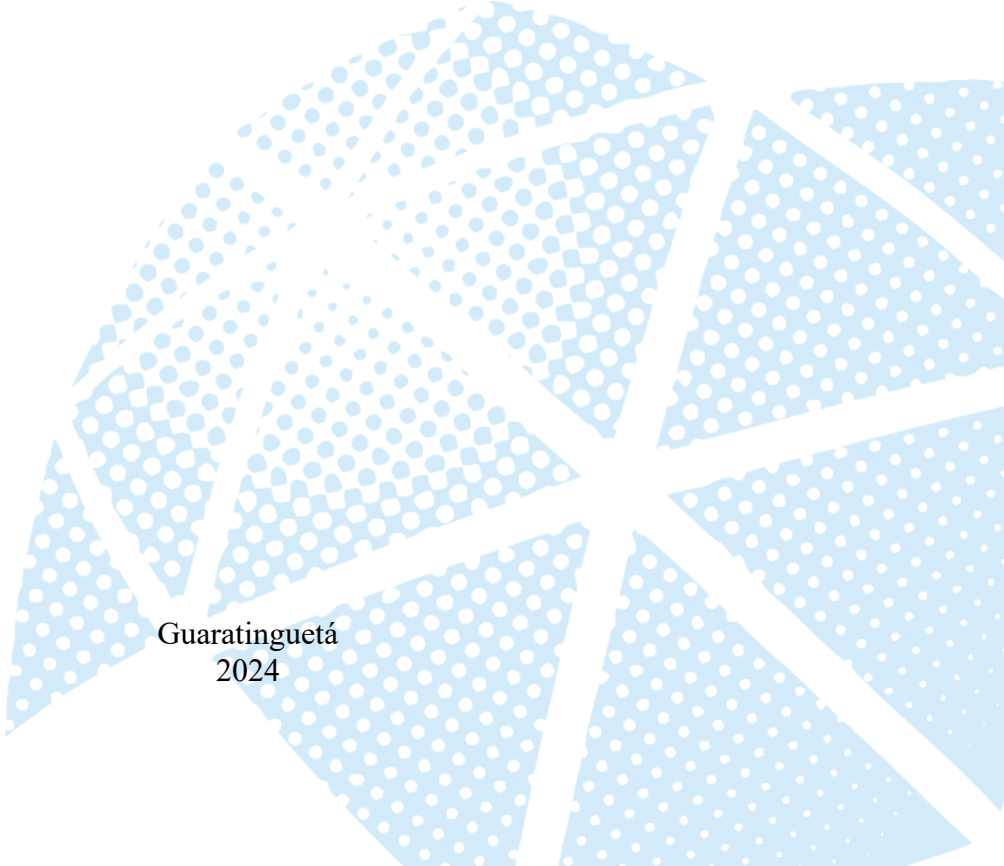


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

JEAN CARLOS LOURENÇO COSTA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA COM O
USO COMBINADO DE CONDICIONADOR DE AR E VENTILADOR DE TETO**

Guaratinguetá
2024



JEAN CARLOS LOURENÇO COSTA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA COM O
USO COMBINADO DE CONDICIONADOR DE AR E VENTILADOR DE TETO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá para obtenção do título de Grau acadêmico de Mestre em Engenharia de Produção ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia.

Área de concentração: Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto

Coorientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá
2024

C837a	Costa, Jean Carlos Lourenço Avaliação do potencial de economia de energia elétrica com o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto / Jean Carlos Lourenço Costa – Guaratinguetá, 2024. 87 : il. Bibliografia: f. 82-87 Dissertação – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientador: Prof. Dr. Antonio Faria Neto Coorientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula 1. Análise energética. 2. Conservação de energia. 3. Conforto térmico. 4. Ventiladores (Máquina). I. Título. CDU 620.9(043)
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595]

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A dissertação aborda o potencial de economia de energia no uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto, podendo ter um impacto significativo em conjunto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Os principais impactos potenciais, de acordo com os ODS, são: ODS 7: Energia Acessível e Limpa - A pesquisa pode contribuir para um potencial de economia de energia no setor de edificações, reduzindo o consumo de energia elétrica e, consequentemente, reduzindo as emissões de gases efeitos estufa (GEE); ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis - Reduzir o consumo de energia pode contribuir para melhorar o conforto térmico dos ocupantes em seus ambientes, criando cidades mais sustentáveis e ODS 12: Consumo e Produção Responsável - A pesquisa pode promover a conscientização dos ocupantes ao utilizarem o condicionador de ar de forma responsável e sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The dissertation addresses the potential energy savings in the combined use of air conditioning and ceiling fans, which could have a significant impact in alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). The main potential impacts, according to the SDGs are: SDG 7: Affordable and Clean Energy - The research can contribute to potential energy savings in the building sector; reducing electricity consumption and consequently reducing greenhouse gas emissions (GHG); SDG 11: Sustainable Cities and Communities – Reducing energy consumption can help improve the thermal comfort of occupants in their environments, creating more sustainable cities e SDG 12: Responsible Consumption and Production - The research can promote awareness among occupants to use air conditioning in a responsible and sustainable manner.

JEAN CARLOS LOURENÇO COSTA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.ª Dr.ª Marcela Aparecida Guerreiro Machado de Freitas
Vice-Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANTONIO FARIA NETO
Orientador – UNESP


**Prof.ª Dr.ª MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DE
FREITAS**
UNESP


Prof. Dr. FABRÍCIO MACIEL GOMES
USP

JUNHO de 2024

DADOS CURRICULARES

JEAN CARLOS LOURENÇO COSTA

NASCIMENTO	07/05/1985 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	José Costa Rosângela Aparecida Lourenço Barbosa Costa
2009/2011	Tecnólogo em Redes de Computadores Fatec Prof. Jessen Vidal de São José dos Campos
2012/2013	Pós-graduação lato sensu em Redes de Computadores Escola Superior Aberta do Brasil.

Dedico este trabalho à minha família: minhas filhas, Laura Moraes Costa e Letícia Moraes Costa, e esposa Renata Pereira Moraes Costa, cujo amor e apoio foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Agradeço especialmente meus pais, Rosângela A. Lourenço Barbosa Costa e José Costa, que sempre me incentivaram a buscar conhecimento e me deram todo o suporte necessário para que eu pudesse seguir meus sonhos. Também dedico esta dissertação ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Faria Neto, que com sua sabedoria e paciência me guiou nessa jornada acadêmica. Espero que este trabalho possa ser útil para a comunidade acadêmica e para a sociedade em geral.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, sabedoria e saúde por essa realização pessoal e profissional;

A minha família, esposa Renata Pereira Moraes Costa e filhas Laura Moraes Costa e Letícia Moraes Costa que sempre esteve presente nesse processo difícil;

Aos meus pais Rosângela A. Lourenço Barbosa Costa e José Costa que sempre me apoiaram;

A irmã e sobrinhos, Tamires Lourenço Silva, Arthur Lourenço Silva e Heitor Lourenço Silva que sempre torceram por mim;

Ao meu orientador professor Dr. Antonio Faria Neto pelo conhecimento, esforço e dedicação aplicado;

Aos professores do Programa de Mestrado em especial ao Messias Borges e Aneirson Silva;

Aos professores da banca de qualificação Marcela Aparecida Guerreiro Machado de Freitas e Fabrício Maciel Gomes;

Aos meus amigos e colegas de estudo Maxmilian Espuny, Mauricio Bueno, Talita Mariano e Vinícius Leite;

Aos amigos de trabalho, especialmente: Diogo Branquinho Ramos, Alfred Makoto e Mayra Vallim;

Aos alunos da Etec Ilza Nascimento Pintus de São José dos Campos.

“A vida é igual a andar de bicicleta.
Para manter o equilíbrio é preciso se manter em
movimento.”

Albert Einstein

RESUMO

Nos últimos anos o setor industrial foi alvo de medidas de conservação de energia, visto que era o setor responsável pelo maior consumo, entretanto, com o passar do tempo, o consumo de energia do setor de edificações tornou-se igualmente relevante, em 2019 o consumo de energia de edifícios residenciais, chegou a quase 36%. Estima-se que o setor de edificações seja responsável por 40% das emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, em 2022 as edificações residenciais, comerciais e públicas consumiram quase 50% do total de energia, esse consumo, deve-se em grande parte à climatização de ambientes. O consumo excessivo de energia está fortemente correlacionado com os impactos das mudanças climáticas, porém limitar o consumo de energia, pode significar restringir o crescimento econômico do país. Assim, torna-se necessário achar um caminho para reduzir a demanda de energia sem restringir o crescimento econômico do país. Com isso, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar o potencial de economia de energia elétrica proporcionada pelo uso combinado de condicionadores de ar e ventiladores de teto em um ambiente *indoor* na sua utilização convencional, sem sacrificar o conforto térmico dos ocupantes. Para isso será realizado um *survey* da sensação térmica dos ocupantes de uma sala de aula em duas condições distintas de climatização, uso exclusivo do condicionador de ar e uso combinado do ventilador de teto com o condicionador de ar, com termostato ajustado alguns graus acima do ajuste anterior. A diferença entre os ajustes do termostato será responsável pela economia de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética; Conservação de energia; Conforto térmico; Movimento do ar; Ventilador de teto.

ABSTRACT

In recent years, the industrial sector has been the target of energy conservation measures, as it was responsible for the largest consumption, however, over time, the energy consumption of the building sector has become equally relevant, in 2019, the energy consumption of residential buildings reached almost 36%. It is estimated that the building sector is responsible for 40% of greenhouse gas emissions. In Brazil, in 2022, residential, commercial, and public buildings consumed almost 50% of the total energy, largely due to air conditioning. Excessive energy consumption is strongly correlated with the impacts of climate change. However, limiting energy consumption can mean restricting the country's economic growth. Therefore, it is necessary to find a way to reduce energy demand without restricting the country's economic growth. Thus, the general objective of this research is to evaluate the potential for electrical energy savings provided by the combined use of air conditioners and ceiling fans in an indoor environment, in their conventional use, without sacrificing the thermal comfort of the occupants. For this, a survey will be conducted of the thermal sensation of the occupants of a classroom in two different air conditioning conditions, exclusive use of the air conditioner and combined use of the ceiling fan with the air conditioner, with the thermostat adjusted a few degrees above the previous setting. The difference between the thermostat settings will be responsible for the energy savings.

KEYWORDS: Energy efficiency; Energy conservation; Thermal Comfort; Air movement; Ceiling fan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Prédio da escola Etec de São José dos Campos.....	19
Figura 2 - Laboratório de informática 5	19
Figura 3 - Sentido de rotação do ventilador de teto.....	21
Figura 4 - Evolução das publicações	32
Figura 5 - Crescimento estimado da venda de aparelhos de ar-condicionado residenciais.....	34
Figura 6 - Distribuição temporal da abordagem metodológica utilizada nos estudos.....	34
Figura 7 - Distribuição temporal do método empregado para determinar o conforto térmico.....	35
Figura 8 - Tipos de edificações onde foram feitas as pesquisas.....	36
Figura 9 - Área das instalações onde foram realizados os experimentos	36
Figura 10 - Número de participantes dos experimentos	37
Figura 11 - Taxa metabólica dos ocupantes	38
Figura 12 - Correspondência entre o voto médio previsto e a porcentagem da população termicamente desconfortável.....	40
Figura 13 - Limites aceitáveis da temperatura operativa para ambientes condicionados naturalmente	41
Figura 14 - Escalas ASHRAE: (a) sensação térmica; (b) aceitabilidade térmica;.....	42
Figura 15 - Comparando a sensibilidade entre as escalas de 7 pontos e 21 pontos.....	46
Figura 16 - Escala de 21 pontos para avaliação da sensação térmica.....	46
Figura 17 - Classificação da pesquisa científica.....	50
Figura 18 - Layout do laboratório de informática selecionados para os experimentos: laboratório 5.....	52
Figura 19 - Sistema de aquisição de dados para medição de temperatura	53
Figura 20 - Medidores de energia elétrica: (a) dowertech dow1310l (a);	53
Figura 21 - Fluxo metodológico da pesquisa.....	55
Figura 22 - Boxplot das sensações térmicas para experimentos apenas condicionador de ar.....	61
Figura 23 - Gráficos para operação exclusiva do condicionador de ar:	62
Figura 24 - Boxplot da sensação térmica para os experimentos condicionador de ar + ventilador de teto	64
Figura 25 - Gráficos para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto:	64
Figura 26 - Inércia termo-sensorial entre dois regimes de climatização e potencial de economia de energia elétrica.....	65
Figura 27 - Boxplot da sensação térmica para os experimentos apenas condicionador de ar.....	67
Figura 28 - Gráficos para operação exclusiva condicionador de ar: (a) dendrograma;.....	68

Figura 29 - Boxplot da sensação térmica para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto	69
Figura 30 - Gráficos para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto: (a) dendrograma; (b) curva do cotovelo.....	70
Figura 31 - Inércia termo-sensorial entre dois regimes de climatização e potencial de economia de energia elétrica	71
Figura 32 - Boxplot da sensação térmica para os experimentos apenas condicionador de ar ..	72
Figura 33 - Gráficos para operação exclusiva condicionador de ar: (a) dendrograma;.....	73
Figura 34 - Boxplot da sensação térmica para experimentos conjunto condicionador de ar + ventilador de teto	74
Figura 35 - Gráficos para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto:	75
Figura 36 - Inércia termo-sensorial entre os dois regimes de climatização e o potencial de economia de energia elétrica	76
Figura 37 - Consumo do condicionador de ar e potenciais de economia	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características das pesquisas em análises.....	34
Quadro 2 – Distribuição geográfica dos artigos utilizados nesta pesquisa	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho de amostra a serem considerados para a realização de surveys para avaliação do conforto térmico	43
Tabela 2 - Classificação das escalas e operações permitidas	44
Tabela 3 - Sensação térmica dos ocupantes.....	47
Tabela 4 - Planejamento dos surveys para as turmas A, B e C do laboratório 5 com a operação exclusiva do condicionador de ar	57
Tabela 5 - Planejamento dos surveys para as turmas A, B e C do laboratório 5 com operação do condicionador de ar + ventilador	58
Tabela 6 - Sensação térmica com operação exclusiva do condicionador de ar	60
Tabela 7 - Sensação térmica com operação conjunta do condicionador de ar e ventilador	63
Tabela 8 - Sensação térmica com operação exclusiva do condicionador de ar	67
Tabela 9 - Sensação térmica para operação conjunta do condicionador de ar e ventilador	69
Tabela 10 - Sensação térmica operação exclusiva do condicionador de ar	72
Tabela 11 - Sensação térmica com operação conjunta do condicionador de ar e ventilador ...	74
Tabela 12 - Parâmetros térmicos e potencial de economia de energia para as modalidades de climatização nas três turmas.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE	<i>American society of heating refrigerating and air-conditioning Engineers</i>
BTU	<i>British thermal unit</i>
CBE	<i>Center for the build environment</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
Clo	<i>Clothing</i>
GEE	Gases de efeito estufa
GWh	Gigawatt-hora
HVAC	<i>Heating, ventilating and air-conditioning</i>
IoT	<i>Internet of things</i>
IPCC	Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas
ITS	Inércia termo-sensorial
kW	Quilowatt
M ²	Metros quadrados
Met	<i>Metabolism</i>
M/S	Metros por segundo
PMV	Voto médio previsto
PPM	Parte por milhão
RPM	Rotação por minuto
SET	<i>Standard effective temperature</i>
TMC	Temperatura mais confortável
VAV	Volume de ar variável
VST	Voto de sensação térmica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivos Específicos.....	18
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	18
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO FORÇADA.....	20
2.1.1 Ventiladores de Teto.....	20
2.2 PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO USO COMBINADO DE CONDICIONADORES DE AR E VENTILADORES	21
2.3 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES.....	39
2.3.1 Conforto Térmico	39
2.3.2 Previsão do Conforto Térmico a Partir da Medição de Grandezas Ambientais	40
2.3.2.1 Voto médio previsto (PMV).....	40
2.3.2.2 Método adaptativo	41
2.3.3 Determinação do Conforto Térmico a Partir de <i>Surveys</i>.....	42
2.3.4 Classificação das Escalas ASHRAES e Suas Propriedades	43
2.3.5 Escala de 21 Pontos para a Estimação da Sensação Térmica.....	44
3 MODELAGEM DO PROBLEMA	47
3.1 DETERMINAÇÃO DA INÉRCIA TERMO-SENSORIAL (ITS).....	48
4 MEIOS E MÉTODOS.....	50
4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	50
4.2 MEIOS EXPERIMENTAIS	51
4.3 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA	54
4.3.1 Formulação do Problema de Pesquisa.....	54
4.3.2 Coleta de Artigos.....	54
4.3.3 Revisão da Literatura.....	54

4.3.4 Planejamento Experimental	56
4.3.5 Execução dos Experimentos	58
4.3.6 Análise dos Resultados	58
4.3.7 Conclusões	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1 TURMA A	60
5.1.1 Operação Exclusiva do Condicionador de Ar	60
5.1.2 Operação Combinada do Condicionador de Ar e Ventilador de Teto	62
5.1.3 Comparações entre os dois regimes de condicionamento	65
5.2 TURMA B	66
5.2.1 Operação Exclusiva do Condicionador de ar	67
5.2.2 Operação Combinada do Condicionador de Ar e Ventilador de Teto	68
5.2.3 Comparações Entre os Dois Regimes de Condicionamento	70
5.3 TURMA C	71
5.3.1 Operação Exclusiva do Condicionador de ar	71
5.3.2 Operação Combinada do Condicionador de ar e Ventilador de Teto	73
5.3.3 Comparações Entre os Dois Regimes de Condicionamento	75
5.4 COMENTÁRIOS	76
6 CONCLUSÃO.....	79
6.1 PESQUISAS FUTURAS COMPLEMENTARES	80
6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	80
6.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	80
6.4 RESULTADOS ACADÊMICOS DA PESQUISA	81
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm sendo um dos maiores desafios ambientais do século 21, impactando na economia, na política, na gestão empresarial e até no estilo de vida das sociedades modernas (TRIANNI *et al.*, 2017) (HÄCKEL; PFOSSER, TRÄNKLER, 2017) (SOLNØRDAL; FOSS, MANRIQUE *et al.*, 2018) (PEIRREHUMBERT, 2019). Dada a gravidade do problema, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) sugeriu que fossem tomadas ações para limitar o aquecimento global a 1,5 – 2 °C, entre 2020 e 2025, além de reduzir em 70% as emissões dos gases de efeito estufa (GEE) até 2050.

Sabe-se que os processos de conversão de combustíveis fósseis em energia são grandes fontes de CO₂, que é o principal gás do efeito estufa. Portanto, pode-se afirmar que o consumo de energia está fortemente correlacionado com a produção dos GEE (CURTIUS, 2018). Portanto, a redução da emissão dos GEE também passa pela redução do consumo de energia.

Energia e crescimento econômico estão conectados (BJERREGAARD; MOLLER, 2019), ou seja, sem acesso a energia o crescimento é impossível; e o crescimento econômico leva a um consumo maior de energia. Portanto, torna-se necessário achar um caminho para reduzir a demanda por energia, e os seus consequentes impactos ambientais, sem afetar o crescimento econômico (REHMAN; REHMAN, 2022) (ZHANG; *et al.*, 2022) (YU; *et al.*, 2022). Segundo Cunha; *et al.*, (2020); Osuntuyi e Lean, (2022) uma das formas de se alcançar esse objetivo é pela adoção de tecnologias energeticamente eficientes e de medidas de conservação de energia.

Por muitos anos, o setor industrial foi alvo quase exclusivo, de medidas de conservação de energia visto que era o maior consumidor de energia. Entretanto, segundo Ding e Zhou (2020), com o passar do tempo, o setor de edificações (residenciais, comerciais e públicos) vem ganhando relevância nesse quesito, e atualmente um consumidor de energia igualmente importante, atraindo a atenção da comunidade científica, ao mesmo tempo que vem se tornando alvo de importantes políticas energéticas.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), o setor de edificações é responsável por quase 36% no consumo final de energia. E por 40% das emissões de gases do efeito estufa (IEA, 2018). O crescimento do consumo de energia elétrica no setor de edificações, deve-se em grande parte à climatização (aquecimento, ventilação e condicionamento de ar). Segundo Cheng *et al.* (2019); Tian, Su e Shao; Zhuang e Wang (2020); Yuan, Pan e Yang (2021);

Zhu, Ren e Cao (2021), a climatização é responsável por 40-50% do consumo total de energia elétrica nas edificações. E dentre os equipamentos de climatização, os condicionadores de ar ocupam lugar de destaque entre as cargas elétricas.

Assim, a redução do consumo de energia elétrica no setor de edificações pode ser alcançada pelo aumento da eficiência energética dos condicionadores de ar, bem como na sua utilização mais racional.

No que se refere à eficiência dos equipamentos, muito já foi feito pelos programas de etiquetagem ao influenciar a escolha do consumidor por modelos de desempenho energético superior. Ao mesmo tempo, os programas de índice mínimo de eficiência energética têm feito com que a indústria lance no mercado equipamentos cada vez mais eficientes.

O desenvolvimento de esquemas de utilização mais racional dos condicionadores de ar pode aumentar ainda mais a economia de energia na climatização de ambientes. Sabe-se que o consumo de energia de um condicionador de ar está relacionado com uma série de variáveis ambientais e comportamentais. Entre estas últimas, destaca-se a temperatura de ajuste do termostato. Quanto maior for esta temperatura, menor será a energia consumida pelo equipamento, e vice-versa. À medida em que se aumenta a temperatura no termostato, afastando-a das preferências individuais, o conforto térmico dos ocupantes também diminui. Portanto, o desafio que se apresenta é como aumentar a temperatura de ajuste do termostato sem afetar o conforto térmico dos ocupantes.

A circulação do ar não altera a temperatura ambiente, mas pode afetar a sensação térmica das pessoas, aumentando ou diminuindo o conforto térmico. Portanto, segundo Zhu, Ren e Cao (2021) os condicionadores de ar podem ser usados em conjunto com ventiladores de teto para climatização, energeticamente eficiente, de ambientes. Essa combinação permite que o termostato do condicionador de ar seja ajustado numa temperatura mais elevada, mas ainda assim, mantendo-se o mesmo nível de conforto térmico quando comparado com a operação isolada do condicionador de ar com o termostato ajustado numa temperatura mais baixa (NI; BAI, 2017) (CAO; DENG, 2019) (ZHU; REN; CAO, 2021). Comparando-se a climatização de um ambiente feita exclusivamente com condicionadores de ar, com aquela feita com o uso combinado condicionador/ventilador esta pesquisa pretende responder as seguintes questões:

Q1. Considerando-se o uso combinado condicionador/ventilador, em quantos graus Celsius pode ser elevado o termostato mantendo-se o mesmo nível de conforto térmico da climatização feita exclusivamente com condicionador de ar?

Q2. Qual a economia líquida de energia proporcionada pelo uso combinado condicionador/ventilador?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o potencial de economia de energia elétrica proporcionada pelo uso combinado de condicionadores de ar e ventiladores de teto em um ambiente *indoor* na sua utilização convencional.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Projetar a construção de um sistema de monitoramento, sincronizado, da temperatura interna e externa do ambiente sob análise.
- Construir um histórico do consumo de energia dos condicionadores de ar, dos ambientes sob análise, para diferentes ajustes de seus termostatos e para várias temperaturas externas.
- Estimar o conforto térmico dos ocupantes, dos ambientes sob análise, com a operação exclusiva do condicionador de ar para diversos ajustes do termostato.
- Estimar o conforto térmico dos ocupantes, dos ambientes sob análise, com a operação combinada do condicionador e ventilador de teto para diversos ajustes do termostato do condicionador.

1.2 JUSTIFICATIVAS

A climatização de ambientes por meio de ventiladores e condicionadores de ar vem aumentando a demanda global de energia (IEA, 2018). O Consumo de energia do setor de edificações, destinado à climatização, cresceu mais de 200% entre 1990 e 2016 (EPE, 2018) e vem crescendo mais rapidamente que qualquer outra destinação final. Estima-se que existam mais de 1,8 bilhão de aparelhos de condicionador de ar no mundo, podendo chegar a 5,6 bilhões em 2050, triplicando o consumo de energia elétrica nesse período (LOPES; LAMBERTS, 2018) (SANTOS *et al.*, 2020).

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Foram realizados experimentos com alunos voluntários de uma escola da rede estadual de escolas técnicas (Etec), na cidade de São José dos Campos, Figura 1. Os experimentos foram conduzidos no laboratório 5 de informática, ilustrado na Figura 2.

Figura 1 - Prédio da escola Etec de São José dos Campos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 2 - Laboratório de informática 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma síntese dos principais estudos, entre 1995 e 2022, que tratam da climatização de ambientes por meio do uso combinado de condicionadores de ar e ventiladores de teto. Além da abordagem metodológica e dos principais parâmetros adotados em cada estudo, esta revisão destaca os principais resultados tanto do ponto de vista do conforto térmico quanto do potencial de economia de energia elétrica possível de ser alcançado.

2.1 RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO FORÇADA

A convecção forçada é um tipo especial de transferência de calor na qual um fluido (ou fluidos) é posto em movimento forçado, por um ventilador de teto, por exemplo, para aumentar a transferência de calor (NOREN THERMAL SOLUTIONS, 2015).

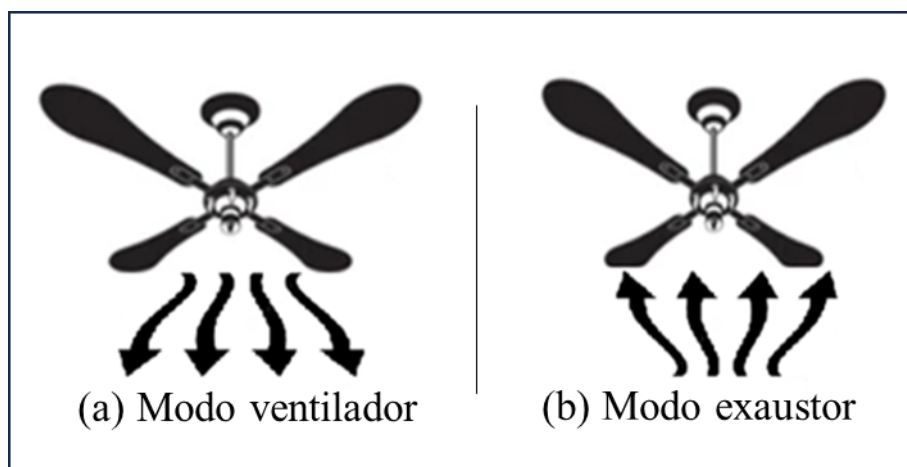
A convecção forçada aumenta a eficiência da climatização de ambientes com condicionadores de ar porque mantém a temperatura mais uniforme em todo o ambiente, reduzindo os bolsões de ar quente, evitando, desta forma, ajustar o termostato para temperatura mais baixa.

Um conceito comumente equivocado é que quanto maior a quantidade de ar movimentada pelo ventilador, maiores serão os efeitos da convecção forçada. Contudo, isso não é inteiramente verdade. Parte de como o ar se move dentro de uma edificação tem a ver com a pressão e a temperatura no ambiente. Por exemplo, se um determinado ambiente tem um bolsão de ar quente, e o objetivo é resfriar o ambiente, a mudança de pressão entre os espaços quentes e frios é um fator que afeta a capacidade do ventilador em movimentar o ar pelo ambiente, podendo fazer com que seja mais difícil para o ventilador soprar o ar frio do condicionador de ar no ambiente.

2.1.1 Ventiladores de Teto

O uso de ventiladores de teto em uma edificação representa um tipo diferente de convecção forçada. Os ventiladores de teto podem ser usados tanto no verão, Figura 3 (a), como no inverno, Figura 3 (b).

Figura 3 - Sentido de rotação do ventilador de teto



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nos meses de verão, a velocidade de operação do ventilador é maior e o sentido de rotação deve ser anti-horário (visto de baixo para cima), para forçar uma brisa para baixo que ajudará na evaporação da transpiração dos ocupantes, proporcionando-lhes a sensação de refrescância. Durante os meses de inverno, o ventilador deve ser usado com velocidade mais baixa, no sentido horário (visto de baixo para cima), de modo que o ar mais frio proveniente das partes mais baixas se misture com o ar mais quente que está em cima e se distribua pelo ambiente.

2.2 PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO USO COMBINADO DE CONDICIONADORES DE AR E VENTILADORES

Sekhar (1995) apresentou simulações do uso combinado de condicionador de ar e ventilador, para determinar o melhor ajuste do termostato, mantendo o nível de conforto térmico dos ocupantes. O estudo foi realizado em Cingapura, durante o verão de 1994, tomando como base edifícios comerciais de 6300 m² de área. Esta simulação utilizou o *software* de análise energética de edifícios denominado DOE-2 *energy simulation*, que prevê o consumo de energia para todo tipo de construção. Os resultados mostraram que o consumo anual da energia empregada para refrigeração poderia ser reduzido em 13 %, com o uso combinado, condicionador/ventilador se o ajuste do termostato do condicionador de ar for aumentado de 23,5 °C para 26 °C, com a umidade relativa do ar em 60 %.

James *et al.* (1996) apresentaram uma simulação que mostra que é possível economizar energia elétrica com o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto em

residências. Esse artigo levou em consideração o resultado de uma simulação em mais de 400 residências, em três cidades da Flórida (EUA): Jacksonville, Orlando e Miami. A simulação foi realizada com a temperatura do termostato do condicionador de ar, aumentando em 0,5 °F, 1 °F e 2 °F a partir de uma temperatura base de 78 °F (25,6 °C) e a velocidade do ventilador ajustada em 0,8 m/s. Foi utilizado o *software* de simulação de energia, FSEC 3.0. O resultado dessa simulação mostrou que o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto leva a uma economia de 2,6% no consumo de energia elétrica quando o ajuste do termostato do condicionador de ar foi alterado de 78 °F (25,6 °C) para 79 °F (26,1 °C) e a uma economia de 14,9% quando o termostato foi ajustado de 78 °F (25,6 °C) para 80 °F (26,7 °C).

Atthajariyakul e Lertsatittanakorn (2008) avaliaram por intermédio de um *survey* da percepção do conforto térmico dos ocupantes de uma sala de aula o potencial de economia de energia elétrica, alcançado por meio do uso combinado de condicionador de ar com ventilador de mesa. O estudo foi realizado na universidade de Mahasarakham, Tailândia, em uma sala de aula de 8,75 m² equipada com um condicionador de ar split com capacidade de refrigeração de 12.000 BTU/h. O experimento realizado com 15 voluntários, sendo 10 homens e 5 mulheres, usando roupas com valor de isolamento térmico de 0,55 até 0,6 (*clo*), desenvolvendo uma atividade com taxa metabólica de 1 (*met*). Os voluntários foram divididos em 5 grupos de 3 alunos, cada grupo permaneceu durante 4 horas para um único experimento. Em cada experimento, o ajuste da temperatura do termostato do condicionador de ar foi alterado de 25°C para 26, 27 e 28°C, a cada hora e a velocidade do ventilador de mesa era aumentada gradualmente a cada 10 minutos, nas seguintes velocidades: 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2 m/s. A umidade relativa do ar foi registrada entre o intervalo de 45 a 75%. A cada 10 minutos, os voluntários respondiam um questionário de voto de sensação térmica, (modelo ASHRAE). O estudo mostrou que, se o ponto de ajuste do termostato do condicionador de ar fosse aumentado de 25°C para 28°C e combinado com o ventilador de mesa a uma velocidade do ar de 0,5 a 2m/s, diminuiria o consumo de eletricidade com condicionador de ar em 18,3%, mantendo o mesmo nível de conforto térmico dos ocupantes.

Momoi et al. (2010) apresentaram um *survey* do conforto térmico dos ocupantes de uma sala de aula que mostra que é possível economizar energia com a climatização, mantendo-se o conforto térmico, por meio do uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto. Esse estudo foi realizado em uma sala de aula de 56m² na universidade de Osaka, Japão, equipada com um condicionador de ar com capacidade de refrigeração de 14kW (48.000 BTU) e com 4 ventiladores de teto, os experimentos foram realizados nos meses de agosto e setembro de 2010, com a participação de 7 voluntários, sendo 2 homens e 5 mulheres usando roupas de

isolamento 0,4 (*clo*) desenvolvendo atividades com taxa metabólica de aproximadamente 1,0 (*met*). Durante o experimento, os voluntários respondiam um questionário de 8 perguntas sobre: sensação de movimento do ar, agradabilidade do movimento do ar, aceitação do fluxo de ar, solicitação para alterar o fluxo de ar, sensação de temperatura, conforto térmico, aceitação térmica e solicitação para ajuste da temperatura em intervalos de 7,5 minutos no tempo total de 105 minutos. Os experimentos foram realizados em 8 condições diferentes, com a temperatura do termostato do condicionador de ar ajustado em 26 °C ou 28 °C e os ventiladores de teto desligados ou ajustados nas velocidades baixa, média e alta, com rotação equivalente a velocidade de 80 rpm, 130 rpm e 170 rpm respectivamente. O estudo mostrou que o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto, diminui a diferença de temperatura dentro da sala de aula, essa diferença ficou em aproximadamente 1 °C, pois o fluxo de ar é distribuído de maneira mais uniforme, a faixa de temperatura efetiva padrão (SET*) para a sensação térmica dos ocupantes, ficou entre 25,6 °C a 28,9 °C com a velocidade do vento variando entre 0,4-1 m/s. Os resultados também mostraram que os ocupantes se sentiram termicamente confortáveis com os seguintes casos: uso exclusivo do condicionador de ar com o termostato ajustado em 26 °C e uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto ajustados em 28 °C e 1 m/s, respectivamente. Não houve relato formal da economia de energia.

Hoyt, Arens e Zhang (2014) realizaram diversas simulações, em 7 cidades dos EUA, para avaliar a magnitude da economia de energia ao aumentar o ponto de ajuste do termostato do sistema de volume de ar variável (VAV) dos edifícios de escritórios de médio porte norte americanos. As simulações consideraram o ajuste da temperatura do termostato, variando entre de 22,2 °C e 26,7 °C e o ponto de ajuste do volume mínimo de ar, variando entre 0,28 m³/s e 0,18 m³/s, foi utilizado o *software Energy Plus*. Os resultados mostraram que, ao aumentar o ponto de ajuste da temperatura de 22,2 °C para 25,5 °C, pode-se alcançar uma economia média de 29 % da energia de resfriamento e diminuir o ponto de ajuste do volume mínimo de ar de 30 % para 10 % pode economizar de 15 a 38 % de energia de resfriamento.

Shetty *et al.* (2016) realizaram um estudo experimental do uso combinado de condicionador de ar com ventilador de mesa, aplicando o método preditivo do conforto térmico aos seis ocupantes de um escritório em Cingapura, os quais usavam roupas que, na média, possuem um nível de isolamento térmico de 0,5 (*clo*) e desempenhavam atividades que levam a uma taxa metabólica de 1,1 (*met*). Os voluntários poderiam ajustar o termostato do condicionador de ar de 25 °C a 27 °C e a velocidade do ventilador de mesa de 0,36 m/s a 1,26 m/s. A umidade relativa do ar era de 60 %. O experimento mostrou que o uso combinado do condicionador de ar com o ventilador de mesa, levou à diminuição do consumo de energia do

condicionador de ar com o aumento do ajuste do termostato, enquanto os ventiladores de mesa, controlados pessoalmente, contribuíram para a manutenção do conforto térmico dos ocupantes.

Lipczynska, Schiavon e Graham (2018) realizaram um *survey* da percepção do conforto térmico dos ocupantes de edifícios comerciais em Cingapura, com o objetivo de estimar a economia de energia proporcionada pelo uso combinado de condicionador de ar e ventiladores de teto. Os experimentos foram realizados em duas salas comerciais de 64 m² e 12 m², durante 6 semanas, onde 15 ocupantes responderam um questionário psicométrico com 8 perguntas relacionadas ao conforto térmico, sensação térmica, aceitabilidade térmica, movimento do ar, bem-estar, concentração e nível de sonolência. Uma das perguntas foi o conforto térmico, medido com a escala ASHRAE de 7 pontos. Os ocupantes estavam usando roupas que, na média, possuem um nível de isolamento térmico de 0,57 (*clo*), desempenhando atividades que levam a uma taxa metabólica de 1,1 a 1,2 (*met*). O estudo mostrou que a elevação do ajuste do termostato do condicionador de ar de 23 °C para 26 °C com o uso combinado do ventilador a uma velocidade de 0,8 m/s e umidade relativa do ar de 50 %, resultou em uma economia de 31,42 % de energia. O consumo de energia utilizada para os ventiladores de teto não representou mais que 1 % do consumo total de energia. O estudo também mostrou que os ocupantes consideraram o ambiente mais confortável termicamente, com o uso combinado de condicionador de ar e ventiladores de teto com a temperatura do termostato ajustada em 26 °C do que com o uso exclusivo do condicionador de ar com a temperatura de 23 °C. O estudo também concluiu que o uso combinado de condicionador de ar e ventiladores de teto para que o conforto térmico seja mantido o termostato do condicionador de ar não deve ser ajustado a uma temperatura superior a 27 °C.

Tian *et al.* (2019) apresentaram simulações do uso combinado de condicionador de ar com ventilador de teto em prédios de escritórios em quatro diferentes cidades da China: Pequim, Qingdao, Xangai e Shenzhen, com diferentes climas, visando a redução do consumo de energia elétrica mantendo em níveis aceitáveis o conforto térmico dos ocupantes. Para simular o consumo de energia nos edifícios estudados, foi utilizado o *software Energy Plus* com o Dakota, um *software* de otimização de projeto. O voto previsto médio (PMV) e o nível de CO₂ foram escolhidos como variáveis de controle do sistema HVAC. O nível de conforto térmico definido como aceitável para os ocupantes foi de 1 para PMV e 800 ppm para CO₂. Significa que, quando os ventiladores de teto operavam em velocidade de 1,2 m/s em seu uso exclusivo, se o PMV ou o CO₂ excederem o limite estabelecido, o sistema de condicionador de ar era ligado com ponto de ajuste entre 20 °C e 28 °C. A simulação foi realizada em um prédio fictício de 927 m² de área climatizada e outro prédio com 21 andares de 55.991 m² de área climatizada. O resultado

da simulação mostrou que, com o uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto, o sistema de climatização nos edifícios estudados poderia diminuir o consumo diário de energia elétrica entre 14,8 % e 33,6 %.

Mihara *et al.* (2019) investigaram o conforto térmico, qualidade do ar percebida e o potencial de economia de energia elétrica proporcionado pelo uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto em uma sala de aula de 42,56 m² da universidade Nacional de Cingapura. Foi feito um *Survey* entre 26 voluntários, sendo 13 homens e 13 mulheres de 19 a 25 anos de idade, todos estavam usando roupas leves de verão com uma média de 0,40 (*clo*) de isolamento térmico, cada experimento durou em média 3 horas e 30 minutos entre dezembro de 2017 e fevereiro de 2018. As condições do experimento foram as seguintes: três temperaturas diferentes no termostato do condicionador de ar, 24 °C, 27 °C e 30 °C com umidade relativa do ar de 60 % e com três diferentes velocidades do ventilador de teto em 0,07 m/s (desligado), 0,94 m/s (velocidade média) e 1,87 m/s (velocidade alta). O estudo lançou mão de um questionário dividido em sete partes, que: (1) Sensação térmica (ASHRAE); preferência térmica; conforto térmico, aceitabilidade térmica; (2) sensação de umidade; aceitabilidade de umidade; (3) sensação do movimento do ar; aceitabilidade do movimento do ar; preferência do movimento do ar; (4) condição de suor; (5) aceitabilidade da qualidade do ar interno (IAQ); frescor do ar; (6) intensidade do odor; (7) desconforto do olho seco. Os resultados mostraram que os ocupantes se sentiram termicamente confortáveis com as seguintes combinações de ajuste do termostato e velocidade do ar: 24 °C e 0,07 m/s; 27 °C e 0,94 m/s; 30 °C e 1,87 m/s. Isso significa que a velocidade do ar de 0,94 m/s compensa o aumento de 3 °C na temperatura tomando como base a temperatura de 24 °C. A velocidade do ar de 1,87 m/s compensa uma diferença de temperatura de 6 °C tomando como base a mesma temperatura de 24 °C. A qualidade do ar percebida, foi melhorando à medida em que a velocidade do ar foi aumentando. O estudo também mostrou, através de simulações, que o uso combinado do condicionador de ar com o ventilador de teto, economizou 25,8 % de energia quando o ajuste do termostato foi de 24 °C para 27 °C, com o ventilador de teto a uma velocidade de 0,94 m/s; 44,6 % quando o ajuste do termostato foi de 24 °C para 30 °C com o ventilador de teto a uma velocidade de 1,87 m/s. Porém a combinação que equilibrou a economia de energia e o conforto térmico foi 27 °C e velocidade do ar de 0,94 m/s.

Chen *et al.* (2020) realizaram um estudo experimental do uso combinado do condicionador de ar com ventilador de teto com objetivo de aumentar a eficiência energética. O experimento foi realizado no *Center for the Built Environment* (CBE), na universidade da Califórnia, Berkeley, em uma Câmara ambiental de teste de 30,25 m², onde um ocupante foi

exposto a duas temperaturas, 26 °C com uso exclusivo do condicionador de ar e 28 °C com o uso combinado do condicionador de ar com ventilador de teto operado em três níveis de velocidade: 0,6; 1,2; 1,8 m/s. O conforto térmico nas duas situações foi estimado por meio do voto médio previsto (PMV) com a ferramenta ASHRAE/CBE. O resultado do estudo mostrou que a sensação térmica do ocupante em um ambiente climatizado a 26 °C foi a mesma que a 28°C com o uso combinado de condicionador de ar com ventilador de teto.

Arumugan, Maiya e Nagendra (2020) investigaram o efeito da circulação de ar na climatização de um escritório e de uma sala de professores nas dependências do Instituto Indiano de Tecnologia Madras, em Chennai, Índia. Cidade com temperatura média de 37 °C no verão e com umidade relativa entre 57 e 78 %. O estudo contou com uma amostra 31 voluntários, sendo 27 homens e 4 mulheres entre os dias 2 e 9 de junho de 2017, usando roupas que, na média, possuem um nível de isolamento térmico de 0,54 (*clo*), desempenhando atividades que levam a uma taxa metabólica de 1,2 (*met*). Durante os experimentos, a umidade relativa do ar variou entre 43 % e 75 %, e o termostato do condicionador de ar foi ajustado entre 25,3 °C ($\cong$ 78 °F) e 29,6 °C ($\cong$ 85 °F). A partir de 35 minutos, após o início dos testes, os voluntários respondiam um conjunto de questionários duas vezes por experimento: Sensação térmica (ASHRAE); preferência térmica; aceitação térmica; sensação de movimento do ar; preferência de movimento dor ar; sensação de umidade. O resultado do estudo mostrou que, os voluntários sentiram-se termicamente confortáveis a uma temperatura de 28 °C, para a velocidade do ar ajustada em 0,25 m/s. A velocidade do ar considerada aceitável por 92 % dos voluntários foi de 0,1 m/s e 0,25 m/s por 88 % dos voluntários. Os autores relatam ter havido economia da energia requerida para a climatização, mas não apontam o seu valor.

He *et al.* (2020) realizaram um *survey* sobre o conforto térmico dos ocupantes de um escritório de 15,3 m² nas dependências da universidade de Hunan, China, para avaliar o uso combinado do condicionador de ar com ventilador de teto na climatização de ambientes. O condicionador de ar tem uma faixa de ajuste entre 18 a 30 °C e um ventilador de teto com 0,7 m de diâmetro e uma faixa de potência de 1,22 a 19,3 W. Participaram 20 universitários, sendo 10 homens e 10 mulheres entre 19 e 25 anos, com as médias de: altura, peso e índice de massa corporal dos homens de 1,73 m $\pm$ 0,42 m; 64,7 kg $\pm$ 4,6 kg e 21,6 $\pm$ 1,8 kg/m² respectivamente e 1,62 m $\pm$ 0,6 m; 51,3 kg $\pm$ 5,9 kg e 19,4 $\pm$ 1,5 kg/m² das mulheres, usando roupas que na média possuem um nível de isolamento térmico de 0,5 (*clo*). Cada experimento durou 75 minutos, mas antes de realizá-los, os ocupantes eram mantidos em uma outra sala de preparação, à temperatura de 25 °C durante 15 minutos, período de aclimação, para estabilizar e padronizar as atividades e taxas metabólicas. Após esse período, os voluntários se dirigiram

à sala do experimento, onde responderam quatro questionários: sensação térmica, conforto térmico, aceitabilidade térmica e preferência térmica a cada 10 minutos. Foram realizadas 12 condições experimentais, com três temperaturas ajustada no termostato do condicionador de ar (26, 28 e 30 °C), umidade relativa do ar 60 % e controle livre da velocidade do ventilador de teto. O estudo mostrou que com o uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto é possível aumentar o ajuste do termostato em até 3 °C sem sacrificar o nível de conforto térmico dos ocupantes.

Li e He (2021) realizaram um estudo na biblioteca (17.754 m²) da Universidade de Guangxi, China, visando a economizar energia com a climatização. O estudo foi desenvolvido em duas etapas. A primeira parte do estudo foi dedicada a identificar os problemas térmicos do ambiente no verão. Já a outra parte do estudo, propôs aumentar o fluxo de ar interno e instalar persianas de resfriamento, com objetivo de reduzir o consumo de energia do condicionador de ar. Para a realização deste estudo, foram usadas duas abordagens conjuntamente: simulação, utilizando o *software* Design Builder, e experimentação para validar os resultados das medias propostas. Para manter um bom nível de conforto térmico para os ocupantes os sistemas de condicionadores de ar precisavam ser ligados de 9,5 até 12 horas por dia, entre abril e novembro. As simulações ocorreram de 1º de maio a 31 de outubro e foram realizadas em 5 cenários: Caso 1, sem medidas de melhoria, apenas o uso exclusivo do condicionador de ar; caso 2, uso de persianas secas; caso 3, uso de persianas de resfriamento; caso 4, uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto e caso 5, uso combinado do condicionador de ar, ventilador de teto e persianas de resfriamento. Para realizações dos experimentos foi utilizada a temperatura efetiva padrão (SET*). Os resultados das simulações mostraram que o uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto, caso 4, reduziu o consumo do condicionador de ar em 5,2 %, com a elevação do ajuste da temperatura do termostato do condicionador de 27 °C para 28,2 °C e ajustada a velocidade do ar em 0,8 m/s, sem sacrificar o nível de conforto térmico dos ocupantes.

Miller *et al.* (2021) realizaram um estudo, método preditivo, para avaliar o impacto do uso combinado de condicionador de ar e ventiladores de teto no consumo de energia elétrica em edifícios comerciais e residenciais, sob a hipótese de que o movimento do ar causado pelos ventiladores de teto manteria os ocupantes termicamente confortáveis mesmo elevando o ajuste do termostato do condicionador de ar. Os estudos foram realizados de junho de 2017 a outubro de 2019 em quatro imóveis, comerciais e residenciais, de 83 a 562 m², nas cidades de Stockton e Fresno, Califórnia, EUA, com variação da temperatura externa de 13,3 a 43,9 °C. O imóvel número 1, foi uma sala comercial no primeiro andar de um prédio de 5 andares, com mais de

50 ocupantes e os demais imóveis, escritórios ou residências com ocupações que variavam entre 2 e 4 ocupantes. Foram coletados os dados de temperatura, umidade relativa do ar e consumo de energia em cada local estudado, a partir da coleta dos dados de temperatura, foi definida a faixa de temperatura para operação exclusiva do condicionador de ar. Por exemplo, o edifício comercial teve seu termostato ajustado em 21,2 °C, ao aumentar gradativamente sua temperatura até 25,9 °C, ponto de intervenção, onde o ventilador de teto com a velocidade de 0,5 m/s entrava em operação, fazendo o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto, a diferença de temperatura entre ponto de ajuste inicial e o ponto de intervenção foi de 4,7 °C. Todos os ocupantes foram entrevistados pessoalmente ou por telefone entre outubro de 2018 a janeiro de 2019, onde respondiam perguntas relacionadas a conforto térmico, percepções e experiências com o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto ou qualquer recomendação de melhoria para esse sistema. Para análise dos dados foram utilizados a linguagem de programação estatística R, com o software RStudio, pacotes adicionais como *cowplot* e *patchwork*. Os resultados do estudo mostraram que com o uso combinado, houve uma economia média de 21% no consumo de energia elétrica. O consumo de energia dos ventiladores de teto, foi 2% do consumo dos condicionadores de ar. Os resultados também indicaram que o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto fornece conforto térmico a 26,7 °C comparável ao uso exclusivo do condicionador de ar ajustado a 22,2 °C.

Mihara *et al.* (2021) realizaram um *survey* da percepção do conforto térmico dos ocupantes com os objetivos, de avaliar as diferenças no conforto térmico, qualidade do ar percebida e o consumo de energia elétrica entre o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto e um sistema de climatização *Fan Coil*. Os experimentos foram realizados na universidade nacional de Cingapura, com a participação de 244 estudantes universitários, entre 19 a 27 anos, que usando roupas que, na média, possuem um nível de isolamento térmico de 0,36 (*clo*), desempenhando atividades que levam a uma taxa metabólica de 1,1 (*met*), sendo 65 homens e 179 mulheres, em dois ambientes experimentais: um estúdio de design com 650m² no qual foi utilizado a combinação de condicionador de ar e ventilador de teto com 192 estudantes e um laboratório de informática com 81 m² que utilizou o *Fan Coil* com 52 estudantes. Os testes foram realizados entre 14 de fevereiro a 21 de março de 2019. As pesquisas de campo foram realizadas por meio de um questionário com questões sobre: sensação térmica (escala ASHRAE), preferência térmica, conforto térmico, aceitabilidade térmica, sensação de umidade e aceitabilidade, aceitabilidade e preferência do movimento do ar, condições de suor, aceitabilidade da qualidade do ar percebida, intensidade do odor e desconforto do olho seco. O ajuste do termostato no estúdio de design foi de 27 °C e a velocidade do ar variou entre 0,13

m/s e 1,89 m/s. Já no laboratório de informática, o termostato foi ajustado em 24 °C, a umidade relativa do ar registrada foi de 60% $\pm$ 5. Os sensores de temperatura foram instalados a uma altura de 1,1 m e registraram as seguintes temperaturas: 26,8 °C e 24,1 °C. Após os registros, os dados de temperatura foram analisados pela ferramenta Microsoft Excel Analysis Toolpak e o teste de Mann-Whitney, para avaliar a diferença dos votos subjetivos, e o teste de Kruskal-Wallis com o teste de Steel-Dwass, para avaliar as diferenças entre as velocidades do ar. O estudo mostrou que os ocupantes se sentiram mais confortáveis termicamente com uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto, comparado ao uso exclusivo *Fan Coil*, e houve uma economia de energia de 27,7 %.

Luo *et al.* (2021) avaliaram o impacto do uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto no conforto térmico e na economia de energia. Esse experimento foi realizado em uma câmara climática de 30,25 m² na Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA. Os testes térmicos foram realizados em manequins para avaliar o efeito de transferência de calor e em pessoas para avaliar as condições térmicas subjetivas, no total de 21 sessões de testes foram realizadas, com três temperaturas ajustadas no termostato do condicionador de ar (23, 26 e 28 °C), quatro modos de operação do ventilador de teto (velocidade baixa descendente, velocidade média descendente, velocidade média ascendente e ventilador desligado) e dois tipos de ventiladores de teto, com fluxo de ar máximo de 4,07 m³/s e outro de 3,17 m³/s. Esses testes foram realizados com 24 ocupantes, sendo 12 mulheres e 12 homens, todos os ocupantes usavam roupas com o nível de isolamento térmico de 0,65 (*clo*) para as temperaturas ajustadas no termostato do condicionador de ar de 23 e 26 °C e 0,5 (*clo*) para temperatura ajustada em 28 °C, desempenhando atividade que levam a uma taxa metabólica de 1,1 (*met*) com umidade relativa em 50 %. O estudo mostrou que o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto, quando a temperatura do condicionador de ar for ajustada em 28 °C e o ventilador de teto operado em modo descendente e com velocidade de 1,6 m/s, criou uma aceitação térmica dos ocupantes igual ou próxima da condição do uso exclusivo do condicionador de ar a uma temperatura ajustada no termostato de 26 °C. Apesar de, no artigo, ser citado que houve economia de energia, não foi apresentado o valor numérico dessa economia.

Sun e Jia (2022) realizaram um experimento para avaliar o conforto térmico em um estúdio de 24,32 m² na China, proporcionado pelo uso combinado de um condicionador de ar e um ventilador de teto. Foram simulados 3 modelos de distribuição de ar no estúdio. O primeiro modelo, com uso exclusivo do ventilador de teto, o segundo modelo, com uso exclusivo do condicionador de ar e, por último, com uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto. O objetivo deste estudo era identificar a relação entre a distribuição do ar e conforto

térmico dos ocupantes e propor o modelo ideal de configuração que resultaria em economia de energia mantendo o conforto térmico dos ocupantes. Para avaliar o conforto térmico dos ocupantes, foi feito um *survey* utilizado a escala ASHRAE. O estudo mostrou que o uso exclusivo dos ventiladores de teto pode criar um ambiente de trabalho mais confortável aos ocupantes. Já com uso combinado de condicionador de ar e ventiladores de teto, a posição ideal do condicionador de ar é na mesma direção do ventilador de teto, tanto para a economia de energia quanto para o conforto térmico dos ocupantes.

Gokarakonda, Treeck e Rawal (2022) apresentaram estudos para analisar o impacto no consumo de energia elétrica do uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto em edifícios residenciais na Índia. Foram relatados três experimentos isolados. O primeiro foi para analisar o comportamento dos ocupantes em relação ao ajuste do termostato do condicionador de ar, estudo realizado com 3 ocupantes em um quarto com dimensões de 10,5 m² de um apartamento na cidade de Ahmedabad, entre 28 de junho e 8 de agosto de 2021 e, nos outros 2 estudos de campo, foi estudado o efeito da velocidade do ar no uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto. O segundo estudo não contou com ocupantes e foi realizado em um único dia, no dia 30 de abril de 2021, na cidade de Hyderabad. O último estudo contou com 2 ocupantes, um adulto e uma criança, realizado em 4 dias, na cidade de Hyderabad. O conforto térmico foi avaliado por intermédio do método preditivo baseado na medição de variáveis ambientais: temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar, além do nível de isolamento térmico das roupas e taxa metabólica dos ocupantes dos ambientes em análise. O nível de isolamento térmico das roupas dos participantes, bem como sua taxa metabólica foram considerados 0,96 (*clo*) e 0,7 (*met*), respectivamente. Os índices de conforto térmico foram calculados utilizando o pacote computacional Pythermalcomfort. O termostato do condicionador de ar foi ajustado em três temperaturas diferentes, 24, 26 e 28 °C e o ventilador de teto em 5 velocidades diferentes: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 m/s com a média da umidade relativa do ar em 67 %. O estudo mostrou que, com o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de teto, a sensação de conforto térmico dos ocupantes foi semelhante nas seguintes condições 24,6 °C com velocidade do ar de 0,2 m/s e 27 °C com velocidade do ar de 0,4 m/s. Com o aumento do fluxo de ar, é possível aumentar o ponto de ajuste do termostato do condicionador de ar em 2 °C. Mesmo considerando o consumo de energia elétrica do ventilador, o uso combinado condicionador de ar/ventilador de teto promoveu a economia de energia. Embora, no artigo, ser citado que houve uma economia de energia, não foi apresentado o valor numérico dessa economia.

Malik (2022) apresentou uma avaliação do consumo de energia quanto ao uso combinado do condicionador de ar e ventilador de pedestal em experimentos realizados na Austrália. Foram avaliados 5 cenários diferentes. Cenário 1, uso exclusivo do condicionador de ar e 4 cenários com uso combinado de condicionador de ar e ventilador de pedestal operando em velocidades diferentes de: 0,1; 0,3; 0,8 e 1,2 m/s. O estudo mostrou que, com o uso combinado de condicionador de ar e ventilador de pedestal, a temperatura de ajuste do termostato do condicionador de ar pode ser elevada de 3 a 4 °C, quando a velocidade do ventilador estiver entre 0,8 m/s para ter o mesmo nível de conforto térmico dos ocupantes comparado com o uso exclusivo do condicionador de ar e estima-se uma economia anual de energia de 76 %.

O Quadro 1 sintetiza as principais características dessas pesquisas.

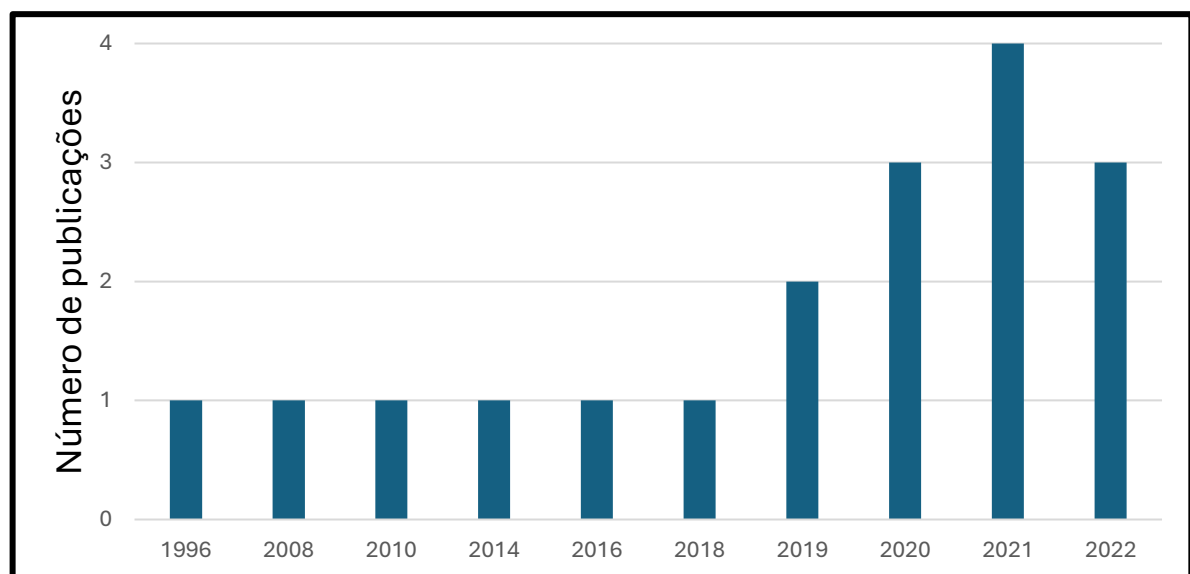
Observa-se que o interesse por esse assunto vem crescendo ao longo dos anos, principalmente, na última década, conforme ilustrado na Figura 4, isso se explica porque, segundo a IEA (2018), o uso de energia para climatização em edifícios triplicou entre 1990 e 2016, atraindo o interesse da comunidade científica para a realização de pesquisas voltadas à economia de energia com refrigeração de ambientes.

Quadro 1- Principais características das pesquisas em análises

Autor	País	Abordag. Met.			Economia (%)	Tipos de Edifícios			Área (m ²)	Condicionador de ar (Btu/h)	Participantes	Taxa Metabólica (met)	Isolamento das roupas (clo)	Temperatura		Velocidade do ar(m/s)	U. R. (%)
		Simulação	Survey	Predição		Residencial	Universitário	Comercial						Inicial (C°)	Final(C°)		
Sekhar (1995)	Singapura	X			13			X	6300	N/A	N/A	N/A	N/A	23,5	26	N/A	60
James et al. (1996)	EUA	X			2,6 e 14,9	X			N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	25,6 e 26,1	26,7	N/A	60
Attahajariyakul, Lertsattitanakorn (2008)	Tailândia		X		18,3		X		8,75	12.000	15	1	0,55-0,6	25	28	0,2-2	60-80
Momoi et al. (2010)	Japão		X		N/A		X		56	14.000	7	1	0,4	26	28	0,8	N/A
Hoyt, Arens e Zhang (2014)	EUA	X			29			X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	22,2	26,7	0,18-0,28	N/A
Shetty et al. (2016)	Singapura			X	N/A			X	N/A	N/A	6	1,1	0,5	25	27	0,36-1,26	60
Lipczynska, Schiavon e Graham (2018)	Singapura		X		31,42			X	12 e 64	N/A	15	1,1-1,2	0,57	23	26	0,8	0,5
Tian et al. (2019)	China	X			14 - 33,6			X	927 e 69.846	N/A	N/A	N/A	N/A	20	28	1,2	N/A
Mihara et al. (2019)	Singapura		X		25		X		42,56	N/A	26	1	0,4	24	27	0,94-1,87	60
Chen et al. (2020)	EUA			X	N/A		X		30,25	N/A	1	N/A	N/A	26	28	0,6-1,2-1,8	N/A
Arumugan, Maiya e Nagendra (2020)	Índia		X		N/A		X	X	N/A	N/A	31	1,2	0,54	25,3	29,6	0,25	57 - 78
He et al. (2020)	China		X		N/A		X		15,3	N/A	20	1	0,5	25	28	1,0-1,3	60
Li e He (2021)	China	x			5,2		X		17.754	N/A	N/A	1,1	0,5	27	28,2	0,8	80
Miller et al. (2021)	EUA		X		21	X		X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	21,2	25,9	0,5	55
Mihara et al. (2021)	Singapura		X		27,7		X		81 e 650	N/A	244	1,1	0,36	24	27	1,89	60
Luo et al. (2021)	EUA			X	N/A		X		30,25	N/A	24	1,1	0,65	23	28	1,6	50
Sun, Jia (2022)	China	X			N/A		X		24,32	N/A	N/A	N/A	0,37	16	30	2,5	N/A
Gokarakonda, Treeck e Rawal (2022)	Índia			X	N/A	X			10,5	N/A	5	0,96	0,7	24,6	27	0,4	67
Malik (2022)	Austrália		X		76			X	N/A	N/A	N/A	N/A	0,5	N/A	N/A	0,8-1,2	N/A

Fonte: Elaborado pelo auto (2023).

Figura 4 - Evolução das publicações



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Embora este tema seja de interesse global, a disseminação dessas pesquisas não se deu de forma igual nos continentes, concentrando-se majoritariamente na Ásia conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Distribuição geográfica dos artigos utilizados nesta pesquisa

País	Número de pesquisa
Estados Unidos	5
China	4
Singapura	1
Índia	2
Japão	1
Tailândia	1
Austrália	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segundo a EPE (2018) estima-se que o número de aparelhos de condicionadores de ar na China e nos Estados Unidos é de 1 a 2 aparelhos por domicílio respectivamente. Já no Japão, esse número pode chegar a três.

Esse número não é muito diferente nos demais países asiáticos. Segundo a IEA (2018) a refrigeração é responsável por 30% do consumo total de energia no setor de edificações asiáticos.

Embora, alguns países da Europa apresentem temperaturas bastante elevadas, por muitos dias, durante o verão, como é o caso de Chipre, Malta e Grécia, menos de 10% dos lares Europeus possuem um condicionador de ar. Contudo, essa situação está prestes a se modificar por conta da intensificação dos verões europeus, causada pelos desequilíbrios climáticos, o que deverá incentivar pesquisas nesta área.

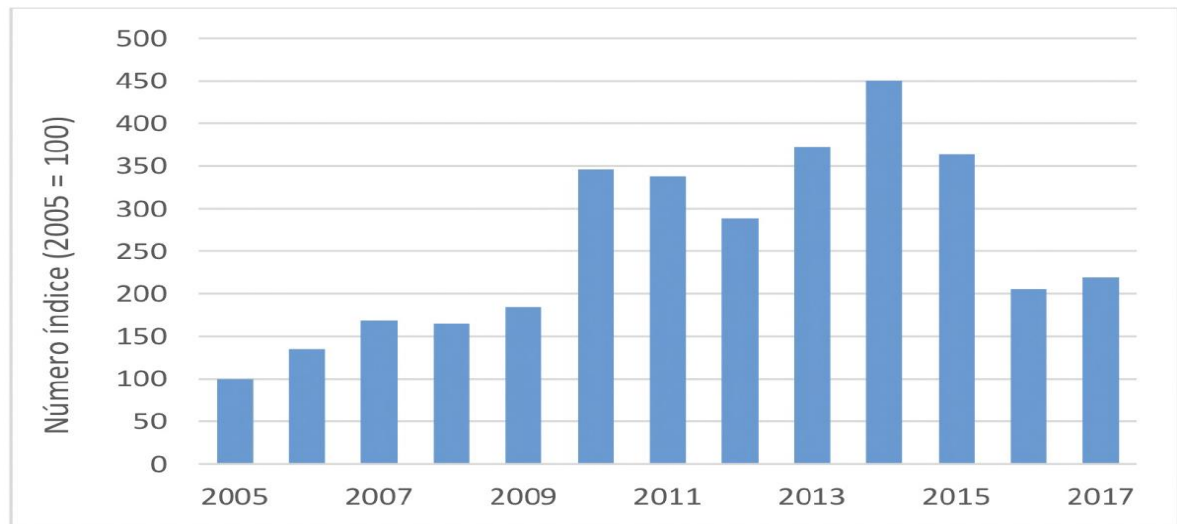
Devido aos baixos padrões de renda das populações Africana, a penetração deste tipo de aparelho neste continente ainda é pequena, não fazendo de sua participação no consumo energético um tema atraente para pesquisa.

Nas Américas central e do sul também não se vê pesquisas nesta área, devido, até então, à baixa participação de condicionadores de ar no mercado. Situação que vem se modificando no Brasil a passos largos, conforme ilustrado na Figura 5.

Esses estudos se dividiram em duas abordagens metodológicas, simulação e experimentação, que se distribuíram de acordo com a Figura 6.

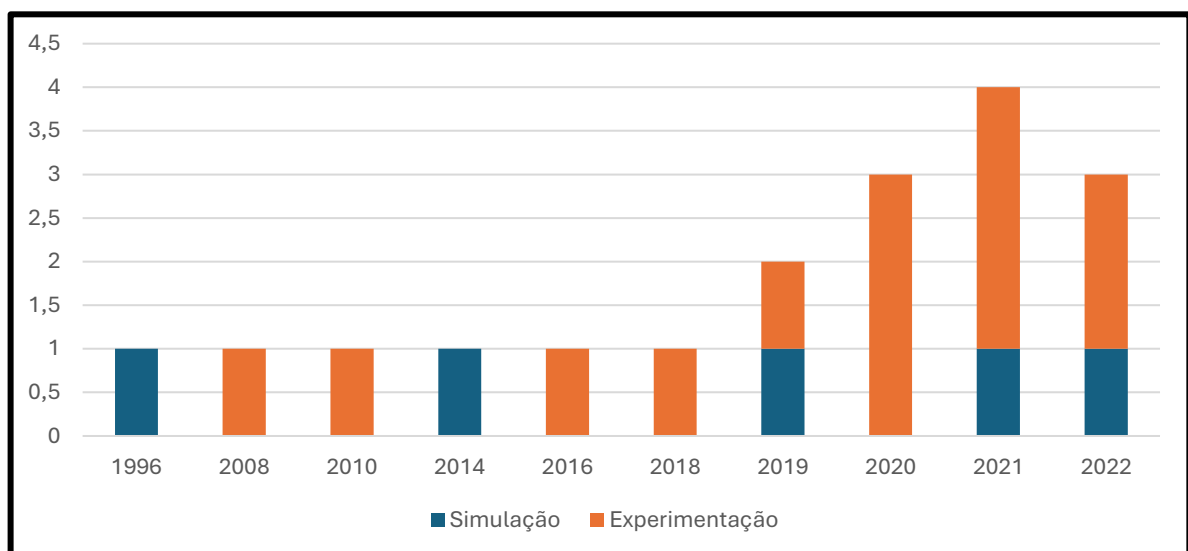
As pesquisas iniciais nesta área lançaram mão de simulações para alcançar os seus resultados. A Figura 6 mostra que esta abordagem não foi a mais utilizada nas pesquisas. Os softwares de simulação utilizados foram: DOE-2; FSEC 3.0: *Software for Environment Computation. V3.0*, *EnergyPlus* e *DesignBuilder*.

Figura 5 - Crescimento estimado da venda de aparelhos de ar-condicionado residenciais



Fonte: Adaptado de EPE (2018).

Figura 6 - Distribuição temporal da abordagem metodológica utilizada nos estudos

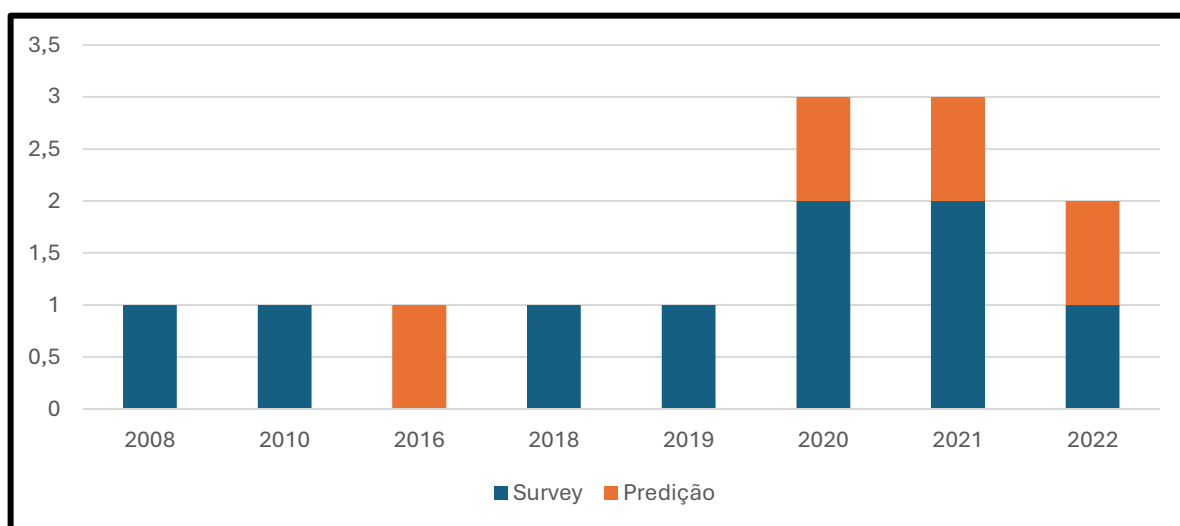


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As pesquisas que usaram a experimentação como abordagem metodológica dividiram-se em dois grupos quanto a forma de determinar o conforto térmico dos ocupantes, segundo as

diretrizes ASHRAE: determinação do conforto térmico a partir de *surveys* dos ocupantes e predição do conforto térmico dos ocupantes a partir de medidas ambientais. Figura 7 ilustra a distribuição temporal da forma de avaliar o conforto térmico.

Figura 7 - Distribuição temporal do método empregado para determinar o conforto térmico

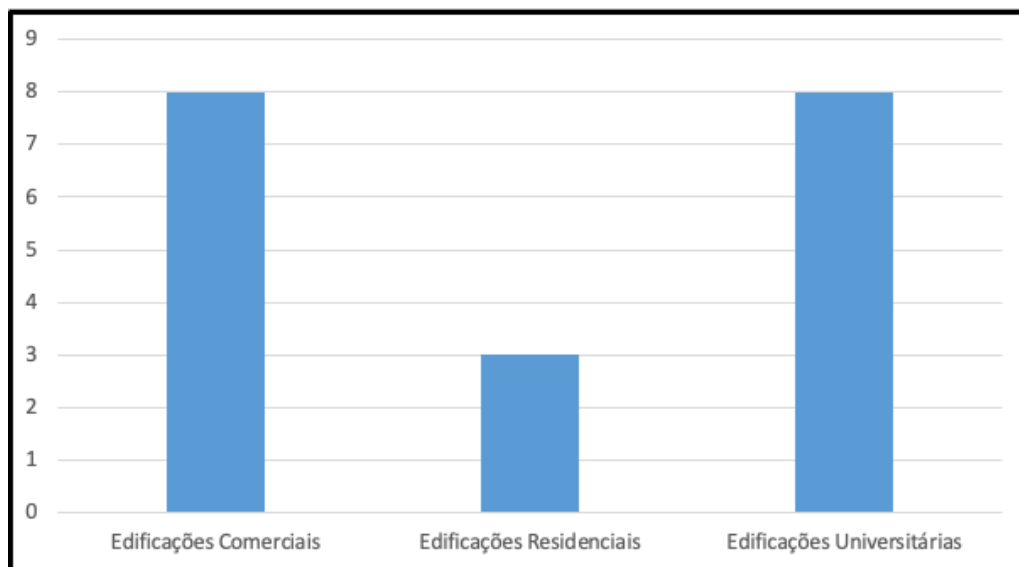


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O *survey* para a determinação do conforto térmico dos ocupantes de um ambiente foi a abordagem metodológica preferida entre as pesquisas. Talvez essa preferência se deva ao fato de que o método preditivo seja trabalhoso, requerendo a medição de diversas grandezas ambientais.

Os tipos de edificações mais utilizadas para a realização dos experimentos são: residenciais, comerciais e as universitárias, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Tipos de edificações onde foram feitas as pesquisas

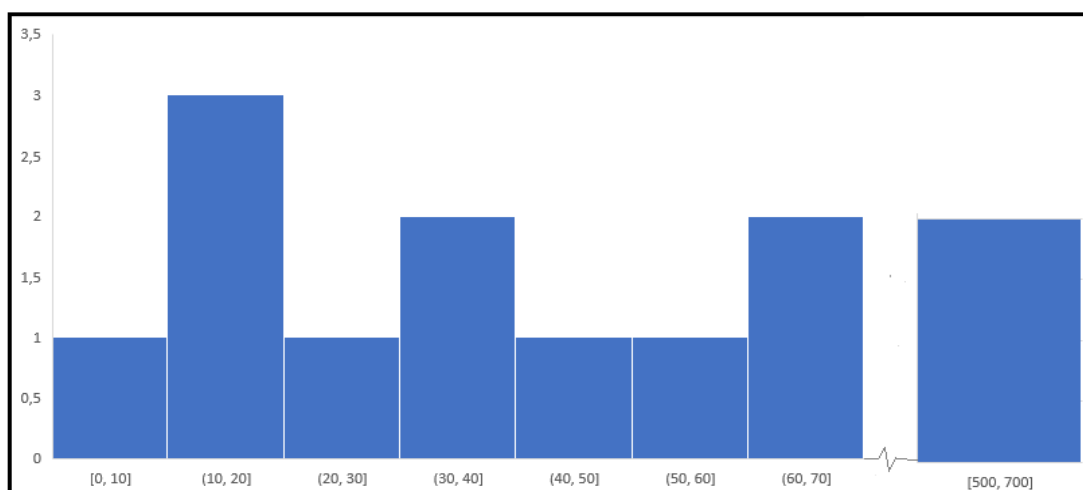


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Dentre as hipóteses que explicam essa distribuição encontram-se a facilidade de controle das variáveis experimentais e possibilidade de amostras maiores.

Infelizmente nem todos os artigos informaram ou foram precisos, ao informar a área das instalações onde os experimentos ou estudos foram conduzidos, sobretudo aqueles que adotaram a simulação como abordagem metodológica (SEKHAR, 1995) (JAMES *et al.*, 1996) (HOYT; ARENS; ZHANG, 2015) (TIAN *et al.*, 2019) (LI; HE, 2021). As dimensões reportadas nos demais estudos se distribuem conforme a Figura 9.

Figura 9 - Área das instalações onde foram realizados os experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

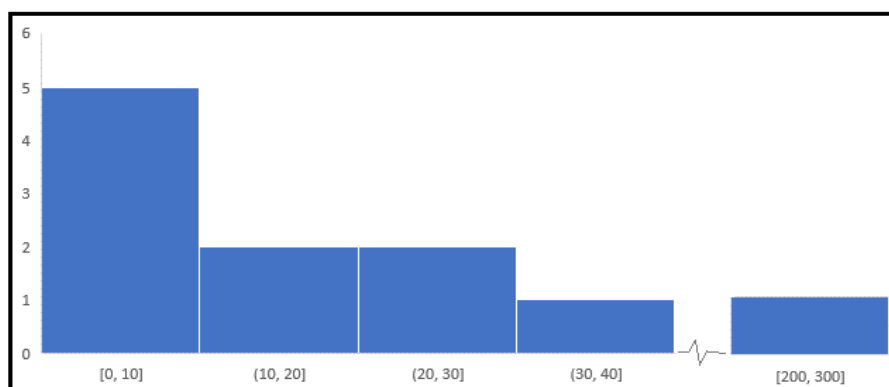
O menor ambiente considerado para experimentação tinha $8,75\text{m}^2$ enquanto o maior, 927m^2 . Não há evidências de que a abordagem metodológica esteja relacionada com as dimensões do ambiente.

O número de participantes envolvidos nos experimentos varia de 1 a 244, distribuídos conforme a Figura 10. Pode-se afirmar que, na maioria dos experimentos, não houve a preocupação em equilibrar o número de homens e mulheres. Não há relação entre a abordagem metodológica e número de participantes.

A taxa de isolamento térmico das roupas utilizadas pelos participantes dos experimentos varia de 0,36 a 0,96 (*clo*), distribuídos de acordo com a Figura 11.

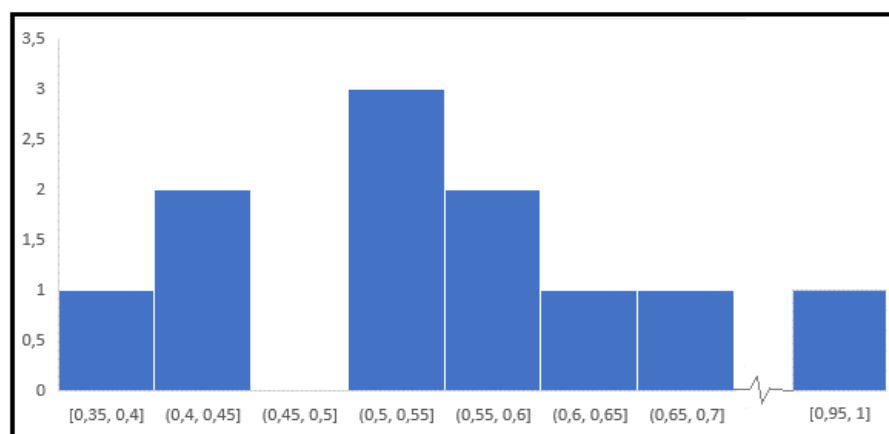
A taxa metabólica dos ocupantes variou de 0,70 a 1,2 (*met*), conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 10 - Número de participantes dos experimentos



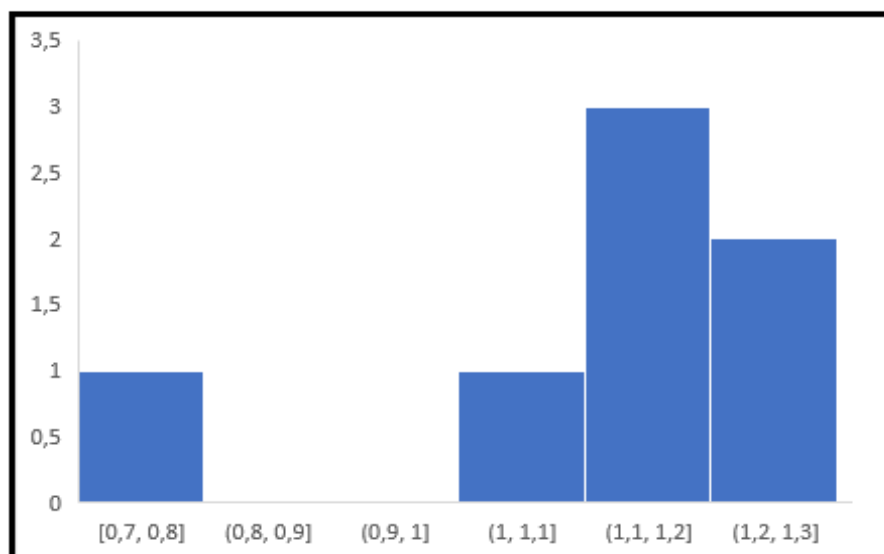
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 11 - Taxa de isolamento térmico das roupas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 11 - Taxa metabólica dos ocupantes



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Comparando-se uma situação em que um ambiente é climatizado exclusivamente por um condicionador de ar, as pesquisas mostraram que, de fato, a circulação de ar no ambiente, em torno de 0,8 m/s, promovida por ventiladores, permite a manutenção do conforto térmico dos ocupantes, mesmo que o termostato do condicionador seja elevado em torno de 3 °C, desde que a temperatura não ultrapasse 27 °C. A umidade relativa do ar, bem como a área do ambiente sob estudo, parece ter pouco impacto nesses resultados.

Foram adotadas três abordagens metodológicas para a realização desses estudos, a saber, simulação, predição do conforto térmico, baseada na medição de variáveis ambientais; e *survey* dos ocupantes sobre o conforto térmico. Essa última abordagem foi a mais utilizada. O tamanho da amostra variou entre 1 e 244 participantes, todos apresentando uma taxa metabólica em torno de 1,0 (*met*) e trajando roupas com isolamento térmico em torno de 0,55 (*clo*).

Os estudos mostraram que o uso combinado de condicionador de ar e ventiladores promove a economia da energia empregada na climatização dos ambientes. Entre os poucos estudos que mencionaram o percentual de economia alcançado por esta modalidade de climatização, aqueles que usaram a abordagem *survey* relataram uma economia média de 25 %. A grande variabilidade desse valor se explica pelo fato do consumo de um condicionador de ar está associado a diversas variáveis, tais como, tipo, potência e eficiência do condicionador de ar, assim como às dimensões, à carga térmica e a temperatura externa das instalações consideradas.

2.3 AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

2.3.1 Conforto Térmico

Segundo ASHRAE (2017) o conforto térmico é muito importante tanto para o bem-estar de uma pessoa, quanto para a produtividade de uma empresa. O desconforto térmico pode ser tanto estressante, quanto um fator limitante do desempenho da equipe de trabalho. Um escritório muito quente aumenta a sensação de cansaço de seus ocupantes, enquanto que outro muito frio leva os seus ocupantes a manifestarem um déficit de atenção, fazendo com que se distraiam facilmente.

O conforto térmico é altamente subjetivo, e não pode ser medido diretamente. Trata-se da sensação de bem-estar experimentada por uma pessoa em um dado ambiente, em um dado momento. Pose-se dizer que uma pessoa está termicamente confortável quando não está sentido nem frio, nem calor.

A avaliação do conforto térmico é um processo cognitivo que envolve muitos dados influenciados por aspectos físicos, fisiológicos, psicológicos e outros (ASHRAE, 2017). Quanto aos aspectos físicos, pode-se relacionar variáveis ambientais, tais como, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar, umidade relativa do ar e isolamento térmico das roupas utilizadas pelos ocupantes do ambiente sob análise. Em relação aos fatores fisiológicos, destaca-se a taxa metabólica dos indivíduos.

Ainda segundo ASHRAE (2017), “O processo de avaliação do conforto térmico é orientado pelos conceitos de sensação e percepção”.

A sensação é um fenômeno psicofisiológico provocado pela excitação de um órgão sensorial. No caso do conforto térmico, os elementos de excitação são os mecanismos de intercâmbio térmico entre o meio e o indivíduo (convecção e evaporação), provocando como resposta a sensação de frio ou calor (ASHRAE, 2017).

A percepção é a função cerebral que atribui significado às sensações, a partir do histórico de memórias. Através da percepção, o indivíduo organiza e interpreta suas impressões sensoriais (suas sensações), para atribuir significado a seu meio (ASHRAE, 2001). Por exemplo, a percepção de um ambiente termicamente confortável por um indivíduo, ocorre quando ele não estiver experimentando nem a sensação de frio ou calor.

Segundo a norma ASHRAE (2017), o conforto térmico de um ambiente pode ser previsto a partir da medição de grandezas ambientais ou pode ser estimado diretamente a partir de *surveys*.

2.3.2 Previsão do Conforto Térmico a Partir da Medição de Grandezas Ambientais

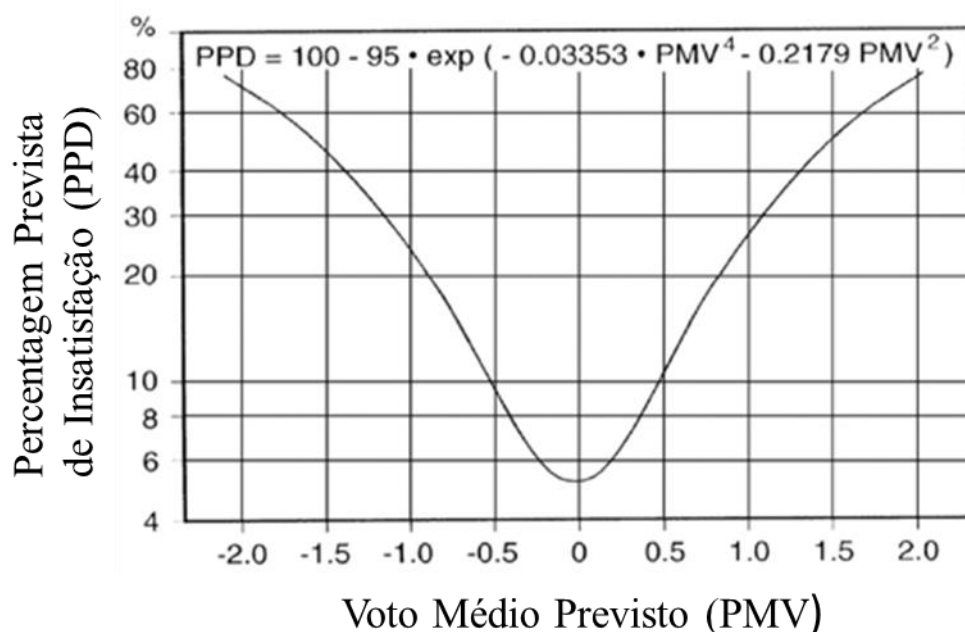
Esta modalidade de estimação do conforto térmico, estabelece que é possível prever a satisfação térmica dos ocupantes de um ambiente *indoor* por meio de medições de grandezas ambientais por meio de cálculos e de comparações com limites estabelecidos para o conforto térmico. A norma ASHRAE (2017) estabelece que o voto médio previsto (PMV – *Predicted Mean Vote*) e método adaptativo podem fazer esta previsão.

2.3.2.1 Voto médio previsto (PMV)

O PMV é calculado combinando as medições de variáveis ambientais com o nível de isolamento térmico das roupas e índice metabólico dos ocupantes. A norma ASHRAE (2017) define a zona de conforto para as condições tais que $PMV = \pm 0,5$.

Para qualquer nível de PMV, pode-se estimar a proporção da população termicamente desconfortável (PPD – *Predicted Percentage Dissatisfied*), por meio de uma curva PPD x PMV, como a da Figura 12.

Figura 12 - Correspondência entre o voto médio previsto e a porcentagem da população termicamente desconfortável



Fonte: ASHRAE (2017)

Essa curva foi ajustada a partir dos *scores* de *surveys* da sensação térmica (T_{sens} – *Thermal Sensation*) feitos em diversas situações. Sempre que a sensação térmica do respondente foi $\geq +2$ ou ≤ -2 , assumiu-se que ele estava termicamente desconfortável.

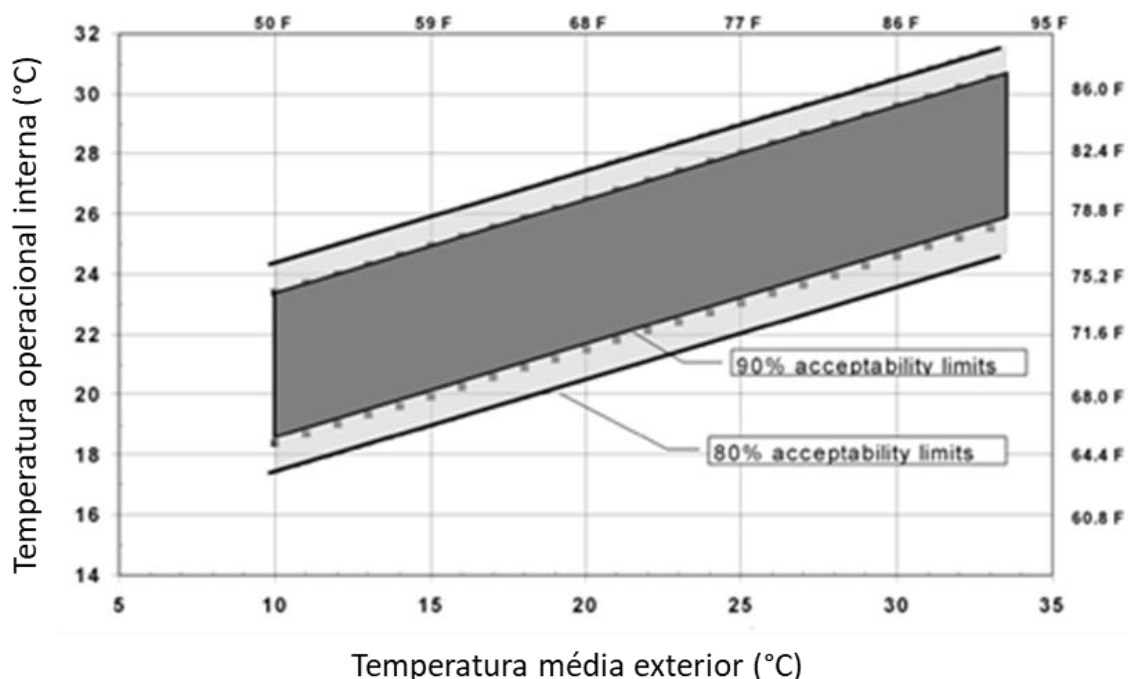
Observando a Figura 13, conclui-se que para um valor de PMV entre $\pm 0,5$, estima-se que 90%, ou mais, se sente termicamente confortável.

Contudo, em muitos edifícios, este índice de 90% de satisfação é raramente alcançado, ficando em torno de 80%. Portanto, em termos mais realistas, a porcentagem da população descontente para PMV entre $\pm 0,5$ é de 20%.

2.3.2.2 Método adaptativo

Este método é usado para ambientes ventilados naturalmente. As medições das grandezas ambientais são ligadas à satisfação térmica dos ocupantes por meio de um modelo empírico no qual a temperatura média do ar no exterior determina o percentual de pessoas termicamente confortáveis ao longo da zona de conforto, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Limites aceitáveis da temperatura operativa para ambientes condicionados naturalmente



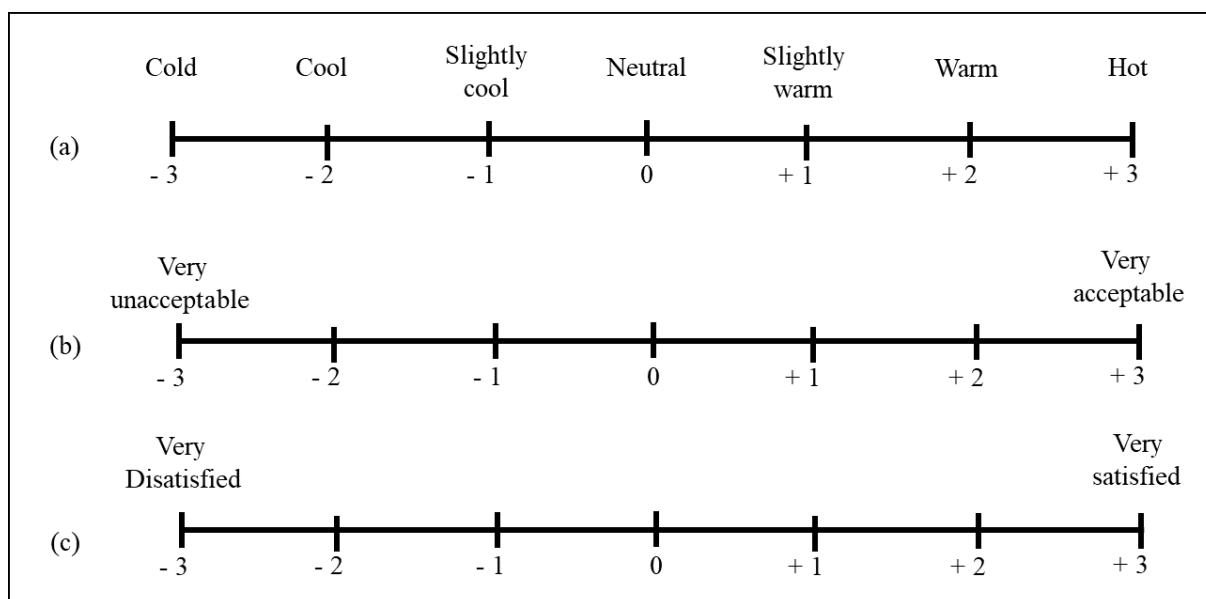
Fonte: ASHRAE (2017)

2.3.3 Determinação do Conforto Térmico a Partir de *Surveys*

Segundo a ASHRAE (2017) o conforto térmico de ambientes *indoor* pode ser estimado satisfatoriamente por meio de *surveys*. Ainda segundo a ASHRAE (2017) os *surveys* permitem estimar diretamente o conforto térmico dos ocupantes, capturando um conjunto de sensações relacionadas com a temperatura do ambiente, enquanto que a medição de grandezas ambientais é utilizada para fazer previsões indiretas dessas percepções por meio de modelos matemáticos.

A ASHRAE (2017) estabelece a realização de *surveys* para estimar a sensação térmica, a aceitabilidade térmica e o conforto térmico dos ocupantes sob análise. As percepções dos ocupantes são quantificadas por meio de escala de sete pontos, conforme indicadas na Figura 14.

Figura 14 - Escalas ASHRAE: (a) sensação térmica; (b) aceitabilidade térmica; (c) satisfação térmica



Fonte: ASHRAE (2017)

Ainda segundo a ASHRAE, os *surveys* podem ser pontuais no tempo, como os *surveys* de sensação térmica e aceitabilidade térmica. Os *surveys* também podem ser usados para avaliar o conforto térmico durante certos períodos (verão passado, antes da instalação de novos equipamentos, etc.).

Para serem efetivos, os *surveys* devem ser realizados usando uma amostra representativa dos ocupantes das instalações, bem como uma alta taxa de resposta, conforme indicado na Tabela 1.

2.3.4 Classificação das Escalas ASHRAES e Suas Propriedades

Por conta de suas características intrínsecas, às sensações e percepções humanas não podem ser medidas diretamente por instrumentação convencional, mas ainda assim, precisam ser quantificadas.

Tabela 1 - Tamanho de amostra a serem considerados para a realização de surveys para avaliação do conforto térmico

Ocupantes	Amostra válida
> 45	> 35%
$45 < x < 20$	> 15 %
< 20	$\geq 80\%$

Fonte: ASHRAE (2017)

Segundo Campbell (1938 *apud* Stevens, 1946) “medição no sentido mais amplo, é definida como atribuição de números a eventos de acordo com certas regras”. Essas regras são concretizadas numa escala, o que leva a diferentes tipos de escalas, cada qual com suas propriedades matemáticas e, por isso, restrita a certas operações estatísticas. A Tabela 2 apresenta os quatros tipos de escala considerados nos estudos estatísticos (nominal, ordinal, intervalar e razão), as operações empíricas para as quais foram concebidas e as operações estatísticas que são permitidas com o resultado das medições provenientes dessas escalas.

Tabela 2 - Classificação das escalas e operações permitidas

Escola	Operações empíricas básicas	Estatísticas permitidas ¹
Nominal	Determinação de igualdade	Distribuição de frequência moda Correlação de contingência
Ordinal	Determinação de maior ou menor	Mediana Percentis
Intervalar	Determinação de igualdade de intervalos ou diferenças	Média Desvio padrão Correlação de postos Correlação linear Soma/subtração de valores
Razão	Determinação de igualdade de razões	Coeficiente de variação Multiplicar e dividir valores Possui um zero real

¹ _As operações estatísticas permitidas para um tipo de escala, sempre incluem as do tipo anterior.

Fonte: Adaptado de Stevens (1946)

Pode-se concluir que as escalas de sensação térmica, aceitabilidade térmica e satisfação térmica são escalas do tipo ordinal, uma vez que todas propõem uma ordenação da intensidade de uma sensação e representam uma função monotonicamente crescente.

As operações média e desvio padrão não devem ser usadas com escalas ordinais porque essas estatísticas requerem mais do que o conhecimento ordem relativa dos dados. Médias e desvios padrões calculados a partir de uma escala ordinal incorrem em erro na medida em que presumem que intervalos sucessivos da escala sejam iguais em tamanho, o que não é verdade. Por exemplo, considerando a escala de sensação térmica, pode-se dizer com absoluta certeza que +2 significa uma sensação de mais calor do que +1. Contudo, não se pode afirmar que uma sensação seja o dobro da outra. Por isso recomenda-se cautela com as operações estatísticas a serem empregadas para tratar dados dessa natureza e, sobretudo, com as conclusões tiradas dessas análises.

2.3.5 Escala de 21 Pontos para a Estimação da Sensação Térmica

A ASHRAE (2017) determina que o instrumento de coleta de dados em *surveys* de sensação térmica seja uma escala de sete pontos, aquela ilustrada na Figura 15 (a). Assim,

qualquer que seja a sensação térmica resultante do processamento sensorial do respondente, ela deve ser quantificada por um dos sete pontos dessa escala.

Esse processo de codificação da sensação térmica, embora subjetivo, está relacionado com a amplitude da escala. Isso significa que a mesma sensação térmica, medida em duas escalas de amplitudes distintas, será representada por dois valores numéricos tão distintos.

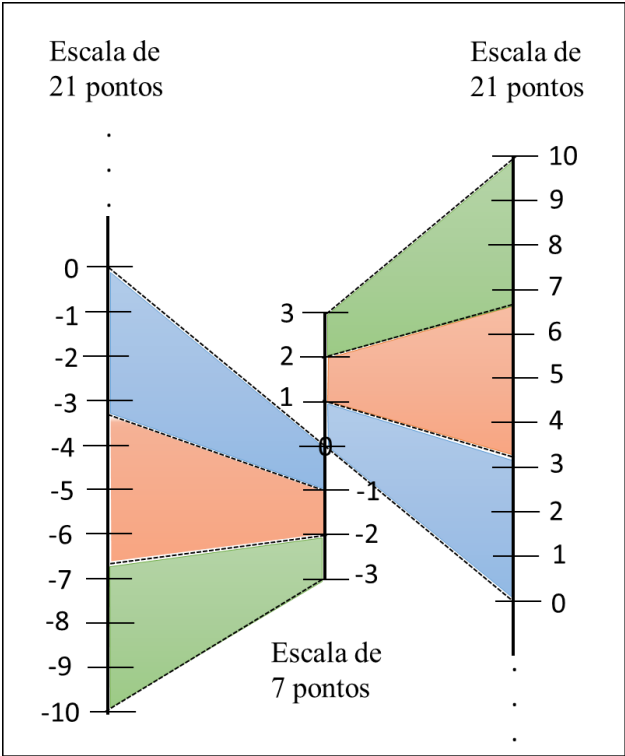
Quando forem as amplitudes, uma escala com amplitude maior, oferece mais opções para registrar sensações térmicas o que equivale a dizer que os dados coletados por esta escala apresentam uma variância maior, o que favorece a aplicação de diversos métodos estatísticos.

Escalas de amplitude maior oferecem maiores possibilidades de registrar distintamente as respostas a estímulos sensoriais distintos, porém próximos. As escalas de maior amplitude apresentam uma sensibilidade maior para registrar estímulos sensoriais.

A Figura 15 ilustra a comparação da sensibilidade entre as escalas de sete e vinte e um pontos. Ao centro da Figura 15, vê-se a escala de 7 pontos. À direita a extensão positiva da escala de vinte e um pontos (0 a +10), enquanto que do lado esquerdo, a sua extensão negativa (0 a -10). Observa-se que uma variação de 1 ponto na sensação térmica, na escala de 7 pontos, corresponde a 3 pontos na escala de vinte e um pontos. Assim, se a sensação térmica a ser registrada na escala de 7 pontos for 0 ou 1, na escala de vinte e um pontos poderia ser 0, 1, 2 ou 3. Portanto, a escala de 21 pontos oferece mais possibilidades de representação de sensação térmicas semelhantes, que estariam restritas à representação por, apenas, dois valores numa escala de 7 pontos.

Conclui-se, portanto, escalas de maior amplitude permitem quantificar mais precisamente o resultado do processamento sensorial de pequenas variações das condições ambientais.

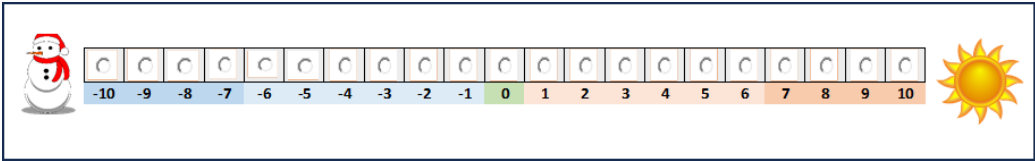
Figura 15 - Comparando a sensibilidade entre as escalas de 7 pontos e 21 pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 16 ilustra uma escala de sensação térmica, de vinte e um pontos, que se apresenta como alternativa para a escala de sete pontos.

Figura 16 - Escala de 21 pontos para avaliação da sensação térmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

3 MODELAGEM DO PROBLEMA

Sabe-se que a ventilação afeta a sensação térmica dos indivíduos. Em ambientes *indoor*, a ventilação forçada pode fazer com que esses indivíduos demorem mais para perceber uma elevação na temperatura (inércia termo-sensorial - ITS).

A inércia termo-sensorial dos ocupantes, causada pela ventilação forçada, pode compensar ajustes maiores no termostato dos condicionadores de ar, levando à economia de energia sem afetar o conforto térmico dos ocupantes.

Para alcançar os objetivos desta pesquisa foi necessário comparar as inércias termo-sensoriais dos ocupantes de um ambiente termicamente condicionado, ora exclusivamente pelo uso do condicionador de ar, ora pelo uso combinado do condicionador de ar e ventilador de teto. Para tanto, foram realizados experimentos para capturar a sensação térmica dos ocupantes nas duas situações.

Os experimentos foram realizados com indivíduos submetidos, aleatoriamente, a N níveis de temperatura previamente determinados. Os resultados foram organizados conforme a Tabela 3, das sensações térmicas dos ocupantes, capturadas pela escala de 21 pontos, conforme a Figura 17, nas duas condições de climatização.

Tabela 3 - Sensação térmica dos ocupantes

Indivíduo	Temperatura (°C)			
	T^1	$\dots$	T^j	$\dots$ T^n
1	T_1^1	$\dots$	T_1^j	$\dots$ T_1^n
2	T_2^1	$\dots$	T_2^j	$\dots$ T_2^n
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
i	T_i^1	$\dots$	T_i^j	$\dots$ T_i^n
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
m	T_m^1	$\dots$	T_m^j	$\dots$ T_m^n
$d_{T^j T^o}$	$d_{T^1 T^o}$	$d_{T^j T^o}$	$d_{T^n T^o}$	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Existe uma temperatura denominada temperatura ótica, $T^o (T^1 < \dots < T^o < \dots T^n)$, na qual todos os respondentes se sentem absolutamente confortáveis, e portanto todos associariam a ela o zero (valor central) da escala de 21 pontos (Figura 17). Contudo, não é fácil determinar essa temperatura, porque, seria necessária a coincidência, pouco provável, de diversos fatores. Contudo, é possível determinar qual das temperaturas, utilizadas nos experimentos $(T^1, \dots, T^j, \dots T^n)$, foi considerada a mais confortável na opinião dos respondentes, para cada modalidade de climatização. Supondo que cada temperatura T^j seja um ponto pertencente a um espaço m-dimensional, e que as sensações dos m alunos sejam as coordenadas desses pontos, é possível calcular a distância entre dois pontos quaisquer desse espaço.

Há diversas definições de distância, cada qual mais apropriada à natureza dos dados sob avaliação. Para a aplicação em questão, considera-se a distância Manhattan a mais adequada para esta aplicação por causa da natureza discreta da variável sensação térmica, de acordo com a escala da Figura 17.

A distância Manhattan entre a temperatura T^j e a temperatura T^o , pode ser calculada como (1).

$$d_{T^j T^o} = \sum_{i=1}^m |T_i^j - T_i^o| = \sum_{i=1}^m |T_i^j| \quad (1)$$

Assim, a temperatura mais confortável (TMC), dentre aquelas utilizadas no experimento $(T^1, \dots, T^j, \dots, T^m)$, foi a mais próxima de T^o (2).

$$TMC = T^j \Rightarrow \min \{d_{T^j T^o}\}_{j=1}^n \quad (2)$$

3.1 DETERMINAÇÃO DA INÉRCIA TERMO-SENSORIAL (ITS)

Como definido anteriormente, a inércia termo-sensorial, é o atraso na percepção da variação da temperatura. No caso deste estudo, é o atraso na percepção do aumento da temperatura. Conforme estabelecido, $T^j = \{T_1^j, T_2^j, \dots, T_i^j, \dots, T_m^j\}$ representa as sensações térmicas dos participantes para a temperatura T^j . Assim, $T^j\{\cdot\} = T^k\{\cdot\}$ significa que os

participantes experimentaram sensações térmicas iguais para as temperaturas T^j e T^k . o que pode ser escrito como:

$$T^j\{\cdot\} T^k = \{\cdot\} \Leftrightarrow x_{ij} = x_{ik} \ (i = 1, \dots, m) \quad (3)$$

Para considerar a subjetividade das percepções a equação 4 pode ser escrita como:

$$T^j\{\cdot\} \cong T^k\{\cdot\} \Leftrightarrow x_{ij} \cong x_{ik} \ (i = 1, \dots, m) \quad (4)$$

Define-se a inércia termo-sensorial como:

$$ITS \triangleq T^k - T^j \ (T^k > T^j) \quad (5)$$

É importante notar que não há haverá um único valor de ITS. Para um grupo de n temperaturas para as quais os respondentes experimentem sensações térmicas próximas, $T^1\{\cdot\} \cong \dots \cong T^n\{\cdot\}$, define-se $n-1$ ITS diferentes, como consegue:

$$ITS^i = T^n - T^i, i = 1, \dots, n - 1 \ (T^n > T^i) \quad (6)$$

Esse procedimento deve ser repetido para os G grupos de sensações térmicas próximas. Portanto, a determinação das ITS's deve ser precedida pela identificação desses G grupos, o que pode ser feito por intermédio da técnica de *clustering*.

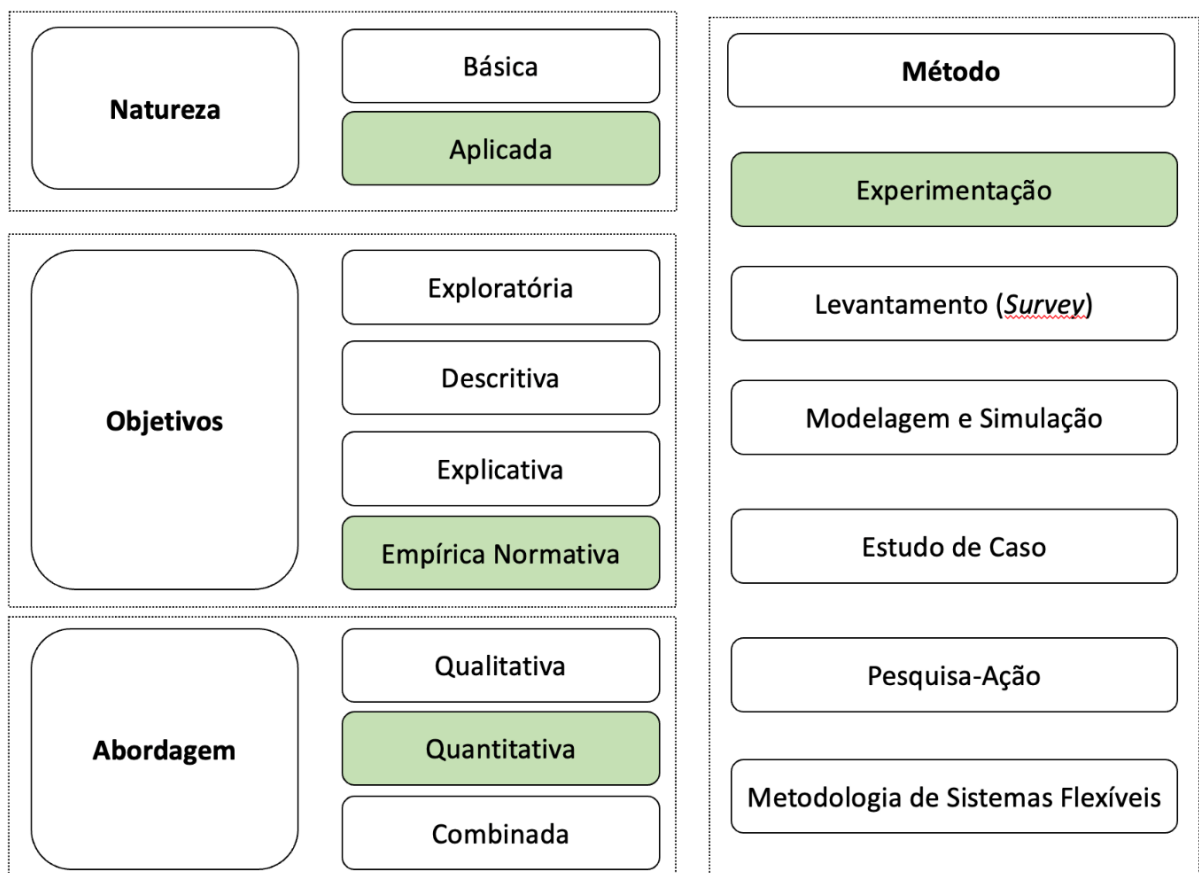
4 MEIOS E MÉTODOS

Esse capítulo apresenta informações sobre a classificação da pesquisa, quanto sua natureza, objetivos, abordagem, método, fluxo metodológico e meios para o desenvolvimento da pesquisa.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Azevedo e Ensslin, (2020), as pesquisas devem ser classificadas, pois visam agrupar e identificar diferentes tipos de pesquisas para facilitar a execução dos métodos e procedimentos. As pesquisas podem ser classificadas de acordo com sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos (PROVDANOV; FREITAS, 2013). A Figura 17 ilustra classificação desta pesquisa de acordo com os critérios supramencionados.

Figura 17 - Classificação da pesquisa científica



Fonte: Adaptado de Provdanov e Freitas (2013).

Segundo Gil (2008); Azevedo e Ensslin (2020). Essa pesquisa caracteriza-se, quanto à sua natureza, como aplicada, visto que tem interesses práticos, está voltada à aplicação imediata do conhecimento ou soluções de problemas específicos e não no desenvolvimento de uma teoria.

Esta pesquisa será empírica normativa, também pode ser chamada de pesquisa experimental, porque baseia-se na observação ou experimentação, é uma pesquisa baseada em dados, chegando a uma conclusão através de experimentos (KOTHARI, 2013).

A forma de abordar problema da pesquisa será quantitativa, pois utiliza técnicas estatísticas para descrever, analisar e interpretar os dados coletados (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

Quanto ao método, a pesquisa será experimentação, pois consiste em identificar variáveis que podem influenciar um objeto de estudo e definir formas de controle e observação para analisar, relacionar e correlacionar comportamentos dessas variáveis (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

4.2 MEIOS EXPERIMENTAIS

As sessões experimentais requeridas por esta pesquisa foram realizadas em um dos laboratórios de informática da instituição, laboratório 5, conforme ilustrado na Figura 18.

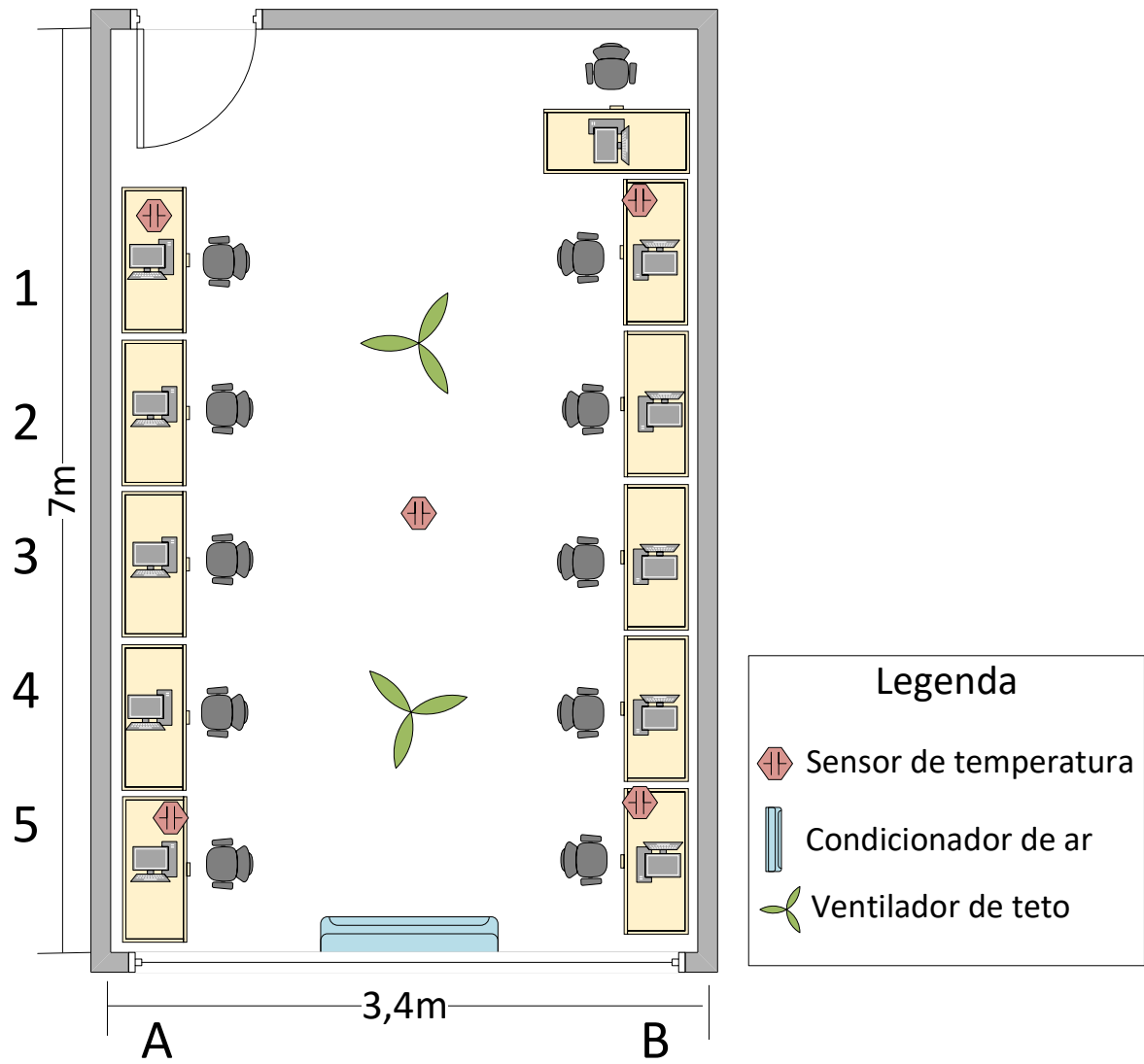
O laboratório 5 (23,80 m²), está equipado com um condicionador de ar de 60.000 BTU/h, marca Komeco, modelo KOP60FC G2 UE220 e dois ventiladores de teto de 130W de potência.

O laboratório está equipado com um sistema digital de aquisição de dados, com o módulo NodeMCU Esp8266 com Wi-Fi, com cinco sensores de temperatura ($\pm 0,5$ °C) dispostos no centro e nos cantos da sala, conforme ilustrado na Figura 19.

A Figura 19 apresenta maiores detalhes do sistema de aquisição de dados.

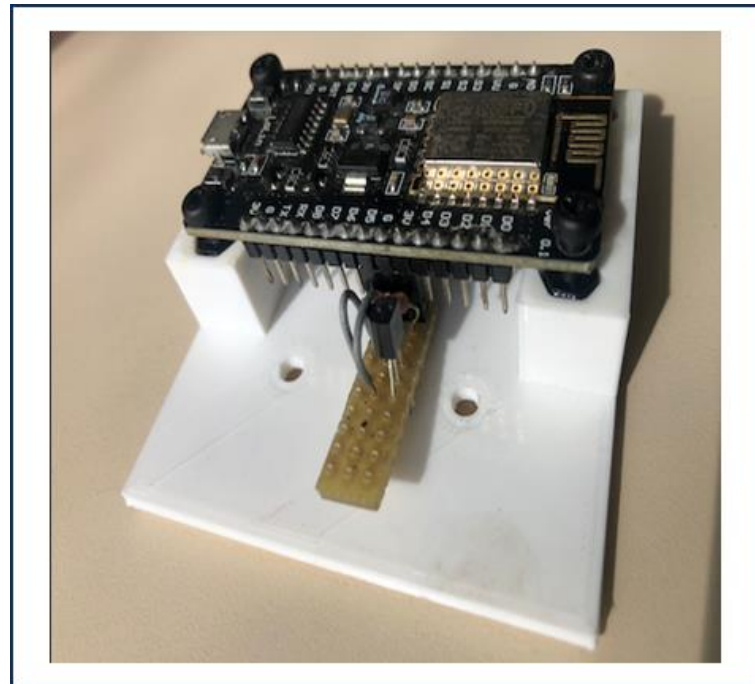
Já para a medição do consumo de energia do condicionador de ar e ventiladores, foi utilizado o medidor eletrônico de energia elétrica da marca DowerTech, modelo DOW1310L para o condicionador de ar e tomadas *smart plug max* Wi-Fi de 10A e 16A para os ventiladores, ilustrado na Figura 20.

Figura 18 - Layout do laboratório de informática selecionados para os experimentos:
laboratório 5



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

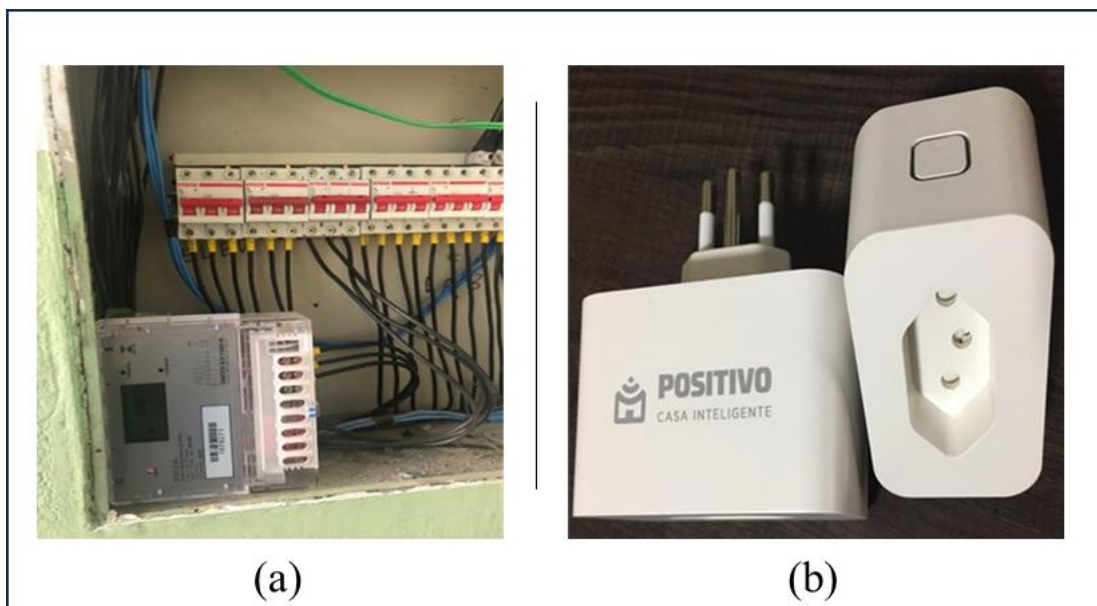
Figura 19 - Sistema de aquisição de dados para medição de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 20 - Medidores de energia elétrica: (a) dowertech dow1310l (a);

(b) tomadas *smart* plug de 10A e 16A



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3 FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA

Esta pesquisa foi conduzida seguindo sequencialmente sete macro etapas: formulação do problema de pesquisa; seleção e coleta dos artigos para revisão bibliográfica; seleção e coleta dos artigos para revisão bibliográfica; revisão da literatura; pesquisa experimental; experimentação e conclusão. A Figura 22 ilustra um fluxograma dessas etapas, e suas respectivas subetapas, com a técnica empregada, as ferramentas utilizadas e com os principais resultados alcançados dentro de cada etapa.

4.3.1 Formulação do Problema de Pesquisa

Nesta etapa o tema da pesquisa foi definido e justificado. As questões de pesquisa foram formuladas e os objetivos propostos. A pesquisa foi delimitada. A técnica utilizada para a realização desta etapa foi a leitura de artigos científicos coletados da base de dados scopus.

4.3.2 Coleta de Artigos

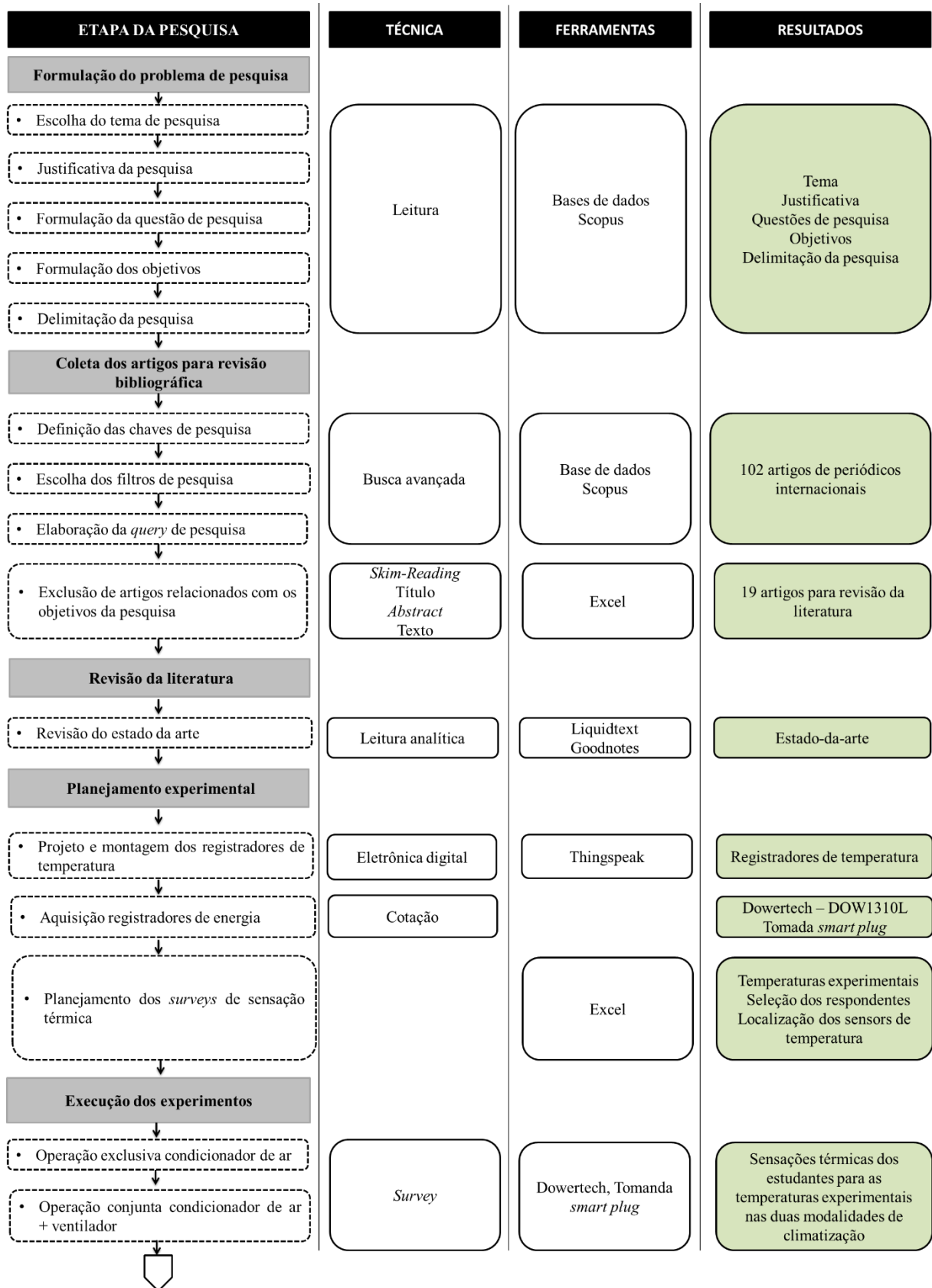
Foram coletados 102 artigos relacionados ao tema da pesquisa. Esses artigos foram capturados da base de dados scopus por meio de *queries* construídas a partir de termos chave obtidos em leituras preliminares.

Após o exame dos títulos, a leitura dos abstracts e a leitura mais detalhada de alguns artigos, o número de artigos destinados à revisão da literatura foi reduzido a 19.

4.3.3 Revisão da Literatura

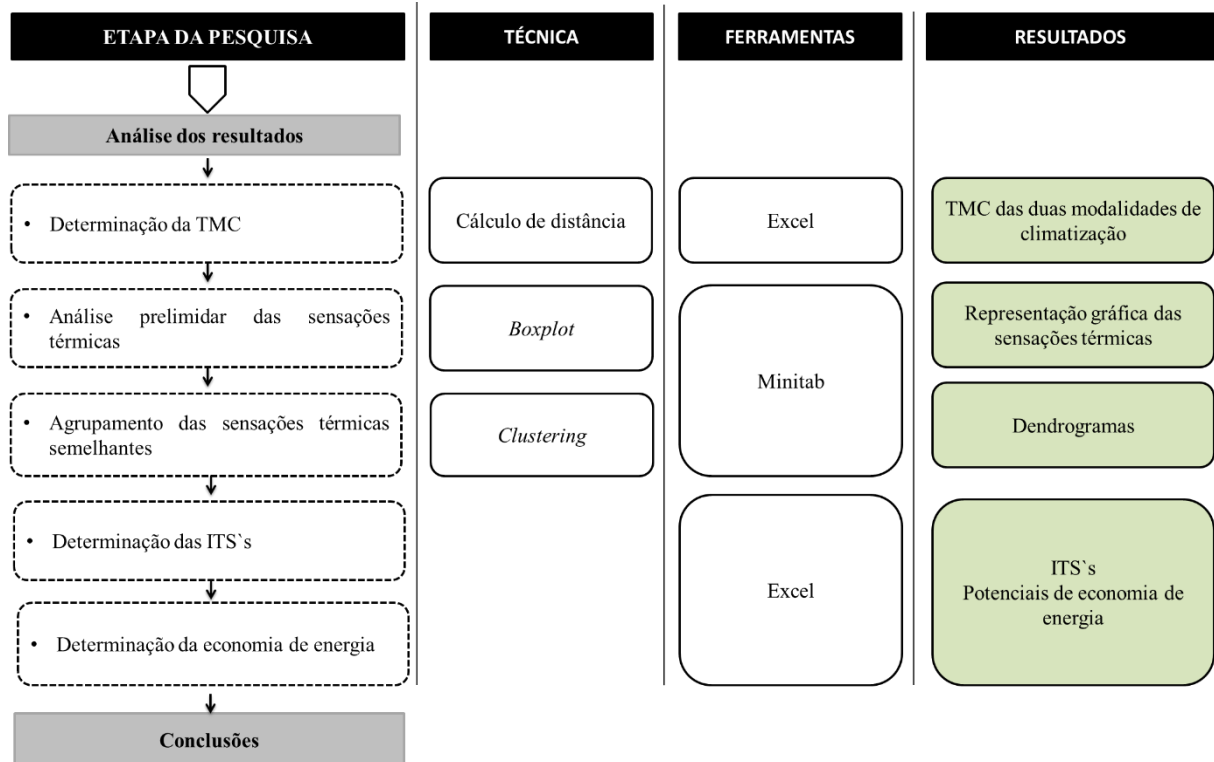
Os artigos coletados na etapa anterior foram lidos detalhadamente, e as informações de interesse foram sintetizadas no Quadro 1 e analisadas posteriormente.

Figura 21 - Fluxo metodológico da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 – Fluxo metodológico da pesquisa (Continuação)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.4 Planejamento Experimental

Foram realizadas 48 sessões de testes, de 90 minutos, entre agosto de 2023 e março de 2024 no laboratório 5.

Cada sessão experimental foi realizada a uma temperatura fixa, escolhida aleatoriamente, do conjunto (20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 °C). Portanto, foram necessárias 8 sessões para cobrir na faixa de 20 a 27 °C.

Foram realizados três *surveys* por cada sessão experimental para assegurar a perfeita aclimação dos respondentes. A temperatura do *setup* do condicionador de ar foi ajustada aleatoriamente entre 20 e 27 °C.

Os experimentos com a participação de três grupos distintos (de 12 alunos) no laboratório 5, totalizando 36 alunos. Foram realizados 48 experimentos no laboratório 5, sendo 24 experimentos com uso exclusivo do condicionador de ar e 24 experimentos com o uso combinado do condicionador de ar mais ventilador de teto.

As Tabelas de 4 e 5 apresentam o planejamento dos experimentos para o laboratório 5 com a operação exclusiva e combinada do condicionador de ar.

Tabela 4 - Planejamento dos surveys para as turmas A, B e C do laboratório 5 com a operação exclusiva do condicionador de ar

Turma A		OPERAÇÃO EXCLUSIVA DO CONDICIONADOR DE AR				
Data		26/08/2023	27/08/2023	28/08/2023	29/08/2023	... 03/10/2023
Temperatura (°C)		20	21	22	23	27
Survey 1		14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Survey 2		14:30	14:30	14:30	14:30	14:30
Survey 3		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
Turma B		OPERAÇÃO EXCLUSIVA DO CONDICIONADOR DE AR				
Data		04/10/2023	05/10/2023	06/10/2023	09/10/2023	... 11/10/2023
Temperatura (°C)		20	21	22	23	27
Survey 1		14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Survey 2		14:30	14:30	14:30	14:30	14:30
Survey 3		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
Turma C		OPERAÇÃO EXCLUSIVA DO CONDICIONADOR DE AR				
Data		16/10/2023	17/10/2023	18/10/2023	19/10/2023	... 23/10/2023
Temperatura (°C)		20	21	22	23	27
Survey 1		14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Survey 2		14:30	14:30	14:30	14:30	14:30
Survey 3		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os experimentos contaram com a participação de três grupos distintos (de 12 alunos) no laboratório 5, totalizando 36 alunos. Foram realizados 48 experimentos no laboratório 5, sendo 24 experimentos com uso exclusivo do condicionador de ar e 24 experimentos com o uso combinado do condicionador de ar mais ventilador de teto.

Tabela 5 - Planejamento dos surveys para as turmas A, B e C do laboratório 5 com operação do condicionador de ar + ventilador

Turma A		OPERAÇÃO CONDICIONADOR DE AR + VENTILADOR				
Data		21/11/2023	22/11/2023	23/11/2023	24/11/2023	... 27/11/2023
Temperatura (°C)		20	21	22	23	27
Survey 1		14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Survey 2		14:30	14:30	14:30	14:30	14:30
Survey 3		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
Turma B		OPERAÇÃO CONDICIONADOR DE AR + VENTILADOR				
Data		28/11/2023	29/11/2023	30/11/2023	01/12/2023	... 04/12/2023
Temperatura (°C)		20	21	22	23	27
Survey 1		14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Survey 2		14:30	14:30	14:30	14:30	14:30
Survey 3		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00
Turma C		OPERAÇÃO CONDICIONADOR DE AR + VENTILADOR				
Data		05/12/2023	06/12/2023	07/12/2023	08/12/2023	... 11/12/2023
Temperatura (°C)		20	21	22	23	27
Survey 1		14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Survey 2		14:30	14:30	14:30	14:30	14:30
Survey 3		15:00	15:00	15:00	15:00	15:00

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

4.3.5 Execução dos Experimentos

Com a supervisão de um professor, foram feitos os três *surveys* por sessão experimentais. Optou-se pelos dados do *survey* 2 por acreditar-se que os respondentes estariam mais aclimatados durante a sua realização do que durante a realização dos demais.

4.3.6 Análise dos Resultados

De posse dos dados experimentais, foram determinadas a temperatura mais confortável (TMC) para ambas as modalidades de climatização, segundo a abordagem exposta no Capítulo 3.

Representou-se as sensações térmicas dos ocupantes por meio de *Boxplots* permitindo uma análise preliminar do impacto da ventilação na sensação térmica dos ocupantes.

Para seguir o método de análise proposto no Capítulo 3 as sensações térmicas, para cada modalidade de climatização, foram agrupadas por semelhança utilizando-se um algoritmo hierarquia de *clustering*.

Em seguida foram determinadas a inércia termo-sensorial e a economia de energia elétrica.

4.3.7 Conclusões

Nesta etapa foram destacados os principais achados deste estudo; as pesquisas complementares que se fazem necessárias para uma melhor compreensão dos fenômenos estudados; as sugestões para trabalhos futuros e os principais resultados acadêmicos alcançados por este estudo até o momento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os dados coletados nos experimentos, seguido de suas respectivas análises.

Conforme estabelecido no capítulo 4. Os experimentos foram realizados no laboratório 5, em dois regimes de climatização do ambiente: A operação exclusiva do condicionador de ar (AR) e operação combinada do condicionador de ar com os ventiladores de teto (AR + V).

Conforme detalhado no Capítulo 4, o *Survey* de sensação térmica foi realizado em três grupos distintos (turmas A, B e C) de 12 alunos (voluntários). Cada turma participou do *survey* para as duas modalidades de climatização do laboratório.

5.1 TURMA A

5.1.1 Operação Exclusiva do Condicionador de Ar

A Tabela 6 apresenta as sensações térmicas dos ocupantes (turma A) do laboratório 5, com a operação exclusiva do condicionador de ar.

Tabela 6 - Sensação térmica com operação exclusiva do condicionador de ar

INDIVÍDUO	Temp. Ext.	35,88°C	36, 23°C	27,25°C	33,63°C	33°C	35°C	31,26°C	34,44°C
	Temp. Int.	20°C	21°C	22°C*	23°C	24°C	25°C	26°C	27°C
1		-4	-3	0	0	2	2	4	6
2		-3	-2	-1	1	3	3	3	6
3		-3	-2	1	0	2	3	3	5
4		-4	-2	1	0	2	2	3	5
5		-2	-1	0	2	3	3	3	5
6		-3	-2	1	1	1	2	3	6
7		-4	-1	1	1	1	2	2	6
8		-2	-1	0	2	1	3	3	6
9		-1	-1	2	1	2	3	4	5
10		-1	-1	1	2	3	3	3	6
11		-1	1	1	2	2	4	4	4
12		0	1	0	1	2	4	3	5
d_{T/T^0}		28	18	9	13	24	34	38	65

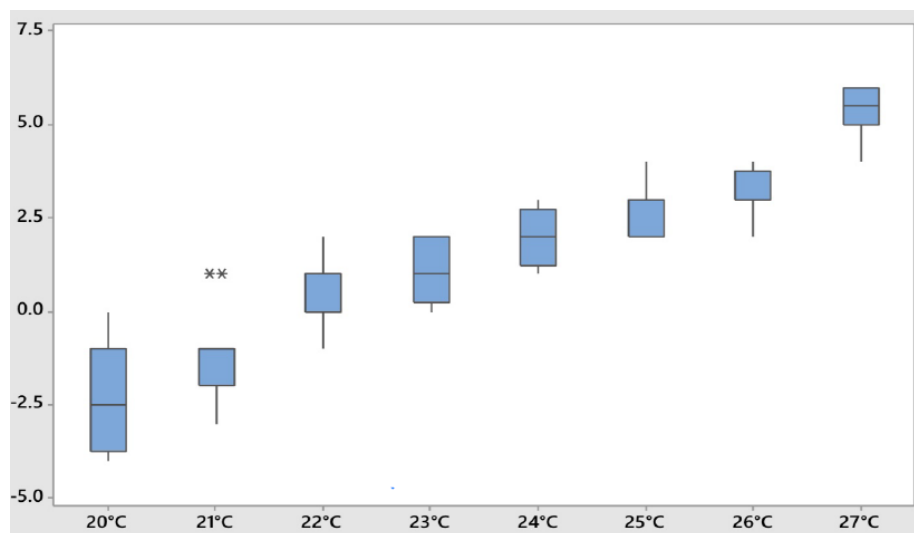
* Temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se que 22 °C foi a temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis.

A distribuição da sensação térmica dos participantes deste *survey* para cada temperatura são apresentadas na Figura 22.

Figura 22 - Boxplot das sensações térmicas para experimentos apenas condicionador de ar



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com o auxílio do *boxplot* além de visualizar as principais características das distribuições das sensações térmicas para cada temperatura, também permite determinar *outliers*. É curioso o emprego do termo *outlier* dentro deste contexto, uma vez que a sensação térmica varia de pessoa para pessoa, sendo perfeitamente possível que algumas pessoas experimentem sensações térmicas divergentes do restante do grupo. Esse é o caso, por exemplo, do conjunto de sensações térmicas para temperatura de 21°C, onde a Figura 24 assinala a presença de dois outliers (**).

Observando a coluna 21°C na Tabela 6. Nota-se que, à exceção de dois valores, todos são negativos, isto, é das 12 pessoas entrevistadas, 10 estavam sentindo frio, e apenas 2 estavam sentindo um pouco de calor. Nenhum respondente assinalou zero (nem frio, nem calor). Portanto, a transição da maioria das pessoas sentindo frio, diretamente para uma minoria de pessoas sentindo calor, fez com que essa minoria fosse qualificada como *outliers*, o que, pelas razões expostas acima não deve ser interpretado dessa forma.

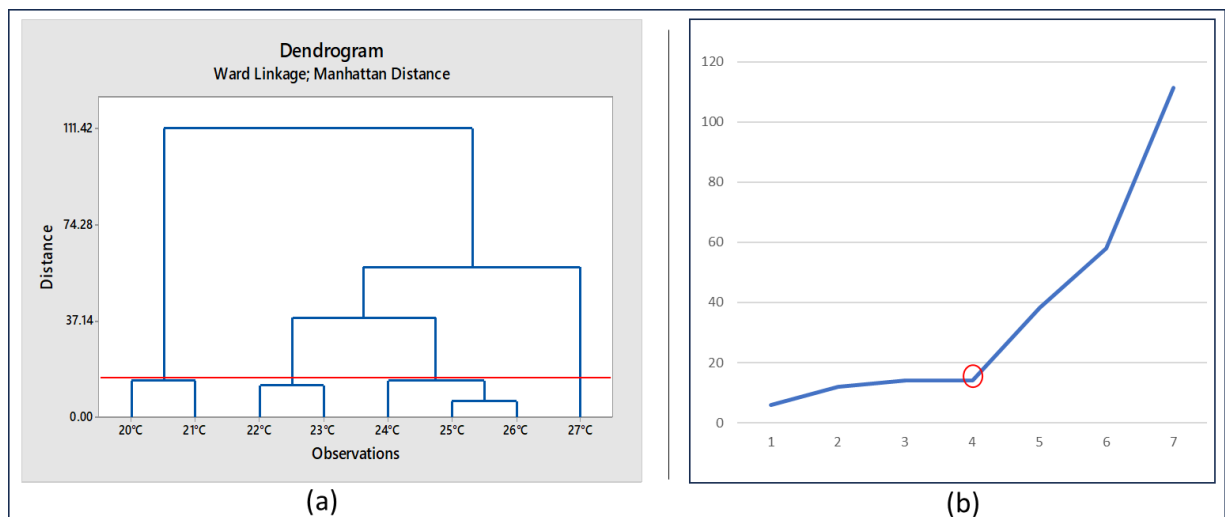
Outro ponto interessante de se observar na Figura 22 é a posição relativa das distribuições das sensações térmicas dos estudantes. Percebe-se que a distribuições das percepções vão se deslocando para cima à medida que a temperatura ambiente vai se elevando, isto é, a percepção de calor vai crescendo entre os respondentes, como seria de se esperar.

Observa-se também, que há uma certa proximidade entre algumas distribuições, em alguns casos, há uma certa sobreposição entre essas distribuições, mostrando indícios da inércia termo-sensorial cujo conceito foi introduzido no Capítulo 3.

Para analisar mais objetivamente as sobreposições das distribuições da Tabela 7 foi submetida a uma análise de *clustering*, que resultou no dendrograma apresentado na Figura 23 (a).

Figura 23 - Gráficos para operação exclusiva do condicionador de ar:

(a) dendrograma; (b) curva do cotovelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Todas as análises de clustering desenvolvida neste trabalho utilizaram a distância de Manhattan e o método Ward para aglutinação de grupos. A reta de corte para a definição da formação dos grupos foi obtida com base na curva do cotovelo Figura 24 (b). O passo que a marca o início dos maiores saltos na distância entre grupos define a máxima distância aceitável para a formação de um grupo (SUWANDA; SYAHPUTRA; ZAMZAMI, 2020).

A Figura 24 (a) mostra que as sensações térmicas dos estudantes para 20 e 21 °C foram bem próximas, o que equivale a dizer que os participantes só sentiram a elevação da temperatura após 21 °C, ou seja, houve uma inércia termo-sensorial de 1 °C. A mesma análise pode ser feita para 22-23 °C e 24-25-26 °C.

5.1.2 Operação Combinada do Condicionador de Ar e Ventilador de Teto

A mesma turma de respondentes foi submetida ao mesmo ambiente condicionado pela operação conjunta do condicionador com ventiladores de teto.

A Tabela 7 apresenta as distribuições das sensações térmicas da turma A, para as novas condições ambientais.

Tabela 7 - Sensação térmica com operação conjunta do condicionador de ar e ventilador

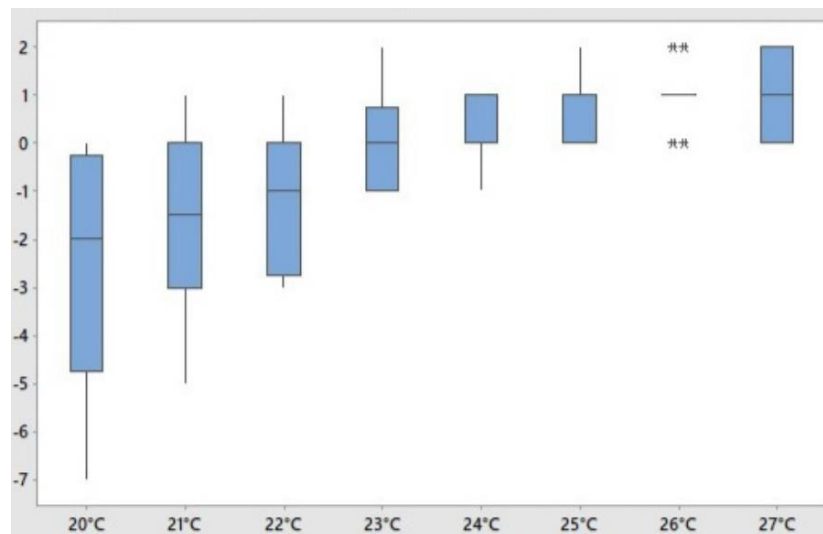
INDIVÍDUO	Temp. Ext.	27,13°C	33°C	26,88°C	27,5°C	28,31°C	32,38°C	31,13°C	31,19°C
	Temp. Int.	20°C	21°C	22°C	23°C	24°C*	25°C	26°C	27°C
1		-5	-5	-2	-1	0	0	1	0
2		-6	-4	-3	-1	0	0	1	0
3		-7	-3	-3	-1	0	1	1	1
4		-4	-2	-1	0	0	0	0	0
5		-2	-1	0	0	-1	1	0	1
6		0	0	0	0	1	0	1	2
7		-2	-3	-3	-1	0	1	1	1
8		-3	-3	-2	-1	0	2	2	0
9		-2	-1	-1	0	0	0	1	2
10		0	0	0	1	1	1	1	2
11		-1	1	1	1	1	1	1	2
12		0	0	1	2	1	2	2	2
$d_{T^jT^0}$		32	23	17	9	5	9	12	13

* Temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 24 ilustra graficamente a Tabela 7, onde vê-se que a introdução dos ventiladores de teto na estratégia de condicionamento do ambiente fez diminuir a percepção de calor para todas as temperaturas e aumentar a sobreposição das distribuições de sensação térmica para várias temperaturas. De forma análoga ao caso anterior, essas distribuições foram submetidas a um procedimento de *clustering*, resultando no agrupamento ilustrado na Figura 25 (a).

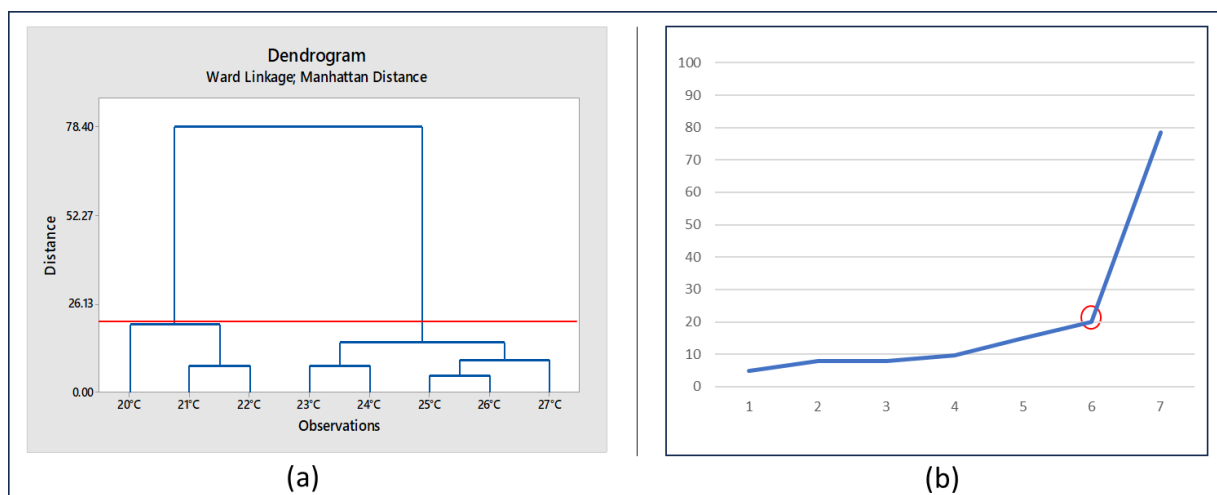
Figura 24 - Boxplot da sensação térmica para os experimentos condicionador de ar + ventilador de teto



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 25 - Gráficos para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto:

(a) dendrograma; (b) curva do cotovelo



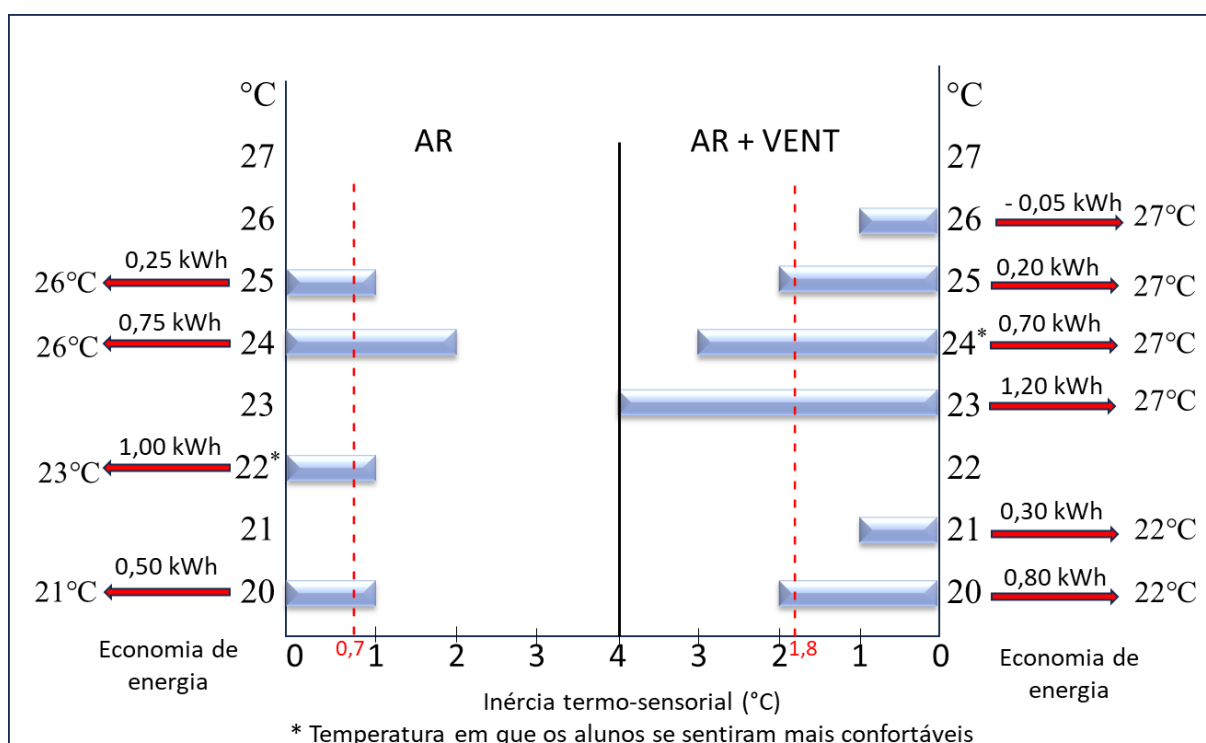
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 25 (a) mostra que os estudantes experimentaram sensações térmicas muito próximas para as temperaturas 20-21-22 °C e para 23-24-25-26-27 °C. Assim como no caso anterior, a inércia termo-sensorial dependerá da temperatura tomada como referência.

5.1.3 Comparações entre os dois regimes de condicionamento

A Figura 26 apresenta a temperatura mais confortável, as inércias termo-sensoriais e o potencial de economia de energia se a inércia termo-sensorial for considerada na climatização do ambiente.

Figura 26 - Inércia termo-sensorial entre dois regimes de climatização e potencial de economia de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se que a temperatura na qual os alunos se sentiram mais confortáveis aumentou de 22 para 24 °C com a utilização combinada do condicionador de ar mais ventilador de teto. Se o ajuste do termostato do condicionador fosse determinado pela TMC, neste caso, isso teria resultado numa economia de energia da ordem de 1.3 kWh, já considerado o consumo dos ventiladores.

Para ambas as modalidades de climatização do ambiente, foram apresentadas as inércias termo-sensoriais para os *clusters* de sensações térmicas, de acordo com os dendrogramas apresentados nas Figuras 23 e 25.

Nota-se que ITS não é constante em toda a faixa de temperatura, depende da temperatura considerada. Para a climatização feita exclusivamente pelo condicionador de ar ela variou entre 0 e 2 °C, podendo ser considerado um valor médio de 0,7 °C. Já para a climatização feita com o uso conjunto do condicionador de ar e ventilador de teto a inércia termo-sensorial variou de 0 a 4° (valor médio = 1,8 °C).

A Figura 26 também traz o potencial de economia de energia elétrica em função da ITS, ressaltando-se dois pontos. Primeiramente, observa-se que mesmo com a climatização do ambiente sendo feita exclusivamente com a operação exclusiva do condicionador de ar, há um potencial de economia de energia elétrica (menor do que com a operação conjunta do condicionador com ventiladores de teto). Outro ponto interessante de se notar é que a economia de energia não é uniforme ao longo da faixa de temperatura dos experimentos, porque o consumo do condicionador diminui à medida em que se eleva a temperatura de refrigeração.

O potencial de economia de energia elétrica se caracteriza pela possibilidade de se ajustar o termostato do condicionador de ar numa temperatura mais elevada (menor consumo), e ainda assim a sensação térmica dos ocupantes ficar próxima daquela causada por uma temperatura mais baixa (maior consumo).

Considerando-se a climatização do ambiente somente com a operação exclusiva do condicionador de ar, observa-se a existência de vários desses binômios de temperaturas, sendo três deles, 21/20 °C, 23/22 °C e 26/25 °C, formados por temperaturas distantes 1 °C entre si, e outro por temperaturas distantes de 2 °C, 26/24 °C.

O maior potencial de economia, ocorreu com o binômio 23/22 °C, ou seja, a sensação térmica coletiva para essas temperaturas é bem próxima, mas ajustar o termostato do condicionador de ar em 23 °C, em vez de 22 °C, promove uma economia de 1,00 kWh.

O binômio 26/24 °C, embora seja constituído de temperatura com 2 °C de diferença apresenta uma economia de energia de 0,75 kWh.

Para operação conjunta do condicionador de ar e ventiladores de tetos, o potencial máximo de economia é de 1,20 kWh, e ocorre quando o condicionador de ar está ajustado em 27 °C produzindo uma sensação interna equivalente a 23 °C.

Convém observar que a economia de energia do binômio 27/26 °C é negativa, significando que a diferença de consumo do condicionador de ar entre essas duas temperaturas é insignificante e, além disso, há o consumo dos ventiladores.

5.2 TURMA B

5.2.1 Operação Exclusiva do Condicionador de ar

A Tabela 8 apresenta as sensações térmicas dos ocupantes (turma B) do laboratório 5, com a operação exclusiva do condicionador de ar.

Tabela 8 - Sensação térmica com operação exclusiva do condicionador de ar

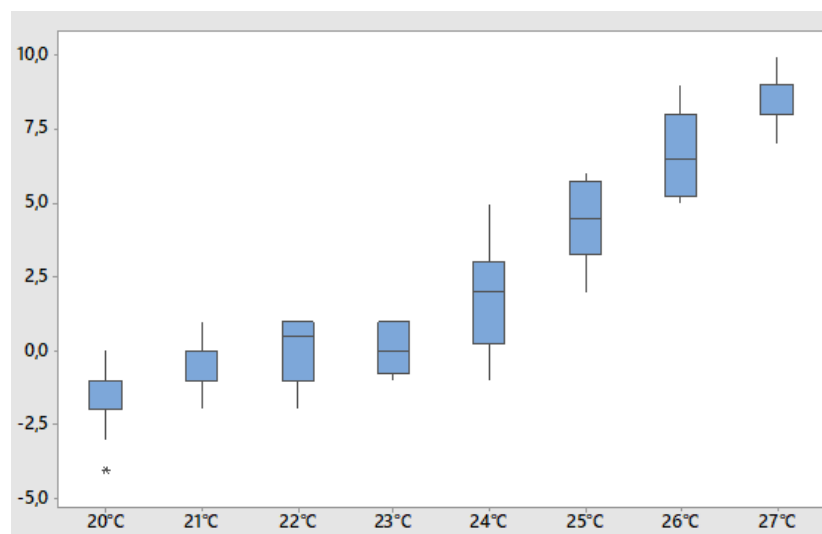
INDIVÍDUO	Temp. Ext.	27,25°C	31,54°C	27,98°C	28,44°C	31,25°C	29,81°C	30,97°C	32,18°C
	Temp. Int.	20°C	21°C	22°C	23°C*	24°C	25°C	26°C	27°C
1		-2	-2	-1	-1	2	3	6	10
2		-1	-2	-1	-1	3	4	7	9
3		0	-1	-2	-1	0	3	5	9
4		-1	-1	0	0	-1	4	8	8
5		-2	-1	1	0	3	5	9	8
6		-2	0	0	0	1	6	8	9
7		-2	0	1	1	0	5	6	9
8		-3	-1	-1	0	3	4	8	7
9		-2	1	1	1	2	6	6	8
10		-4	0	1	1	3	2	8	9
11		-2	-1	1	0	5	6	5	10
12		0	1	1	1	2	5	5	8
d_{TjT^0}		21	11	11	7	25	53	81	104

* Temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A distribuição da sensação térmica dos participantes deste *Survey* para cada temperatura é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Boxplot da sensação térmica para os experimentos apenas condicionador de ar



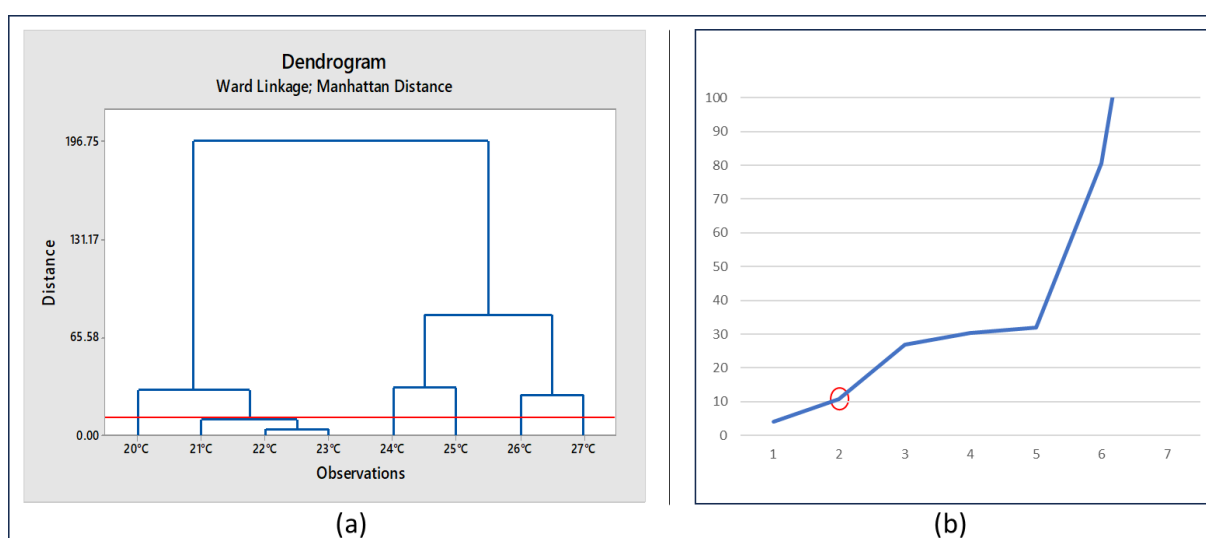
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Vê-se que, como é natural, as distribuições das sensações térmicas vão se deslocando para cima à medida em que a temperatura ambiente vai aumentando.

Também é possível observar uma sobreposição entre as distribuições. Assim como no caso anterior, as distribuições da Tabela 8 foram submetidas a um procedimento de *clustering* resultando no dendrograma da Figura 28.

Figura 28 - Gráficos para operação exclusiva condicionador de ar: (a) dendrograma;

(b) curva do cotovelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se que as sensações térmicas dos estudantes foram bem próximas no intervalo 21-23 °C.

5.2.2 Operação Combinada do Condicionador de Ar e Ventilador de Teto

A Tabela 9 apresenta as distribuições das sensações térmicas da turma B para o condicionamento do ambiente feito pela operação conjunta do condicionador de ar mais ventilador de teto.

Observa-se que embora a utilização de ventiladores tenha diminuído a sensação de calor, a temperatura mais confortável para os ocupantes do laboratório permaneceu constante em 23 °C.

Tabela 9 - Sensação térmica para operação conjunta do condicionador de ar e ventilador

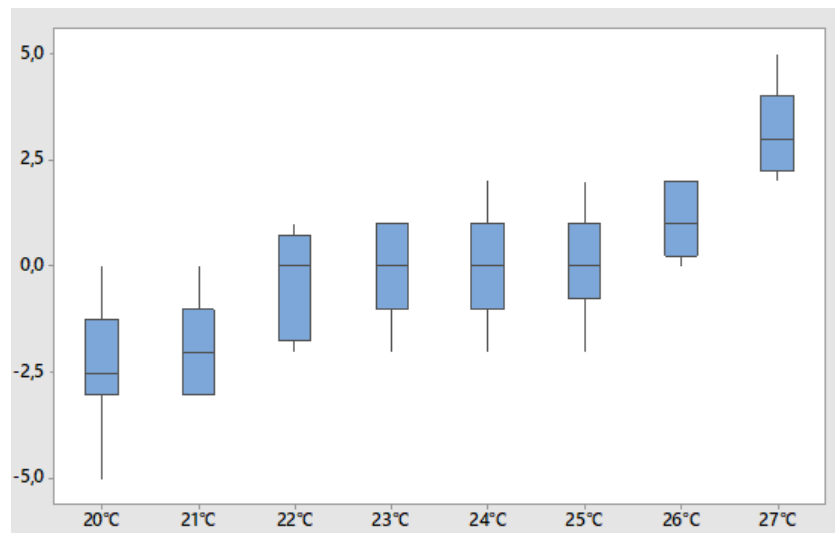
INDIVÍDUO	Temp. Ext.	28,95 °C	30,08°C	28,75°C	28,44°C	31,8°C	29,19 °C	28,45°C	32,63°C
	Temp. Int.	20°C	21°C	22°C	23°C*	24°C	25°C	26°C	27°C
1		-3	-3	-2	0	0	0	0	2
2		-3	-3	0	-1	-1	-1	0	2
3		-2	-2	0	-1	0	0	1	3
4		-1	-1	-2	0	-1	-1	1	2
5		-1	-1	-2	-2	-2	-2	0	4
6		-3	-2	0	0	1	1	1	3
7		-3	-2	0	1	0	0	1	5
8		-2	-1	1	-1	-1	0	1	3
9		-5	-3	1	1	1	1	2	3
10		-5	-3	0	1	2	2	2	4
11		-2	-3	-1	0	1	1	2	4
12		0	0	1	1	1	1	2	5
d_{TjT^0}		30	24	10	9	11	10	13	40

* Temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 29 ilustra graficamente as distribuições apresentadas na Tabela 9.

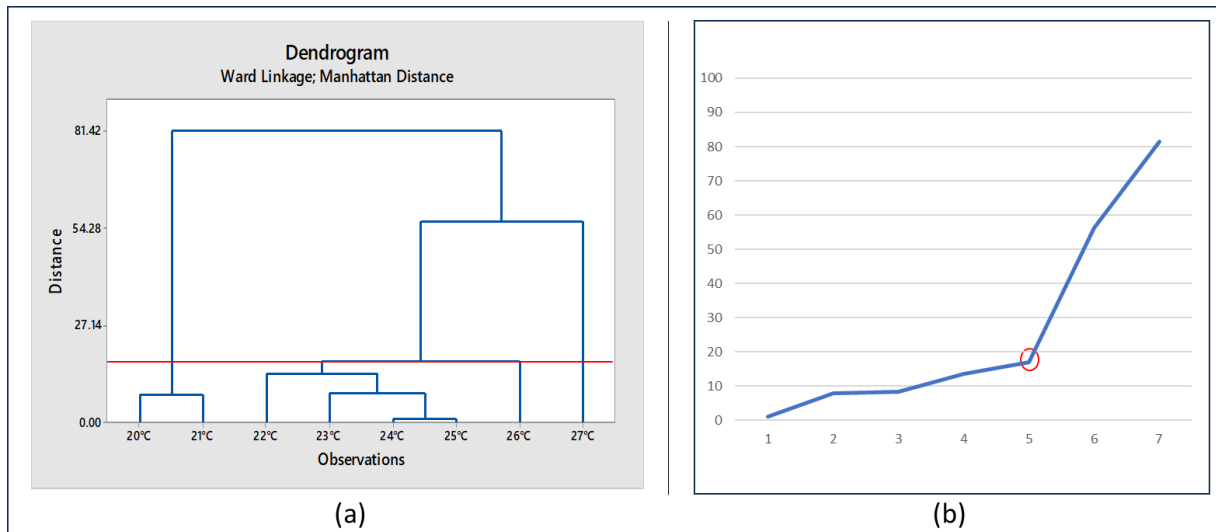
Figura 29 - Boxplot da sensação térmica para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota-se no início (20-21 °C) e na região central (22-26 °C) da Figura 29 uma sobreposição de distribuições, sugerindo, que as sensações térmicas sejam iguais, do ponto de vista estatístico, dentro de cada regiões. Para analisar esta situação de forma objetiva, a Tabela 9 foi submetida a uma análise de *clustering* resultando na Figura 30.

Figura 30 - Gráficos para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto: (a) dendrograma; (b) curva do cotovelo



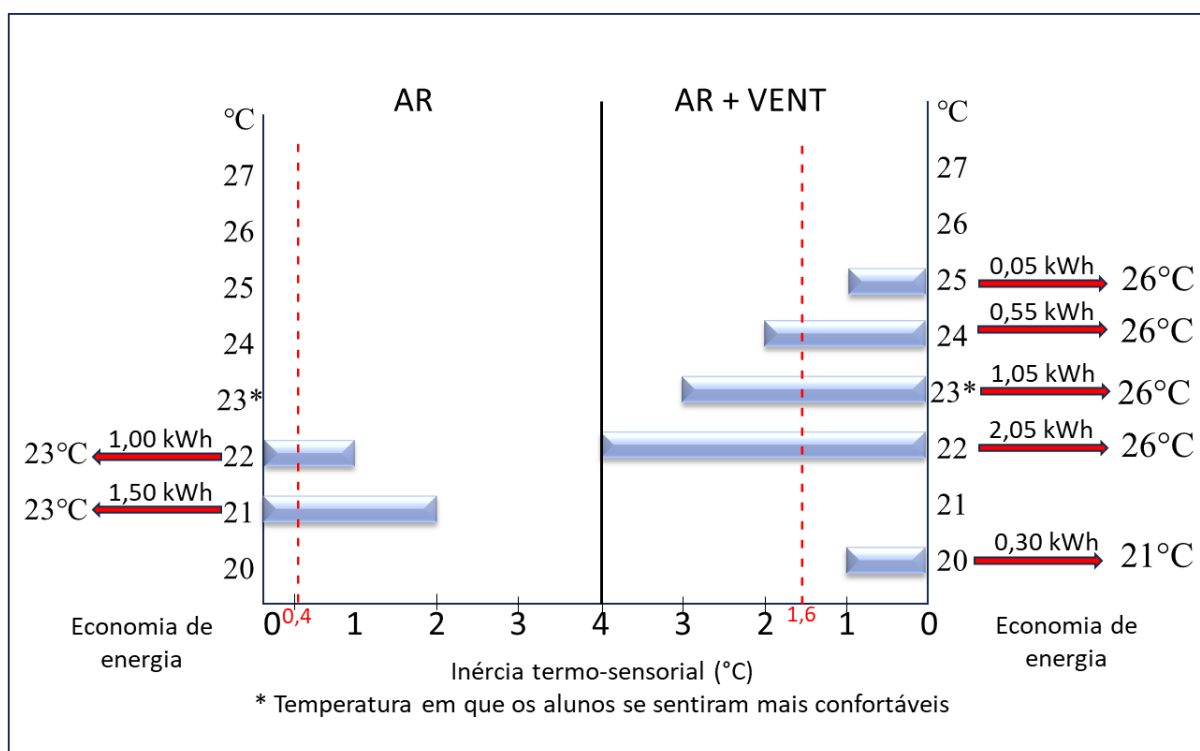
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 30 (a) sugere que os estudantes experimentaram sensações térmicas muito próximas entre 20-21 °C e entre 23-24-25-26 °C, sugerindo fortemente um aumento na inércia termo-sensorial.

5.2.3 Comparações Entre os Dois Regimes de Condicionamento

A Figura 31 sintetiza as comparações entre os dois regimes de condicionamento.

Figura 31 - Inércia termo-sensorial entre dois regimes de climatização e potencial de economia de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Primeiramente, observa-se que a temperatura na qual os alunos se sentiram mais confortáveis foi a mesma para as duas modalidades de condicionamento (23 °C).

A Figura 31 também apresenta a inércia termo-sensorial para ambas as modalidades de climatização de acordo com os dendrogramas das Figuras 28 e 30. Para climatização feita exclusivamente pelo condicionador de ar a inércia termo-sensorial variou de 0 a 2 °C (valor médio = 0,4 °C). Já para o uso combinado do condicionador com o ventilador de teto a inércia termo-sensorial variou de 0 a 4° (valor médio $\cong$ 1,6 °C).

O potencial máximo de economia de energia para operação exclusiva do condicionador de ar alcançou 1,50 kWh (23/21 °C). Enquanto que para a operação conjunta como ventiladores de teto chegou a 2,25 kWh (26/22 °C).

5.3 TURMA C

5.3.1 Operação Exclusiva do Condicionador de ar

A Tabela 10 apresenta as sensações térmicas dos ocupantes (Turma C) do laboratório 5, com a operação exclusiva do condicionador de ar.

Tabela 10 - Sensação térmica operação exclusiva do condicionador de ar

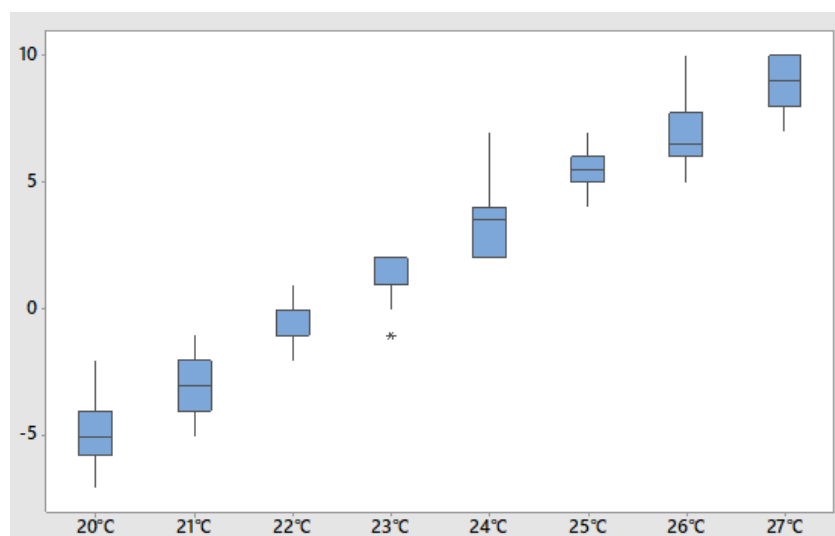
INDIVÍDUO	Temp. Ext.	29,15°C	31,8°C	29,7°C	32,65°C	33,15°C	30,48°C	31,23°C	33°C
	Temp. Int.	20°C	21°C	22°C*	23°C	24°C	25°C	26°C	27°C
1		-7	-4	-1	1	4	7	10	10
2		-6	-5	-1	1	4	6	6	9
3		-5	-4	0	1	4	6	5	7
4		-6	-3	0	2	7	7	8	9
5		-4	-4	-2	0	4	6	8	10
6		-3	-3	-2	-1	2	5	6	7
7		-2	-2	0	1	2	4	6	8
8		-4	-2	0	2	4	6	7	10
9		-5	-1	0	2	3	4	6	8
10		-4	-2	-1	2	2	5	5	9
11		-5	-2	1	1	3	5	7	10
12		-5	-3	0	1	2	5	7	8
d_{T/T^0}		56	35	8	15	41	66	81	105

* Temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As distribuições das sensações térmicas da Tabela 10 são apresentadas na Figura 32

Figura 32 - Boxplot da sensação térmica para os experimentos apenas condicionador de ar

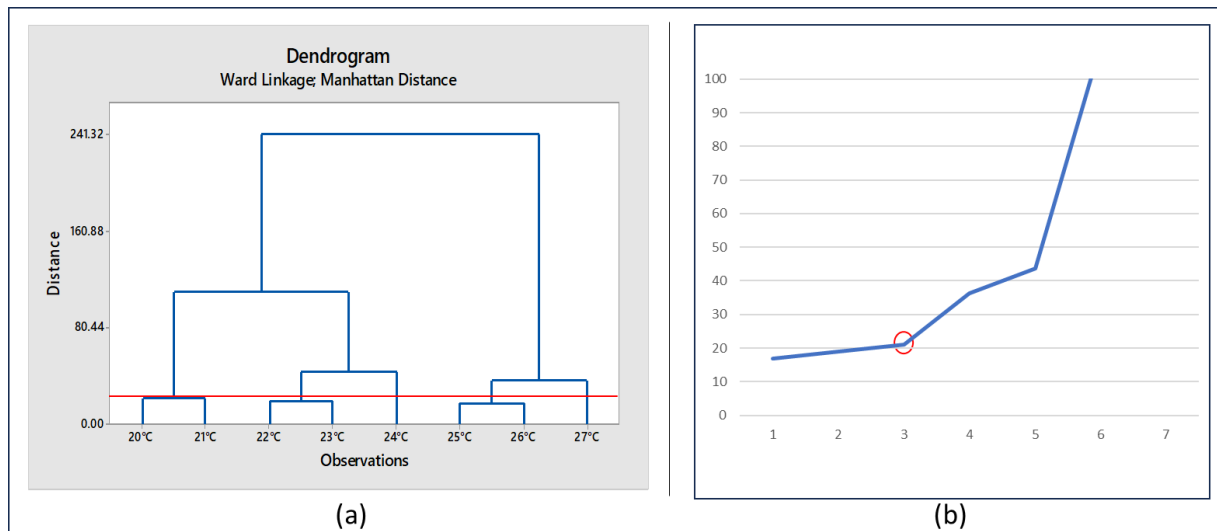


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Como nos dois casos anteriores, as distribuições das sensações térmicas vão se deslocando para cima à medida em que a temperatura ambiente vai aumentando.

Também é possível observar uma sobreposição entre as distribuições da Tabela 11 foram submetidas a um procedimento de *clustering* resultando no dendrograma da Figura 33.

Figura 33 - Gráficos para operação exclusiva condicionador de ar: (a) dendrograma; (b) curva do cotovelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As sensações térmicas dos alunos ficaram bem próximas entre 20-21 °C; 22-23 °C e 25-26 °C.

5.3.2 Operação Combinada do Condicionador de ar e Ventilador de Teto

A Tabela 11 apresenta as distribuições das sensações térmicas da turma C para o condicionamento do ambiente feito pela operação conjunta do condicionador de ar mais ventilador de teto.

Tabela 11 - Sensação térmica com operação conjunta do condicionador de ar e ventilador

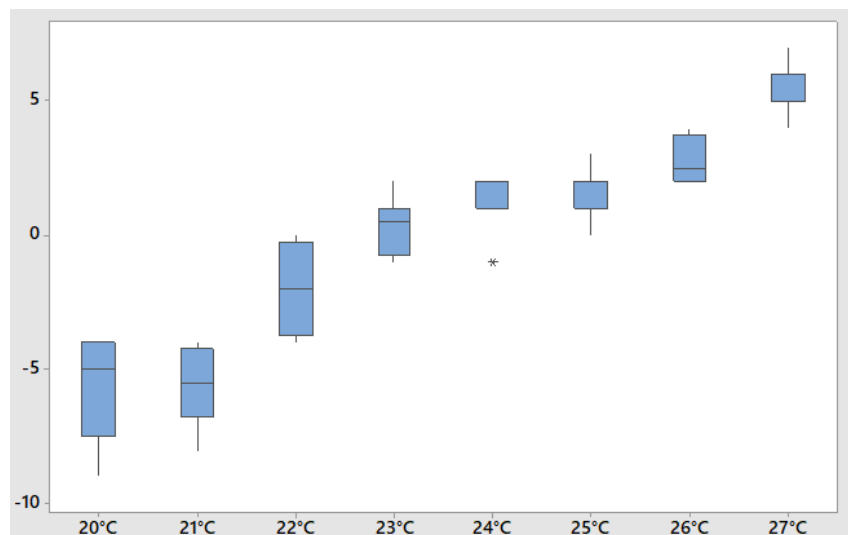
INDIVÍDUO	Temp. Ext.	25,94°C	28,47°C	28,1°C	28,14°C	29,88°C	30,12°C	29,25°C	30,64°C
	Temp. Int.	20°C	21°C	22°C	23°C*	24°C	25°C	26°C	27°C
1		-8	-8	-4	-1	1	2	2	5
2		-9	-7	-4	0	-1	2	3	5
3		-6	-6	-3	1	1	2	2	6
4		-5	-4	-4	1	2	1	3	6
5		-4	-6	-2	1	1	1	2	5
6		-4	-4	0	-1	1	2	4	6
7		-6	-5	-2	2	1	0	4	6
8		-9	-8	0	-1	2	1	4	5
9		-5	-5	0	0	2	3	2	4
10		-4	-5	-1	0	1	3	3	5
11		-5	-6	-2	1	1	1	2	7
12		-4	-4	-2	1	2	2	2	4
d_{TjT^0}		69	68	24	10	16	20	33	64

* Temperatura na qual os estudantes se sentiram mais confortáveis

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 34 ilustra, por meio de *Boxplots*, as distribuições da Tabela 11.

Figura 34 - Boxplot da sensação térmica para experimentos conjunto condicionador de ar + ventilador de teto

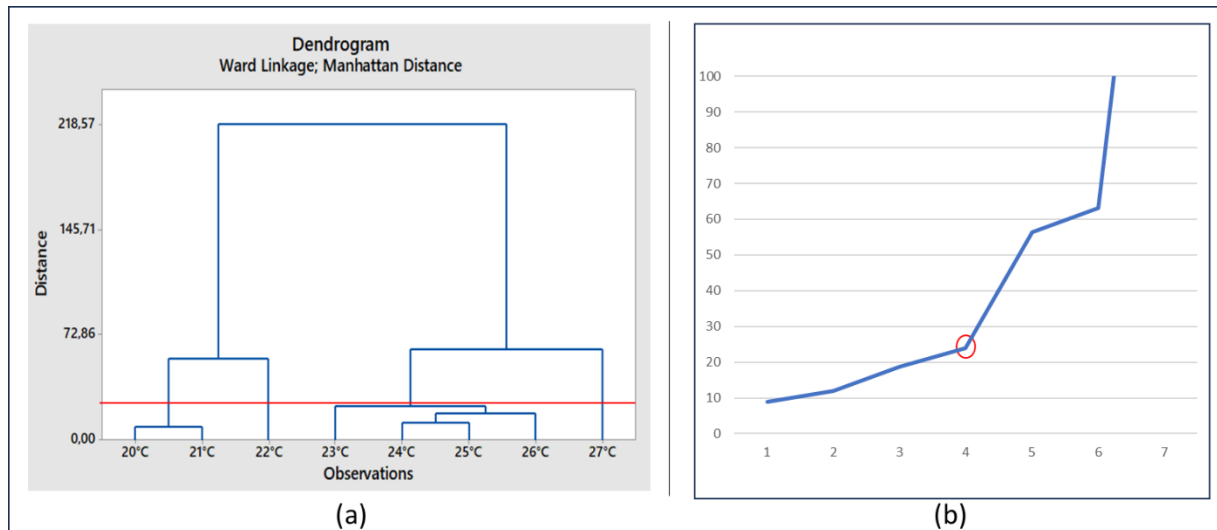


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 11 foi submetida a uma análise de *clustering* resultando na Figura 35.

Figura 35 - Gráficos para operação conjunta condicionador de ar + ventilador de teto:

(a) dendrograma; (b) curva do cotovelo



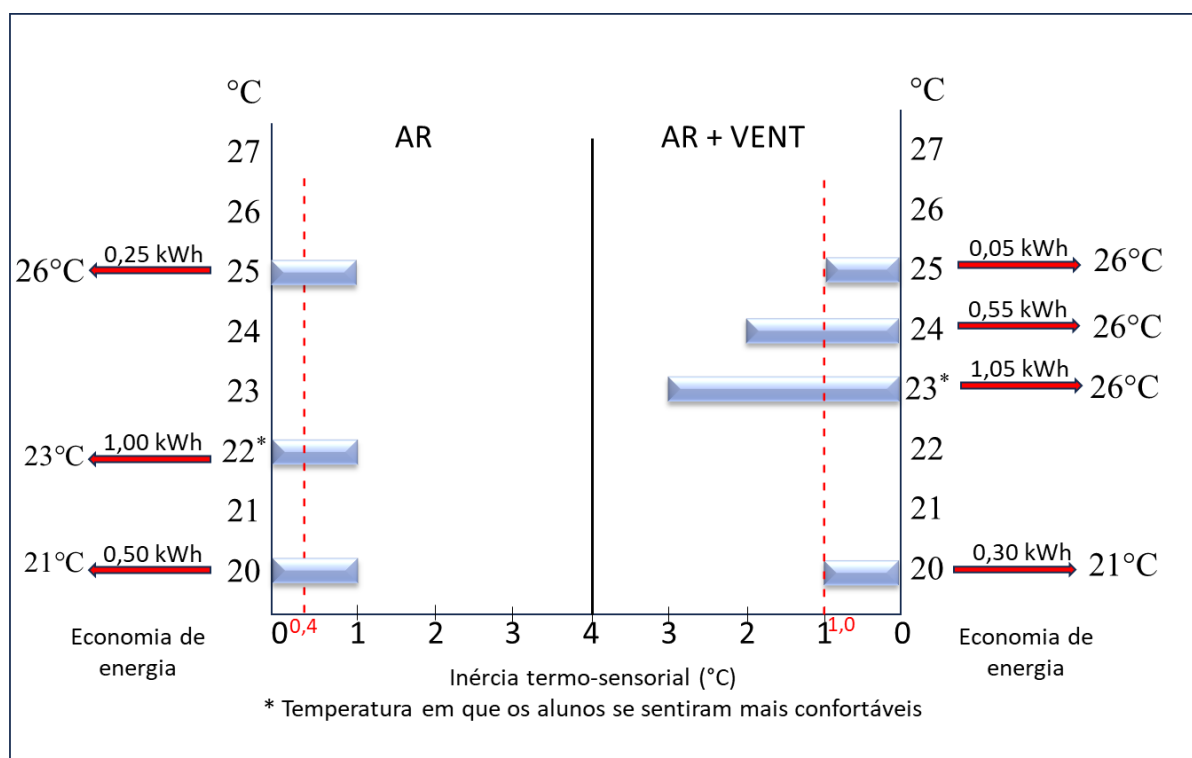
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 35 (a) sugere que, a exemplo do caso anterior, os estudantes experimentaram sensações térmicas muito próximas entre 20-21 °C e entre 23-24-25-26 °C. Apontando para um aumento na inércia termo-sensorial.

5.3.3 Comparações Entre os Dois Regimes de Condicionamento

Como nos casos anteriores, a Figura 36 sintetiza as comparações entre os dois regimes de condicionamento.

Figura 36 - Inércia termo-sensorial entre os dois regimes de climatização e o potencial de economia de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se que a temperatura na qual os alunos se sentiram mais confortáveis aumentou de 22 para 23 °C com a utilização combinada do condicionador de ar mais ventilador de teto.

A Figura 36 também apresenta a inércia termo-sensorial para ambas as modalidades de climatização de acordo com os dendrogramas das Figuras 33 e 35. Para a climatização feita exclusivamente pelo condicionador de ar a inércia termo-sensorial variou de 0 a 1 °C (valor médio = 0,4 °C). Já para o uso combinado do condicionador com o ventilador de teto, a inércia termo-sensorial variou de 0 a 3 °C (valor médio de $\cong 1,0$ °C).

O perfil energético deste caso é muito semelhante ao do anterior. O potencial máximo de economia de energia para a operação exclusiva do condicionador de ar alcançou 1,0 kWh (23/22 °C). Para operação conjunta com ventiladores de teto o potencial máximo de economia alcançou 1,05 kWh (26/23 °C).

5.4 COMENTÁRIOS

A Tabela 12 apresenta os principais parâmetros térmicos e o potencial de economia de energia para as duas modalidades de climatização para as três turmas.

Tabela 12 - Parâmetros térmicos e potencial de economia de energia para as modalidades de climatização nas três turmas.

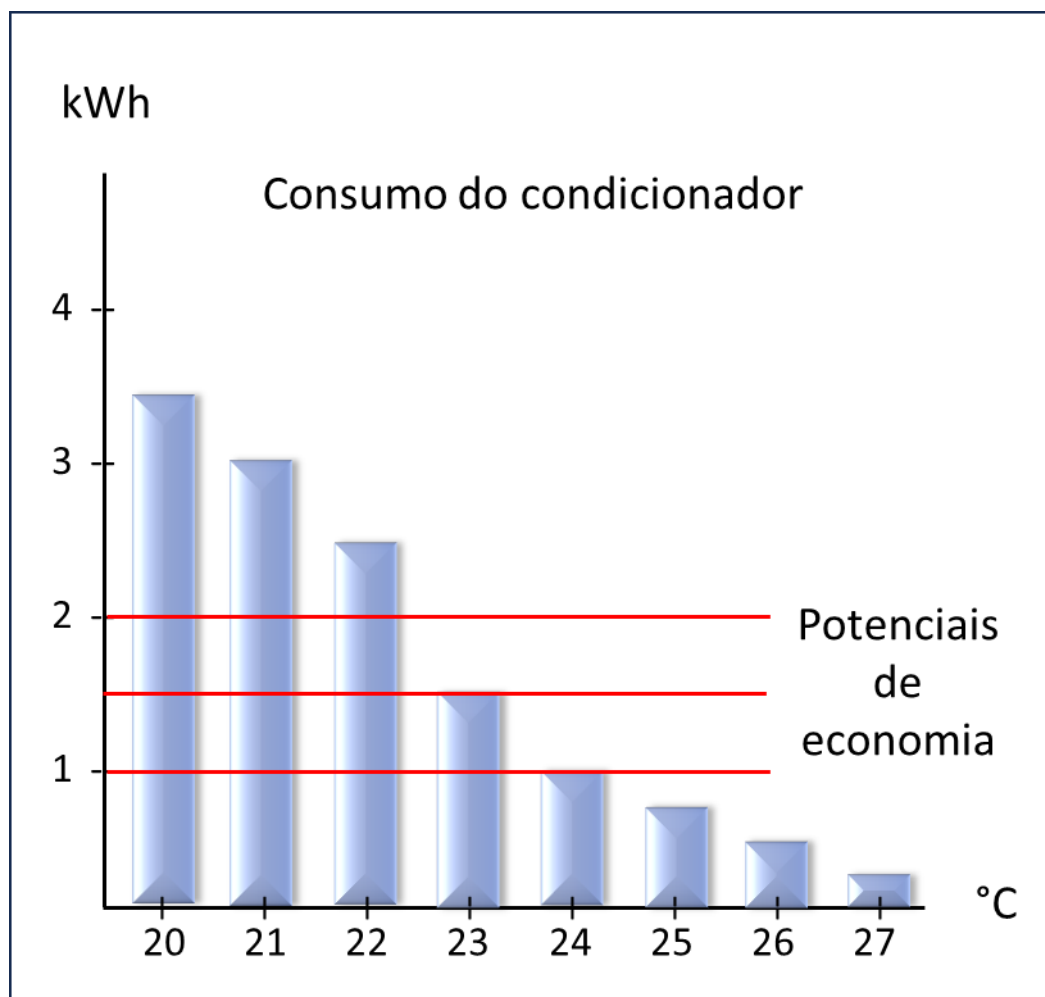
Turma	Temperatura mais confortável		Inércia termo-sensorial média		Inércia termo-sensorial máxima		Potencial de economia de energia máximo	
	(AR)	(AR + V)	(AR)	(AR + V)	(AR)	(AR + V)	(AR)	(AR + V)
A	22°C	24°C	0,7°C	1,8°C	2°C	4°C	1,00 kWh	1,20 kWh
B	23°C	23°C	0,4°C	1,6°C	2°C	4°C	1,50 kWh	2,05 kWh
C	22°C	23°C	0,4°C	1,0°C	1°C	3°C	1,00 kWh	1,05 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Observa-se que a utilização conjunta dos ventiladores de teto com o condicionador de ar fez com que a temperatura mais confortável se elevasse em torno de 1 a 2 °C. A inércia termo-sensorial aumentou de, aproximadamente 0,4 °C para 1,6 °C. E a inércia termo-sensorial máxima alcançou 4 °C em torno de 22 °C. Claramente a inclusão dos ventiladores de teto no esquema de climatização influenciou na sensação térmica dos participantes, aumentando sua inércia termo-sensorial. O aumento da inércia termo-sensorial permitiria elevar a temperatura do condicionador de ar alterando minimamente a sensação térmica dos participantes. A elevação da temperatura do condicionador de ar criou um potencial de economia de energia que, no caso da operação combinada do condicionador de ar com ventiladores de teto, seria de 20 a 30 % maior do que o alcançado com operação exclusiva do condicionador de ar.

Para ter uma noção da ordem de grandeza dos potenciais de economia de energia, figura 37 ilustra o consumo, aproximado, do condicionador de ar para as temperaturas utilizadas para os experimentos, bem como alguns dos potenciais de economia da Tabela 12.

Figura 37 - Consumo do condicionador de ar e potenciais de economia



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com base na Figura 37, pode-se concluir que o potencial de economia de energia pelo ajuste da temperatura do condicionador de ar é significativo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o potencial de economia de energia elétrica empregada na climatização de um ambiente, por meio do uso combinado de um condicionador de ar e dois ventiladores de teto.

O ambiente estudado foi um laboratório didático-pedagógico, onde foram realizados três grandes experimentos a saber, três grupos distintos de alunos foram submetidos a duas modalidades de climatização do ambiente, operação exclusiva do condicionador de ar e a operação combinada do condicionador com os dois ventiladores de teto. Os alunos responderam a um *survey* sobre a sensação térmica nas duas condições. Os resultados dos *surveys* das duas modalidades de climatização foram comparados e confrontados com as réplicas, permitindo afirmar que:

- A introdução dos ventiladores no esquema de ventilação definitivamente, diminuiu a sensação de calor dos ocupantes;
- A climatização feita exclusivamente com o condicionador de ar proporcionou uma inércia termo-sensorial, de até 2 °C, para algumas das temperaturas (21, 22, 24 e 25 °C) do espectro experimental;
- A ventilação forçada aumentou significativamente a inércia termo-sensorial dos respondentes não só na extensão da temperatura (até 4 °C), mas também em todas as temperaturas do espectro experimental;
- Em ambos os casos o aumento da inércia termo-sensorial não ocorreu de forma linear e contínua ao longo do espectro experimental. Por esta razão não há um valor único para a inércia termo-sensorial, pois observou-se um valor para cada temperatura;
- Pela razão acima, a economia no consumo de energia ficou condicionada a binômios de temperaturas. Isto é, temperatura ajustada no termostato do condicionador de ar quando ele opera isoladamente (T^1) e o novo ajuste do termostato para sua operação conjunta com os ventiladores de teto (T^2), $T^2 > T^1$, (1,05 – 2,05 kWh);
- A operação exclusiva do condicionador de ar também cria uma perspectiva de economia de energia (1,00 – 1,50 kWh).

Os experimentos mostraram que, de fato, o uso combinado do condicionador de ar com os ventiladores de teto diminui a sensação de calor; expandiu a inércia termo-sensorial dos

ocupantes e aumentou o potencial de economia de energia elétrica. Contudo, devia às peculiaridades dos benefícios advindo do uso combinado do condicionador de ar mais ventilador de teto, fazem-se necessárias pesquisas complementares para a quantificação efetiva tanto da inércia termo-sensorial, como da economia de energia elétrica.

6.1 PESQUISAS FUTURAS COMPLEMENTARES

- Determinação da inércia termo-sensorial para o ambiente sem qualquer climatização e climatizado exclusivamente pelos ventiladores;
- Utilização de técnicas estatísticas não-paramétricas para a comparação de sensações térmicas e posterior comparação com a técnica de *clustering* empregada neste trabalho;
- Realizar medições mais precisas, e mais longas, do consumo de energia do condicionador de ar nas duas modalidades de climatização;
- Estudar a influência das dimensões do ambiente na inércia termo-sensorial;
- Estudar a influência da velocidade do vento, produzido pelos ventiladores na inércia termo-sensorial.

6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

- Rede digital de medidores de temperatura, umidade e CO₂;
- Introdução do conceito de inércia termo-sensorial;
- Introdução da escala de 21 pontos para capturar a sensação térmica dos ocupantes de um ambiente, contrastando com a escala ASHRAE de sete pontos;
- Aplicação da teoria de *clustering* para comparação de sensações térmicas.

6.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Repetir este estudo substituindo o *survey* pela medição de grandezas ambientais e comparar os resultados.

6.4 RESULTADOS ACADÊMICOS DA PESQUISA

- Artigo publicado na revista Sodebras, Nº 218 – fevereiro/2024 sob o título: otimização energética na climatização: integração de condicionadores de ar e ventiladores de teto – uma revisão literária
- Artigo em fase final de submissão (*Energy savings reached by the combined use of air conditioner and ceiling fans*) - *Energy and Buildings*

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Energy efficiency -The first fuel of a sustainable global energy system 2019**. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Global Energy & CO2 Status Report 2018**. Disponível em: <https://www.iea.org/geco/emissions/>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy**. ASHRAE, 2017.
- ARUMUGAM, J.; MAIYA, M. P. P.; NAGENDRA, S. M. S. **Thermal comfort assessment of tropically acclimatized occupants in an air-conditioned microenvironment**, v. 101, n. 4, p. 795-807, 2020.
- ATTHAJARIYAKUL S.; LERTSATITTANAKORN C. Small fan assisted air conditioner for thermal comfort and energy saving in Thailand. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p. 2499-2504, 2008.
- AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L. **Metodologia da pesquisa para engenharias**. Minas Gerais: Cefet-MG, 2020.
- BJERREGAARD, C.; MØLLER, N. F. The impact of EU's energy labeling policy: An econometric analysis of increased transparency in the market for cold appliances in Denmark. **Energy Policy**, v. 128, p. 891-899, 2019.
- CAO, S. J.; DENG, H. Y. Investigation of temperature regulation effects on indoor thermal comfort, air quality, and energy savings toward green residential buildings. **Science and Technology for the Built Environment**, v. 25, p. 309-321, 2019.
- CAMPBELL, N. R.; JEFFREYS, H. Proceedings of the Aristotelian society. **Oxford University Press**, v. 17, p. 121-151, 1938.
- CHEN, W. *et al.* Ceiling-fan-integrated air conditioning: airflow and temperature characteristics of a sidewall-supply jet interacting with a ceiling fan. **Building and Environment**, v. 171, 2020.
- CHENG, Y. *et al.* Optimization on fresh outdoor air ratio of air conditioning system with stratum ventilation for both targeted indoor air quality and maximal energy saving. **Building and Environment**, v. 147, p. 11-22, 2019.
- CUNHA, P., *et al.* Adoption of efficiency measures in the buildings of micro, small and medium-sized Portuguese enterprises. **Energy Policy**, v. 146, 2020.
- CURTIUS, H. C. The adoption of building-integrated photovoltaics: barriers and facilitators. **Renewable Energy**, v. 126, p. 783-790, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **EPE 030/2018**: Uso de ar-condicionado no setor residencial brasileiro: perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética: Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6.ed. São Paulo: Atlas S.A, 2008. 220 p.

GOKARAKONDA, S.; TREECK, C.; RAWAL, R. Investigating optimum cooling set point temperature and air velocity for thermal comfort and energy conservation in mixed-mode buildings in India. **Energies**, v. 15, 2022.

HÄCKEL, B.; PFOSSER, S.; TRÄNKLER, T. Explaining the energy efficiency gap - Expected utility theory versus cumulative prospect theory, **Energy Policy**, v. 111, p. 414-426, 2017.

HE, Y. *et al.* Air-conditioning use behaviors when elevated air movement is available. **Energy & Buildings**, v. 225, 2020.

HOYT, T.; ARENS, E.; ZHANG, H. Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. **Building and Environment**, v. 88, p. 89-96, 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2022: Mitigation of Climate Change**. Part A: The Working Group III (WG III) contribution to the IPCC's Sixth Assessment Report (AR6). Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

JAMES, P. W. *et al.* **Are savings due to ceiling fans just hot air**. Florida Solar Energy Center (FSEC), 1996.

KOTHARI, C. **Research methodology: methods and techniques**. 2.ed. New Delhi: New Age International, 2013. 418 p.

LI, Y.; HE, J. Evaluating the improvement effect of low-energy strategies on the summer indoor thermal environment and cooling energy consumption in a library building: A case study in a hot-humid and less-windy city of China. **Build Simul**, v. 14, p. 1423-1437, 2021.

LIPCZYNSKA, A.; SCHIAVON, S.; GRAHAM, L. T. Thermal comfort and self-reported productivity in an office with ceiling fans. **Building and Environment**, v. 135, p. 202-212, 2018.

LOPES, M.; LAMBERTS, R. N. Development of a Metamodel to Predict Cooling Energy Consumption of HVAC Systems in Office Buildings in Different Climates. **Sustainability**, v.10, 2018.

LUO, M. *et al.* Ceiling-fan-integrated air-conditioning: thermal comfort evaluations. **Buildings & Cities**, v. 2, p. 928-951, 2021.

MALIK, A. The potential for indoor fans to change air conditioning use while maintaining human thermal comfort during hot weather: an analysis of energy demand and associated greenhouse gas emissions. **Lancet Planet Health**, v. 6, 2022.

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 280 p.

MIHARA, K. *et al.* Thermal comfort and energy performance of a dedicated outdoor air system with ceiling fans in hot and humid climate. **Energy & Buildings**, v. 203, 2019.

MIHARA, K. *et al.* Thermal and perceived air quality responses between a dedicated outdoor air system with ceiling fans and conventional air-conditioning system. **Building and Environment**, v. 190, 2021.

MILLER, D. *et al.* Cooling energy savings and occupant feedback in a two year retrofit evaluation of 99 automated ceiling fans staged with air conditioning. **Energy & Buildings**, v. 251, 2021.

MOMOI, Y. *et al.* **Control of air velocity and temperature distribution in classroom using ceiling fan**. Osaka, Japan, 2010.

NI, J.; BAI, X., A review of air conditioning energy performance in data centers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 625-640, 2017.

NOREN THERMAL SOLUTIONS. **About us**. Forced Convection Cooling, [2015]. Disponível em: <http://www.norenproducts.com/forced-convection-cooling/>. Acesso em 31 jul. 2023.

OSUNTUYI, B. V.; LEAN, H. H. Economic growth, energy consumption and environmental degradation nexus in heterogeneous countries: does education matter. **Environmental Sciences Europe**, 2022.

PIERREHUMBERT, R. There is no Plan B for dealing with the climate crisis, **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 75, p. 215-221, 2019.

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. D. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

REHMAN, E.; REHMAN, S. Modeling the nexus between carbon emission, urbanization, population growth, energy consumption, and economic development in asia: Evidence from grey relational analysis. **Energy Reports**, v. 8, p. 5430-5442, 2022.

SANTOS, A. F.; GASPAR, P. D.; SOUZA, H. J. L. New HVAC Sustainability Index—TWI (Total Water Impact). **Energies** 13, no. 7: 1590, 2020.

SEKHAR, S. C. Higher space temperature and better thermal comfort – a tropical analysis. **Energy and Building**, v. 23, p. 63-70, 1995.

SHETTY, S. *et al.* Personal thermal comfort management in existing office buildings using energy-efficient fans. **Department of Electrical & Computer Engineering**, Singapore, 2016.

- SOLNØRDAL, M. T.; FOSS, L. Closing the energy efficiency gap a systematic review of empirical articles on drivers to energy efficiency in manufacturing firms. **Energies**, v. 11, p. 518, 2018.
- STEVENS, S. S. On the theory of scales of measurement. **Science**, v. 103, p. 677-680, 1946.
- SUN, D.; JIA, C. Study on joint management of indoor natural ventilation environment by coupling ceiling fan with air conditioner. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 21, p. 1093-1105, 2022.
- SUWANDA, R.; SYAHPUTRA, Z.; ZAMZAMI, E. M. Analysis of Euclidean Distance and Manhattan Distance in the K-Means Algorithm for Variations Number of Centroid K. **Journal of Physics**, Conference Series, 1566, 2020.
- TIAN, S.; SU, X.; SHAO, X. Optimization and evaluation of a solar energy, heat pump and desiccant wheel hybrid system in a nearly zero energy building. **Build. Simul**, v. 13, p. 1291–1303, 2020.
- TIAN, Z. *et al.* Multi-objective optimization model predictive dispatch precooling and ceiling fans in office buildings under different summer weather conditions. **Building Thermal, Lighting, and Acoustics Modeling**, 2019.
- TRIANNI, A.; CAGNO, E.; MARCHESANI, F.; SPALLINA, G. Classification of drivers for industrial energy efficiency and their effect on the barriers affecting the investment decision-making process. **Energy Efficiency**, v. 10, p. 199-215, 2017.
- YU, *et al.*, Digital finance and renewable energy consumption: evidence from China. **Financial Innovation**, 2022.
- YUAN, X.; PAN, Y.; YANG, J. Study on the application of reinforcement learning in the operation optimization of HVAC system. **Build. Simul**, v. 14, p. 75–87, 2021.
- ZHANG, L. *et al.* Digital economy, energy efficiency, and carbon emissions: Evidence from provincial panel data in China. **Science of The Total Environment**, v. 852, 2022.
- ZHU, H. C.; REN, C.; CAO, S. J. Fast prediction for multi-parameters concentration, temperature and humidity of indoor environment towards the online control of HVAC system. **Build. Simul**, v.14, p. 649–665, 2021.
- ZHUANG, C.; WANG, S. Uncertainty-based robust optimal design of cleanroom air-conditioning systems considering life-cycle performance, **Indoor and Built Environment**, v. 29, p. 1214–1226, 2020.