de caso, variáveis ambientais consideradas no estudo de caso, tipo de construção onde os dados do estudo de caso foram coletados, modelos de conforto selecionados, âmbito da produtividade analisado e pela abordagem do problema.

Os dados utilizados no estudo de caso foram provenientes de uma universidade no Sul do Brasil. A amostra populacional, portanto, se limitou a estudantes universitários. Esta amostra foi coletada com o objetivo de representar a população de estudantes universitários da universidade. As variáveis ambientais coletadas foram a temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa do ar em um ambiente naturalmente ventilado.

Os modelos considerados para a análise comparativa se limitaram a modelos que utilizassem variáveis ambientais e pessoais que coincidissem com os dados disponíveis, possibilitando a aplicação dos dados nos modelos. Os dados incluíram idade, altura, peso, data e hora da coleta, gênero, isolamento das vestimentas, sensação térmica, preferência térmica, taxa metabólica estimada, velocidade do ar estimada e as variáveis ambientais já citadas. Foram considerados também modelos que utilizassem variáveis que pudessem ser calculadas com base nos dados disponíveis, como a variável temperatura operacional, que pode ser calculada com base nas variáveis temperatura do ar e temperatura radiante média.

O âmbito de produtividade considerado se limitou ao âmbito intelectual. Foram considerados modelos desenvolvidos para ambientes educacionais ou escritórios,

baseados em dados relativos a atividades cognitivas, como atividades relacionadas à aprendizagem, memória, concentração, etc.

Para abordar o problema da necessidade de ampliar o conhecimento sobre a relação entre produtividade no âmbito intelectual e o conforto térmico, optou-se por partir dos modelos já existentes sobre o fenômeno. Foram realizadas análises de comparação e agrupamento com modelos existentes, a fim de encontrar padrões nos dados e lacunas de conhecimento no contexto estudado.

## REFERÊNCIAS

- AL HERR, Y. et al. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. **Building and Environment**, v. 105, p. 369–389, 15 ago. 2016.
- APPEL-MEULENBROEK, R.; CLIPPARD, M.; PFNÜR, A. The effectiveness of physical office environments for employee outcomes: An interdisciplinary perspective of research efforts. **Journal of Corporate Real Estate**, v. 20, n. 1, p. 56–80, 3 abr. 2018.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2004.
- BRIDGES, C. C. Hierarchical Cluster Analysis. **Psychological Reports**, v. 18, n. 3, p. 851–854, jun. 1966.
- BUENO, A. M. et al. Hierarchical and K-means clustering to assess thermal dissatisfaction and productivity in university classrooms. **Building and Environment**, v. 233, p. 110097, 1 abr. 2023.
- CHEUNG, T. et al. Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. **Building and Environment**, v. 153, p. 205–217, 15 abr. 2019.
- CUI, W. et al. Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance. **Building and Environment**, v. 68, p. 114–122, 1 out. 2013.
- FELGUEIRAS, F. et al. A systematic review of environmental intervention studies in offices with beneficial effects on workers' health, well-being and productivity. **Atmospheric Pollution Research**, v. 13, n. 9, p. 101513, 1 set. 2022.
- FISK, W. J.; BLACK, D.; BRUNNER, G. Benefits and costs of improved IEQ in U.S. offices. **Indoor Air**, v. 21, n. 5, p. 357–367, 2011.
- FRONTCZAK, M.; WARGOCKI, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. **Building and Environment**, v. 46, n. 4, p. 922–937, 1 abr. 2011.
- GENG, Y. et al. The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. **Building and Environment**, v. 121, p. 158–167, 15 ago. 2017.
- ISO 7730. **Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. International Organization for Standardization, 2005.
- JIANG, J. et al. A study on pupils' learning performance and thermal comfort of primary schools in China. **Building and Environment**, v. 134, p. 102–113, 15 abr. 2018.

KANG, S.; OU, D.; MAK, C. M. The impact of indoor environmental quality on work productivity in university open-plan research offices. **Building and Environment**, v. 124, p. 78–89, 1 nov. 2017.

KAWAKUBO, S.; SUGIUCHI, M.; ARATA, S. Office thermal environment that maximizes workers' thermal comfort and productivity. **Building and Environment**, v. 233, p. 110092, 1 abr. 2023.

KIM, H. et al. A psychophysiological effect of indoor thermal condition on college students' learning performance through EEG measurement. **Building and Environment**, v. 184, p. 107223, 15 out. 2020.

KLEPEIS, N. E. et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 11, n. 3, p. 231–252, 1 jul. 2001.

LAN, L.; WARGOCKI, P.; LIAN, Z. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort. **Energy and Buildings**, Tackling building energy consumption challenges - Special Issue of ISHVAC 2009, Nanjing, China. v. 43, n. 5, p. 1057–1062, 1 maio 2011.

LECCESE, F. et al. Towards a holistic approach to indoor environmental quality assessment: Weighting schemes to combine effects of multiple environmental factors. **Energy and Buildings**, v. 245, p. 111056, 15 ago. 2021.

LIU, F. et al. Effects of indoor environment factors on productivity of university workplaces: A structural equation model. **Building and Environment**, v. 233, p. 110098, 1 abr. 2023.

LIU, J. et al. Overall effects of temperature steps in hot summer on students' subjective perception, physiological response and learning performance. **Energy and Buildings**, v. 247, p. 111124, 15 set. 2021.

LOZADA, G.; NUNES, K. S. **Metodologia científica**. Grupo A, 2019.

MAROCO, J. Análise estatística. **Lisboa: Sílabo**, n. 2, 2003.

MATIAS-PEREIRA, J. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4. ed. Grupo GEN, 2016.

NICO, M. A.; LIUZZI, S.; STEFANIZZI, P. Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis. **Applied Ergonomics**, v. 48, p. 111–120, 1 maio 2015.

OTT, W. R. **Human activity patterns: a review of the literature for estimating time spent indoors, outdoors, and in transit**. US Environmental Protection Agency, 1988.

PAGANO, R. R. **Understanding statistics in the behavioral sciences**. 9. ed. Belmont, California: Cengage Learning, 2009.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **International Journal of Surgery**, v. 88, p. 105906, 1 abr. 2021.

PEPLER, R. D.; WARNER, R. E. Temperature and learning: An experimental study. **ASHRAE Transactions**, v. 74, n. 2, p. 211–219, 1968.

RUPP, R. F. et al. Associations of occupant demographics, thermal history and obesity variables with their thermal comfort in air-conditioned and mixed-mode ventilation office buildings. **Building and Environment**, v. 135, p. 1–9, 1 maio 2018.

RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 178–205, 15 out. 2015.

SADICK, A.-M.; KPAMMA, Z. E.; AGYEFI-MENSAH, S. Impact of indoor environmental quality on job satisfaction and self-reported productivity of university employees in a tropical African climate. **Building and Environment**, v. 181, p. 107102, 15 ago. 2020.

SEPPANEN, O.; FISK, W. J.; FAULKNER, D. Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office building. 1 jun. 2003.

SOTO MUÑOZ, J. et al. Recognizing the effect of the thermal environment on self-perceived productivity in offices: A structural equation modeling perspective. **Building and Environment**, v. 210, p. 108696, 15 fev. 2022.

**THE 17 GOALS | Sustainable Development.** Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals>>. Acesso em: 22 maio. 2023.

WANG, D. et al. Experimental investigation of the effect of indoor air temperature on students' learning performance under the summer conditions in China. **Building and Environment**, v. 140, p. 140–152, 1 ago. 2018.

YANG, Y. et al. Investigation of students' short-term memory performance and thermal sensation with heart rate variability under different environments in summer. **Building and Environment**, v. 195, p. 107765, 15 maio 2021.

YEOM, D. J.; DELOGU, F. Local body skin temperature-driven thermal sensation predictive model for the occupant's optimum productivity. **Building and Environment**, v. 204, p. 108196, 15 out. 2021.

ZHANG, T. et al. Addressing data inadequacy challenges in personal comfort models by combining pretrained comfort models. **Energy and Buildings**, v. 264, p. 112068, 1 jun. 2022.