

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PEDRO FILIPE DA CONCEIÇÃO PEREIRA

**DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE CONFORTO TÉRMICO POR MEIO
DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE
CARACTERIZAÇÃO DE PESSOAS TERMICAMENTE INSATISFEITAS**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2021

PEDRO FILIPE DA CONCEIÇÃO PEREIRA

**DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE CONFORTO TÉRMICO POR MEIO
DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE
CARACTERIZAÇÃO DE PESSOAS TERMICAMENTE INSATISFEITAS**

**DETERMINATION OF THERMAL COMFORT ZONES THROUGH COMPARATIVE ANALYSIS
BETWEEN DIFFERENT METHODS OF CHARACTERIZATION OF THERMALLY DISSATISFIED
PEOPLE**

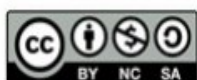
Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Evandro Eduardo Broday

Coorientador: Antonio Augusto de Paula Xavier

PONTA GROSSA

2021



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

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa



PEDRO FILIPE DA CONCEICAO PEREIRA

**DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE CONFORTO TÉRMICO POR MEIO DA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE
DIFERENTES MÉTODOS DE CARATERIZAÇÃO DE PESSOAS TERMICAMENTE INSATISFEITAS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 23 de Março de 2021

Prof Evandro Eduardo Broday, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Aldo Braghini Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Joao Carlos Colmenero, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Manuel Carlos Gameiro Da Silva, Doutorado - Universidade de Coimbra

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 23/03/2021.

Dedico este trabalho à minha mãe, pela força e
sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão contemplar a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a Deus, pai de infinita bondade, pelo dom da vida e por ter dado a permissão para que tudo isso fosse possível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Evandro Eduardo Broday, pela paciência e sabedoria com que me guiou nesta trajetória, o qual é um grande exemplo e inspiração.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Antonio Augusto de Paula Xavier pelos momentos de puro aprendizado que pude ter ao longo desses dois anos.

Aos meus colegas do LabErgo, em especial ao Matheus Almeida, pela amizade e incentivo de realizar o mestrado.

A UTFPR, por disponibilizar ensino público e de qualidade para a minha formação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, em especial a minha esposa Lana Dara, por sempre me apoiar e estar ao meu lado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código de financiamento 001.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não
sou o que deveria ser, mas Graças a Deus,
não sou o que era antes”.

(Martin Luther King)

RESUMO

PEREIRA, Pedro Filipe da Conceição. **Determinação de zonas de conforto térmico por meio da análise comparativa entre diferentes métodos de caracterização de pessoas termicamente insatisfeitas**. 2021.81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Para manter o conforto térmico e preservar a qualidade ambiental interior de ambientes, por vezes, o ser humano faz uso de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC). No entanto, devido à crise energética mundial, as edificações devem estar preparadas não somente para proporcionar o conforto térmico adequado aos seus ocupantes, como alinhar estratégias que possibilitem melhor desempenho energético. Nesse intuito, este trabalho teve como objetivo determinar zonas de conforto térmico (TCZ) a partir de diferentes métodos de caracterização de insatisfeitos térmicos. Foram coletadas respostas de 481 estudantes, por meio da aplicação de questionários durante atividades em salas de aula, no inverno brasileiro de 2019. Foram adotados três métodos de determinação de insatisfeitos que geraram três diferentes equações de porcentagem de insatisfeitos térmicos, aqui denominados: APD_1; APD_2 e APD_3, com base na equação original do *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD). Por meio do modelo *probit*, três TCZ foram calculadas: 17,73°C – 22,4°C (APD_1); 20,71°C – 20,93°C (APD_2) e 17,89°C – 24,83°C (APD_3), além de uma zona baseado na regressão linear entre os votos de sensação térmica e a temperatura operativa, de 18,77°C – 22,69°C. Todas as zonas de conforto térmico resultantes deste trabalho possuem temperaturas mais frias que a indicada pelo padrão ASHRAE (2017) de 23°C – 26°C para o inverno, mostrando a potencial economia energética na adoção deste tipo de estratégia, mantendo simultaneamente o conforto térmico já que as zonas de conforto foram formuladas para estarem de acordo com a categoria B da ISO 7730 (2005).

Palavras-chave: Conforto térmico. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD). Zonas de conforto térmico (TCZ). Economia de energia.

ABSTRACT

PEREIRA, Pedro Filipe da Conceição. **Determination of thermal comfort zones through comparative analysis between different methods of characterizing thermally dissatisfied people.** 2021. 81 p. Dissertation (Master Degree in Production Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

To maintain thermal comfort and preserve the indoor environmental quality, human beings sometimes use heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems. However, due to the global energy crisis, buildings must be prepared not only to provide adequate thermal comfort to their occupants but also to align strategies that enable better energy performance. To this end, this work aimed to determine thermal comfort zones (TCZ) by using different methods of characterization of thermally dissatisfied people. Responses were collected from 481 students, through the application of questionnaires during classroom activities, in the Brazilian winter of 2019. Three methods of determining dissatisfied were adopted, which generated three different equations for the percentage of thermal dissatisfied, named here: APD_1; APD_2 and APD_3, based on the original PPD equation. Using the *probit* model, three TCZs were calculated: 17.73°C - 22.4°C (APD_1); 20.71°C - 20.93°C (APD_2) and 17.89°C - 24.83°C (APD_3), in addition to a zone based on the linear regression between the thermal sensation votes and the operative temperature of 18.77°C - 22.69°C. All thermal comfort zones resulting from this work have colder temperatures than that indicated by the ASHRAE standard (2017) of 23°C - 26°C for the winter, showing the potential for energy savings from the adoption of this type of strategy, while maintaining thermal comfort, since comfort zones were formulated to comply with category B of ISO 7730 (2005).

Key-words: Thermal Comfort. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD). Thermal Comfort Zones (TCZ). Energy Saving.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismos de troca de calor	19
Figura 2 – Relação entre PMV e PPD.....	27
Figura 3 – Número de publicações por ano, por periódico e fator de impacto	29
Figura 4 – Clusters	31
Figura 5 – Mapa de coocorrência de palavras-chave do portfólio final seguindo a linha do tempo.....	31
Figura 6 - Confortímetro Sensus	43
Figura 7 - Desenho Experimental.....	45
Figura 8 – Comparação entre o AMV e PMV	51
Figura 9 – Regressão linear entre Top e AMV	52
Figura 10 – Comparação entre os valores de APDs e PPD	54
Figura 11 – Curva APD_1	55
Figura 12 – Curva APD_2	56
Figura 13 – Curva APD_3	57
Figura 14 – Comparação entre os APDs e o PPD	58
Figura 15 – Probit PPD_1.....	60
Figura 16 – Probit PPD_2.....	61
Figura 17 – Probit PPD_3.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis do Conforto Térmico	23
Tabela 2 – Escala de sete pontos da sensação térmica	25
Tabela 3 – Valores aceitáveis para o uso do PMV	26
Tabela 4 – Categorias do ambiente térmico.....	27
Tabela 5 – Estudos que comparam o PMV com a resposta real.....	28
Tabela 6 – Clusters	30
Tabela 7 – PPDs alternativos	33
Tabela 8 – TCZ padrão ASHRAE.....	36
Tabela 9 – TCZ alternativas	37
Tabela 10 – Métodos para o cálculo de cada APD	47
Tabela 11 – Estatística descritiva da amostra	50
Tabela 12 – Resultado das medições	50
Tabela 13 – Relação entre Top e AMV	53
Tabela 14 – Equações APD	57

LISTA DE SIGLAS

AED	Análise Exploratória dos Dados
AMV	<i>Actual Mean Vote</i>
APD	<i>Actual Percentage of Dissatisfied</i>
E_{sw}	Taxa De Secreção De Suor
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
IEA	<i>International Ergonomics Association</i>
IEQ	<i>Indoor Environmental Quality</i>
IF	Fator De Impacto
M	Taxa Metabólica
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
t_{ar}	Temperatura Do Ar
TCZ	<i>Thermal Comfort Zones</i>
T_{op}	Temperatura Operativa
t_{rm}	Temperatura Radiante Média
t_{sk}	Temperatura Média Da Pele
UR	Umidade Relativa
v_{ar}	Velocidade Do Ar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVO GERAL	15
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 CALOR E SEUS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO	18
2.2 CONFORTO TÉRMICO	21
2.3 MODELO PREDITIVO DE FANGER: PMV E PPD	25
2.4 PANORAMA CIENTÍFICO DAS PUBLICAÇÕES	29
2.5 <i>PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED</i> – PPD	33
2.6 <i>THERMAL COMFORT ZONES</i> – TCZ	35
3 METODOLOGIA	43
3.1 CARACTERIAÇÃO E OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS E DEFINIÇÃO DA AMOSTRA	43
3.2 DESENHO EXPERIMENTAL DAS MEDIÇÕES	44
3.3 PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE DADOS	45
3.3.1 Análise estatística dos dados	45
3.3.2 Análise da temperatura de conforto por meio do AMV	46
3.3.3 Metodologia para predição dos APD	47
3.3.4 Preposição das Zonas de Conforto Térmico	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 ANÁLISE INICIAL DOS DADOS	50
4.2 ANÁLISE DA TEMPERATURA DE CONFORTO POR MEIO DO AMV	52
4.3 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS APD	53
4.4 CONSTRUÇÃO DAS ZONAS DE CONFORTO TÉRMICO	59
5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A - Questionário Conforto Térmico	80

1 INTRODUÇÃO

A qualidade ambiental interior (*Indoor Environmental Quality – IEQ*) refere-se à qualidade de parâmetros internos, tais como a qualidade do ar (concentração de dióxido de carbono e compostos orgânicos voláteis), o conforto visual (luz), sonoro (ruído) e térmico (temperatura) de quem ocupa este espaço (GENG et al., 2017; WONG et al., 2018).

Caso haja alterações significativas nesses parâmetros, efeitos adversos são observados no bem-estar e saúde dos ocupantes, podendo afetar a produtividade em ambientes de trabalho (CHEONG e CHONG, 2001). Desse modo, é natural a preocupação do ser humano para com a qualidade interna do ambiente, principalmente quando se trata de conforto térmico, já que o desconforto em relação a esse parâmetro pode influenciar de forma negativa sua saúde e desempenho, o que implica em uma menor eficiência nas suas atividades (CORGNATI et al., 2009; SARBU e SEBARCHIEVICI, 2013; RICCIARDI e BURATTI, 2018; ZARE et al., 2018).

Propiciar as condições necessárias para a obtenção do conforto térmico é essencial para se atingir o máximo desempenho, principalmente em ambientes onde haja um esforço intelectual, tais como as salas de aula. Por esta razão, grande parte do consumo energético em ambientes internos parte dessa premissa, onde o uso de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (*Heating, Ventilation and Air Conditioning – HVAC*) se faz necessário para oferecer, aos seus ocupantes, condições de conforto e/ou habitação (WANG et al., 2015).

Apesar do conforto térmico ser de extrema relevância, as edificações devem estar preparadas não só para oferecer conforto aos seus usuários, mas também operar de forma eficiente, visto que as edificações são responsáveis por aproximadamente um terço do consumo total de energia em todo o mundo (MÄRZINGER e ÖSTERREICHER, 2019). Nos países emergentes, essa realidade se torna mais efetiva; portanto, regular o consumo tem um potencial significativo para economia de energia (ZAKI et al., 2017).

Zhao et al. (2017) afirmam que mais de um terço do consumo local de energia da China é proveniente de edificações e, deste, 63% se deve aos sistemas de refrigeração ou aquecimento. Li et al. (2018) atestam que o consumo energético em edificações, na China, teve um aumento de 45% nas últimas duas décadas. Indraganti

et al. (2014) apontam que na Índia, entre 2004 a 2010, houve um aumento significativo de 13,4% do consumo de energia, o que vai de encontro com a escassez energética relatada em todo o país, sendo o setor de construção um dos principais responsáveis.

No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional de 2018 (EPE, 2019), elaborado pelo Ministério de Minas e Energia, os setores residenciais e de comércio correspondem a 14,8% do consumo final de energia no país; já o setor residencial sozinho teve participação de 4,5% do total de emissão de dióxido de carbono (CO₂). Assim, são crescentes os esforços para a diminuição do gasto de energia nas edificações já que também são responsáveis por grande parte das emissões de gases do efeito estufa, na faixa de 36% da emissão de CO₂ mundial (YAO, 2014; KIM et al., 2016; LUO et al., 2015; DELGARM et al., 2016; ZHANG et al., 2019).

Para contornar este problema em relação ao demasiado gasto energéticos e elevada emissão de gases do efeito estufa, possíveis alternativas são utilizadas, tais como a utilização de combustíveis limpos e a integração do método de avaliação da ISO 7730 (2005) nos códigos de simulação de sistemas HVAC mais econômicos (BURATTI et al., 2013; LI et al., 2019). Esta última alternativa ocorre para avaliar o nível de conforto térmico, por meio do voto médio estimado (*Predicted Mean Vote – PMV*). O PMV foi desenvolvido por Fanger (1970) e prevê a sensação térmica média de um grande grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente (DE DEAR et al., 2013). A partir do PMV derivou-se o percentual de pessoas insatisfeitas (*Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD*), que segundo D’Ambrosio Alfano et al. (2017) é uma porcentagem residual de pessoas insatisfeitas devido a questões fisiológicas, ou seja, não é resultado de qualquer desenho incorreto de sistemas HVAC.

A adoção de parâmetros padronizados pode então ajudar a conciliar, de forma otimizada, a relação entre o conforto térmico humano e a eficiência energética em edificações educacionais, que são grandes unidades consumidoras. No entanto, Mui et al. (2020) apontam que a simples utilização de modelos, sem a devida atenção as discrepâncias geradas entre os dados preditos pelo modelo e os dados obtidos nos estudos de campo, afeta significativamente a implicação da economia de energia nas pesquisas de conforto térmico. Van Hoof (2008) explica que as discrepâncias observadas podem ser devido ao tipo de ventilação da edificação, ao pequeno número de indivíduos que podem ter uma grande distribuição interindividual nas preferências térmicas, climas diversos, tipos de construção, faixa etária, dentre outros. Essa

observação é relevante para estudos sobre conforto térmico, pois indica a importância de estudos locais para determinar as melhores condições para cada tipo de ambiente.

Por esse motivo, alguns estudos como os de: Corgnati et al. (2007), Yao et al. (2010) e Broday e Xavier (2020) optam por fazer uso do PPD real (*Actual Percentage of dissatisfied* – APD). Para Yao et al. (2010), o APD é a porcentagem de votos na escala sensação térmica de 7 pontos da ASHRAE (2017) determinados como votos de insatisfação em uma determinada temperatura do ar no levantamento de campo.

A relação entre o PPD e o conforto térmico dos ocupantes das edificações é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o PPD maior será o conforto, o que implica em menor consumo de energia e melhores efeitos econômicos e ambientais (KIM et al., 2016). Algumas pesquisas utilizam, para além do índice PPD, o conceito de Zonas Térmicas de Conforto (*Thermal Comfort Zones* – TCZ), com o intuito de reduzir ainda mais o consumo de energia. Para Kumar et al. (2016), uma zona de conforto térmica é “a gama de condições climáticas em que a maioria das pessoas sentiria conforto térmico”. Zavala (2013) considera a utilização das zonas de conforto térmico como uma das estratégias mais relevante para a economia de energia.

Chong et al. (2019) salientam que a utilização do percentual de insatisfeitos térmicos pode determinar zonas de conforto mais amplas, sendo esta uma informação útil para o dimensionamento de projetos para sistemas HVAC. A utilização de zonas de conforto térmico mais amplas pode proporcionar um ajuste de temperaturas mais altas ou mais baixas, o que provavelmente tenderá a reduzir o consumo de energia de resfriamento ou aquecimento ao longo do tempo (RYU et al., 2017).

Al-ajmi e Loveday (2010) afirmam que, em termos de conservação de energia, a diferença de 1°C pode ajudar a economizar em torno de 10% do consumo energético para resfriamento de um ambiente interno. Aghniaey et al. (2019) demonstraram que a aceitabilidade térmica continuou acima de 80% mesmo ao aumentar a temperatura de 21°C para 25°C, o que poderia potencializar a economia de energia mantendo o conforto térmico em salas de aula de um câmpus universitário.

Tendo em vista a relevância dos temas de conforto térmico e economia de energia nas edificações educacionais, este trabalho se propõe a determinar zonas de conforto térmico, por meio da análise comparativa entre diferentes métodos de caracterização real de pessoas termicamente insatisfeitas, para salas de aula da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Ponta Grossa, no

intuito de demonstrar de forma prática a utilização desta metodologia para a economia de energia.

1.1 PROBLEMA

Qual o método de determinação de insatisfeitos térmicos produz uma zona mais ampla de conforto térmico?

1.2 JUSTIFICATIVA

Os primeiros estudos sobre conforto térmico e o controle de energia nas edificações foram publicados na década de 1970 e se desenvolveram praticamente em paralelo de forma bastante independente (PARK e NAGY, 2018). A crise de energia tem pressionado os líderes mundiais a explorar novos tipos de fonte energética, bem como reduzir o alto consumo. Desta forma, as temáticas do conforto térmico e eficiência energética vão sendo trabalhadas cada vez mais em conjunto (WANG et al., 2015). Por consequência, a realização de pesquisas que alinham os temas aumentou significativamente, principalmente em construções com alto potencial de gasto energético, como as edificações educacionais (JING et al., 2019).

O gasto energético desse tipo de construção pode ser explicado tanto pelo elevado tempo (um terço do dia) que seus ocupantes passam no interior desses ambientes (DE DEAR et al., 2015), como pelo efeito considerável que a falta de conforto térmico causa no desempenho cognitivo dos estudantes (MENDELL e HEATH, 2005; JIANG et al., 2018; PORRAS-SALAZAR et al., 2018; WARGOCKI et al., 2019; PEREIRA, BRODAY e XAVIER, 2020).

O processo de aprendizagem envolve diretamente as cargas cognitivas e os fatores relacionados ao ambiente que envolve os agentes do processo, ou seja, a forma com o estudante percebe e interage com o meio (ZHANG et al., 2019). Desse modo se faz necessário planejar as atividades de ensino e suas cargas cognitivas bem como o ambiente e o conforto que as salas de aula oferecem. Assim, é crucial tanto a avaliação como o monitoramento do desempenho dos ambientes em termos de conforto térmico associado ao desempenho energético, sendo a coexistência de ambos essencial para que os alunos atinjam níveis satisfatórios de conforto com

consumo mínimo de energia (BARBHUIYA e BARBHUIYA, 2013; ALLAB et al., 2017; MERABTINE et al., 2018).

Esta pesquisa parte desta premissa e se utiliza da temática para verificar, por meio dos insatisfeitos térmicos, as zonas de conforto térmico que podem ser utilizadas para reduzir o consumo de energia ao mesmo tempo que potencializa o conforto térmico das salas de aula. Hwang et al. (2007) destacam a relevância da integração entre o APD e as TCZ ao descobrirem que apenas 40% dos ambientes hospitalares por eles pesquisados estavam dentro das zonas de conforto recomendadas pela ASHRAE (2017). Este *gap* de pesquisa foi demonstrado por Park e Nagy (2018) e Kim et al. (2020), onde os autores salientam a importância de se explorar e compreender tanto a sensação térmica como as zonas de conforto para maximizar a economia de energia.

Além dos aspectos já mencionados, a pesquisa em questão é significativa, pois visa contribuir para os bancos de dados a respeito das condições de conforto térmico em ambientes de ensino. Enseja-se a criação de ambientes termicamente confortáveis que auxiliem a produtividade em salas de aula e por se tratar de um estudo aplicado em um ambiente onde se requer um esforço intelectual, esta pesquisa pode ser estendida a outros ambientes de mesma classe.

1.3 OBJETIVO GERAL

Comparar os diferentes métodos de determinação de pessoas termicamente insatisfeitas para verificar qual deles produz uma zona de conforto térmico mais ampla.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Verificar a aplicabilidade do índice PMV para avaliar a sensação térmica dos usuários;
- b) Determinar a temperatura de conforto no ambiente estudado, por meio dos votos de sensação térmica;
- c) Utilizar o modelo estatístico *probit* para obtenção das zonas de conforto térmico, por meio de diferentes métodos de caracterização de insatisfação térmica;

d) Formar um banco de dados das variáveis ambientais e pessoais do conforto térmico, para que possa ser utilizado em pesquisas futuras.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A ergonomia, segundo a *International Ergonomics Association* (IEA, 2019), é a ciência que busca a compreensão entre os homens e outros elementos do sistema e tem como objetivo aumentar o bem-estar humano e o desempenho geral. Tendo como base esse conceito pode-se entender que ergonomia é o meio pelo qual se estuda como o ambiente deve ser ajustado às necessidades de convivência do homem, utilizando-se de conhecimentos multidisciplinares (IIDA e BUARQUE, 2016).

O conforto térmico, tema geral desta pesquisa, se enquadra dentro do espectro da Ergonomia, pois se trata de um estudo multidisciplinar que possui como principal objetivo proporcionar um ambiente no qual o homem não seja afetado negativamente pelo ambiente térmico e possa realizar suas atividades de forma satisfatória. A avaliação termo ambiental classifica-se de acordo com o tipo de ambiente. No caso de ambientes moderados destacam-se: os índices PMV e PPD que atualmente tem como procedimento de aplicação a norma ISO (2005) baseada nos estudos de Fanger. A pesquisa foi efetuada com base no modelo de Fanger e não foram utilizados os modelos adaptativos de conforto térmico.

A sensação de conforto térmico de cada indivíduo vai muito além da resposta fisiológica do seu organismo aos parâmetros ambientais (velocidade do ar, temperatura radiante, umidades do ar e temperatura do ar). Fatores como o estado emocional, perseverança e a hora do dia, podem influenciar a sensação de desconforto térmico (TELI et al., 2012). No entanto, estes fatores não foram levados em consideração para a realização do estudo.

Para Fanger (1970), é impossível que um determinado grupo de pessoas estejam 100% satisfeitos com o ambiente térmico no qual estão inseridos, devido a diferenças fisiológicas. Por esse aspecto o autor desenvolveu o índice PPD que determina o percentual predito de insatisfeitos térmico. Esta pesquisa limita-se a trabalhar o tema geral sobre conforto térmico, especificamente com o índice PPD e a sua aplicação para determinar as zonas térmicas de conforto.

Chong et al. (2019) mostram que zonas amplas de conforto térmico garantem redução no consumo de energia, mas o intuito deste trabalho é apenas demonstrá-las, já que a pesquisa foi realizada durante o inverno e as salas de aulas não contavam com sistemas de aquecimento, impossibilitando o cálculo da economia de energia.

A metodologia aqui utilizada pode ser replicada em ambientes internos sob condições semelhantes, garantindo a extrapolação dos dados. Neste estudo, devido a pandemia do novo coronavírus (SARS-CoV-2), a amostra foi reduzida, impossibilitando a coleta de novos dados no ano de 2020.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica a seguir se faz necessária para o entendimento dos aspectos relacionados a esta pesquisas. Os tópicos abordados tratam sobre: ao calor e seus mecanismos de transmissão, tópicos relevantes sobre o conforto térmico e o modelo preditivo desenvolvido por Fanger, aqui utilizado como base, e um panorama científico atual sobre as pesquisas que envolvem o PPD e TCZ.

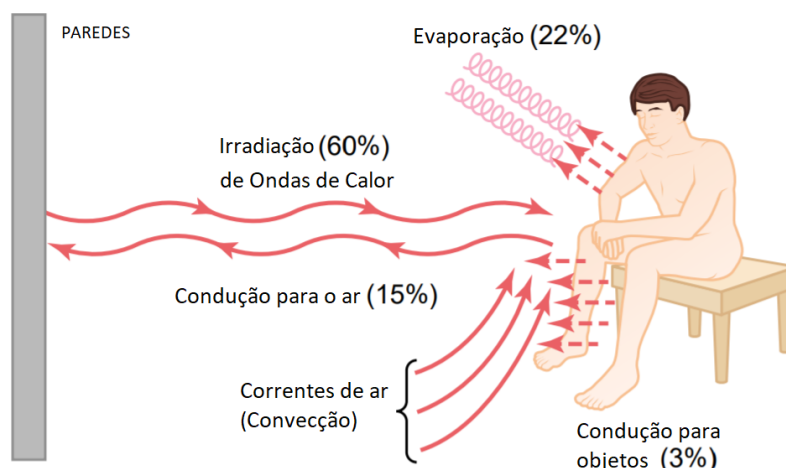
2.1 CALOR E SEUS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO

Para um melhor entendimento sobre o conforto térmico é preciso se ter determinadas noções sobre os mecanismos de transmissão de calor. Vasconcelos (2013) ressalta que para uma análise das interações térmicas entre o homem e o meio que o mesmo está inserido é preciso primeiramente se efetuar um estudo dos fatores envolvidos durante o processo de transmissão de calor.

A temperatura pode ser definida como sendo o potencial térmico de um sistema, ou seja, a temperatura indica o nível de agitação das moléculas ou de energia térmica, sendo o homem o sistema em estudo (MATTOS e MÁSCULO, 2019). Moran et al. (2018) conceitua o calor como a energia em trânsito, que ultrapassa os limites de um sistema, sempre que houver diferença de temperatura entre sistemas, ou entre o sistema e o meio no qual o mesmo está imerso. Ainda segundo os autores essa transferência de energia acontece sempre no sentido do lugar com mais energia (quente) para o lugar com menos energia (frio), ou seja, a diferença de temperatura que determinará o fluxo de calor.

Essas trocas de energias acontecem por meio de condução, convecção e radiação, descritas como trocas secas, e pela evaporação, troca úmida, que são ditos como os meios de transmissão de calor (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). A figura 1 mostra o processo de perda de calor pelos mecanismos de transmissão de calor, considerando uma pessoa, sentada e em condições normais de temperatura (HALL e HALL, 2020).

Figura 1 – Mecanismos de troca de calor



Fonte: Adaptado de Hall e Hall (2020)

lida e Buarque (2016) definem que a condução ocorre quando existe o contato direto do organismo com objetos mais quentes ou mais frios. Os autores ressaltam que além do contato direto a troca de calor por condução ocorre em partes do mesmo corpo que possuam temperaturas diferentes. A equação 1, que quantifica o processo de condução é a seguir:

$$K = kA \frac{(t_1 - t_2)}{\Delta x} \quad 1$$

onde:

K = quantidade de calor (W);

k = constante de proporcionalidade (condutividade térmica);

A = área do objeto (m²);

t₁ e t₂ = temperaturas dos pontos 1 e 2 (°C);

Δx = diferença entre as distâncias do ponto 1 e 2 (m).

Mattos e Másculo (2019) ressaltam o mecanismo de convecção como sendo a transferência de energia que ocorre entre um sólido e um fluido, que pode ser ar ou líquido, com o qual o sólido entra em contato. Tendo o homem como o sólido em questão, a transferência de energia ocorre entre a pele e a camada de ar por meio do movimento dessa camada de ar próximo a pele e dependendo da velocidade em que ocorra a troca de energia por convecção pode chegar a valores significativos (IIDA e BUARQUE, 2016). De um modo geral a equação 2, que define e quantifica da troca de energia por convecção, é:

$$C = h_c A (T_s - T_f) \quad 2$$

onde:

C = é o fluxo de calor transferido;

T_s e T_f = temperaturas da superfície e do fluido respectivamente (°C);

A = área da superfície sólida (m²);

h_c = coeficiente de convecção.

O mecanismo de transferência de calor por meio de radiação pode ser entendido por aquele que ocorre entre dois corpos por meio da sua capacidade de emitir e/ou absorver energia térmica por meio de ondas eletromagnéticas. Devido ao fato do processo ocorrer por meio de ondas eletromagnéticas, a radiação não necessita de um meio material que a propague, ao contrário, ela ocorre melhor no vácuo (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018). Tomando o homem como o sistema, a equação 3 descreve o fluxo de radiação entre o ser humano e as superfícies que o cercam:

$$R = h_r \cdot F_s \cdot (t_{sk} - t_{rm}) \quad 3$$

onde:

R = fluxo de calor transmitido por radiação;

h_r = coeficiente de radiação;

t_{sk} = temperatura média da pele (°C);

t_{rm} = temperatura radiante média do meio (°C);

F_s = fator de redução de calor sensível.

A evaporação ocorre quando existe a perda de calor de uma superfície, no caso a pele, por conta da absorção de calor pela água (suor) para a mudança de fase (IIDA e BUARQUE, 2016). Moran et al. (2018) destacam que o mecanismo de evaporação do suor é o principal e mais importante meio promotor do equilíbrio térmico.

Quando a superfície está em contato com um ambiente muito quente ou quando a atividade realizada é muito intensa, o corpo ativa os mecanismos de termorregulação e as glândulas sudoríparas são ativadas e produzem suor que

retiram calor da pele de líquido evaporado, a quantidade de calor eliminada por meio da evaporação, dentre outros fatores, depende da umidade relativa e do movimento do ar (VASCONCELOS, 2013).

2.2 CONFORTO TÉRMICO

Segundo a ASHRAE (2017), o conforto térmico pode ser entendido como a condição mental em que o ser humano manifesta satisfação com o ambiente térmico no qual está inserido. No entanto, para que o homem atinja essa condição de satisfação é necessário primeiramente que ele atinja certas condições aqui elencadas: a neutralidade térmica, que a temperatura média da pele (t_{sk}) e a taxa de secreção de suor (E_{sw}) sejam compatíveis com a atividade desempenhada e ao mesmo tempo não pode haver desconforto térmico localizado (XAVIER, 2000).

A neutralidade térmica ocorre quando não há um acúmulo ou perda excessiva de calor pelo organismo, sendo uma condição necessária para se atingir o conforto já que o mesmo é um animal homeotérmico e gasta energia para se manter termicamente estável (FANGER, 1970).

A segunda condição para que o homem atinja o conforto térmico depende da compatibilidade entre a taxa metabólica (M) gerada por uma determinada atividade com a temperatura média da pele (t_{sk}) e a taxa de secreção de suor (E_{sw}) (BARTAL et al., 2012). Para Broday (2015), a temperatura média da pele e taxa de suor fornecem, respectivamente, os requisitos para se encontrar em conforto térmico por meio das equações 4 e 5:

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0275M \quad 4$$

$$E_{sw} = 0,42(M - 58,15) \quad 5$$

Por meio da análise das equações 4 e 5, Fanger (1970) determinou que a única variável que afeta tanto a t_{sk} como E_{sw} é a taxa metabólica (M). A terceira condição para que o homem atinja o conforto térmico segundo a ISO 7730 (2005) é que não existam os seguintes desconfortos: correntes de ar, assimetria de radiação térmica, diferença de temperatura do ar (sentido vertical) e pisos aquecidos ou

resfriados. Para Broday (2015) se as três condições forem satisfeitas, a pessoa terá condições para atingir o conforto térmico.

O principal modelo utilizado para analisar as interações entre o corpo humano e o ambiente é o do balanço de energia no estado estacionário desenvolvido por Fanger (1970) sendo base para as normas ISO 7730 (2005) e ASHRAE (2017). Segundo Kilic et al. (2006) o estado estacionário considera que o corpo está em equilíbrio térmico e a energia armazenada é desprezível e o balanço de energia térmica é regido pela equação dupla 6:

$$M - W - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 3,05 \cdot [5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] = \frac{35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad 6$$

onde:

M = taxa metabólica (W/m²);

W = energia mecânica eficaz, nula para a maioria das atividades sedentárias (W/m²);

t_{ar} = temperatura do ar (°C);

p_a = pressão parcial de vapor de água (mmHg);

t_{cl} = temperatura da superfície externa da roupa (°C);

I_{cl} = isolamento térmico da vestimenta (clo);

f_{cl} = razão entre a área da superfície corporal do vestido e do corpo nu

h_c = coeficiente de troca de calor por convecção (W/m²K).

Com exceção da variável t_{cl}, determinada iterativamente, todas as variáveis envolvidas podem ser determinadas por meio de medições com aparelhos ou por consultas em tabelas normatizadas (BRODAY, 2015). Segundo a ISO 7730 (2005) existem seis variáveis que devem ser abordadas para se definir o conforto térmico e que levam em consideração fatores pessoais e ambientais, ou seja, a norma conceitua que conforto térmico é a sensação de bem-estar que um indivíduo experimenta em um ambiente, justamente pela combinação satisfatória dessas variáveis.

As variáveis pessoais são ditas como subjetivas, pois variam para cada indivíduo. Já as variáveis ambientais são as que se relacionam com o ambiente e influenciam todas as pessoas presentes em um determinado espaço físico (ISO 7730, 2005). A tabela 1, mostra as variáveis pessoais e ambientais envolvidas no processo de conforto térmico:

Tabela 1 – Variáveis do Conforto Térmico

Tipo	Variáveis do conforto
Variáveis pessoais	Taxa Metabólica, M (W/m^2); Isolamento das Vestimentas, I_{cl} (clo).
Variáveis ambientais	Temperatura do ar, t_a ($^{\circ}C$); Temperatura radiante média, t_{rm} ($^{\circ}C$); Velocidade do ar, v_{ar} (m/s); Umidade relativa do ar, RH (%).

Fonte: ISO 7730 (2005)

Pode-se observar que as variáveis pessoais são a taxa metabólica e o isolamento das roupas. Em relação ao metabolismo, tem-se que o homem, como uma “máquina térmica”, para a realização de atividades necessita de energia. Essa energia provém exatamente desse metabolismo, definido por Havenith et al. (2002) como: “taxa de energia liberada pela reação química entre o oxigênio e o alimento, a qual é proporcional ao esforço realizado pelos músculos”.

O metabolismo pode ser entendido como uma reação química, que ocorre no corpo, entre os carboidratos presentes nos alimentos e o oxigênio inalado para a formação de calor, vapor d’água e dióxido de carbono (MATTOS e MÁSCULO, 2019). Parte desse calor, ou seja, da energia proveniente do metabolismo, é utilizada para a produção de trabalho externo. Outra parte dessa energia é denominada taxa de metabolismo basal, que é utilizada para o funcionamento de órgãos e movimentos involuntários, ou seja, será uma energia para manutenção das funções básicas do corpo em repouso e o restante é dissipado para o ambiente (BRUNETTO et al., 2010).

Como toda máquina, a eficiência se torna um parâmetro para a comparação. A eficiência mecânica do corpo humano (relação entre o trabalho realizado e o metabolismo) é baixa, onde raras são as vezes que chega a 20% (MATTOS e MÁSCULO, 2019). A taxa metabólica não possui o mesmo valor para todas as atividades, e segundo a ISO 8996 (2004), quanto mais intensa for a atividade realizada, maior será a taxa de calor produzida.

Segundo a ISO 7730 (2005), a unidade de metabolismo pode ser expressa em “met” (mensurar a produção de calor de uma pessoa que esteja descansando e sentada, em condições de conforto térmico) que corresponde a $58,2 W/m^2$. A segunda variável pessoal é a vestimenta, e a sua escolha é fundamental para proteção do indivíduo. Somada a pele, as roupas formam a fronteira do sistema do homem com o ambiente. A roupa oferece isolamento térmico e proporciona resistência às trocas de

calor com o meio, sendo assim uma das principais ferramentas externas de controle da temperatura (FANGER, 1970).

A representação da variável vestimenta é “ I_{cl} ”, ou “clo”. Sendo que 1 “clo” corresponde a $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ segundo a ISO 9920 (2006) e os valores do isolamento térmico dos trajes dependem de fatores como a espessura dos tecidos e materiais das roupas. No tocante as variáveis ambientais observam-se: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar, velocidade relativa do ar, umidade relativa do ar.

A temperatura do ar corresponde à temperatura do ar ao redor do corpo humano e está diretamente ligada a troca de calor com o ambiente por meio de convecção e em alguns casos pode afetar também o processo de perda de calor por evaporação (ISO 7726, 1998). A temperatura do ar pode ser medida de diferentes formas como: termômetro elétrico, termômetro de coluna de mercúrio, termopar, resistência de platina. Para Cui et al. (2013), é uma das principais variáveis relacionadas ao desempenho das pessoas em um ambiente de trabalho.

A temperatura radiante média consiste em uma variável que mede a temperatura uniforme de um ambiente imaginário, onde a transferência de radiante do corpo humano é igual a do ambiente real não uniforme (FANGER, 1970). A temperatura radiante média pode ser mensurada por meio de valores obtidos por instrumentos como termômetro de globo negro, sensor esférico ou por meio das temperaturas das superfícies ao redor do corpo.

A velocidade do ar deve ser levada em consideração no estudo de conforto térmico devido a sua participação dos mecanismos de transferência de calor por convecção e evaporação e consiste na média da velocidade instantânea em um determinado período de tempo e pode ser medida por meio de hélices, fio quente, esfera quente, dentre outras (BRODAY, 2015).

A umidade relativa do ar é definida como a relação entre a massa de vapor de água nas condições reais do ambiente com a massa de vapor de água no estado saturado, estando ambas na mesma temperatura. Essa variável está intimamente ligada ao processo de evaporação. De acordo com a ISO 7726 (1998), é calculada pela razão entre a pressão parcial de vapor no ar úmido e a pressão de saturação de vapor de água e ser mensurada por meio do psicrômetro, aparelho que mede simultaneamente as temperaturas do bulbo seco e do bulbo úmido e com essa leitura pode-se determinar a umidade relativa com a utilização das relações psicrométricas.

2.3 MODELO PREDITIVO DE FANGER: PMV E PPD

O *Predicted Mean Vote* – PMV, ou voto médio estimado, é um índice desenvolvido por Fanger nos anos 70, que mostra a média de sensação térmica de um grande grupo de pessoas expostas a um mesmo ambiente, e atualmente possui como procedimento de aplicação a norma ISO 7730 (2005) que tem como intuito identificar a relação entre a sensação de conforto, de caráter subjetivo, e as variáveis de balanço térmico (DJONGYANG et al., 2010).

Fanger (1970) mostra em seu trabalho que é possível derivar um índice que torna possível a predição da sensação térmica das pessoas em relação à sensação térmica, que é representado pela escala de sete pontos da sensação, que varia de muito quente a muito frio. A tabela 2 exemplifica a escala de sete pontos:

Tabela 2 – Escala de sete pontos da sensação térmica

Sensação	Escala
Muito quente	3
Quente	2
Levemente quente	1
Neutro	0
Levemente frio	-1
Frio	-2
Muito frio	-3

Fonte: ISO 7730 (2005)

A equação proposta para o PMV por Fanger é apresentada conforme a equação 7:

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

onde:

M = Taxa metabólica (1met=58,2W/m²);

W = Trabalho mecânico (W/m²), sendo nulo para a maioria das atividades;

f_{cl} = Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu;

t_a = Temperatura do ar (°C);

t_{rm} = Temperatura radiante média (°C);

p_a = Pressão parcial do vapor de água, (Pa);

h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2\text{°C}$);

t_{cl} = Temperatura superficial das roupas (°C).

Para Zhao et al. (2017), a equação foi desenvolvida com base no balanço térmico entre o corpo e o ambiente, considerando o metabolismo “M”, no estado estacionário, bem como a carga térmica atualmente sobre o corpo. De acordo com a ISO 7730 (2005), o índice PMV só deve ser utilizado respeitando os limites de cada uma das variáveis como apresentado na tabela 3:

Tabela 3 – Valores aceitáveis para o uso do PMV

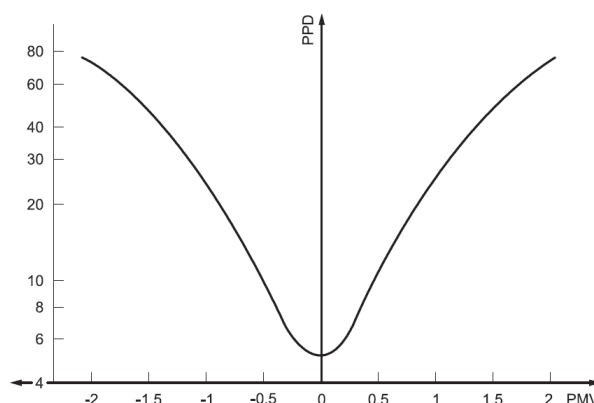
Variável	Faixa de Valores aceitáveis das variáveis para uso do PMV
Taxa metabólica	46 a 232 W/m^2
Isolamento da vestimenta	0 a 0,310 $m^2.K/W$
Temperatura radiante média	10 a 40 °C
Velocidade relativa do ar	0 a 1 m/s
Pressão parcial de vapor de água	0 a 2700 Pa
Temperatura do ar	10 a 30 °C

Fonte: ISO 7730 (2005)

Fanger (1970) além do índice PMV, associou cada sensação térmica a um percentual de pessoas insatisfeitas, que corresponde ao índice *Predicted Percentage of Dissatisfied* - PPD, ou percentual de pessoas insatisfeitas, que é apresentado pela equação 8:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,0335 PMV^4 - 0,2179 PMV^2) \quad 8$$

Assim, por meio da equação 8 onde tem-se a relação entre os índices PMV e PPD, é possível observar que curva que representa a relação entre PPD e PMV tem um valor mínimo de PPD = 5% correspondente à PMV = 0 (Neutralidade térmica), o que significa a condição de conforto ótima, onde 5% dos ocupantes estão insatisfeitos com o ambiente, perante 95% de satisfeitos (ISO 7730, 2005). A relação entre os índices pode ser observada por meio da figura 2:

Figura 2 – Relação entre PMV e PPD

Fonte: ISO 7730 (2005)

Existem três categorias apresentadas na norma ISO 7730 (2005) para classificar ambientes térmicos de acordo com a avaliação de percentagem de insatisfeitos: categoria A (6% de PPD máximo); categoria B (10% de PPD máximo) e categoria C (15% de PPD máximo), conforme a tabela 4:

Tabela 4 – Categorias do ambiente térmico

Categoria	PPD (%)	PMV
A	<6	$-0,2 < PMV < 0,2$
B	<10	$-0,5 < PMV < 0,5$
C	<15	$-0,7 < PMV < 0,7$

Fonte: ISO 7730 (2005)

A norma ISO 7730 (2005) admite serem valores aceitáveis em ambientes termicamente confortáveis aqueles em que o PMV está entre -0,5 e 0,5 e $PPD \leq 10\%$, ou seja, categoria B. Enescu (2017) afirma que existe uma relação inversamente proporcional entre a uniformidade de um campo térmico em uma sala e o número de pessoas insatisfeitas. A partir do seu desenvolvimento o modelo preditivo (PMV/PPD) já foi aplicado em diferentes tipos de ambiente a fim de testar a sua aplicabilidade em relação ao voto térmico real (*Actual Mean Vote – AMV*) ou, como também é denominado, voto de sensação térmica (*Thermal Sensation Vote – TSV*). A tabela 5 mostra alguns exemplos dessa comparação entre o PMV e o AMV, levando em consideração o tipo de ambiente.

Tabela 5 – Estudos que comparam o PMV com a resposta real

Referência	Ambiente	PMV x AMV	
		Superestimou	Subestimou
Hwang et al. (2007)	Hospital	x	
Yau e Chew (2009)	Hospital	x	
Teli et al. (2012)	Salas de aula		x
Azizpour; Moghimi; Lim; et al. (2013)	Hospital		x
Azizpour; Moghimi; Salleh; et al. (2013)	Hospital		x
Maiti (2014)	Câmara climática	x	
Van Gaever et al. (2014)	Hospital	x	
Hussin et al. (2015)	Mesquita		x
Wang e Hu (2016)	Câmara climática	x	
Rupp et al. (2017)	Escritório	x	
Jing et al. (2019)	Salas de aula	x	
Fabbri et al. (2019)	Hospital		x
Brodav e Xavier (2020)	Escritório	x	

Fonte: Elaboração própria

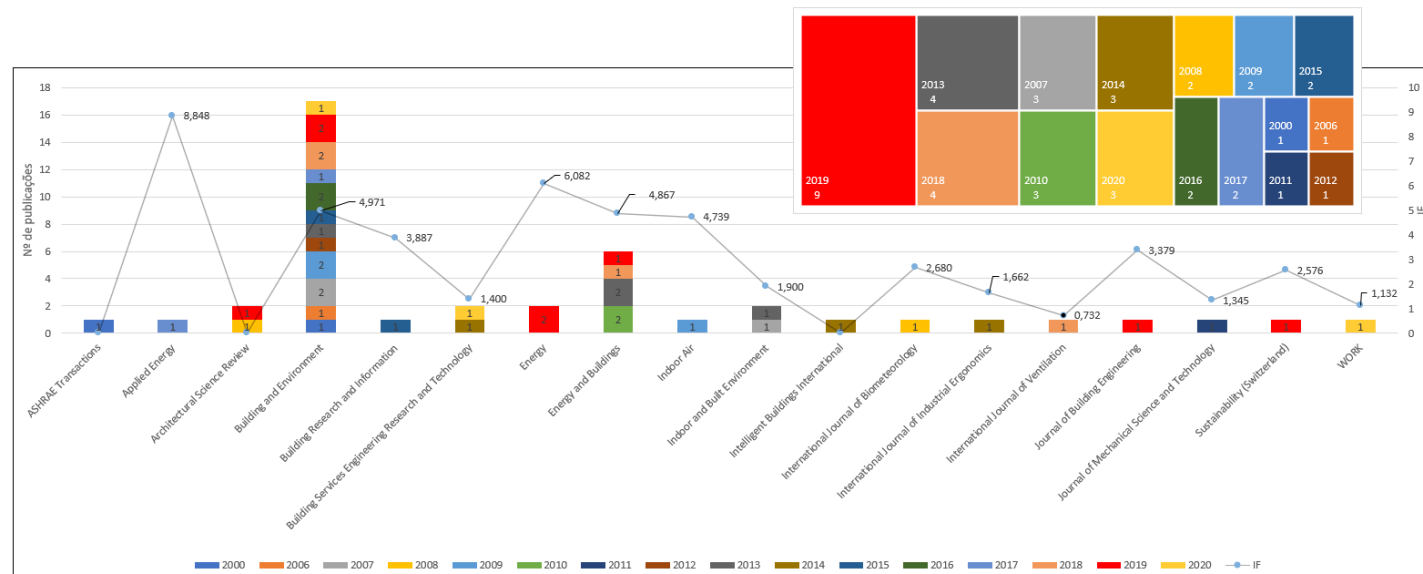
Dos estudos elencados percebe-se que, apesar dos variados tipos de ambiente, sendo trabalho até mesmo em câmaras climáticas, O PMV superestimou o AMV em oito estudos. Em cinco estudos o PMV subestimou o voto de sensação térmicas dos participantes da pesquisa.

Segundo Humphreys e Nicol (2002), o modelo do PMV não considera as ações adaptativas que as pessoas realizam em ambientes internos para manter seu conforto, levando o PMV a subestimar ou superestimar a real sensação térmica sentida pelas pessoas nos ambientes, sendo então fundamental realização de pesquisas de campo para determinar os parâmetros reais de conforto e ajuste do ambiente térmico.

2.4 PANORAMA CIENTÍFICO DAS PUBLICAÇÕES

Para compor o panorama científico foram identificados 43 artigos que focam na união das temáticas entre conforto térmico e zonas de conforto térmico. A figura 3 trata do número de estudos publicados por revistas, representadas por barras verticais, seguido do fator de impacto (IF), aqui representado por linhas de cada um deles. O Fator de impacto utilizado para construção da figura foi obtido por meio do site da *Incites Journal Citation Reports Clarivate Analytics (2021)*. Além disso, a quantidade de documentos publicados em cada ano é mostrada junto com a legenda, em cores diferentes por ano de publicação.

Figura 3 – Número de publicações por ano, por periódico e fator de impacto



Fonte: Autoria própria.

A análise do mapa de árvore prova que a quantidade de artigos que tratam da temática aqui tratada apresenta um comportamento crescente sendo o ano de 2019 o que ostenta maior número de artigos com 9 publicações ao total.

Ao final da análise é percebido o seguinte cenário em relação aos principais editores de revistas: Elsevier (35%); Taylor and Francis Online (24%); SAGE Journals e Springer (12%); Wiley Online Library, MDPI e IOS PRESS (6%). As principais revistas são: *Building and Environment* e *Energy Buildings* com 18 e 6 artigos publicados, respectivamente.

Ao incluir os arquivos referentes aos artigos, as palavras-chave mais relevantes foram extraídas por meio de uma função de mineração de texto embutida no VOSviewer. Em seguida, foram eliminadas as palavras-chave não relacionadas, aqui tratados como: nomes de países, cidades e regiões, nomes de organizações, termos genéricos. As palavras repetitivas (formas no singular e plural e abreviatura e nome completo) foram unidas aplicando os arquivos de dicionário de sinônimos predefinidos pelo VOSviewer. Com a lista de palavras-chave, o programa gerou o mapa de coocorrência e agrupou as palavras-chave com base nas coocorrências. Duas palavras são definidas como coocorridas se aparecerem no mesmo documento. Dos 1178 termos, 64 atendem ao limite mínimo de 5 ocorrências e após a filtragem 28 itens restaram em 3 clusters identificados por 4 escala de cores diferentes apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Clusters

Clusters	Cor	Número de itens	Palavras
1	Vermelho	13	<i>Adaptive Model; Air Conditioning System; ASHRAE; Comfort; Energy; Energy consumption; Fanger; Heating; Indoor Temperature; Office Building; Person; PPD; Winter.</i>
2	Verde	8	<i>ASHRAE standard; ISO; Mean Vote; Preferred Temperature; Relative Humidity; Survey; Thermal Sensation Vote; TSV.</i>
3	Azul	7	<i>Adaptive Thermal Comfort; Air; Classroom; Field Survey; School; Student; Thermal Comfort Standard.</i>

Fonte: Autoria própria

A figura 4 mostra as relações entre as palavras que compõe os Clusters, identificando os 43 documentos que compõem o portfólio final da análise.

térmico deixaram de ser apenas ligadas ao aspecto de simplesmente oferecer conforto aos ocupantes e vem evoluindo para alcançar também a eficiência energética.

O termo “*adaptive thermal comfort*” mostra a inclinação das pesquisas em adotarem o conforto adaptativo em substituição ao modelo original de Fanger, visto a dificuldade do modelo original em prever com sucesso as respostas de ocupante em ambientes não controlado, já que o contexto climático, hábitos e expectativas em ambientes reais diferem daqueles encontrados em câmara climática Becker; Paciuik (2009) e Humphreys, Fergus e Nicol (2002).

2.5 PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED – PPD

Oseland (1995) relatou que existem discrepâncias significativas entre os valores de votos médios previstos (PMV) e votos médios reais (AMV) e entre os valores de PPD e APD obtidos em escritórios e residências, em comparação com estudos de câmara climática, atribuindo as diferenças aos efeitos contextuais. Han et al. (2007) explicam que os ambientes reais dificilmente podem ser replicados em câmaras climáticas, o que pode causar preocupações quando os padrões são aplicados a residentes que vivem em situações do mundo real. Assim, dados obtidos em estudos de campo traduzem o comportamento particular de uma amostra em determinado ambiente em relação ao conforto térmico e representam melhor suas preferências (SCHIAVON e MELIKOV, 2008).

Na tabela 7 são demonstradas todas as equações alternativas de percentual de insatisfeitos obtidas em estudos de campo baseadas no voto de sensação térmica real ou temperatura operativa. País, amostra, tipo de ventilação e percentual mínimo (PPDmin) também são destacados. Ao total 16 trabalhos são apresentados.

Tabela 7 – PPDs alternativos

Referência	País	Amostra	Tipo de Ventilação	PPD	PPDmin (%)
Mayer (2002)	Alemanha	n/e	n/e	$PPD = 100 - 84.3 \times e^{[0.01(PMV-0.4)^4 + 0.5479(PMV-0.4)^2]}$	16
Yoon et al. (1999)	China	n/e	n/e	$PPD = 11.37 \times PMV^2 + 18.34 \times PMV + 24.42$	18
Araújo e Araújo (1999)	Brasil	n/e	n/e	$PPD = 100 - 52.5 \times e^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)}$	47.5
Xavier e Lamberts (2000)	Brasil	1200 pontos de dados de sensação térmica pessoal	n/e	$I = 18.945 \times S^2 - 0.24 \times S + 25.41$	25.4
Wang (2006)	China	120 participantes	n/e	$PPD = 9,1706MTS^2 - 8,9396MTS + 9,6263$	7.5
Hwang et al. (2009a)	Taiwan	22 estudantes universitários	HVAC	$APD = 100 - 84 \exp[-0,00051 (TSV + 0,4)^2 - 0,1401 (TSV + 0,4)^2]$	16

Hwang et al. (2009b)	Taiwan	968 dados	HVAC	$PD = 100 - 91,1 \exp[-0,00367(TSV + 0,45)^2 - 0,11135(TSV + 0,45)^2]$	9
Hwang e Chen (2010)	China	87 Idosos	Livre	$PPD = 100 - 97 \exp(-0,3338MTSV^2 - 0,01972MTSV^4)$	3
Maiti (2014)	Índia	40 estudantes	HVAC	$PPD = 112,35953 - 107,395 \exp(-0,173587(tsv - 0,53175)^2)$	13.47
D'Ambrosio Alfano et al. (2013)	Itália	4000 alunos	NV	$PDacc = 100 - 85 \exp(-0,131 TSV^4 - 0,285 TSV^2)$	15
Yau e Chew (2014)	Malásia	293 funcionários	HVAC	$APD = 1.0931To^2 - 56.092To + 735.22$	n/e
Zhang et al. (2016)	Austrália	28 estudantes universitários	HVAC	$PPD = -0,0074TSV^3 + 0,1101TSV^2 + 0,0471TSV$	n/e
Piasecki et al. (2019)	Polônia	50 alunos	HVAC	$PD = 100 - 99,9 \exp(-0,0355PMV^4 - 0,242PMV^2)$	0
Chong et al. (2019)	China	110 estudantes universitários	HVAC	$PPD = 730.55 - 728.29 \exp(-0.025 TSV^2 + 0.003 TSV - 0.00009)$	2.26
Wu et al. (2019)	China	442 ocupantes	HVAC	$APD = 519 - 41,93To + 0,85To^2$	5
Broday e Xavier (2020)	Portugal	56 mulheres	HVAC	$APD = 100 - 67.8297 \exp(0.40454 AMV^4 - 1.51038AMV^2)$	52.31

n/e = não encontrado

Fonte: Autoria própria

A principal motivação que leva os estudos a proporem de novas curvas de PPD com base na porcentagem real de insatisfeitos (APD) é tentarem de alguma maneira corrigir o modelo de Fanger. Hwang et al. (2009a; 2009b) ao propor seu estudo lança uma dúvida sobre se o modelo PMV – PPD é ou não adequado para o calor e umidade de Taiwan. O mesmo ocorreu com os estudos de D'Ambrosio Alfano et al. (2013) para o clima mediterrâneo e Yau e Chew (2014) para climas quentes e úmidos.

Hwang e Chen (2010) foram motivados pela dúvida de que o modelo preditivo era qualificado para prever satisfatoriamente a resposta de um público específico, no caso idosos. Maiti (2014) fez o mesmo, quando testou se o PMV era ou não bom para os índios. Chong et al. (2019) testou se aclimação ao calor de curto prazo (*short-term heat acclimation*) era um método eficaz para aumentar a aceitação dos ocupantes a ambientes quentes. Zhang et al. (2016) testaram ciclos de temperatura induzidos por estratégias de controle de carga direta e propôs uma curva de insatisfeitos térmicos.

Piasecki et al. (2019) testou a confiabilidade do modelo de conforto térmico de Fanger por meio de um estudo de caso em um edifício de escritórios com energia quase zero (NZEB), enquanto Wu et al. (2019) avaliaram o potencial de economia de energia em 11 edifícios de escritórios com ar condicionado *split*.

Os maiores PPDmin (%) são os trabalhos de Araújo e Araújo (1999) e Broday e Xavier (2020) com 47.5 e 52.31 respectivamente. Ambos os autores adotaram a perspectiva de que somente aqueles participantes que votassem 0 na escala de 7 pontos estariam satisfeitos com o ambiente térmico. Apenas Hwang e Chen (2010) e D'Ambrosio Alfano et al. (2013) não realizaram seus estudos em ambientes com algum sistema HVAC.

Conhecer o percentual de insatisfeitos real é essencial para o dimensionamento correto dos sistemas HVAC. Ao se comparar as pontuações PMV e TSV é possível encontrar diferenças na temperatura operativa e calcular o melhor a TCZ para um determinado ambiente e conseqüentemente será possível uma redução no gasto energético por meio do ajuste correto do range de temperatura (AGHNIAEY e LAWRENCE, 2018).

2.6 THERMAL COMFORT ZONES – TCZ

Como o conforto térmico pode ser definido como a combinação do estado psicológico que expressa satisfação com o ambiente térmico e o balanço térmico neutro da temperatura do corpo como um todo, é muito difícil satisfazer a todos em um mesmo ambiente, pois existem grandes variações fisiológicas e psicológicas entre os indivíduos (FANGER, 1970). Por essa condição a norma ASHARE 55 (2013) afirma que as condições ambientais que resultam em conforto térmico não são as mesmas

para todos e preveem faixas de temperatura de conforto chamadas zonas de conforto térmico - TCZ.

A zona de conforto térmico em um ambiente é aquela em que a maioria das pessoas, devido a certas condições ambientais estará em conforto térmico, e trata-se de umas das estratégias mais relevante para a economia de energia (ZAVALA, 2013; KUMAR et al., 2016).

Normalmente, estas zonas preveem uma aceitabilidade de 80% pelos ocupantes, ou seja, 20% de insatisfeitos, consistindo em 10% de usuários termicamente insatisfeitos devido as condições fisiológicas mais um adicional de 10% de insatisfeitos devido ao desconforto localizado. Assim, a zona de conforto é definida pela combinação das seis variáveis de conforto térmico para as quais o PMV está dentro dos limites apresentados dentro da categoria B da tabela 4. Os padrões da ASHRAE (2017) determinam as zonas de conforto térmico para $PPD < 10\%$ e $-0,5 < PMV < 0,5$ seguindo a tabela 8.

Tabela 8 – TCZ padrão ASHRAE

	Zona de conforto térmico	Temperatura Operativa
Verão	20 – 23°C	22°C
Inverno	23 – 26°C	24,5°C

Fonte: ASHRAE (2017)

Para Djongyang et al. (2010) essas configurações de zona de conforto térmico foram assumidas para uma umidade relativa de 50%, uma velocidade do ar média inferior a 0,15 m/s, temperatura radiante média igual à temperatura do ar e uma taxa metabólica de 1,2met, o isolamento da roupa foi definido como 0,9 clo no inverno e 0,5 clo no verão. A tabela 9 a seguir resume as principais zonas de conforto térmico obtidas nos últimos anos em estudos de campo,, todos os valores incluídos foram calculados tendo como base a categoria B da ISO 7730 (80% de aceitabilidade térmica). A tabela 9 categorizou os trabalhos de acordo com o país onde o estudo foi realizado; Clima; estação do ano; tipo de construção; tipo de ventilação, sendo: NV – Naturalmente ventilado, HVAC ou ambos; Amostra; TCZ e Temperatura neutra.

Tabela 9 – TCZ alternativas

(continua)

Referência	País	Clima	Estação	Tipo de Construção	Tipo de Ventilação	Amostra	TCZ calculada (°C)	Temperatura Neutra (°C)
Karyono (2000)	Indonésia	clima tropical quente-úmido	n/e	Escritório	HVAC e NV	596 trabalhadores (19 - 53 anos)	23.5 - 29.9	26.7
Wang (2006)	China	frio e seco	Inverno	Edifícios Residenciais	n/e	120 sujeitos (14 - 80 anos)	18.0 - 25.5	20.9(H) 21.9 (M)
Han et al. (2007)	China	clima quente-úmido	Verão	Edifícios Residenciais	HVAC e NV	111 sujeitos (média 41.8 anos)	22.0 - 25.9	28.6
Zhang et al. (2007)	China	continental subtropical	Primavera	Salas de aula	NV	1273 alunos (média de 20 anos)	17.0 - 30.0	21.5
Mui e Wong (2007)	China	climas subtropicais	Verão e Inverno	Escritório	HVAC	422 sujeitos	22.5 - 24.7 (verão) 20.2 - 23.6 (inverno)	23.6 (verão) 21.4(inverno)
Yang e Zhang (2008)	China	clima subtropical úmido	Verão	Edifícios	HVAC e NV	229 ocupantes	25.0 - 31.6 (NV) 25.1 - 30.3 (HVAC)	28.3 (NV) 27.7 (HVAC)
Karyono (2008)	Indonésia	tropical quente-úmido	n/e	Salas de aula	NV	20 alunos	23.9 - 27.0	25.4
Hwang et al. (2009a)	Taiwan	clima quente-úmido	n/e	Câmara de laboratório	HVAC	22 estudantes universitários	23.0 - 28.0	n/e
Hwang et al. (2009b)	Taiwan	clima quente-úmido	n/e	Locais de trabalho e residências	HVAC	968 dados	20.4 - 28.4	25.9

Tabela 9 – TCZ alternativas

(continua)

Referência	País	Clima	Estação	Tipo de Construção	Tipo de Ventilação	Amostra	TCZ calculada (°C)	Temperatura Neutra (°C)
Indraganti (2010)	Índia	Clima composto	Verão e Monções	Edifícios de apartamentos de médio porte	NV	113 ocupantes (média 42 anos)	26.0 - 32.5	29.2
Indraganti e Rao (2010)	Índia	clima quente e seco	Verão	Edifícios residenciais	NV	113 ocupantes (17 - 69 anos)	27.3 - 33.1	30.2
Hwang e Chen (2010)	China	n/e	Verão e Inverno	Residências	HVAC e NV	87 Idosos (média 71 anos)	23.2 - 27.1 (verão)	25.2 (verão) 23.2 (inverno)
Jung et al. (2011)	Korea	clima temperado oceânico.	Primavera e Outono	Salas de aula	n/e	962 alunos (média 24.3 anos)	17.0 - 25.0	n/e
Ricciardi e Buratti (2012)	Itália	n/e	Verão e Inverno	Escritórios	HVAC	145 sujeitos	21.5 - 24.5	n/e
Yang, L. et al. (2013)	China	Frio	Verão e Inverno	Edifícios residenciais	n/e	76 sujeitos	13.6 - 32.4	18.9 (Inverno) 23.3 (Verão)
Azizpour; Moghimi; Salleh; et al. (2013)	Malásia	Tropical	n/e	Hospital	n/e	188 sujeitos	21.2 - 25.5	23.4
Yau et al. (2013)	Malásia	Tropical	n/e	Museu	HVAC	28 sujeitos (média 23.71 anos)	18.0 - 22.0	22.5
Yau e Chew (2014)	Malásia	Quente e úmido	n/e	Hospital	HVAC	293 funcionários	19.2 – 28.5	23.8
Maiti (2014)	Índia	n/e	n/e	sala de conferências e sala de laboratório	HVAC	40 estudantes	23.25 - 27.18	24.83

Tabela 9 – TCZ alternativas

(continua)

Referência	País	Clima	Estação	Tipo de Construção	Tipo de Ventilação	Amostra	TCZ calculada (°C)	Temperatura Neutra (°C)
Yang et al. (2014)	China	Subtropicais	Verão	Espaços urbanos	NV	2089 sujeitos (média 25,7 anos)	25.3 - 32.3	28.6
Mishra e Ramgopal (2015)	Índia	Quente e úmido.	Outono e Primavera	Salas de aula	NV	82 alunos	22.1 - 31.5	29.0
Referência	País	Clima	Estação	Tipo de Construção	Tipo de Ventilação	Amostra	TCZ calculada (°C)	Temperatura Neutra (°C)
De Dear et al. (2015)	Austrália	clima subtropical	Verão	Salas de aula	HVAC NV	2850 alunos	19.5 - 26.6	22.5
Thapa et al. (2016)	Índia	úmido subtropical (1) and frio e nublado (2)	Ano todo	Universidades	NV	325 sujeitos (média de 20.3 anos)	12.5 - 32.3	29.7 (1) 21.2 (2)
Nematchoua et al. (2017)	Madagascar	Tropical	n/e	Hospitais, Shopping e escolar	HVAC	1092 pessoas	22.9 - 27.2	n/e
Ryu et al. (2017)	South Korea	n/e	Verão	Apartamentos	HVAC	50 ocupantes	24.7 – 28.3	n/e
Jindal (2018)	Índia	monção quente de verão com inverno seco	Monção e Inverno	Salas de aula	NV	130 alunos	15.3 – 33.7	27.1
Udrea et al. (2018)	Romênia	clima continental temperado	n/e	Escritórios e residências	NV	738 pessoas	22.6 – 26.0	n/e
Wu et al. (2018)	China	Verão Quente e Inverno Quente	Verão, Outono e Inverno	Escritório	HVAC	656 questionários	22.1 – 29.6	23.3

Tabela 9 – TCZ alternativas

(conclusão)

Referência	País	Clima	Estação	Tipo de Construção	Tipo de Ventilação	Amostra	TCZ calculada (°C)	Temperatura Neutra (°C)
Fang et al. (2018)	Hong Kong	Clima Subtropical Úmido	Verão	Salas de aula	HVAC	982 alunos (média 21.3 anos)	21.56 – 26.75	24.0
Jindal (2019)	Índia	clima composto	Verão e Inverno	Salas de aula	NV	1.890 estudantes (10 – 18 anos)	16.0 – 33.7	28.2 (Verão) 19.4 (Inverno)
García et al. (2019)	Colômbia	tropical frio	n/e	Escritório	NV	72 pessoas	19.97 – 26.9	23.47
Liu et al. (2019)	China	Frio	Inverno	Salas de aula	NV	992 estudantes universitários	19.5 – 21.8	20.6
Kumar et al. (2019)	Índia	Monções	n/e	Hotel	NV	470 sujeitos	27.2 – 31.0	29.9
Wu et al. (2019 ^a)	China	quente e úmida	Verão	Dormitórios	NV	465 sujeitos	25.0 – 28.7	26.2
Aghniaey et al. (2019)	USA	Subtropical úmido	Verão	Salas de aula	HVAC	496 alunos	22.0 – 24.5	23.5
Jiang et al. (2020)	China	Semiáridos frios e desérticos frios	Inverno	Salas de aula	HVAC e NV	1206 alunos	13.0 – 18.0	14.2
Chong et al. (2019)	China	n/e	Verão	Câmara climática	HVAC	110 estudantes universitários	23.5 – 29.1	n/e
Wu et al. (2019 ^b)	China	zona quente de verão e zona fria de inverno (HSCW)	Verão	Office	HVAC	442 ocupantes	24.6 – 28.6	26.7
Munonye; Ji (2020)	Nigéria	Tropical	n/e	Escola primária	NV	330 crianças (7 – 12 anos)	25.2 – 32.3	28.8
Brodav e Xavier (2020)	Portugal	n/e	Inverno	Escritório	HVAC	48 mulheres	19.61 – 22.61	21.1

Nota: n/e = não encontrado

Fonte: Autoria Própria

As faixas de temperatura apresentadas contam com limites inferiores e superiores, bem como amplitude, calculadas de acordo com as características do local e amostra para o qual foi calculada. E podem ser comparadas com os limites normativos para fins de comparação e assim encontrar a potencial economia de energia.

Em relação a temperatura de conforto apenas o trabalho de Indraganti e Rao (2010), mostra um valor maior que 30°C como pressuposto pela ISO 7730 (2005). Os autores encontraram uma temperatura de conforto de 30.2°C. Os demais todos estão abaixo dessa temperatura.

Karyono (2000) realizou um estudo de campo sobre conforto térmico e energia de construção na Indonésia, ainda no 2000, o estudo revela que as condições de conforto podem ser alcançadas sem refrigeração desnecessária em edifícios com ar condicionado, por meio do calcula de TCZ. Esta pesquisa demonstra que a preocupação com a economia de energia não é recente em estudos da área.

De acordo com os estudos presentes na tabela 9 a maior parte (87.5%) foram realizados em clima quente e 12.5% em climas frios. Jiang et al. (2020) foram motivados a descobrir a TCZ de alunos em salas de aula no inverno da China. Os autores encontraram um limite superior da temperatura confortável com 3°C inferior ao limite inferior da norma internacional recomendada atual no inverno, implicando em uma potencial economia de energia com sistemas de aquecimento.

Munonye e Ji (2020), na Nigéria, buscando avaliar a percepção térmica de crianças de 7 a 12 anos. De acordo com a faixa de temperatura encontrada, as crianças demonstraram tolerância a altas temperaturas. Os autores sugeriram que a instalação de ar condicionado em escolas primárias estudadas não eram necessárias, pois pode levar ao consumo desnecessário de energia e emissão de carbono.

Conhecer a temperatura de conforto de um ambiente para um grupo de pessoas, é utilizado para possivelmente consumir menos energia, pois projeta-se o ambiente onde o grupo sintam-se confortável, não recorrendo assim ao HVAC (RYU et al., 2017). Destacando assim a importância de conhecer o real número de insatisfeitos.

Um dos métodos para a proposição de faixas de conforto é baseado nas análises estatísticas tipo *probit* ou *normit* (BALLANTYNE et al., 1977). O *probit* é um modelo de estimação oriundo da curva de distribuição normal de frequências. Este

tipo de análise é indicado para conjuntos de dados compostos por variáveis dependentes dicotômicas, ou seja, do tipo que assumam apenas dois valores, do tipo sim ou não, ter ou não ter, confortável ou não confortável.

Para trabalhos de conforto térmico as curvas *probit* são construídas levando-se em consideração os insatisfeitos com o ambiente, seja por frio ou por calor. Esse método foi utilizado por exemplo em: Nicol e Humphreys (2007); Toe e Kubota (2013); Hwang et al. (2009a); Hwang et al. (2009b); Wu et al. (2019b) e Broday e Xavier (2020).

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIAÇÃO E OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS E DEFINIÇÃO DA AMOSTRA

Conforme descrito na seção 2.2, existem seis variáveis que atuam diretamente na determinação do conforto térmico segundo o modelo do balanço térmico e que foram coletadas para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo estas: ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, umidade relativa do ar e velocidade do ar) e pessoais (taxa metabólica e isolamento térmico das roupas). Para a coleta das variáveis ambientais foi utilizado Confortímetro Sensu®. A figura 6, mostra em detalhes o equipamento.

Figura 6 - Confortímetro Sensu



Fonte: Autoria própria

O Confortímetro consegue medir as variáveis ambientais do conforto térmico em termos de: graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) para temperatura do ar (t_{ar}) e temperatura radiante média (t_{rm}); metros por segundo (m/s) para velocidade do ar (v_{ar}) e porcentagem (%) para umidade relativa do ar (UR).

A obtenção das variáveis pessoais se deu da seguinte forma: a taxa metabólica (M) foi determinada com base na ISO 8996 (2004) como 1,2met, valor característico de atividades sedentárias, típica de estudantes. Para a coleta do isolamento térmico das roupas (clo) dos alunos foi aplicado um questionário, baseado

na ISO 9920 (2007), onde o participante assinalava todas as peças de roupa que estava usando no momento da coleta, sendo possível determinar a variável por se tratar de valores tabelados. Por meio do questionário também foi possível coletar a Sensação e Preferência Térmica dos participantes e outras variáveis para caracterizar a amostra como: sexo, idade, altura, massa.

As variáveis do conforto térmico foram utilizadas para determinar os valores de PMV e PPD. A Sensação térmica de cada indivíduo, nesta pesquisa denominada de AMV, bem como a Preferência térmica, foram utilizadas para determinar o percentual real de insatisfeitos térmicos (APD) e conseqüentemente as zonas de conforto térmico. O questionário utilizado nesta pesquisa encontra-se disponível no Apêndice A.

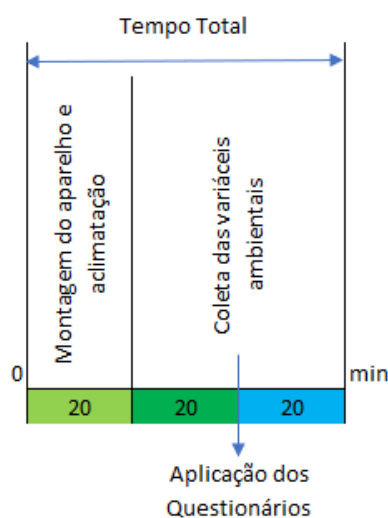
O local escolhido para a realização das medições necessárias para a pesquisa foram as salas de aula da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa. A cidade possui clima temperado oceânico. A população definida para a pesquisa foram os alunos dos cursos de graduação devidamente matriculados na UTFPR. Tendo como amostra, não probabilística, 481 alunos que participaram de 17 medições (a serem definidas na seção 3.2) em salas de aula, relacionadas ao levantamento das variáveis ambientais e pessoais do conforto térmico durante o inverno de 2019. Durante a pesquisa não foi aplicado nenhum critério de exclusão e a não participação na pesquisa ficou a juízo do aluno.

3.2 DESENHO EXPERIMENTAL DAS MEDIÇÕES

Cada coleta de dados teve duração de 1 hora por medição em sala de aula, podendo o pesquisador coletar dados em mais de 1 sala de aula por dia, decisão que ficou por conta da disponibilidade tanto do pesquisador como dos professores ministrantes das aulas. O tempo total de medição (1h) foi dividido da seguinte forma: (a) Antes de se iniciar as medições, o aparelho foi montado para entrar em equilíbrio térmico com o ambiente 20 minutos antes do início da coleta das variáveis ambientais. O aparelho foi montado de acordo com as recomendações da ISO 7726 (1998) que trata sobre “Ergonomia do ambiente térmico – Instrumentos para medir quantidades físicas”: 0,6m de distância do solo devido a posição sentada em que se encontram os alunos.

(b) A medição para coleta das variáveis ambientais foi de 40 min. Após transcorrido 20 minutos do início da medição (metade do tempo de coleta) foram aplicados aos alunos os questionários para levantamento do isolamento térmico das roupas e sobre: sensação, avaliação e preferência térmica. A figura 7 a seguir traz o desenho experimental do protocolo de coleta de dados.

Figura 7 - Desenho Experimental



Fonte: Autoria própria

O Confortímetro Sensu® foi programado para coletar as referidas variáveis ambientais a cada 1 minuto ao longo dos 40 minutos de coleta, assim totalizando 40 leituras ambientais por medição. Não houve intervenção direta do pesquisador durante os levantamentos e qualquer alteração no ambiente, a fim de regular a temperatura local, como abrir/fechar janelas, partiu dos próprios participantes.

3.3 PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE DADOS

3.3.1 Análise estatística dos dados

O processo de tratamento e análise dos dados consistiu inicialmente da tabulação e organização das informações obtidas no procedimento de coleta dos dados com o auxílio de planilha eletrônica do software MS Excel®. Posteriormente, foi

utilizado o software STATISTICA® para efeitos dos cálculos estatísticos e plotagem dos gráficos.

No tocante a análise dos dados, esta pesquisa buscou analisar sob duas perspectivas estatística: a descritiva e inferencial. A estatística descritiva são procedimentos estatísticos utilizados para resumir, organizar e simplificar os dados (GRAVETTER e WALLNAU, 2016) e possui várias técnicas dentre as quais se destacam a Análise Exploratória de Dados – AED, que tem a flexibilidade para responder aos padrões revelados na análise preliminar dos dados, utilizando técnicas gráficas e informações tabulares (COOPER e SCHINDLER, 2014).

Para o presente trabalho foi utilizado a abordagem AED onde tenta-se obter dos dados a maior quantidade possível de informação, que indique modelos plausíveis a serem utilizados posteriormente na inferência estatística (MORETTIN e BUSSAB, 2017). A inferência estatística, por sua vez, possui o objetivo de extrair conclusões sobre as condições que existem em uma população, estudando uma amostra tirada desta população (TRIOLA, 2006).

Realizou-se, assim, a análise descritiva dos dados. Com base nestes valores foi possível comparar PMV e AMV, de modo a averiguar possíveis discrepâncias.

3.3.2 Análise da temperatura de conforto por meio do AMV

Segundo Yang, W. et al. (2013) a temperatura de conforto ou de neutralidade térmica é geralmente determinada pela análise da relação entre a sensação térmica (AMV) e a temperatura operativa (T_{op}). Kazkaz e Pavelek (2013) definem temperatura operativa como a “temperatura uniforme de um invólucro radiantemente preto no qual um ocupante trocaria a mesma quantidade de calor por radiação e convecção como no ambiente não uniforme atual” e pode ser obtida pela média aritmética entre a temperatura do ar (t_{ar}) e a temperatura radiante média (t_{rm}).

Para a obtenção da temperatura de conforto por meio da sensação térmica real utilizou-se o modelo de regressão linear entre o AMV e a temperatura operativa (T_{op}) neste trabalho. Assim, foi possível determinar o valor da T_{op} em função do AMV para fins comparativos com outros trabalhos que fizeram o mesmo cálculo.

3.3.3 Metodologia para predição dos APD

Esta pesquisa buscou relacionar o desconforto térmico, por meio da variável APD, com as variáveis supracitadas dos parâmetros do conforto térmico. Esta análise ocorreu por meio da construção de modelos de regressão para verificação a relação entre essas variáveis propostas. Por último, foi verificada a discrepância entre o PMV/PPD calculado com o real questionado junto aos alunos quando os mesmos respondem quanto a sua sensação e avaliação térmica.

A predição de porcentagem de insatisfação real (APD) em cada medição foi calculada, levando-se em consideração a escala de sete pontos da sensação térmica da ISO 7730 (2005) de acordo com 3 métodos diferentes assim detalhadas na tabela 10:

Tabela 10 – Métodos para o cálculo de cada APD

Perspectiva para cada APD	Votos de Satisfação	Votos de Insatisfação	Referência
APD_1	0	-3,-2,-1,1,2 e 3	Araújo e Araújo (1999)
APD_2	-1, 0 e 1	-3,-2,2 e 3	Categoria B (ISO 7730, 2005)
APD_3	-1 e 1 (considerando voto 0 na escala de preferência térmica) e 0	-1 e 1 (considerando voto diferente de 0 na escala de preferência térmica); -3, -2, 2 e 3	Proposto nesta pesquisa utilizando a ISO 10551 (1995)

Fonte: Autoria própria

Para efeito de esclarecimento tem-se o seguinte exemplo para o cálculo do APD_1: se em uma dada medição existem 5 pessoas ocupando o ambiente e todas elas votam na escala de sensação térmica diferente de 0 (neutro), existe 100% de pessoas insatisfeitas; se em um ambiente existem 5 pessoas e quatro votam pela neutralidade, mas uma pessoa votar diferente de 0, existe neste ambiente 20% de pessoas insatisfeitas.

Após a obtenção da porcentagem verificada de pessoas insatisfeitas de acordo com as 3 perspectivas apresentadas, foi realizado um ajuste não linear, similar à do modelo do PMV/PPD, para a predição das pessoas insatisfeitas, conforme equação 9:

$$APD = 100 - a * \exp(-b(AMV)^4 - c(AMV)^2) \quad 9$$

Em que:

APD = *Actual Percentage of Dissatisfied*.

AMV = *Actual Mean Vote*.

“a”, “b” e “c” = coeficientes de ajuste.

Verifica-se, por meio da equação 9, que o ajuste não linear fornece a quantidade de insatisfeitos reais no ambiente térmico (APD) para cada valor de AMV inserido.

3.3.4 Preposição das Zonas de Conforto Térmico

Para a proposição das 3 faixas de conforto, foram utilizadas análises estatísticas tipo *probit*. O *probit* é um modelo de estimação oriundo da curva de distribuição normal de frequências. É o mais apropriado para análises de variáveis dependentes dicotômicas, ou seja, que assumam apenas dois valores, do tipo sim ou não, ter ou não ter, entre outras (XAVIER, 2000).

As curvas *probit* desta pesquisa foram construídas levando-se em consideração os insatisfeitos térmicos por frio ou por calor para com o ambiente. Para isso foi utilizada uma linha de corte determinado de acordo com a categoria B da ISO 7730 (2005): $-0.5 < PMV < +0.5$. Para se chegar ao número de insatisfeitos por calor e por frio seguiu-se a seguinte lógica de acordo com o APD.

- APD_1: insatisfeito por calor votos em +3, +2 e +1; insatisfeito por frio são os votos em -3, -2 e -1;
- APD_2: insatisfeitos por calor votos em +3 e +2; insatisfeitos por frio são votos em -3 e -2;
- APD_3: insatisfeito por calor votos em +3, +2 e se o indivíduo votar em +1 e ao mesmo tempo votar diferente de 0 na escala de preferência térmica; insatisfeitos por frio são votos em -3, -2 e se o indivíduo votar em -1 e ao mesmo tempo votar diferente de 0 na escala de preferência térmica.

Assim, ao substituir o valor de $AMV = 0.5$ na equação de cada APD, derivada da equação 9, determinou-se o seu valor corte. Caso, o percentual de insatisfeitos por calor ou frio fosse maior ou igual ao valor encontrado atribuía-se o número 1 a variável dicotômica, caso o percentual fosse menor atribuía-se o dígito 0 a variável dicotômica.

Assim, para cada uma das 3 situações foi possível construir duas curvas: uma curva que representa os insatisfeitos com o ambiente por frio (aqui representada graficamente pela cor azul) e outra curva que representa os insatisfeitos com o ambiente por calor (aqui representada graficamente pela cor vermelho). Em ambos os casos, para construção do gráfico a variável relacionada com o APD foi a temperatura operativa (T_{op}).

Esses limites serão aqueles que façam com que a percentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente fique no interior da faixa de conforto, ou seja, os valores de APD, para os quais a expressão mostrada na equação 9 forneçam valores para AMV entre +0,5 e -0,5, o que pelo modelo do PMV/PPD, representariam a faixa de aceitabilidade térmica ($PPD < 10\%$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE INICIAL DOS DADOS

Ao todo 481 questionários foram respondidos em 17 medições realizadas durante o inverno de 2019. A amostra total de estudantes que participaram da pesquisa está discriminada na tabela 11.

Tabela 11 – Estatística descritiva da amostra

Masculino: 346 Feminino: 135	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Idade (anos)	22,03	2,86	17	32
Altura (cm)	174,05	8,64	152	196
Massa corporal (Kg)	74,24	15,29	42	130

Fonte: Autoria própria

A tabela 12 traz de forma detalhada a média das variáveis coletadas: Temperatura do ar (T_{ar}), Temperatura radiante média (T_{rm}), Velocidade do ar (V_{ar}), Umidade relativa (UR), Metabolismo (M), Isolamentos Térmico das roupas (Icl), bem como os valores de AMV, PMV, PPD, APD (1;2 e 3) por medição.

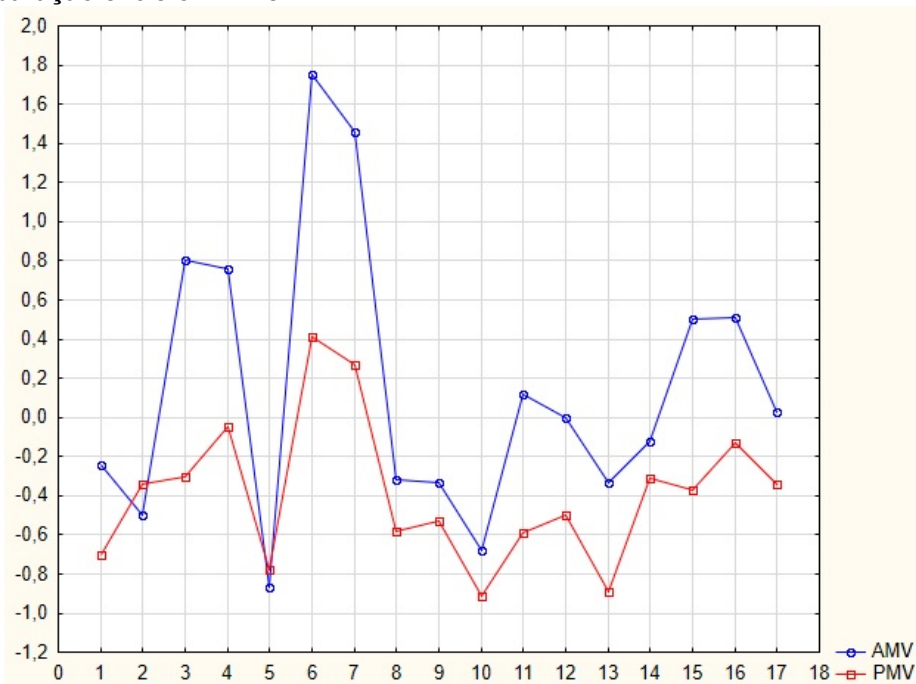
Tabela 12 – Resultado das medições

Medição	T_{ar} (°C)	T_{rm} (°C)	T_{op} (°C)	V_{ar} (m/s)	UR (%)	M (met)	Icl (clo)	AMV	PMV	PPD	APD		
											APD_1	APD_2	APD_3
1	19,73	20,12	19,93	0,03	61,91	1,2	0,77	-0,2	-0,7	15%	29,41%	11,76%	23,53%
2	20,41	20,48	20,45	0,04	61,41	1,2	0,9	-0,5	-0,3	7%	45,83%	4,17%	37,50%
3	21,71	21,64	21,68	0,04	69,44	1,2	0,72	0,8	-0,3	7%	73,33%	13,33%	53,33%
4	23,98	24,14	24,06	0,06	57,47	1,2	0,55	0,76	-0,1	5%	60,61%	18,18%	39,39%
5	17,77	17,81	17,79	0,03	64,01	1,2	0,98	-0,9	-0,8	18%	46,67%	20,00%	46,67%
6	28,26	27,67	27,97	0,15	40,03	1,2	0,38	1,75	0,41	9%	93,75%	62,50%	93,75%
7	27,52	26,89	27,21	0,12	37,55	1,2	0,38	1,46	0,27	7%	100,00%	38,46%	84,62%
8	19,44	19,13	19,29	0,03	66,79	1,2	0,89	-0,3	-0,6	12%	52,63%	2,63%	34,21%
9	19,12	19,12	19,12	0,03	59,62	1,2	0,96	-0,3	-0,5	11%	59,62%	7,69%	42,31%
10	17,95	17,69	17,82	0,04	66,76	1,2	0,9	-0,7	-0,9	23%	58,82%	11,76%	52,94%
11	20,66	20,52	20,59	0,08	65,75	1,2	0,73	0,12	-0,6	12%	58,82%	0,00%	41,18%
12	20,64	21,14	20,89	0,06	61,63	1,2	0,75	0	-0,5	10%	36,36%	0,00%	25,00%
13	18,47	18,38	18,43	0,07	68,13	1,2	0,84	-0,3	-0,9	22%	56,41%	7,69%	43,69%
14	19,89	19,81	19,85	0,04	60,34	1,2	1	-0,1	-0,3	7%	27,27%	3,03%	24,24%
15	23,29	23,17	23,23	0,08	60,15	1,2	0,51	0,5	-0,4	8%	58,33%	0,00%	58,33%
16	22,73	23,01	22,87	0,06	62,06	1,2	0,67	0,51	-0,1	5%	48,65%	2,70%	40,54%
17	21,21	21,21	21,21	0,03	61,39	1,2	0,78	0,03	-0,3	7%	33,33%	3,33%	26,67%

Fonte: Autoria própria

Os valores de T_{ar} e T_{rm} foram posteriormente combinados para gerar os valores de Temperatura Operativa (T_{op}). Nota-se que os valores de “M” são fixos para todas as 17 medições, pois trata-se de valores tabelados (ISO 8996/2004) por atividade desempenhada, no caso atividade tipo sedentária. Os valores de I_{cl} e AMV foram obtidos por meio do questionário aplicado, já os valores de PMV, PPD e APD (1,2 e 3) foram calculados. A figura 8, mostra a comparação entre o AMV, obtido e os valores de PMV calculados a partir do levantamento.

Figura 8 – Comparação entre o AMV e PMV



Fonte: Autoria própria

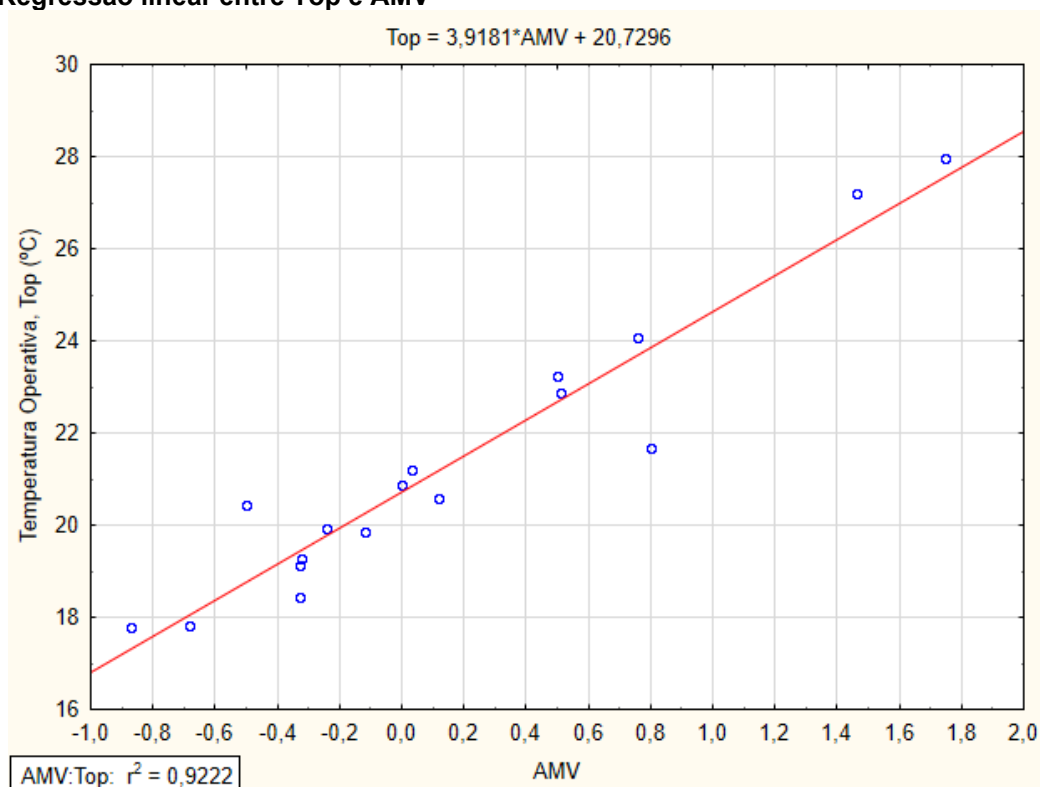
Percebe-se que em 15 das 17 medições o PMV subestima o valor real de AMV, apenas em 2 medições o contrário ocorre. Sendo assim, para essa pesquisa pode-se afirmar que de maneira geral o PMV subestimou o voto de sensação térmica real relatado pelos participantes.

Esse comportamento se repetiu igualmente na pesquisa de Azizpour; Moghimi; Lim; et al. (2013) e Azizpour; Moghimi; Salleh; et al. (2013) e Teli et al. (2012) realizadas em hospitais, Fabbri et al. (2019) em salas de aula e Hussin et al. (2015) em mesquitas.

4.2 ANÁLISE DA TEMPERATURA DE CONFORTO POR MEIO DO AMV

Por meio da análise de regressão linear entre a T_{op} e o AMV foi possível determinar a relação entre as variáveis. A figura 9 mostra o graficamente a equação gerada, bem como o R^2 .

Figura 9 – Regressão linear entre Top e AMV



Fonte: Autoria própria

A equação 10 representa a regressão linear:

$$T_{op} = 3,9181 * AMV + 20,7296$$

10

Para gerar a TCZ por meio da análise de regressão entre a T_{op} e AMV foi preciso substituir o valor de -0,5 e 0,5 (que correspondem aos valores de AMV para a categoria B da ISO 7730 (2005)). O que gerou uma TCZ de 18,77°C – 22,69°C com amplitude de 3,92°C. A tabela 13 traz resumidamente outros estudos que também relacionaram o AMV e T_{op} . Vale ressaltar que alguns autores, em vez de usar o termo

Voto Médio Real (AMV), usaram voto de sensação térmica (TSV), no entanto essas terminologias são equivalentes.

Tabela 13 – Relação entre Top e AMV

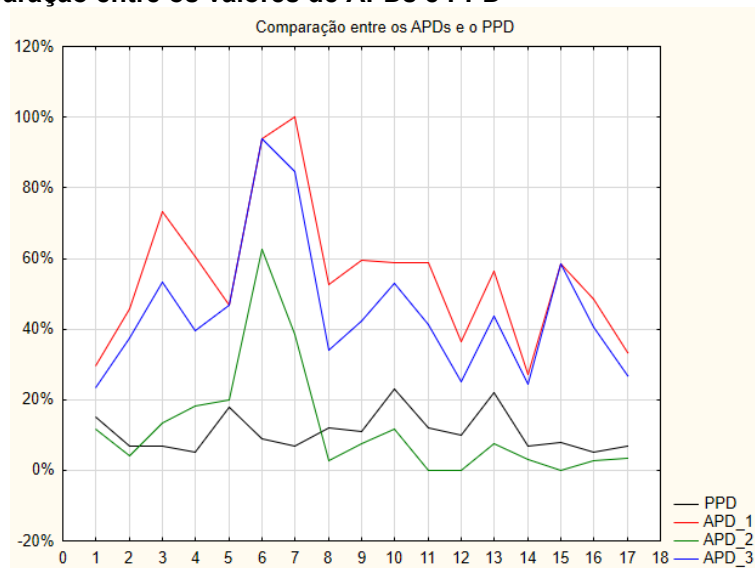
Referência	Equação	T _{op} neutra (°C)	Tipo de ambiente
Zhang et al. (2007)	$TSV = 0.0448 * Top - 0.9628$	21,5	Salas de aula
Al-ajmi (2010)	$AMV = 0.1334 * Top - 3.48$	26,08	Mesquitas
Teli et al. (2012)	$TSV = 0.26 * Top - 5.68$	21,84	Salas de aula
Mustapa et al. (2016)	$TSV = 0.491 * Top - 13.1$	26,68	Escritórios
Brodav e Xavier (2020)	$AMV = 1.4316 * Top - 30.62$	21,39	Escritórios
Esta pesquisa	$AMV = 0,2354 * Top - 4,8675$	20,73	Salas de aula

Fonte: Autoria própria

De maneira geral este estudo encontrou a menor temperatura operativa neutra dentre os estudos citados, por meio da relação linear entre T_{op} e AMV. Para comparação todos os estudos realizados em salas de aula foram ambientes naturalmente ventilados. Zhang et al (2007) realizaram seu estudo em uma universidade chinesa com público adulto, assim como ocorreu neste trabalho. O estudo de Teli et al. (2012) foi o que gerou uma equação mais próxima da aqui apresentada, apesar de ser realizado com crianças entre 7 e 11 anos na Inglaterra durante o verão. Os autores utilizaram uma abordagem baseada nas orientações da construção do edifício para verificar seu impacto na sensação de conforto.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS APD

A figura 10 mostra um gráfico comparativo entre os valores do PPD calculado e dos APDs resultantes da aplicação do questionário nas 17 medições realizadas em campo.

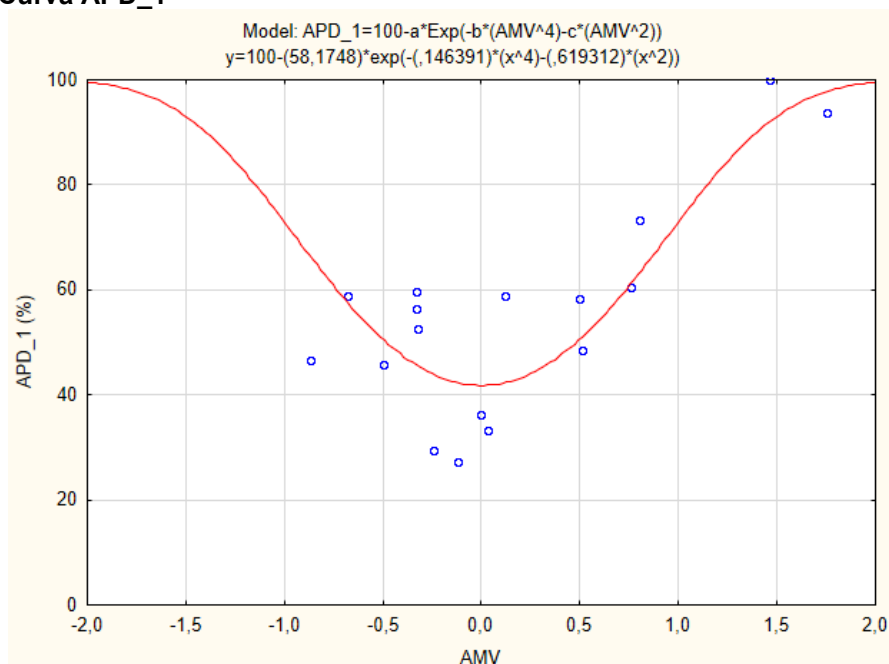
Figura 10 – Comparação entre os valores de APDs e PPD

Fonte: Autoria própria

Nota-se que o valor de APD_1 é quase sempre superior aos demais, esse comportamento já era esperado já que a perspectiva 1 é a mais rígida e considera satisfeito apenas o indivíduo que votou 0 na escala de sensação térmica. Assim, naturalmente o nível de insatisfação tende a ser maior. Seguindo essa linha de pensamento, o comportamento do valor índice APD_2, como esperado, foi sempre o menor entre os APDs, visto que tem a perspectiva mais “relaxado” dentre eles. O APD_3 se manteve sempre intermediário, mas tendendo a uma proximidade maior ao APD_1, chegando a igualar valores.

A partir desses valores foi possível determinar as curvas de cada APD em comparação ao valor de AMV com base na curva original de PPD. A figura 11 mostra a curva para o APD_1.

Figura 11 – Curva APD_1



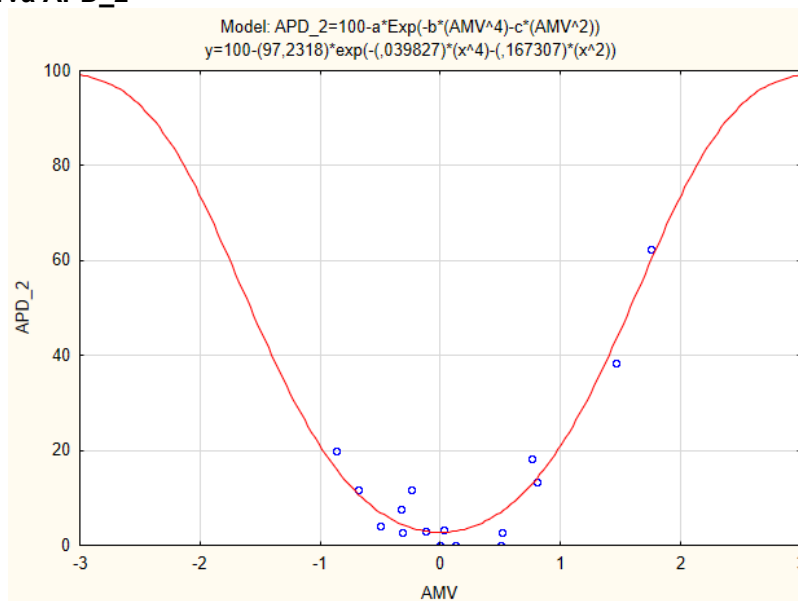
Fonte: Autoria própria

A curva gerada na figura 11 é regida pela equação 11:

$$APD_1 = 100 - (58,1748) * \text{exp}((-0,146391 * AMV^4) - (0,619312 * AMV^2)) \quad 11$$

O valor mínimo dessa curva foi de 41,83% mostrando que a partir dessa perspectiva o valor mínimo de insatisfeitos no ambiente é próximo a metade, sendo um valor superior ao estabelecido na ISO 7730 (2005) de 5%. A figura 12 mostra a curva para o APD_2.

Figura 12 – Curva APD_2



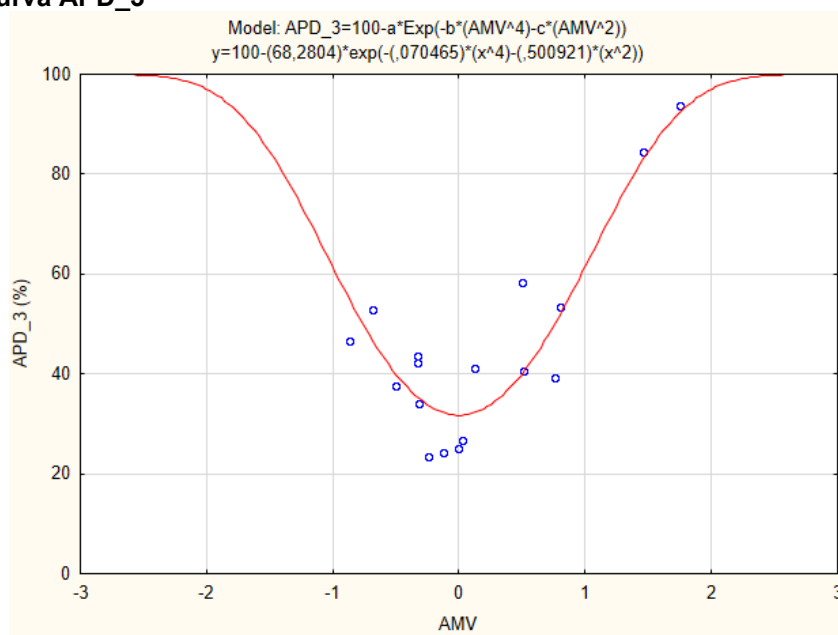
Fonte: Autoria própria

A curva é resultando da equação 12:

$$APD_2 = 100 - (97,2318) \cdot \exp((-0,039827 \cdot AMV^4) - (0,167307 \cdot AMV^2)) \quad 12$$

Esta curva adota a perspectiva da ISO 7730 (2005) e resultou em um valor mínimo de insatisfeitos de 2,77%, valor inferior ao da norma (5%). A figura 13 ilustra a curva para o APD_3.

Figura 13 – Curva APD_3



Fonte: Autoria própria

A equação 13 determinou esta curva:

$$APD_3 = 100 - (68,2804) * \exp((-0,070465 * AMV^4) - (0,500921 * AMV^2)) \quad 13$$

Sendo resultado da metodologia sugerida nesta pesquisa a equação determinou um valor mínimo de 31,72% de insatisfeitos para esse ambiente. Valor intermediário ao APD_1 e APD_2. De forma resumida a tabela 14, mostra os valores de R², APD mínimo (APD_{min}) tendo AMV = 0 e o valor de APD correspondente a categoria B da ISO 7730 correspondendo ao valor de AMV = 0.5 substituído em cada equação de APD.

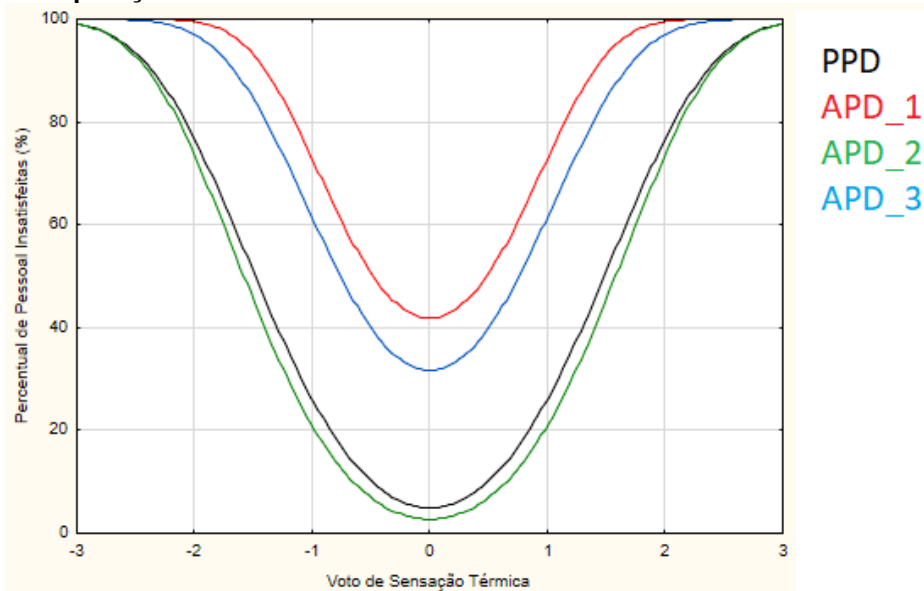
Tabela 14 – Equações APD

	Equação	R ²	APD _{min}	AMV=0,5
APD_1	$100 - (58,1748) * \exp((-0,146391 * AMV^4) - (0,619312 * AMV^2))$	0,844	41,83%	50,62%
APD_2	$100 - (97,2318) * \exp((-0,039827 * AMV^4) - (0,167307 * AMV^2))$	0,969	2,77%	6,98%
APD_3	$100 - (68,2804) * \exp((-0,070465 * AMV^4) - (0,500921 * AMV^2))$	0,914	31,72%	40,02%

Fonte: Autoria própria

A figura 14 serve de comparação entre as 3 curvas de APD e a curva original do PPD.

Figura 14 – Comparação entre os APDs e o PPD



Fonte: Autoria própria

O APD_1 registrou o maior percentual mínimo de insatisfeitos, novamente, esse comportamento foi esperado devido ao forte rigor de sua metodologia. Normalmente, levantamentos que apresentam esse rigor de considerar satisfeito apenas o participante que votar 0 na escala de 7 pontos de sensação térmica apresentam um APD elevado, como observado na pesquisa de Araújo e Araújo (1999) e Broday e Xavier (2020), com valores APD_{min} de 47,5% e 52,31% respectivamente, valores próximos ao encontrado nessa pesquisa. Em relação ao APD_2, que segue a perspectiva da ISO 7730 (2005), o valor de 2,77% chegou a ser inferior aos 5% estabelecidos pela norma. O APD_3 novamente se manteve intermediário entre ambos e tendendo ao valor do APD_1.

4.4 CONSTRUÇÃO DAS ZONAS DE CONFORTO TÉRMICO

A tabela 15 mostra a construção das variáveis dicotômicas (1 e 0) para os APDs levando em consideração o número de insatisfeitos por calor e por frio.

Tabela 15 – Modelo Probit

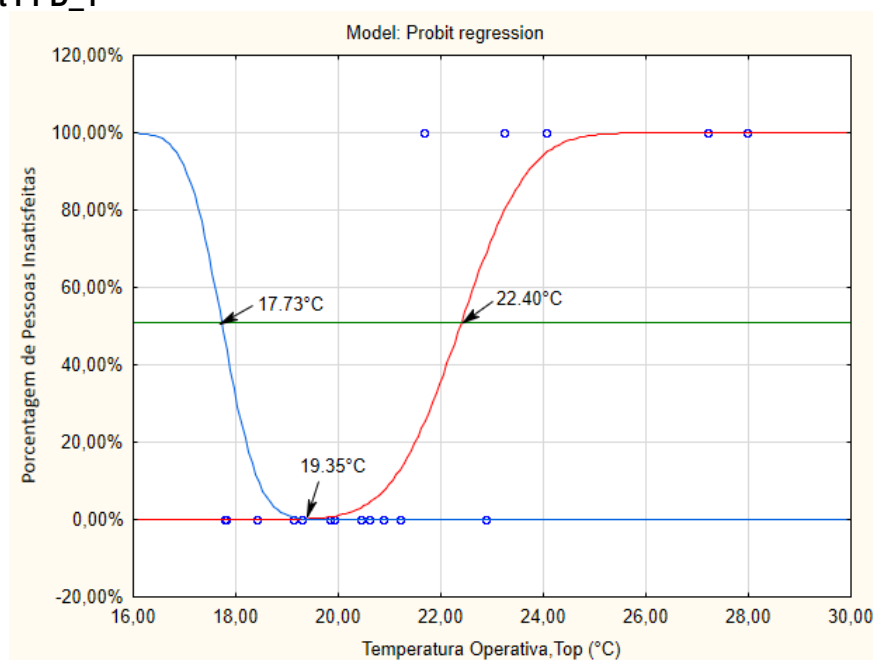
APD_1		CORTE 50,62%		APD_2		CORTE 6,98%		APD_3		CORTE 40,02%	
INSATISFEITOS POR CALOR	INSATISFEITOS POR FRIO	CALOR	FRIO	INSATISFEITOS POR CALOR	INSATISFEITOS POR FRIO	CALOR	FRIO	INSATISFEITOS POR CALOR	INSATISFEITOS POR FRIO	CALOR	FRIO
11,76%	17,65%	0	0	0,00%	11,76%	0	1	5,88%	11,76%	0	0
0,00%	45,83%	0	0	0,00%	4,17%	0	0	0,00%	25,00%	0	0
66,67%	6,67%	1	0	13,33%	0,00%	1	0	40,00%	0,00%	0	0
57,58%	3,03%	1	0	18,18%	0,00%	1	0	33,33%	0,00%	0	0
0,00%	46,67%	0	0	0,00%	20,00%	0	1	0,00%	40,00%	0	0
93,75%	0,00%	1	0	62,50%	0,00%	1	0	87,50%	0,00%	1	0
100,00%	0,00%	1	0	38,46%	0,00%	1	0	61,54%	0,00%	1	0
13,16%	39,47%	0	0	0,00%	2,63%	0	0	5,26%	18,42%	0	0
17,31%	42,31%	0	0	0,00%	7,69%	0	1	3,85%	25,00%	0	0
2,94%	55,88%	0	1	0,00%	11,76%	0	1	2,94%	41,18%	0	1
35,29%	23,53%	0	0	0,00%	0,00%	0	0	11,76%	11,76%	0	0
18,18%	18,18%	0	0	0,00%	0,00%	0	0	6,82%	6,82%	0	0
15,38%	41,03%	0	0	0,00%	7,69%	0	1	10,26%	28,21%	0	0
9,09%	18,18%	0	0	0,00%	3,03%	0	0	3,03%	18,18%	0	0
54,17%	4,17%	1	0	0,00%	0,00%	0	0	33,33%	4,17%	0	0
48,65%	0,00%	0	0	2,70%	0,00%	0	0	27,03%	0,00%	0	0
16,67%	16,67%	0	0	3,33%	0,00%	0	0	6,67%	10,00%	0	0

Fonte: Autoria própria

O corte utilizado simboliza a porcentagem de insatisfeitos de acordo com a categoria B da ISO 7730 (2005). Para o APD_1 caso a porcentagem de insatisfação fosse maior ou igual a 50,62% o valor 1 era atribuído, caso o valor fosse menor que 50,62% o valor 0 era atribuído. O mesmo padrão foi seguido para os APD_2 e APD_3 com cortes em 6,987% e 40,02%, respectivamente.

Com os valores das variáveis dicotômicas construiu-se os gráficos que representam o modelo *Probit* para cada APD em relação a temperatura operativa (T_{op}). A linha azul dos gráficos representa os insatisfeitos por frio, enquanto a linha vermelha simboliza os insatisfeitos por calor. Uma linha verde adicional foi inserida com o valor corte da categoria B da ISO 7730 (2005). O ponto de interseção entre as linhas azul e vermelha é considerado o ponto de Temperatura Operativa (T_{op}) neutra onde existe a menor quantidade de insatisfeitos por frio e calor ao mesmo tempo. A interseção entre a linha verde e as linhas azul e vermelha representa a zona de conforto térmico obtida a partir do APD específico. A figura 15 mostra o resultado para o APD_1.

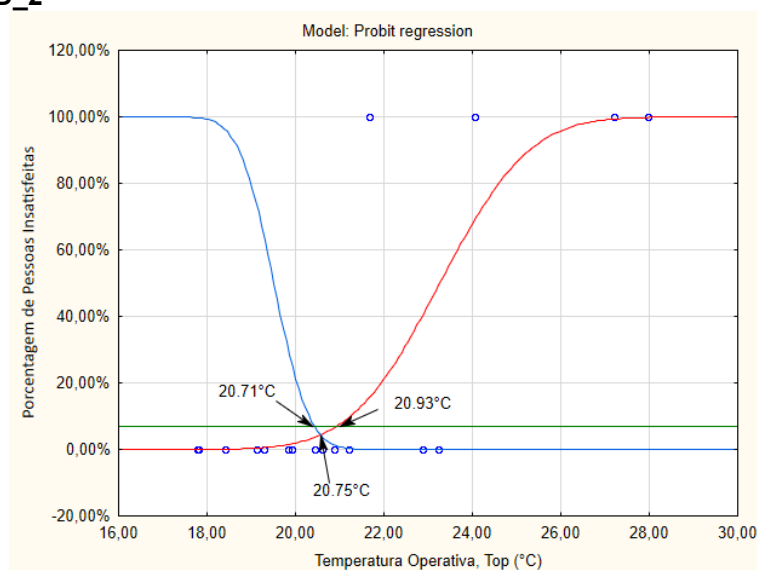
Figura 15 – Probit PPD_1



Fonte: Autoria própria

Para o corte de 50,62% o modelo *probit* gerou para o APD_1 uma zona de conforto térmico variando entre 17,73°C e 22,40°C, com uma temperatura operativa neutra de 19,35°C onde teoricamente apenas 0,18% das pessoas estariam insatisfeitas. A figura 16 detalha o modelo *probit* gerado para o APD_2.

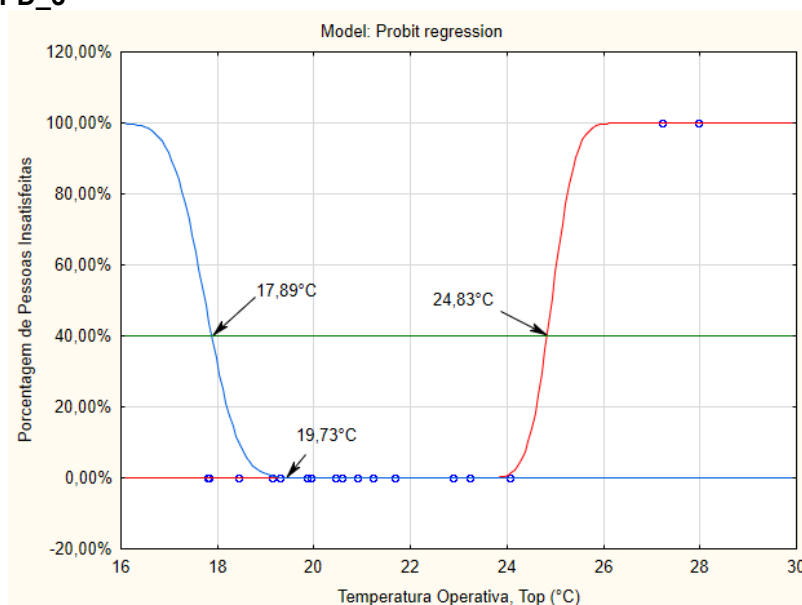
Figura 16 – Probit PPD_2



Fonte: Autoria própria

Segundo o corte sugerido de 6,98% a zona de conforto térmica é de 20,71°C a 20,93°C com temperatura operativa de conforto de 20,75°C onde 5,28% das pessoas estariam insatisfeitas. A figura 17 aponta o resultado do modelo para o APD_3.

Figura 17 – Probit PPD_3



Fonte: Autoria própria

Com corte igual a 40,02% de acordo com a categoria B da ISO 7730 (2005) a zona de conforto para o APD_3 varia de 17,89°C a 24,83°C, possuindo temperatura

operativa neutra de 19,73°C com aproximadamente 0,03% de insatisfeitos, valor praticamente nulo. A tabela 16 traz resumidamente os valores para temperatura operativa neutra, zona de conforto térmico e amplitude da zona.

Tabela 16 – T_{op} neutra, TCZ e Amplitude por APD

	T _{op} neutra	TCZ	Amplitude
APD_1	19,35°C	17,73°C – 22,4°C	4,67°C
APD_2	20,75°C	20,71°C – 20,93°C	0,22°C
APD_3	19,73°C	17,89°C – 24,83°C	6,94°C

Fonte: Autoria própria

Os 3 APDs trouxeram Temperaturas Operativas neutras relativamente próximas. A diferença considerável foi em relação à TCZ gerada pelo APD_2 com valores muito próximos e amplitude menor que 1°C. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do percentual de insatisfeitos para o APD_2 ser de longe o menor entre os 3 (6,98%). A TCZ obtida por meio do APD_3 foi a maior entre elas, com amplitude de 6,94°C, seguida pela TCZ relativa ao APD_1 com amplitude de 4,67°C. É interessante destacar que mesmo admitindo um percentual de insatisfeitos menor o APD_3 gerou uma TCZ mais ampla que o APD_1.

Em relação com a zona de conforto térmico sugerida pela ASHRAE (2017) de 23 a 26°C para o inverno, todas as TCZ aqui calculadas possuem valores mínimos e máximos menores, tendendo a temperaturas mais frias que as sugeridas pela norma. Além disso, as zonas geradas pelo APD_1 e APD_2 possuem amplitudes maiores. Hwang et al. (2006) explicam que qualquer nível diferente de conforto térmico existente é uma oportunidade de economia do consumo de energia, seja por amplitudes maiores que as das normas de conforto térmico ou temperaturas preferidas mais frias ou quentes devido a adaptação da amostra a um respectivo clima.

A tabela 17 traz estudos desenvolvidos durante o inverno e suas respectivas TCZ para comparação com a TCZ gerada pela perspectiva sugerida nesta pesquisa (APD_3).

Tabela 17 – TCZ desenvolvidas no inverno

Referência	TCZ (°C)	T _{op} neutra (°C)	Amplitude
Mui e Wang (2007)	20,2 – 23,6	21,4	3,4
Liu et al. (2019)	19,5 – 21,8	20,6	2,3
Jiang et al. (2020)	13 – 18	14,2	5
Broday e Xavier (2020)	19,61 – 22,61	21,1	3
Esta pesquisa	17,89 – 24,83	19,73	6,94

Fonte: Aatoria própria

O trabalho de Jiang et al. (2020), realizado em alunos de escolas primárias e secundárias na China, gerou as TCZ com temperaturas mais frias dentre os trabalhos, chegando ao valor mínimo de 13°C e máximo de 18°C, bem como a T_{op} neutra mais baixa mostrando um comportamento peculiar do público mais jovem. Em relação a amplitude, a maior foi gerada nesta pesquisa seguida da pesquisa de Jiang et al. (2020).

Todas as TCZ apresentadas na tabela 17 possuem temperaturas mais baixas que as sugeridas para o inverno pela ASHRAE (2017) de 23 – 26°C e, exceto a proposta por Liu et al. (2019), possuem amplitudes maiores ou iguais a da norma. Isto mostra a importância de se verificar os valores derivados de características particulares de cada região ao se determinar uma zona de conforto térmico, para assim potencializar a relação entre o conforto térmico e gasto mínimo de energia.

5 CONCLUSÃO

Visando atingir o objetivo principal de comparar os diferentes métodos de determinação de pessoas termicamente insatisfeitas para verificar qual deles produz uma zona de conforto térmico mais ampla, esta pesquisa se propôs a:

a) Verificar a aplicabilidade do índice de Fanger para avaliar a sensação térmica dos usuários.

Os resultados mostraram que majoritariamente o PMV subestima os votos de sensação térmica real (AMV). Logo, o índice proposto por Fanger não é um preditor ideal para ser aplicado nas condições sugeridas por esta pesquisa.

b) Determinar a temperatura de conforto no ambiente estudado, por meio dos votos de sensação térmica;

Os resultados demonstraram a temperatura operativa preferida com base nos votos de sensação térmica foi de 20,73°C. A temperatura foi bem inferior aos 24,5°C proposto pela ASHRAE (2017) para o inverno, mostrando que nas condições propostas por este estudo os estudantes suportam temperaturas mais frias.

c) Utilizar o modelo estatístico *probit* para obtenção das zonas de conforto térmico, por meio dos votos de insatisfação térmica;

Esta pesquisa adotou três métodos de se determinar os insatisfeitos térmicos. A primeira, baseada no trabalho de Araújo e Araújo (1999), foi a mais rígida e gerou percentual de insatisfeito denominado APD_1. A segunda perspectiva aqui adotada foi baseada nos padrões adotados pela ISO 7730 (2005) e gerou um percentual de insatisfeitos denominado APD_2. O terceiro método foi proposto nesta pesquisa, utiliza-se da escala de preferência térmica encontrada na ISO 10551 (1995), gerou o percentual APD_3. Com base na categoria B da ISO 7730 (2005) o percentual de insatisfeitos térmico foram de: 50,62% (APD_1); 6,98% (APD_2); e 40,02%(APD_3).

As TCZ calculadas a partir dos APD_1, APD_2 e APD_3, por meio do método *probit*, são respectivamente: 17,73°C – 22,4°C; 20,71°C – 20,93°C e 17,89°C – 24,83°C. Todos os percentuais aqui adotados levaram a zonas de conforto térmico potencialmente econômicos em termos de energia, devido a possuírem valores de temperatura mais frias que a adotada pela norma ASHRAE (2017) para o inverno. Além disso, as TCZ geradas pelo uso do APD_1 e APD_3 possuem amplitude maior que a da norma anteriormente citada. Sendo a TCZ derivada do APD_3 a zona de maior amplitude entre as aqui apresentadas. Conclui-se que a utilização de TCZ,

criadas com base no percentual de insatisfeitos térmicos, é uma estratégia viável para se manter o conforto e potencializar a economia de energia.

d) Formar um banco de dados das variáveis ambientais e pessoais do conforto térmico, para que possa ser utilizado em pesquisas futuras.

Com base nos achados desta pesquisa, sugere-se como oportunidades que podem ser desenvolvidas em estudos futuros, tais como: podem ser propostas outros métodos de determinar insatisfeitos térmicos, gerando outras zonas de conforto térmico e a adoção da metodologia do conforto térmico adaptativo, considerando assim os comportamentos adaptativos dos participantes.

Dessa forma, todos os objetivos foram alcançados e a pesquisa verificou as possíveis zonas de conforto térmico que podem ser aplicadas em futuros dimensionamentos de sistemas HVAC durante o inverno.

REFERÊNCIAS

AGHNIAEY, S.; LAWRENCE, T. M. The impact of increased cooling setpoint temperature during demand response events on occupant thermal comfort in commercial buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 19–27, 2018.

AGHNIAEY, S.; LAWRENCE, T. M.; SHARPTON, T. N.; et al. Thermal comfort evaluation in campus classrooms during room temperature adjustment corresponding to demand response. **Building and Environment**, v. 148, p. 488–497, 2019.

AL-AJMI, F. F. Thermal comfort in air-conditioned mosques in the dry desert climate. **Building and Environment**, v. 45, n. 11, p. 2407–2413, 2010.

AL-AJMI, F. F.; LOVEDAY, D. L. Indoor thermal conditions and thermal comfort in air-conditioned domestic buildings in the dry-desert climate of Kuwait. **Building and Environment**, v. 45, n. 3, p. 704–710, 2010.

ALFANO, F. R. D'AMBROSIO; OLESEN, B. W.; PALELLA, B. I. Povl Ole Fanger's impact ten years later. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 243–249, 2017.

ALLAB, Y.; PELLEGRINO, M.; GUO, X.; NEFZAOU, E.; KINDINIS, A. Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 202–219, 2017.

ARAÚJO, V. M. D.; ARAÚJO, E. H. S. The applicability of ISO 7730 for the assessment of the thermal conditions of users of the buildings in Natal-Brazil. **Proc Indoor Air**, v. 99, p. 148–153, 1999.

ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. **ASHRAE Inc.**, v. 2017, p. 66, 2017.

AZIZPOUR, F.; MOGHIMI, S.; LIM, C. H.; et al. A thermal comfort investigation of a facility department of a hospital in hot-humid climate: Correlation between objective and subjective measurements. **Indoor and Built Environment**, v. 22, n. 5, p. 836–845, 2013.

AZIZPOUR, F.; MOGHIMI, S.; SALLEH, E.; et al. Thermal comfort assessment of

large-scale hospitals in tropical climates: A case study of University Kebangsaan Malaysia Medical Centre (UKMMC). **Energy and Buildings**, v. 64, p. 317–322, 2013.

BALLANTYNE, E. R.; HILL, R. K.; SPENCER, J. W. Probit analysis of thermal sensation assessments. **International Journal of Biometeorology**, v. 21, n. 1, p. 29–43, 1977.

BARBHUIYA, S.; BARBHUIYA, S. Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. **Building and Environment**, v. 68, p. 1–11, 2013.

BARTAL, I.; BÁNHIDI, H. L.; GARBAI, L. Analysis of the static thermal comfort equation. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 188–191, 2012.

BECKER, R.; PACIUK, M. Thermal comfort in residential buildings – Failure to predict by Standard model. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 948–960, 2009.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. Editora Blucher, 2018.

BRODAY, E. E. Proposta de metodologia de predição de sensação térmica dos usuários em ambientes internos. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

BRODAY, E. E.; DE PAULA XAVIER, A. A. A method for predicting the actual percentage of dissatisfied (APD) through a simple proposition of thermal comfort zones in a working environment. **Work**, p. 1–11, 2020.

BRUNETTO, B. C.; GUEDES, D. P.; BRUNETTO, A. F. Taxa metabólica basal em universitários: comparação entre valores medidos e preditos. **Revista de Nutrição**, v. 23, n. 3, p. 369–377, 2010.

BURATTI, C.; MORETTI, E.; BELLONI, E.; COTANA, F. Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. **Building and Environment**, v. 59, p. 482–491, 2013.

CHEONG, K. W.; CHONG, K. Y. Development and application of an indoor air quality audit to an air-conditioned building in Singapore. **Building and Environment**, v. 36, n. 2, p. 181–188, 2001.

CHONG, D.; ZHU, N.; LUO, W.; ZHANG, Z. Broadening human thermal comfort range based on short-term heat acclimation. **Energy**, v. 176, p. 418–428, 2019.

DA CONCEIÇÃO PEREIRA, P. F.; BRODAY, E. E.; DE PAULA XAVIER, A. A.; DA SILVA SIMÕES, A. Evaluation of the Thermal Environment Influence on Cognitive Performance in Students in Northeast Brazil. **Occupational and Environmental Safety and Health II**. p.517–525, 2020.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. Business Research Methods.© The McGraw-Hill Companies. , 2014.

CORGNATI, S. P.; ANSALDI, R.; FILIPPI, M. Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 785–792, 2009.

CORGNATI, S. P.; FILIPPI, M.; VIAZZO, S. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort. **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 951–959, 2007.

CUI, W.; CAO, G.; PARK, J. H.; OUYANG, Q.; ZHU, Y. Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance. **Building and Environment**, v. 68, p. 114–122, 2013.

D'AMBROSIO ALFANO, F. R.; IANNIELLO, E.; PALELLA, B. I. PMV–PPD and acceptability in naturally ventilated schools. **Building and Environment**, v. 67, p. 129–137, 2013.

DE DEAR, R.; KIM, J.; CANDIDO, C.; DEUBLE, M. Adaptive thermal comfort in australian school classrooms. **Building Research and Information**, v. 43, n. 3, p. 383–398, 2015.

DE DEAR, R. J.; AKIMOTO, T.; ARENS, E. A.; et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air**, v. 23, n. 6, p. 442–461, 2013.

DELGARM, N.; SAJADI, B.; DELGARM, S. Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). **Energy and Buildings**, v. 131, p. 42–53, 2016.

DJONGYANG, N.; TCHINDA, R.; NJOMO, D. Thermal comfort: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. X2626-2640, 2010.

ENESCU, D. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1353–1379, 2017.

EPE. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório Síntese BEN 2019 Ano Base 2018.pdf>>. .

FABBRI, K.; GASPARI, J.; VANDI, L. Indoor thermal comfort of pregnant women in hospital: A case study evidence. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 23, 2019.

FANG, Z.; ZHANG, S.; CHENG, Y.; et al. Field study on adaptive thermal comfort in typical air conditioned classrooms. **Building and Environment**, v. 133, p. 73–82, 2018.

FANGER, P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. **Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering**, 1970. Copenhagen: Danish Technical Press.

VAN GAEVER, R.; JACOBS, V. A.; DILTOER, M.; PEETERS, L.; VANLANDUIT, S. Thermal comfort of the surgical staff in the operating room. **Building and Environment**, v. 81, p. 37–41, 2014.

GARCÍA, A.; OLIVIERI, F.; LARRUMBIDE, E.; ÁVILA, P. Thermal comfort assessment in naturally ventilated offices located in a cold tropical climate, Bogotá. **Building and Environment**, v. 158, p. 237–247, 2019.

GENG, Y.; JI, W.; LIN, B.; ZHU, Y. The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. **Building and Environment**, v. 121, p. 158–167, 2017.

GRAVETTER, F. J.; WALLNAU, L. B. **Statistics for the behavioral sciences**. Cengage Learning, 2016.

HALL, J. E.; HALL, M. E. **Guyton and Hall textbook of medical physiology e-Book**.

Elsevier Health Sciences, 2020.

HAN, J.; ZHANG, G.; ZHANG, Q.; et al. Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China. **Building and Environment**, v. 42, n. 12, p. 4043–4050, 2007.

HAVENITH, G.; HOLMÉR, I.; PARSONS, K. Personal factors in thermal comfort assessment: Clothing properties and metabolic heat production. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 581–591, 2002.

VAN HOOFF, J. Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all? **Indoor Air**, v. 18, n. 3, p. 182–201, 2008.

HUMPHREYS, M. A.; FERGUS NICOL, J. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 667–684, 2002.

HUSSIN, A.; SALLEH, E.; CHAN, H. Y.; MAT, S. The reliability of Predicted Mean Vote model predictions in an air-conditioned mosque during daily prayer times in Malaysia. **Architectural Science Review**, v. 58, n. 1, p. 67–76, 2015.

HWANG, R.-L.; LIN, T.-P.; CHENG, M.-J.; CHIEN, J.-H. Patient thermal comfort requirement for hospital environments in Taiwan. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 2980–2987, 2007.

HWANG, R.-L.; LIN, T.-P.; KUO, N.-J. Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 1, p. 53–62, 2006.

HWANG, R.-L.; LIN, T.-P.; LIANG, H.-H.; YANG, K.-H.; YEH, T.-C. Additive model for thermal comfort generated by matrix experiment using orthogonal array. **Building and Environment**, v. 44, n. 8, p. 1730–1739, 2009.

HWANG, R. L.; CHEN, C. P. Field study on behaviors and adaptation of elderly people and their thermal comfort requirements in residential environments. **Indoor Air**, v. 20, n. 3, p. 235–245, 2010.

HWANG, R. L.; CHENG, M. J.; LIN, T. P.; HO, M. C. Thermal perceptions, general adaptation methods and occupant's idea about the trade-off between thermal comfort

and energy saving in hot-humid regions. **Building and Environment**, v. 44, n. 6, p. 1128–1134, 2009.

IIDA, I.; BUARQUE, L. **Ergonomia: projeto e produção**. Editora Blucher, 2016.

Incites Journal Citation Reports - JCR (Clarivate Analytics). Disponível em: <<https://clarivate.com.ez48.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 19/11/2020.

INDRAGANTI, M. Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 7, p. 1019–1025, 2010.

INDRAGANTI, M.; OOKA, R.; RIJAL, H. B.; BRAGER, G. S. Adaptive model of thermal comfort for offices in hot and humid climates of India. **Building and Environment**, v. 74, p. 39–53, 2014.

INDRAGANTI, M.; RAO, K. D. Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 3, p. 273–281, 2010.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. ISO 9920, Genebra, 2007.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. ISO 7730, Genebra, 2005.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. ISO 7726, Genebra, 1998.

JIANG, J.; WANG, D.; LIU, Y.; DI, Y.; LIU, J. A field study of adaptive thermal comfort in primary and secondary school classrooms during winter season in Northwest China. **Building and Environment**, v. 175, 2020.

JIANG, J.; WANG, D.; LIU, Y.; XU, Y.; LIU, J. A study on pupils' learning performance

and thermal comfort of primary schools in China. **Building and Environment**, v. 134, p. 102–113, 2018.

JINDAL, A. Thermal comfort study in naturally ventilated school classrooms in composite climate of India. **Building and Environment**, v. 142, p. 34–46, 2018.

JINDAL, A. Investigation and analysis of thermal comfort in naturally ventilated secondary school classrooms in the composite climate of India. **Architectural Science Review**, v. 62, n. 6, p. 466–484, 2019.

JING, S.; LEI, Y.; WANG, H.; SONG, C.; YAN, X. Thermal comfort and energy-saving potential in university classrooms during the heating season. **Energy and Buildings**, v. 202, 2019.

JUNG, G. J.; SONG, S. K.; AHN, Y. C.; OH, G. S.; IM, Y. BIN. Experimental research on thermal comfort in the university classroom of regular semesters in Korea. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 25, n. 2, p. 503–512, 2011.

KARYONO, T. H. Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta - Indonesia. **Building and Environment**, v. 35, n. 1, p. 77–90, 2000.

KARYONO, T. H. Bandung thermal comfort study: Assessing the applicability of an adaptive model in Indonesia. **Architectural Science Review**, v. 51, n. 1, p. 60–65, 2008.

KAZKAZ, M.; PAVELEK, M. Operative temperature and globe temperature. **Eng. Mech**, v. 20, n. 3/4, p. 319–325, 2013.

KILIC, M.; KAYNAKLI, O.; YAMANKARADENIZ, R. Determination of required core temperature for thermal comfort with steady-state energy balance method. **International communications in heat and mass transfer**, v. 33, n. 2, p. 199–210, 2006.

KIM, J.; HONG, T.; JEONG, J.; KOO, C.; JEONG, K. An optimization model for selecting the optimal green systems by considering the thermal comfort and energy consumption. **Applied Energy**, v. 169, p. 682–695, 2016.

KIM, J.; SONG, D.; KIM, S.; et al. Energy-saving potential of extending temperature

set-points in a VRF air-conditioned building. **Energies**, v. 13, n. 9, 2020.

KUMAR, S.; MATHUR, J.; MATHUR, S.; SINGH, M. K.; LOFTNESS, V. An adaptive approach to define thermal comfort zones on psychrometric chart for naturally ventilated buildings in composite climate of India. **Building and Environment**, v. 109, p. 135–153, 2016.

KUMAR, S.; SINGH, M. K.; KUKREJA, R.; CHAURASIYA, S. K.; GUPTA, V. K. Comparative study of thermal comfort and adaptive actions for modern and traditional multi-storey naturally ventilated hostel buildings during monsoon season in India. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 90–106, 2019.

LI, B.; DU, C.; YAO, R.; YU, W.; COSTANZO, V. Indoor thermal environments in Chinese residential buildings responding to the diversity of climates. **Applied Thermal Engineering**, v. 129, p. 693–708, 2018.

LI, P.; PARKINSON, T.; BRAGER, G.; et al. A data-driven approach to defining acceptable temperature ranges in buildings. **Building and Environment**, v. 153, p. 302–312, 2019.

LIU, J.; YANG, X.; JIANG, Q.; QIU, J.; LIU, Y. Occupants' thermal comfort and perceived air quality in natural ventilated classrooms during cold days. **Building and Environment**, v. 158, p. 73–82, 2019.

LUO, M.; CAO, B.; DAMIENS, J.; LIN, B.; ZHU, Y. Evaluating thermal comfort in mixed-mode buildings: A field study in a subtropical climate. **Building and Environment**, v. 88, n. SI, p. 46–54, 2015.

MAITI, R. PMV model is insufficient to capture subjective thermal response from Indians. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 44, n. 3, p. 349–361, 2014.

MÄRZINGER, T.; ÖSTERREICHER, D. Supporting the Smart Readiness Indicator—A Methodology to Integrate A Quantitative Assessment of the Load Shifting Potential of Smart Buildings. **Energies**, v. 12, n. 10, p. 1955, 2019.

MATTOS, U.; MÁSCULO, F. **Higiene e segurança do trabalho**. Elsevier Brasil, 2019.

MAYER, E. A new correlation between predicted mean votes (PMV) and predicted percentages of dissatisfied (PPD). **Cib Report**, p. 60–65, 2002.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. **Indoor air**, v. 15, n. 1, p. 27–52, 2005.

MERABTINE, A.; MAALOUF, C.; AL WAHEED HAWILA, A.; MARTAJ, N.; POLIDORI, G. Building energy audit, thermal comfort, and IAQ assessment of a school building: A case study. **Building and Environment**, v. 145, p. 62–76, 2018.

MISHRA, A. K.; RAMGOPAL, M. A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in Kharagpur, India. **Building and Environment**, v. 92, p. 396–406, 2015.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 9e WileyPLUS + Loose-leaf**. Wiley, 2018.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. Editora Saraiva, 2017.

MUI, K. W.; TSANG, T. W.; WONG, L. T. Bayesian updates for indoor thermal comfort models. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101117, 2020.

MUI, K. W.; WONG, L. T. Neutral temperature in subtropical climates-A field survey in air-conditioned offices. **Building and Environment**, v. 42, n. 2, p. 699–706, 2007.

MUNONYE, C.; JI, Y. Evaluating the perception of thermal environment in naturally ventilated schools in a warm and humid climate in Nigeria. **Building Services Engineering Research and Technology**, 2020.

MUSTAPA, M. S.; ZAKI, S. A.; RIJAL, H. B.; HAGISHIMA, A.; ALI, M. S. M. Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer. **Building and Environment**, v. 105, p. 332–342, 2016.

NEMATCHOUA, M. K.; RICCIARDI, P.; BURATTI, C. Statistical analysis of indoor parameters and subjective responses of building occupants in a hot region of Indian ocean; a case of Madagascar island. **Applied Energy**, v. 208, p. 1562–1575, 2017.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort. **Solar Energy**, v. 81, n. 3, p. 295–304, 2007.

OSELAND, N. A. Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. **Energy and Buildings**, v. 23, n. 2, p. 105–115, 1995.

PARK, J. Y.; NAGY, Z. Comprehensive analysis of the relationship between thermal comfort and building control research - A data-driven literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. July 2017, p. 2664–2679, 2018.

DE PAULA XAVIER, A. A.; LAMBERTS, R. Indices of thermal comfort developed from field survey in Brazil. **Transactions-american Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers**, v. 106, n. 1, p. 45–58, 2000.

PIASECKI, M.; FEDORCZAK-CISAK, M.; FURTAK, M.; BISKUPSKI, J. Experimental Confirmation of the Reliability of Fanger's Thermal Comfort Model Case Study of a Near-Zero Energy Building (NZEB) Office Building. **Sustainability**, v. 11, n. 9, 2019.

PORRAS-SALAZAR, J. A.; WYON, D. P.; PIDERIT-MORENO, B.; CONTRERAS-ESPINOZA, S.; WARGOCKI, P. Reducing classroom temperature in a tropical climate improved the thermal comfort and the performance of elementary school pupils. **Indoor air**, v. 28, n. 6, p. 892–904, 2018.

RICCIARDI, P.; BURATTI, C. Thermal comfort in open plan offices in northern Italy: An adaptive approach. **Building and Environment**, v. 56, p. 314–320, 2012.

RICCIARDI, P.; BURATTI, C. Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. **Building and Environment**, v. 127, p. 23–36, 2018.

RUPP, R. F.; GHISI, E.; FORGIARINI RUPP, R.; GHISI, E. Predicting thermal comfort in office buildings in a Brazilian temperate and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 152–166, 2017.

RYU, J. H.; HONG, W. H.; SEO, H. C.; SEO, Y. K. Determination of an acceptable comfort zone for apartment occupants in South Korea: An empirical analysis of cooling operation. **Building and Environment**, v. 125, p. 484–501, 2017.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 410–419, 2013.

SCHIAVON, S.; MELIKOV, A. K. Energy saving and improved comfort by increased air movement. **Energy and buildings**, v. 40, n. 10, p. 1954–1960, 2008.

STANDARDIZATION, I. O. FOR. ISO 10551: 1995. Ergonomics of the thermal environment–Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales. , 1995.

TELI, D.; JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B. Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. **Energy and Buildings**, v. 53, p. 166–182, 2012.

THAPA, S.; BANSAL, A. K.; PANDA, G. K. Adaptive thermal comfort in the two college campuses of Salesian College, Darjeeling – Effect of difference in altitude. **Building and Environment**, v. 109, p. 25–41, 2016.

THERMAL COMFORT STUDY OF HOSPITAL WORKERS IN MALAYSIAYAU, Y. H.; CHEW, B. T. Thermal comfort study of hospital workers in Malaysia. **Indoor Air**, v. 19, n. 6, p. 500–510, 2009. .

TOE, D. H. C.; KUBOTA, T. Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database. **Frontiers of Architectural Research**, v. 2, n. 3, p. 278–291, 2013.

TRIOLA, M. F. **Elementary statistics**. Pearson/Addison-Wesley Reading, MA, 2006.

UDREA, I.; CROITORU, C.; NASTASE, I.; CRUTESCU, R.; BADESCU, V. First adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in Bucharest, Romania. **International Journal of Ventilation**, v. 17, n. 3, p. 149–165, 2018.

VASCONCELOS, P. E. D. M. Estudo da relação entre variáveis térmicas e o desempenho de estudantes da Academia de Polícia Militar do Estado da Paraíba. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2013.

WANG, H.; HU, S. Experimental study on thermal sensation of people in moderate activities. **Building and Environment**, v. 100, p. 127–134, 2016.

WANG, Y.; KUCKELKORN, J.; ZHAO, F.-Y.; et al. Evaluation on classroom thermal comfort and energy performance of passive school building by optimizing HVAC control systems. **Building and Environment**, v. 89, p. 86–106, 2015.

WANG, Z. A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin. **Building and Environment**, v. 41, n. 8, p. 1034–1039, 2006.

WARGOCKI, P.; PORRAS-SALAZAR, J. A.; CONTRERAS-ESPINOZA, S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. **Building and Environment**, v. 157, p. 197–204, 2019.

WONG, L. T.; MUI, K. W.; TSANG, T. W. An open acceptance model for indoor environmental quality (IEQ). **Building and Environment**, v. 142, p. 371–378, 2018.

WU, T.; CAO, B.; ZHU, Y. A field study on thermal comfort and air-conditioning energy use in an office building in Guangzhou. **Energy and Buildings**, v. 168, p. 428–437, 2018.

WU, ZHIBIN; LI, N.; WARGOCKI, P.; et al. Field study on thermal comfort and energy saving potential in 11 split air-conditioned office buildings in Changsha, China. **Energy**, v. 182, p. 471–482, 2019.

WU, Z; LI, N.; WARGOCKI, P.; et al. Adaptive thermal comfort in naturally ventilated dormitory buildings in Changsha, China. **Energy and Buildings**, v. 186, p. 56–70, 2019.

XAVIER, A. A. DE P. Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias-Teoria física aliada a estudos de campo. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

YANG, L.; YAN, H.; XU, Y.; LAM, J. C. Residential thermal environment in cold climates at high altitudes and building energy use implications. **Energy and Buildings**, v. 62, p. 139–145, 2013.

YANG, W.; LIN, Y.; WONG, N. H.; ZHOU, J. Thermal comfort requirements in the summer season in subtropical urban spaces. **Intelligent Buildings International**, v. 6, n. 4, p. 224–238, 2014.

YANG, W.; WONG, N. H.; JUSUF, S. K. Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore. **Building and Environment**, v. 59, p. 426–435, 2013.

YANG, W.; ZHANG, G. Thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned buildings in humid subtropical climate zone in China. **International Journal of Biometeorology**, v. 52, n. 5, p. 385–398, 2008.

YAO, J. An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements. **Building and Environment**, v. 71, p. 24–32, 2014.

YAO, R.; LIU, J.; LI, B. Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 1015–1022, 2010.

YAU, Y. H.; CHEW, B. T. Adaptive thermal comfort model for air-conditioned hospitals in Malaysia. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 35, n. 2, p. 117–138, 2014.

YAU, Y. H.; CHEW, B. T.; SAIFULLAH, A. Z. A. A field study on thermal comfort of occupants and acceptable neutral temperature at the national museum in Malaysia. **Indoor and Built Environment**, v. 22, n. 2, p. 433–444, 2013.

YOON, D. W.; SOHN, J. Y.; CHO, K. H. The comparison on the thermal comfort sensation between the results of questionnaire survey and the calculation of the PMV values. **Proc Indoor Air**, v. 99, p. 137–141, 1999.

ZAKI, S. A.; DAMIATI, S. A.; RIJAL, H. B.; HAGISHIMA, A.; ABD RAZAK, A. Adaptive thermal comfort in university classrooms in Malaysia and Japan. **Building and Environment**, v. 122, p. 294–306, 2017.

ZARE, S.; HASHEMINEJAD, N.; SHIRVAN, H. E.; et al. Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. **Weather and Climate Extremes**, v. 19, p. 49–57, 2018.

ZAVALA, V. M. Real-time optimization strategies for building systems†. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 9, p. 3137–3150, 2013.

ZHANG, F.; DE DEAR, R.; CANDIDO, C. Thermal comfort during temperature cycles induced by direct load control strategies of peak electricity demand management. **Building and Environment**, v. 103, p. 9–20, 2016.

ZHANG, G.; ZHENG, C.; YANG, W.; ZHANG, Q.; MOSCHANDREAS, D. J. Thermal comfort investigation of naturally ventilated classrooms in a subtropical region. **Indoor and Built Environment**, v. 16, n. 2, p. 148–158, 2007.

ZHANG, S.; LIN, Z.; AI, Z.; et al. Multi-criteria performance optimization for operation of stratum ventilation under heating mode. **Applied Energy**, v. 239, p. 969–980, 2019.

ZHAO, M.; GU, Z. L.; KANG, W. B.; et al. Experimental investigation and feasibility analysis on a capillary radiant heating system based on solar and air source heat pump dual heat source. **Applied Energy**, v. 185, p. 2094–2105, 2017.

APÊNDICE A - Questionário Conforto Térmico

Questionário Conforto Térmico

Idade: _____ Altura: _____ Peso: _____ Gênero: _____

1) Marque as vestimentas que você está utilizando (Adaptado ISO 9920/2007):

Roupas de baixo		Calças	T-shirts, Suéteres, Camisolas e Casacos	Acessórios
Calcinha		Shorts	Colete sem mangas	Sapato de sola de couro
Cueca		Bermuda	Colete sem mangas grosso	Sapato de sola de borracha
Soutien		Calça de tecido fino	Suéter manga longa fino	Tênis
Meia Calça		Calça jeans	Suéter manga longa grosso	Botas sem cano (Botim)
Camisola Interior		Calça de moletom		Sandália/chinelo
Ceroulas		Macacão	Jaquetão/japona leve	Blusão Fino
		Macacão por cima da roupa	Jaquetão/ japona grosso	Meia soquete
Camisas, Blusas		Vestidos e Saias	Blusão Grosso	Luvas
Camiseta Regata		Vestido curto sem manga	Blazer Fino	Meia Calça
Camiseta manga curta		Vestido curto manga curta	Blazer Grosso	Meia soquete
Camiseta manga longa		Vestido até o joelho manga curta	T-shirt	Meia
Camisa de manga curta		Vestido comprido manga curta		Meia ¾ até o joelho
Camisa de manga longa		Vestido comprido manga longa		
Camisão manga curta		Vestido tipo jardineira		
Camisão manga longa		Saia curta de tecido fino		
Minibluza		Saia curta de tecido grosso		
Blusa gola redonda				
Moletom manga longa		Vestido completo, fechado		

2) Em relação a sua sensação térmica, como você está se sentindo? (ISO 7730/2005)

+3	Muito calor	
+2	Calor	
+1	Levemente com calor	
0	Neutro	
-1	Levemente com frio	
-2	Frio	
-3	Muito Frio	

3) Em relação a sua avaliação térmica, você está? (ISO 10551/1995)

0	Confortável	
1	Levemente Inconfortável	
2	Inconfortável	
3	Muito inconfortável	

4) Em relação a sua preferência térmica, como você gostaria de estar se sentindo? (ISO 10551/1995)

+3	Bem Mais Aquecido	
+2	Um pouco mais aquecido	
+1	Mais aquecido	
0	Assim mesmo	
-1	Mais refrescado	
-2	Um pouco mais Refrescado	
-3	Bem mais refrescado	