

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

BRUNO VINÍCIUS VIDOR

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE CONFORTO TÉRMICO EM CABINE
DE ÔNIBUS**

São Leopoldo, RS

2021

BRUNO VINÍCIUS VIDOR

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE CONFORTO TÉRMICO EM CABINE
DE ÔNIBUS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

São Leopoldo, RS

2021

V654e Vidor, Bruno Vinícius.
Estudo numérico e experimental de conforto térmico em
cabine de ônibus / Bruno Vinícius Vidor. – 2021.
72 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, 2021.

“Orientadora: Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini
Zinanni.”

1. Computational Fluid Dynamics. 2. Conforto térmico.
3. Ônibus. 4. Simulação numérica. I. Título.

CDU 621

BRUNO VINÍCIUS VIDOR

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE CONFORTO TÉRMICO EM CABINE
DE ÔNIBUS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 06 de maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Paulo Roberto Wander - UNISINOS

Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha - UNISINOS

Dra. Letícia Jenisch Rodrigues - UFRGS

RESUMO

A pesquisa em torno do conforto térmico é motivada pela melhoria da qualidade de vida, segurança para atividades que exijam atenção, eficiência energética, diferencial competitivo para a indústria, e diversas atividades em que o ser humano está inserido. A Dinâmica dos fluidos computacional (CFD) pode ser utilizada para aperfeiçoar as geometrias e condições de operação de sistemas a fim de melhorar o conforto térmico e contribuir com o avanço da ciência e da tecnologia. O presente trabalho apresenta um estudo numérico e experimental do conforto térmico de uma cabine de motorista de ônibus, visando validar a implementação numérica como método de análise e aprimoramento deste tipo de sistema. Na primeira parte, este trabalho apresenta uma revisão da literatura, que demonstra como o conforto térmico vem sendo abordado associado às técnicas de CFD. Na segunda parte, propõe-se investigar, através de métodos numéricos e experimentais, o escoamento de ar, suas velocidades e temperaturas, no ambiente de uma cabine de motorista de ônibus, a fim de relacioná-los ao conforto térmico neste ambiente. Foi utilizado um código comercial de CFD baseado no método de volumes finitos, e foram comparados os resultados com medições experimentais. A validação permitiu definir as boas práticas de modelagem para o sistema em questão. A determinação dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) e os campos de temperaturas e velocidades do ar permitiram que fossem elaboradas recomendações voltadas ao maior conforto térmico para o projeto de cabines de ônibus. O modelo numérico desenvolvido apresentou bons resultados observando as comparações com as medições experimentais. A diferença absoluta média obtida para a temperatura foi de 0,8 °C enquanto para a velocidade do ar foi de 0,04 m/s. Através dos resultados numéricos, os índices PMV-PPD demonstram que 92,33% dos indivíduos iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,3582. Os resultados experimentais de temperatura e velocidade do ar médias demonstram que 93,27% iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,2882. A metodologia adotada para avaliação do conforto térmico através das simulações numéricas permite proporcionar ambientes confortáveis aos seres humanos através do estudo de melhorias em diferentes projetos.

Palavras-chave: CFD. conforto térmico. ensaio experimental. ônibus. simulação numérica.

ABSTRACT

The research around thermal comfort is motivated by the improvement of the quality of life, safety for activities that require attention, energy efficiency, competitive differential for the industry, and various activities in which the human being is inserted. Computational fluid dynamics (CFD) can be used to improve the geometries and operating conditions of systems in order to improve thermal comfort and contribute to the advancement of science and technology. The work presents a numerical and experimental study of the thermal comfort of a bus driver's cabin, aiming to validate the numerical implementation as a method of analysis and improvement of this type of system. In the first part, this work presents a literature review, which demonstrates how thermal comfort has been approached in association with CFD techniques. In the second part, it is proposed to investigate, through numerical and experimental methods, the air flow, its speeds and temperatures, in the environment of a bus driver's cabin, in order to relate them to the thermal comfort in this environment. A commercial CFD code based on the finite volume method was used, and the results were compared with experimental measurements. The validation made it possible to define good modeling practices for the system in question. The determination of the thermal comfort indexes (PMV-PPD) and the fields of temperatures and air speeds allowed the elaboration of recommendations aimed at greater thermal comfort for the design of bus cabins. The developed numerical model presented good results observing the comparisons with the experimental measurements. The average absolute difference obtained for the temperature was 0.8 °C while for the air velocity it was 0.04 m/s. Through the numerical results, the PMV-PPD indices demonstrate that 92.33% of the individuals would feel comfortable with the environment, which represents a PMV index of -0.3582. The experimental results of average temperature and air speed demonstrate that 93.27% would feel comfortable with the environment, which represents a PMV index of -0.2882. The methodology adopted for the evaluation of thermal comfort through numerical simulations allows to provide comfortable environments to human beings through the study of improvements in different projects.

Keywords: bus. CFD. experimental measurement. numerical simulation. thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figure 1 - Map of relevant authors for chosen combination.	20
Figure 2 - Number of selected articles per year.....	20
Figure 3 - Percentage of works based on the main objective of the study.	21
Figure 4 - Percentage of works based on the study environment.....	21
Figure 5 - PMV-PPD indices.....	24
Figure 6 - Equivalent temperature.	24
Figure 7 - Resistance associations for the human body thermoregulation model.	26
Figure 8 - Numerical and experimental study of the airplane.	29
Figure 9 - Analysis of the current lines of the simulation in the automobile.	31
Figure 10 - Bus temperature distribution through numerical simulation.....	35
Figure 11 - Distribution of temperatures and air velocities through numerical simulation.	37
Figura 12 - Fluxograma de etapas do trabalho.....	45
Figura 13 - Modelo representativo de veículo utilizado para as avaliações.	46
Figura 14 - Sensores posicionados na região do motorista.	49
Figura 15 - Domínio simplificado do modelo numérico da cabine.	50
Figura 16 - Condição de contorno na cabine.....	50
Figura 17 - Condições de contorno para a cabine.....	53
Figura 18 - Malha gerada a partir do domínio da cabine.....	54
Figura 19 - PMV-PPD.....	56
Figura 20 - Temperaturas médias de insuflamento do ar condicionado.....	58
Figura 21 - Pontos monitorados na região do motorista.....	60
Figura 22 - Linhas de corrente na cabine do motorista.	61
Figura 23 - Distribuição de temperaturas nos planos.	62
Figura 24 - Distribuição de velocidades nos planos.	62
Figura 25 - Distribuição de temperaturas e velocidades na região do motorista.	62
Figura 26 - Vetores do escoamento do ar na região do motorista.....	63
Figura 27 - Gráfico dos índices PMV-PPD.	65

LISTA DE TABELAS

Table 1 - Search protocol for systematic review.....	18
Table 2 - Quantities of work in the Scopus base.	19
Tabela 3 - Delineamento da pesquisa.....	45
Tabela 4 - Condições para as avaliações experimentais.	46
Tabela 5 - Condições do sistema de climatização para as avaliações.....	47
Tabela 6 - Instrumentação para os ensaios experimentais.	48
Tabela 7 - Propriedades da roupa utilizada no modelo.	50
Tabela 8 - Condições de contorno utilizadas na cabine.	53
Tabela 9 - Escala de sensação térmica.	56
Tabela 10 - Temperaturas médias de insuflamento do ar.	58
Tabela 11 - Velocidades de ar nos difusores.	59
Tabela 12 - Distribuição de temperaturas médias na cabine.	59
Tabela 13 - Temperatura de globo e umidade relativa.....	60
Tabela 14 - Resultados obtidos junto ao ocupante do posto do motorista.	60
Tabela 15 - Validação e verificação do modelo numérico.	63
Tabela 16 - Parâmetros utilizados para entrada do cálculo de PMV-PPD.	64

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PIV	<i>Particle Image Velocity</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage Dissatisfied</i>
RANS	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico	[J/kgK]
h_c	Coefficiente de transmissão de calor por convecção	[W/m ² K]
x_i	Componente do vetor posição	[m]
u_i	Componente do vetor velocidade média	[m/s]
K	Condutividade térmica	[W/mK]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
D	Diâmetro do globo	[m]
f_{cl}	Fator de superfície da roupa	[-]
I_{cl}	Isolamento da roupa	[m ² K/W]
W	Potência mecânica efetiva	[W/m ²]
p	Pressão média	[Pa]
p_a	Pressão parcial do vapor de água	[Pa]
M	Fluxo metabólico	[W/m ²]
t_{cl}	Temperatura da superfície da roupa	[°C]
t_g	Temperatura de globo	[°C]
t_a	Temperatura do ar	[°C]
T	Temperatura média	[°C]
\bar{t}_r	Temperatura radiante média	[°C]
UR	Umidade relativa	[%]
v_{ar}	Velocidade relativa do ar	[m/s]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[Ns/m ²]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 ESTRUTURA DE PESQUISA	15
2 THERMAL COMFORT ANALYSIS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW	16
2.1 INTRODUCTION	16
2.2 METHODS	17
2.3 RESULTS.....	19
2.3.1 Bibliometric analysis of literature	19
2.3.2 Development and improvement of thermal comfort models	21
2.3.3 Evaluations of thermal mannequins and human body thermoregulation system	25
2.3.4 Thermal comfort studies in different environments	27
2.3.4.1 Airplane	28
2.3.4.2 Car.....	30
2.3.4.3 Bus	33
2.3.4.4 Train and subway	35
2.3.5 Discussion of results	38
2.4 CONCLUSION	39
3 ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO CONFORTO TÉRMICO NA CABINE DO MOTORISTA DE UM ÔNIBUS	41
3.1 INTRODUÇÃO	42
3.2 METODOLOGIA.....	44
3.2.1 Métodos experimentais	46
3.2.2 Métodos numéricos	49
3.2.2.1 Modelo físico	49
3.2.2.2 Modelo matemático	51
3.2.2.3 Modelo numérico	53
3.2.3 Análise do conforto térmico	54
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58

3.3.1 Coletas experimentais	58
3.3.2 Simulação numérica.....	61
3.3.3 Validação e verificação do modelo numérico.....	63
3.3.4 Análise de conforto térmico	64
3.4 CONCLUSÃO.....	65
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

O mundo está passando por constantes mudanças climáticas, e uma das causas é o aquecimento global. Dados indicam que a temperatura média da superfície do planeta apresentou um expressivo aumento nos últimos anos (NASA, 2020).

Estudos demonstram que o aumento da temperatura do planeta poderá trazer consequências como o derretimento das geleiras do Ártico e da Antártica provocando elevação do nível do mar global. Também trará mudanças na biodiversidade forçando as espécies a se adaptarem a novos habitats o que pode provocar a extinção de algumas (POST *et al.*, 2019).

Observando este cenário, além de medidas para o controle e diminuição do aquecimento global, as pesquisas em torno do conforto térmico e qualidade do ar para o ser humano são fundamentais para promover qualidade de vida, desenvolvimento de novas tecnologias e segurança. Os estudos relacionados são indispensáveis para proporcionar condições de conforto independente do ambiente ao qual estará exposto.

O conforto térmico está diretamente relacionado com a satisfação do ser humano ao ambiente em que está situado. De acordo com a ISO 7730 (2005) são diversos fatores que influenciam no conforto térmico, sejam através de variações de metabolismo, vestimentas, temperatura do ar, velocidade de ar, umidade, temperatura radiante, e outros que variam conforme o ser humano. Por se tratar de um conceito também subjetivo que depende de diversos fatores, proporcionar um ambiente térmico considerado aceitável à maioria das pessoas não é trivial.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) vem sendo utilizada como ferramenta em projetos para diversos ambientes, determinando melhores conceitos de ventilação, conforto térmico e qualidade do ar, incluindo cabines veiculares. Com base na revisão da literatura, o uso das simulações numéricas para avaliações de conforto térmico e qualidade do ar em ambientes internos ainda estão em desenvolvimento, e desta forma existem algumas lacunas a serem preenchidas.

O uso de técnicas numéricas traz diversas vantagens, como permitir uma análise local e não invasiva, avaliar diferentes configurações dos sistemas a baixo custo, definir a melhor geometria antes da construção de protótipos reais, dentre outros. Nos dias atuais ainda há algumas dificuldades na utilização das simulações, como o custo computacional elevado para análises de escoamentos turbulentos,

tridimensionais e transientes, onde há necessidade de tecnologia em hardware avançada. Observando tais características desta ferramenta, verifica-se que ela pode sim ser útil no projeto e análise do conforto térmico. O uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional pode auxiliar no desenvolvimento de produtos, ganhando com redução de tempo do projeto, e evitando a necessidade de diversos protótipos. Com isso, se torna possível melhorar geometrias e sistemas para atingir um nível de projeto que permita proporcionar condições aceitáveis de conforto térmico e qualidade de vida aos seres humanos.

Estudos relacionados a pesquisa e desenvolvimento estão cada vez mais inseridos na indústria. Nos dias atuais, a união da indústria com a universidade pode proporcionar o avanço da ciência, pois torna possível a união da teoria com a prática e os recursos necessários. Além disso, traz a inovação como diferencial competitivo para os produtos desenvolvidos.

Desta forma, este projeto conta com o apoio de uma empresa fabricante de carrocerias de ônibus localizada no RS, que apoiou a realização de análises em uma cabine de motorista de ônibus, que é o objeto desta pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo analisar parâmetros de conforto térmico em uma cabine de motorista de ônibus, através de resultados computacionais e experimentais, validando a implementação numérica e corroborando como ferramenta de projeto e melhoria deste tipo de sistema.

1.1.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- a) investigar o estado da arte relacionado ao uso de ferramentas de simulação para analisar o conforto térmico;

- b) analisar pontos de temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura de globo e umidade relativa em uma cabine de motorista de ônibus por meio de investigação experimental;
- c) criar um modelo computacional para analisar os campos de temperatura e velocidade do ar no interior de uma cabine de motorista de ônibus;
- d) quantificar a precisão do modelo numérico frente ao experimental observando os dados de temperatura do ar e velocidade do ar;
- e) analisar os parâmetros de conforto térmico da cabine de motorista de ônibus através dos dados experimentais e numéricos obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo do conforto térmico é de grande importância para a sociedade, onde podem-se destacar as seguintes justificativas e motivações para esta pesquisa:

- a) promover saúde e bem estar aos seres humanos;
- b) segurança, em atividades que exijam atenção, como exemplo dirigir;
- c) o modelo numérico desenvolvido pode ser utilizado como metodologia para aplicação nos diversos projetos da empresa fabricante de carrocerias de ônibus que apoiou a realização deste trabalho, e demonstra potencial para aplicação nos seus processos de desenvolvimento, sendo um diferencial competitivo para seus produtos. O modelo numérico permite variar condições de contorno como velocidades e temperaturas do ar, além de formatos e posições dos difusores de ar condicionado, visando propor melhorias e novas soluções ainda em nível de projeto;
- d) visto que poucos trabalhos relacionados a simulação e ao conforto térmico foram encontrados no ambiente da cabine do motorista de um ônibus, este estudo contribuí com esta lacuna de pesquisa;
- e) outro fator motivador foi o estudo experimental, permitindo assim a validação do modelo numérico desenvolvido;
- f) através das simulações numéricas pode ser possível melhorar a eficiência energética de ambientes sem prejudicar o conforto dos seres humanos;

- g) observando os diversos fatores que influenciam no conforto térmico do ser humano, a pesquisa em torno deste tema é muito importante para promover o avanço da ciência e tecnologia.

1.3 ESTRUTURA DE PESQUISA

O presente trabalho possui quatro capítulos, dos quais são descritos a seguir:

- a) o capítulo 1 demonstra os objetivos e motivações;
- b) o capítulo 2 é apresentado na forma de artigo. Nele é feita uma revisão sistemática da literatura relacionado ao uso de ferramentas de simulação numérica para avaliação de conforto térmico. Neste artigo é apresentado o estado da arte da literatura. Este artigo foi submetido ao *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2020* (VIDOR e ZINANI, 2020) e apresentado em novembro de 2020;
- c) o capítulo 3 é apresentado na forma de artigo e apresenta os seguintes tópicos:
- o objeto de estudo: a cabine do ônibus e suas características;
 - os métodos experimentais;
 - os métodos numéricos;
 - os resultados experimentais e numéricos;
 - a análise de conforto térmico do ambiente;
- d) no capítulo 4 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 THERMAL COMFORT ANALYSIS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract. *Research related to thermal comfort is motivated by the improvement of quality of life, ergonomics, safety, energy efficiency and also as a competitive differential in the industry. In recent years, numerous researchers have sought the development of science and technology through studies of thermal comfort models, such as Fanger's PMV-PPD indices and the use of thermal mannequins through equivalent temperatures, also by modeling the body's thermoregulatory systems and in the assessment of different thermal environments. Currently, computational fluid dynamics (CFD) is employed as a powerful tool to provide numerical simulations of flow and heat transfer, thus allowing a better understanding of the various phenomena in comfort. The coupling between numerical simulations, experimental analyzes and thermal comfort models allows greater precision in the results related to the thermal environment. This work aims to carry out a systematic review of the available literature on the analysis of thermal comfort. Based on the Scopus database, this review presents important research on the topic, disseminating the way the world is addressing this issue and promoting research gaps and trends in future work to seek the advancement of science and technology.*

Keywords: *CFD. equivalent temperature. experimental. Fanger. thermal comfort. PMV-PPD.*

2.1 INTRODUCTION

Global warming has been causing constant climate changes in recent years, and we can see that the temperature of the planet is increasing (NASA, 2020). With this overheating, the search for human beings for comfortable thermal environments that provide a better quality of life becomes increasingly greater.

Thermal comfort is defined as a condition of the human being's mind that demonstrates satisfaction according to the thermal conditions of the environment, where being thermally comfortable depends on several environmental and personal factors, and vary from individual to individual (ASHRAE 55, 2017).

Thermal comfort has become a source of much research in recent years. From studies of Fanger (1972), considered a pioneer in the subject, numerous researchers

sought the development of science and technology in favor of better methods and ways of evaluating thermal comfort.

Having a thermally comfortable environment is of fundamental importance, as it promotes improvement in quality of life, reduction of thermal stress, promoting safety in jobs that require attention, aiming to improve issues such as energy efficiency, and also to be a competitive differential for the industry.

In recent years, research related to thermal comfort has basically been divided into three main areas: in the development of models that seek to understand the various variables that influence comfort, in the study of the human body's thermoregulation system and its modeling, and in the evaluation of different types of environments and conditions, whether homogeneous or not, stationary or transient.

The development of technology and the dynamics of computational fluids has enabled researchers to better understand how the various variables influence thermal comfort, where together with other methodologies such as Survey and experimental measurements, they can provide more reliable results.

Seeking to understand this broad field of research, mapping the literature can help to identify research gaps and future trends, allowing to guide studies in search of the development of science and technology.

With this precept, this work aims to conduct a systematic review of the literature, identifying the most relevant research in the area and the trends for studies related to thermal comfort.

2.2 METHODS

In order to identify the most relevant research for the topic in question and improve the quality of the literature review, a bibliometric review step was inserted, where it was possible to quantify and map the most relevant works in the area. The research process for the systematic literature review was based on the integrated method (DRESCH *et al.*, 2015).

With these data it was possible to determine the important work and then carry out the analysis and discussion of the results. The first stage of the work consisted of determining the search protocol to be followed during the research, as shown in Tab. 1.

Table 1 - Search protocol for systematic review.

Conceptual framework	We sought to determine the state of the art in the literature regarding the study of human thermal comfort.
Context	Broad context focused on the concern of how the topic of thermal comfort is being addressed and identification of research gaps and trends in future work.
Horizon	Studies related to methods of assessing human thermal comfort and its evolution in the last 20 years, mainly in the study related to comfort in public passenger transport.
Theoretical current	All works of a subjective, experimental or numerical character.
Languages	English.
Review question	What is the state of the art in relation to the study of thermal comfort for human beings and how is this subject being treated?
Review strategy	Aggregative, to answer the review questions.
Search criteria	Includes: Complete articles only; Just English; Only in the final version; Contains the keyword "Thermal Comfort"; Most cited authors; Exclusion: articles that do not contain the inclusion requirements; that are not articles in the final version;
Search sources	Scopus / Elsevier.
Search terms	"thermal comfort" AND simulation "thermal comfort" AND experimental "thermal comfort" AND CFD "thermal comfort" AND cabin "thermal comfort" AND vehicles "thermal comfort" AND bus "thermal comfort" AND aircraft "thermal comfort" AND train "thermal comfort" AND subway "thermal comfort" AND "solar radiation" "thermal comfort" AND dummy "Solar radiation" AND CFD AND vehicles "ISO 7730" "ISO 14505" "ASHRAE 55" "ISO 7796"

With the definition of the protocol, a search was carried out in the selected database (Scopus) and the number of articles related to the theme was identified from the defined keywords.

For bibliometric analysis, the data sets obtained in the search were exported to the VOSviewer software where it was possible to determine the most relevant authors and the best articles related to the topic. These selected articles were evaluated for

further analysis and discussion of the results in order to achieve the research objectives.

2.3 RESULTS

Through the proposed method, a systematic analysis of the literature was carried out, where the works were initially quantified by means of bibliometric analysis and later analyzed the most relevant works in the area.

2.3.1 Bibliometric analysis of literature

The search in the database showed several published research related to the topic. Table 2 shows these data based on the search terms used.

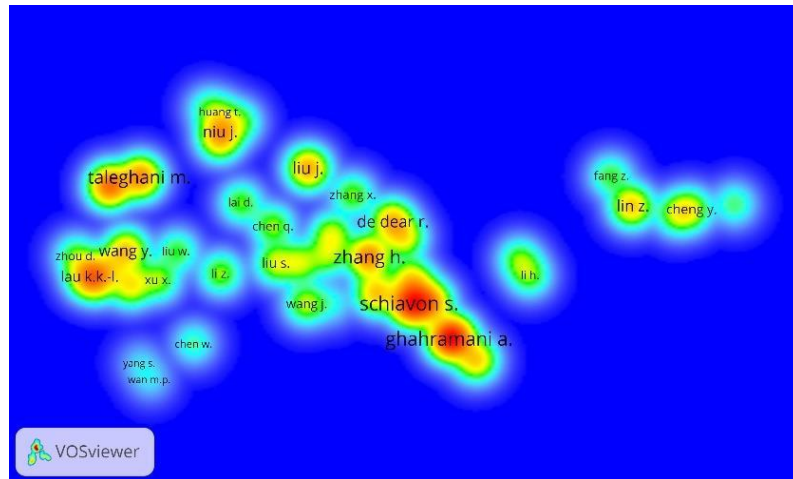
For the study, searches that obtained the keywords in the title or abstract were identified using the search tool of the Base Scopus. With the combination of the selected keywords, the sets of articles were exported to the VOSviewer Software to perform bibliometric analyzes and create maps of the most cited authors.

Table 2 - Quantities of work in the Scopus base.

Date of search	Search terms	Number of works
August 21, 2020	"thermal comfort" AND simulation	2,891
	"thermal comfort" AND experimental	2,399
	"thermal comfort" AND CFD	848
	"thermal comfort" AND cabin	272
	"thermal comfort" AND vehicles	339
	"thermal comfort" AND bus	79
	"thermal comfort" AND aircraft	156
	"thermal comfort" AND train	80
	"thermal comfort" AND subway	41
	"thermal comfort" AND "solar radiation"	584
	"thermal comfort" AND dummy	8
	"Solar radiation" AND CFD AND vehicles	20
	"ISO 7730"	539
	"ISO 14505"	12
	"ASHRAE 55"	186
"ISO 7796"	0	

With the combination of the terms “thermal comfort” AND simulation, the most relevant groups of authors were identified and researched on the topic. To illustrate and identify these groups, maps were created with the VOSviewer Software. Figure 1 shows an analysis map of the most cited and relevant authors.

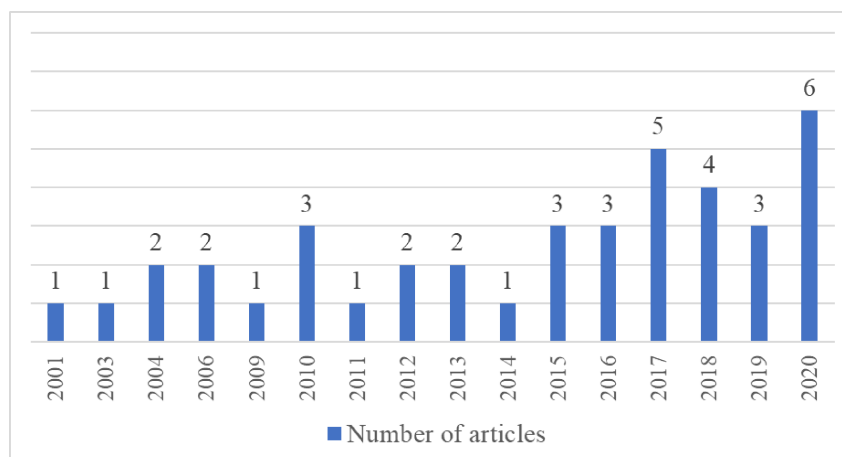
Figure 1 - Map of relevant authors for chosen combination.



With this procedure, it was possible to identify the relevant works in the area and select them to carry out the analysis and discussion of the results. For each combination of defined keywords, the most relevant articles were selected based on bibliometric analysis, selecting the most cited authors as an inclusion criterion.

We selected 40 articles published in the last 20 years, giving greater relevance to the most recent works. Figure 2 shows the number of articles selected per year, showing the largest number of studies selected for review in recent years.

Figure 2 - Number of selected articles per year.



For the 40 selected articles, 3 major research areas were identified: studies aiming to promote improvements and developments related to thermal comfort models, research with the main focus on the environment in which the human being is inserted and works that seek to model and evaluate the human body and its thermoregulation system. Figure 3 shows the percentage of articles selected in this work for each major area, which demonstrates that most of the selected works show the interest in evaluating the environments in which the human being is inserted and ways of evaluating thermal comfort. Among the selected works, the types of diverse environments referred to in the studies were also evaluated, where Figure 4 presents the percentage based on the evaluated environments.

Figure 3 - Percentage of works based on the main objective of the study.

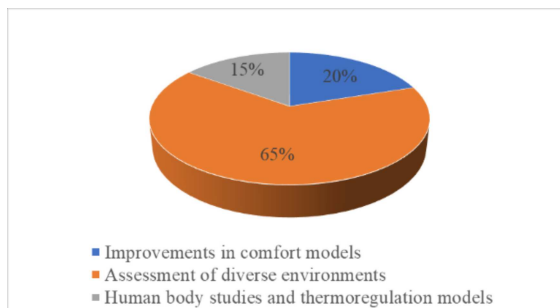
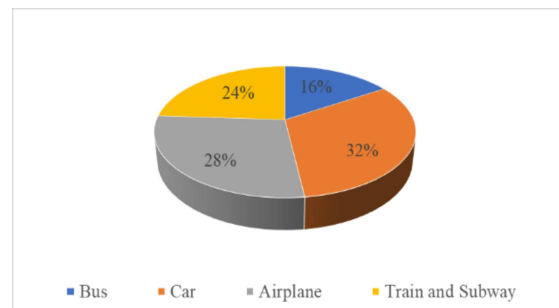


Figure 4 - Percentage of works based on the study environment.



Through the bibliometric analysis carried out, the discussion and analysis of the selected works was conducted. For the evaluation, the articles were separated based on the main objective of the research: studies aiming to promote improvements and developments related to thermal comfort models, research with the main focus on the environment in which the human being is inserted and works that seek to model and evaluate the body and its thermoregulation system.

2.3.2 Development and improvement of thermal comfort models

According ASHRAE 55 (2017) thermal comfort is defined as a condition of the human being's mind that demonstrates satisfaction according to the thermal conditions of the environment. There are six primary factors that influence the thermal comfort of the human being, namely: the metabolic rate, the clothing used, air temperature, radiant temperature, air speed and relative humidity. In addition to these, other factors

also influence comfort, such as age, physical inactivity, health conditions, among others.

Each of the factors that involve the thermal comfort of human beings has been a source of research, such as the thermal insulation of clothes, observed in the work of Schiavon and Lee (2012), where they developed a research in order to identify the insulation of clothes normally used by office occupants aiming at the application in thermal comfort calculations. Based on the data available in the ASHRAE database, the influence of 20 variables on the insulation of clothing was analyzed statistically. The results showed that the average insulation of the clothes is 0.59 clo in the summer and 0.69 clo in the winter. This suggested average value is significantly lower than the indicated value and international standards (1.0 clo) for the winter. The data obtained allows the dimensioning of air conditioning systems and more accurate thermal comfort calculations.

Based on studies of Fanger (1972), considered as the pioneer in thermal comfort studies, where we sought to relate the various variables that influence comfort through indices, based on subjective responses and experimental measurements, which originated the PMV (predicted mean vote) and PPD (predicted percentage dissatisfied) attributed by the standard ISO 7730 (2005).

Since then, numerous researches have been carried out aiming to evaluate the applicability of these indexes in different environments and also the development of new indexes and researches to improve the thermal comfort models as also addressed by Hoof *et al.* (2010) in its literature review with studies since the 1990s, mainly addressing the PMV-PPD indices, as illustrated in Figure 5.

Due to the fact that thermal comfort is something complex, where providing comfort conditions acceptable to all human beings is difficult due to the physical characteristics of each individual, several studies seek to evaluate new methods and models of thermal comfort to improve the accuracy of the thermal sensation.

Thus, in addition to global comfort indices that involve several variables, there are local indices that influence comfort such as asymmetric radiation, the vertical difference in temperatures, drafts, hot or cold floor temperatures. As can be seen in the study, Liu *et al.* (2020) evaluated the vertical difference in temperatures based on subjective and environmental data. The objectives of the study sought to develop a statistical model to estimate the percentage of dissatisfaction for this vertical difference. The results suggest that the vertical temperature gradient between the feet

and the head can be increased to 5 °C, noting that the standards (ISO and ASHRAE) suggest 3 °C/m as the limit.

Many authors also tend to separate comfort assessments in homogeneous and non-homogeneous environments, bringing different approaches for each type of environment, however further studies are still needed to validate each method adopted in each type of environment. The following works demonstrated these differences found.

Cheng *et al.* (2012) carried out a review of several thermal comfort models that address thermal sensations mainly in non-homogeneous environments, highlighting their advantages and limitations. After that, two typical comfort models, the ISO 14505-2 standard and the UC Berkeley comprehensive comfort model (UCB model), were coupled to the computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation with different processes for assessing the thermal environment of a small office. The results indicated that the ISO standard model can be applied as a convenient method to evaluate comfort in non-uniform and thermally neutral environments in general. Comfort in non-uniform and often transient thermal environments has been a source of recent studies for researchers.

Similarly, Schellen *et al.* (2013) discussed a physiological model for a non-homogeneous environment built to evaluate a thermal sensation through computational numerical simulation (CFD). The results were compared with studies in the literature to validate the method in three available models: predicted mean vote index (PMV), UC Berkeley thermal heating model and the ISO 14505 standard (as shown in Figure 6). The use of each model is used to link physiological responses to the thermal sensation. The results obtained show that PMV is not able to predict comfort when local effects are more influential. In addition, they indicate that thermological physiological models combined with UC Berkeley or ISO standard models seem promising for predicting thermal heating in non-uniform environments in general. However, more research is needed to substantiate such claims.

Figure 5 - PMV-PPD indices.

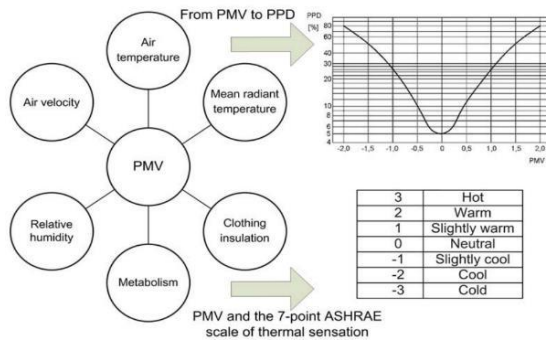
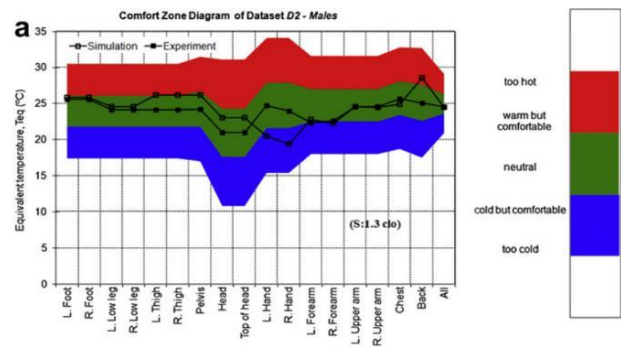
Source: Hoof *et al.* (2010)

Figure 6 - Equivalent temperature.

Source: Schellen *et al.* (2013)

The standard ASHRAE 55 (2017) brings an advanced model to predict thermal comfort in environments, named SET (standard effective temperature). Researchers seek to improve methods more and more, bringing greater precision to models such as the SET provided for in the standard. An example can be seen in the research of Zhang and Lin (2020), who proposed two SET-based models to assess thermal comfort, namely: Extended predicted thermal sensation (PTS) and Predicted adaptive thermal sensation (aPTS). To validate the proposed models, case studies were carried out using data from building fields with natural ventilation and air conditioning. As a result, it was identified that both models improve the prediction of the thermal sensation, surpassing the conventional models.

Similarly, Zhang *et al.* (2010) studied and developed models to predict thermal sensation and comfort throughout the body. The developed models apply to sedentary activities in different environments: uniform and non-uniform, stable and transitory. The research was carried out based on data collected in experimental research for the environments already mentioned. And concluded that, in order to keep the whole body comfortable, one should eliminate as much as possible uncomfortable local conditions that present the highest values, and there may also be benefits providing personal control of environmental conditions.

Aiming to provide researchers, professionals and students with tools for assessing thermal comfort based on standards, Tartarini *et al.* (2020) developed an online tool for the calculation and visualization of various thermal comfort assessment methodologies based on international standards (ISO, ASHRAE and EN 16798-1). The program incorporates the latest thermal comfort models based on these

standards, such as: the mean expected vote (PMV), the standard effective temperature (SET), adaptive models, and local discomfort. It also has solar chart information and insulation for clothing. It is possible to dynamically observe the thermal comfort zones according to the variables by means of graphs. This tool allows users to perform complex thermal comfort analyzes based on international standards and free of charge.

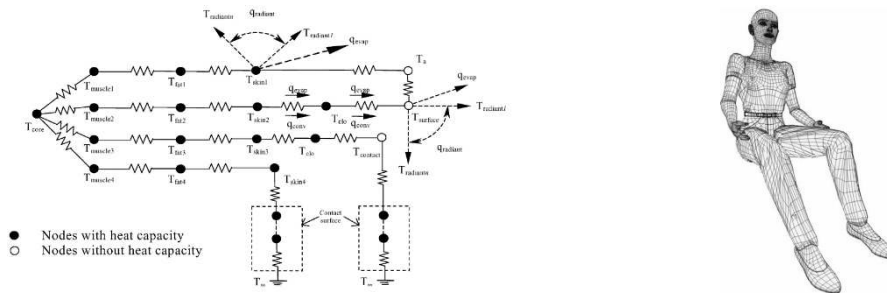
This field of research that seeks the development of new methodologies to evaluate the thermal comfort of human beings is of paramount importance, since working together with advances in technology, it can provide several benefits such as energy efficiency, health and quality of life to Society.

2.3.3 Evaluations of thermal mannequins and human body thermoregulation system

Another area of great importance that is also a source of research in recent years are studies that seek to model the thermoregulatory system of the human body. These mathematical models developed allow us to better understand how the thermal distribution of the body is, to evaluate issues such as breathing, perspiration, and also, if used in conjunction with the numerical simulations of environments and models to predict thermal comfort, it can provide great advances in science and technology.

Several studies seek to represent the phenomena of conduction, convection and radiation applied to humans and their thermoregulation system. As can be seen in the work of Huizenga *et al.* (2001), that present a model of human regulation that simulates the layers of the body and also of the clothes, according to associations shown in Figure 7. Physiological factors such as vasodilation, vasoconstriction, sweating and metabolic heat production are also considered. The model is also able to predict the physiological response to transient and non-uniform thermal environments. These environments present the greatest difficulties of current models for predicting comfort.

Figure 7 - Resistance associations for the human body thermoregulation model.



Source: Huizenga *et al.* (2001).

With this mathematical development of the human cup thermoregulatory system, several studies also propose the coupling of these models with computational simulation tools and models of thermal comfort. As an example, the work of Gao *et al.* (2006), where they investigated through a numerical solution the personalized ventilation aiming to evaluate the air quality and the thermal comfort in the place. A thermoregulation model of the human body was attached to the CFD and then the customized ventilation systems were evaluated. Personalized ventilation has great potential to improve air quality and local thermal comfort. The air velocity calculated by the CFD close to the body surface and inserted in a thermoregulation model (Berkeley) so that local thermal comfort in a non-uniform environment can be investigated.

Another similar work was carried out by Treeck *et al.* (2009), who developed and tested a parametric model of multisegmented thermal mannequin of human thermoregulation models using computational codes to study the effects of transient and local thermal perception and sensation. The developed interface allows the interaction with the computer simulation (CFD). Clothing conditions and activity level can be modified on a real-time scale. The visualization on the skin of the mannequin includes the surface temperatures, the votes of the local thermal sensation (LTSV), the predicted mean vote (PMV) and the dynamic thermal sensation (DTS). The model was validated based on experimental data.

Several studies have developed studies of these effects on humans, such as Gao *et al.* (2019) who investigated the effects of ambient temperature, air speed and wind direction on the body's thermal conditions. The results showed that higher ambient temperatures led to a decrease in the heat transfer coefficient and an increase in the radiation coefficient. And also Tian *et al.* (2011) who evaluated the influence of the average local air temperature in an office using a numerical method. The results

showed that when the air supply increases from 19 °C to 21 °C, the average temperature of the occupied area increases from 24.5 °C to 26.5 °C. The air quality is improved when the supplied air increases from 19 °C to 21 °C. In addition, the PMV-PPD comfort indices meet the requirements of ISO 7730: 2005.

In addition to simulation and mathematical formulations, the validation of thermal mannequins through experimental evaluations is essential. As observed in studies such as Cheng and Lin (2016), who experimentally investigated the effect of a human body on the pattern of a global air flow and correlation with subjective research allowed us to better assess the human being's thermal sensation in the face of air flows, and also to validate the models developed.

Similar to the previous work, Fojtlín *et al.* (2019) examined typical approaches to obtain local thermal properties of clothing and subjective perception in heterogeneous environments. Standing and sitting conditions were also assessed. The impact on the thermal sensation is demonstrated based on the simulated thermo physiological responses. The results showed noticeable differences in the thermal properties of the clothes between the sitting and standing positions on the lower limbs and torso.

The development of studies related to thermal mannequins and modeling of the human body's thermoregulatory system is essential for a more in-depth assessment of comfort, especially in transient and non-homogeneous environments, where each part of the body may be providing comfort conditions different from global levels, as well as variation over time, in naturally ventilated environments for example.

2.3.4 Thermal comfort studies in different environments

Another great area very widespread among thermal comfort researchers is to identify, based on the environment in which the human being is inserted, ways to predict whether the thermal environment is comfortable and how to carry out the evaluation. For this research, the environments of interest were collective passenger transport, as conducted through the keywords selected for searching the database.

In this way, it was basically divided into four collective passenger transport: airplane, car, bus, train and subway. Where the methods and results obtained were evaluated for each environment.

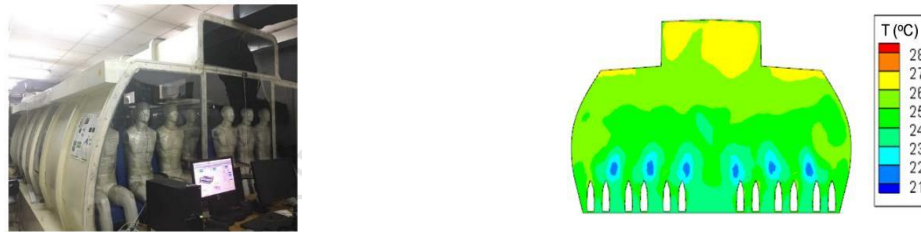
2.3.4.1 Airplane

The study of thermal comfort in aeronautics is of great interest to several researchers, and of great importance to society, as it is the main means of international transport. As addressed by Fan and Zhou (2018) in your review of the literature on thermal comfort in airplanes, there are several factors that influence comfort such as relative humidity, radiant temperature, and human metabolism. According to the authors, comfort models can be divided according to the environment, being stationary or transient, and uniform or non-uniform. In this environment, many authors have studied ways to improve air quality without reducing comfort conditions, proposing new models of ventilation systems.

As can be seen in the research of Maier *et al.* (2017) who studied three different versions of ventilation systems (100% by variable displacement; 70:30% hybrid system combining variable displacement and mixed ventilation; 50:50% hybrid system combining variable displacement and mixed ventilation) in a simulated aircraft cabin. For the assessment, they conducted surveys based on objective and subjective data with 40 participants in each system. Air speed and temperature data were also collected and thermal dummies were used in the aircraft's unoccupied seats. The results were compared with a previous study with mixed ventilation only. The data obtained revealed that the vertical temperature difference in systems 100% by variable displacement and mixed ventilation is relatively smaller. Air speed was lower with a variable displacement system and increased with a greater amount of mixed ventilation provided.

Another interesting job was done by You *et al.* (2018) where they carried out experimental and numerical studies to improve the ventilation system of the airplane cabin, as can be seen in Figure 8. A new system was proposed designed to reduce contaminants and maintain thermal comfort. With the research, it was verified the best configuration of diffusers and exhaust fans that the cabin must have to transport contaminants and maintain thermal comfort.

Figure 8 - Numerical and experimental study of the airplane.



Source: You *et al.* (2018)

You *et al.* (2016) they also evaluated, through experimental and numerical measurements, the distribution of air in an airplane cabin model. The study demonstrated the best practices for carrying out the experimental measurements and for the numerical simulations, corroborating with the previous study referring to improvements in the aircraft's ventilation systems.

Other ways of seeking to improve the ventilation systems of aircraft cabin is the use of optimization methods. According to research Wei *et al.* (2019), where they studied optimization methods to improve the ventilation system of an aircraft cabin. The results indicated that the integration of several methods made it possible to obtain the best solutions and reduce computational time. The results made it possible to achieve optimal design values to ensure better conditions of thermal comfort for passengers and improve the ventilation system.

In addition to these simulation fields with a focus on the cabin ventilation system, experimental studies and subjective research are essential to validate the methods and models of comfort in this environment. Thus, we can observe two studies that carried out studies like this.

Cui *et al.* (2014) who explored the field of thermal comfort in an aircraft cabin including the spatial distribution of the environment with parameters such as air temperature, relative humidity, black globe temperature and air speed, in addition to a survey questionnaire for passengers. In the aircraft, the position of the seats can influence comfort, if it is close to the window it can be influenced by hot or cold radiation and passengers in areas of high human density can be influenced by the higher temperature. The results indicated that the spatial distribution in the cabin was not uniform, but the difference did not significantly influence the assessment of comfort, probably due to the possibility of self-adjustment of passengers. Based on the local analysis, it was observed that the upper body was the most comfortable. The study

also showed that by improving local comfort in some parts of the body, it is possible to achieve better conditions of global thermal comfort.

Another interesting study was conducted by Giaconia *et al.* (2015) who investigated thermal comfort in short-haul domestic flights by means of experimental measurements, comfort indexes and subjective research. Air temperature, radiant temperature and relative humidity data were collected during the flights. The air temperature varied between 22.2 °C and 26.0 °C, the humidity between 8.7% and 59.2%. The calculated PMV values ranged from -0.16 to 0.90 and were confirmed based on the responses of the passengers. The equivalent temperature was also calculated based on ISO 14505-2, correlating with the other determined indices. The results indicated that the equivalent temperature can also be used to assess comfort in this environment, in addition to the PMV index.

Each environment has its particularity that influences thermal comfort, as well as several methodologies for evaluation, either experimental or subjective, or through numerical models. The combination of these methods is fundamental for the assertiveness of comfort predictions. The study of the various variables that influence thermal comfort in humans is quite complex, where in aircraft, the study of ventilation systems where better air quality and thermal comfort conditions is very important, since they are long trips in which the human being will be exposed.

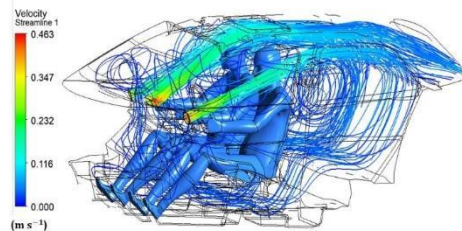
2.3.4.2 Car

Similar to airplanes, automobiles are widely used by human beings, and also a source of various research. However, the environment of the car and the conditions that influence comfort are quite different, as an example, the length of stay of the human being is much shorter than long international trips, also due to the conditions imposed by the external environment such as direct solar radiation, large glass area, air renewal, among other factors.

In automobiles, solar heat gain is one of the most studied factors today. Several studies have developed numerical simulation models with experimental validation to represent this solar condition. In parallel, the use of thermal comfort models standardized in ISO 14505-2 for automobiles, where it uses the method of segmenting the human body and determining equivalent temperatures for each area of the body is widely used together with the PMV-PPD indices for comparison methods.

As an example, the work of Khatoon and Kim (2017) and Khatoon and Kim (2020) where they investigated thermal comfort in a car cabin using numerical simulation, solar radiation and models of thermal comfort (Fanger, modified Fanger and equivalent temperature). Through the results it can be seen that the combination of comfort indexes can improve the precision obtained in estimating the thermal comfort of the vehicle. Comparing the thermal comfort models, it was found that the Fanger models (PMV-PPD) provided satisfactory results for the overall comfort index, despite the equivalent temperature model demonstrating the inhomogeneity of the thermal environment in the vehicle. Figure 9 shows one of the analyzes of the simulation performed.

Figure 9 - Analysis of the current lines of the simulation in the automobile.



Source: Khatoon and Kim (2020).

Similarly, Moon *et al.* (2016) investigated, through numerical simulation, the thermal comfort in a passenger compartment considering the spectral solar radiation. Using the ANSYS Fluent software, which has a built-in solar charge model, the simulation was performed to accurately predict the thermal and flow fields under operational conditions of heating, ventilation and air conditioning. In this study, the Fanger model and the equivalent temperature model for comfort analysis were compared. Based on the results obtained, the temperature estimated near the driver and passengers increased by about 1 to 2 °C when considering solar radiation. When comparing the two thermal comfort models, it can be seen that, unlike the Fanger model, which demonstrates comfort on a global level, the equivalent temperature model can predict local temperature problems in comfort levels.

Rosendahl and Olesen (2006) also evaluated the thermal environment of a vehicle using three parameters to assess thermal comfort (air temperature, operative temperature and equivalent temperature). The tests were carried out in the winter period during heating. To assess the environment, ISO 14505-2 was used as a basis

using the equivalent temperature method. Six transducers were used to represent different parts of the body. The results showed that the use of air temperature or operative temperature only as a parameter for assessing thermal comfort in vehicles is not very ideal. The equivalent temperature better represents the inhomogeneity in the evaluated case.

Ružić and Stepanov (2013) evaluated through numerical simulation, the influence of the direction and intensity of solar radiation on the thermal flow of a car driver. The results indicated that the greatest heat flow caused by solar radiation can occur when the sun is in front of the vehicle as proposed in ISO 14505-2. With these conditions, the driver's chest region receives the greatest heat flow. According to the authors, designing the vehicle's air distribution system so that the diffusers provide air conditioning directly to these areas (with a higher incident heat flow) is a way to reduce localized thermal discomfort.

Mao *et al.* (2018) developed a numerical and experimental study to assess the distribution of air inside an electric vehicle under static and dynamic conditions, during the cooling and heating periods. Data on air temperature, vehicle surfaces and the human body were collected at different points. The numerical model showed temperature variations with differences of less than 10% in relation to the experimental data. The analysis of the distribution of temperatures and air velocities showed that the thermal storage of the seat significantly affected the thermal comfort for the transitory conditions. The movement of the vehicle increased the heat transfer by convection on the external surface of the cabin, which increased the heat transfer to the interior and consequently the time needed to promote comfort conditions.

As observed in the works related to thermoregulatory models, it is possible to couple these in numerical simulation models of the environment, providing greater precision in thermal comfort assessments. The following works show this coupling.

Ozeki *et al.* (2003) evaluated the effect of different radiation sources (solar and infrared lamps) on the reflective and transmissive performance of a car's glass. The performance of thermal comfort inside the vehicle was also assessed. For this, the numerical simulation method was used combining a model of thermoregulation of the human body and models of thermal and solar radiation. It was observed that the numerical model performed well to evaluate the equivalent temperature standardized in ISO 14505-2. It was also found that the transmissive and reflective performance of the glasses is quite different with the different sources of radiation. The difference in

air temperature around the occupant is less than 1 °C with different radiation sources, but there are significant differences in the equivalent temperature causing local discomfort.

Dixit and Gade (2015) investigated the use of the simplified thermoregulatory Bio-heat (STB) equation to be solved in parallel to the Navier-Stokes equation within a CFD tool referring to the cabin of a vehicle. For the numerical simulation, a domain that represents the cabin of a vehicle with a human body mannequin with 17 segments was used. The transient analysis was performed using the ANSYS Fluent software. To represent the heat transfer of the human body, the simplified Bio-Heat Equation was used as a condition of the mannequin's contour by means of a UDF (User Defined Function). For the evaluation of thermal comfort, the Fanger model was used by means of the PMV and PPD. The Fanger Equation was applied to each part of the body, which was possible due to the coupling with the simplified Bio-Heat Equation. The PMV-PPD indices were calculated at a distance of 5 cm from the human body to consider environmental variables. The results obtained showed good agreement with the compared cases.

From the observed studies, it appears that in automobiles the research on solar radiation, coupling of thermoregulatory models and also comparisons between the Fanger model (PMV-PPD) and the equivalent temperature for each part of the body are still objects of studies for researchers.

2.3.4.3 Bus

Buses are excellent for the collective transport of passengers, and their use provides numerous benefits to society, such as improving urban mobility and reducing pollution. Providing thermal comfort and air quality to the occupants is essential to promote the use of this vehicle and also to be a competitive differential for bus assemblers.

Thermal comfort for bus drivers is directly related to driving performance, making it a safety requirement for all occupants. As noted in the study of Ismail *et al.* (2015), where they investigated the correlation between thermal comfort and performance of bus drivers in Malaysia. The survey method used was the Survey, where questionnaires were applied to examine the relationship between thermal comfort and environmental factors in the performance of drivers. Approximately 260

drivers were assessed with a 95% confidence level and 0.05 accuracy. According to the statistical analysis, a correlation between performance and thermal comfort was obtained. As a result, it became evident that thermal comfort and environmental factors significantly influence the performance of drivers.

In parallel to the driver's environment, several studies also seek to assess the environment of passengers on the bus. As an example, the work of Lin *et al.* (2010) where they investigated by means of experimental measurements (based on ISO 7726:1998) and Survey research (based on questionnaires ISO 10551:1995 and ISO 14505-3:2006) in 2,129 respondents, the thermal comfort of short and long distance buses. The experimental results indicate that the high temperature of the air, the strong solar radiation and the low movement of the air explain the discomfort of the passengers. It has also been found that passengers over short distances generally adjust the air vents to increase thermal comfort, while passengers in long distance vehicles prefer to close the curtains to reduce discomfort due to solar radiation. This behavior demonstrates the several variables that influence comfort, where several studies are needed for each one.

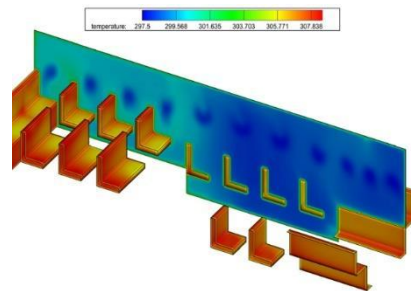
Similarly, Velt and Daanen (2017) evaluated the sensation and thermal comfort of electric bus passengers on a cold day in the Netherlands. 28 men and 72 women were evaluated based on the temperatures measured by an infrared thermometer (of the hands and face) and information on age, height, weight and clothing. The sensation and thermal comfort were based on scales of the ISO 10551:2001 standard. From the collected parameters and the use of linear regression, an equation was determined relating the variables obtained in order to determine the temperature of the bus to promote thermal comfort to passengers. As a result it was obtained that for the evaluated conditions and local climate the ideal temperature for comfort is 20.9 °C with the ambient temperature outside the bus of 13.4 °C.

In addition to experimental research with buses in operation, numerical studies are essential in order to better understand the parameters that influence comfort. The combination of these three main methods of comfort study, Survey research, experimental measurements and numerical methods further improves the accuracy of the results obtained. As addressed by Zhu *et al.* (2018) that studied, through field measurements, questionnaires and a numerical simulation system, the comfort and air pollution in the environment of an air-conditioned bus. For subjective research, questionnaires were applied on defined routes. The experimental tests were carried

out in two days where air temperature and PM₁₀ concentration data were collected. For the numerical method, geometry was assessed equal to that assessed in the field. ANSYS Fluent software and the RANS model were used for turbulence. To simulate passengers, an evenly distributed heat dissipation of 58.2 W/m² was considered. Figure 10 shows the results of the obtained temperature field. The results indicated low air quality and unsatisfactory thermal comfort conditions in the current system. To solve these problems, three scenarios were evaluated by evaluating the ventilatory parameters. According to the results, reducing or adding air vents would shorten the time to reach steady state conditions, weaken the air flow and decrease the temperature. Changing the inflation angle can also reduce the concentration of contaminants (PM₁₀) and improve air quality.

Based on the research carried out in the database, not many studies were found evaluating the environment of the buses, mainly numerical works for the region of the driver's cabin, bringing opportunities for researchers to fill this research gap. As well as the use of the available comfort models, such as the global models of Fanger (PMV-PPD) and even the models of segmented mannequins (through the equivalent temperature).

Figure 10 - Bus temperature distribution through numerical simulation.



Source: Zhu et al. (2018).

2.3.4.4 Train and subway

Other means of passenger transport, widely used mainly in Europe, are trains and subways. Several studies have conducted research related to thermal comfort in these environments, as can be seen in the literature review of Ampofo *et al.* (2004) where they investigated works related to thermal comfort in underground / rail environments. In general, from the results obtained the authors concluded that there are differences in comfort between modern and old subways, generally the level of air

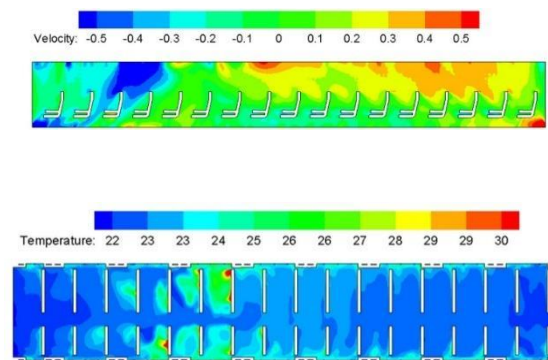
speed is acceptable and a little higher sometimes, the air temperature is high, and there is no radiation problem, factors such as the variation in the number of passengers, the clothes used and the metabolic rate also impact comfort.

As with other public passenger transport, the study of ventilation systems and their influence on thermal comfort are also sources of research on trains and subways. Lian *et al.* (2004) investigated a new type of air supply for a train car in China. The thermal comfort and energy savings provided by the system were also evaluated. For the evaluations, numerical simulations were carried out, validated experimentally. To validate the model, temperature and speed measurements were made on a prototype similar to the numerical model. In general, low relative errors (average of 4.69%) were obtained between the experimental and the simulation. It was found that the proposed system has advantages of better air distribution and energy savings compared to conventional models.

Schmeling and Bosbach (2017) evaluated the influence of sensible heat on ventilation efficiency and thermal comfort in a generic train compartment. To this end, a series of studies in humans have been conducted at various temperatures. Complementing the study, measurements were also made with thermal manikins with controllable sensible heat release. Data on temperature, air speed, humidity and thermal images were collected. The PIV (Particle Image Velocimetry) technique was also used to capture the components of air velocity. In addition to experimental measurements, subjective data was collected from people in the train compartment. As main conclusions it can be observed that the efficiency of heat removal decreases with the increase of the ambient temperature, which decreases the sensible heat lost during the subjective tests.

Similarly, Yang *et al.* (2017) used numerical simulation to study the characteristics of the internal distribution of air conditioning in a high-speed train. The distributions of temperatures, air velocities, pressures and concentration of contaminating gas were evaluated. The results showed that the distribution of temperatures, pressure and speed has an uneven gradient, and there are possibilities to improve the distribution in the environment. Figure 11 shows the results of the study for the distribution of temperatures and air velocities. Studies like this are essential to promote improvements in the design of the air conditioning system and provide comfort to passengers.

Figure 11 - Distribution of temperatures and air velocities through numerical simulation.



Source: Yang et al. (2017).

In addition to studies in public transport, it is essential to understand how the human being feels right before entering these environments, that is, in the subway stations, for example. Thus, Pan *et al.* (2020) proposed a dynamic thermal comfort research method, where participants enter a metro station, take the train and leave a metro station. The environmental characteristics and sensations of the passengers are observed in order to verify the adaptive behavior of the human being in these environments. For this purpose, objective measurements and Survey research were carried out. Based on the experimental measurements, differences of 10 °C were identified between the external environment and the subway environment. For the humidity it was observed that with the increase of the humidity of the external environment there is a decrease of the humidity of the subway. As for the air flow, it was found that in the subway the speeds are higher than in the external environment. Passengers' thermal sensations vary according to location, where in general, the station and subway environments were acceptable. The survey showed that 80% of respondents consider it comfortable at the station and the subway.

Corroborating the study mentioned earlier, Wu *et al.* (2020) evaluated air quality (by PM particulate index) and thermal comfort (by Relative Heat Index) during the transfer process of the Beijing subway. For experimental measurements, data on temperature, air speed, relative humidity, concentration of pollutants (PM_{2.5} and PM₁₀) distributed in different points of the metro stations were monitored. With these data collected, comfort indexes were calculated based on the ASHRAE-55:2013 standard. It was found that the level of thermal comfort is not ideal in 87% of the measured spaces and is slightly warm in general.

2.3.5 Discussion of results

Based on the results obtained from the systematic literature review, several trends were identified to provide the advancement of science in this extremely important area, which is the thermal comfort of human beings.

Initially, as discussed, the development of models and methods for assessing thermal comfort, using indices that encompass the various parameters that influence comfort, are extremely important to predict human satisfaction with the environment. Fanger's PMV-PPD indices, standardized in ISO 7730:2005, are widely used in various researches, making it a benchmark for comparison with other assessment and development methods. As an example, the equivalent temperature method, standardized in ISO 14505-2:2006, used as a reference in local comfort analysis on thermal mannequins. These were the models most cited during the research.

As discussed by several authors, the assessment of thermal comfort in environments can be divided into homogeneous and non-homogeneous, stationary and transient, which promoted several studies to verify the applicability of each method in each environment. Some authors suggest that the PMV-PPD indices bring excellent results to determine the overall comfort following the model's restrictions, while the equivalent temperature method performed through the segmentation of a thermal manikin provides better results to determine local comfort levels.

It was also observed that, as researched by several authors, there are several variables that influence comfort, and the study of better indexes that provide better precision in the results is in constant discussions. As well as there are several forms of comfort evaluation as observed in the works, which are: through subjective analysis, experimental measurements or numerical simulations. The coupling of these methods allows to provide better precision regarding the thermal satisfaction of the human being in the environment.

Another major area of research was the thermoregulation models of the human body. The coupling of these, with CFD models of the environment allows to predict with lower computational costs, the adaptation of the human being in the environment, making an efficient way to evaluate comfort mainly in transient environments, discussed by many as suggestions for future work.

The use of these concepts of models of thermal comfort and thermoregulation of the human body applied to different types of environments is also a great area of

research. Due to the complexity of evaluating the various variables that influence thermal comfort, and also the factors of each environment, especially in public passenger transport, research becomes essential for the development of science and technology.

With this, it is expected that the advancement of computational resources, thermal comfort models and numerical simulations will provide the development of technologies in the future, optimizing products, improving issues such as energy efficiency and indoor air quality in the most diverse environments in which the human being is present.

2.4 CONCLUSION

This work presents a literature review through a systematic methodology, identifying the state of the art related to thermal comfort analyzes.

The systematic review method used for the review allows the identification of studies relevant to the area. Furthermore, the bibliometric analysis stage included in the selection and analysis of the research is an excellent tool to quantify the published works, and to identify the most relevant research in question.

The subject of human thermal comfort is broad and complex, thus providing numerous challenges and possibilities for researchers. As noted in the results obtained from the review, there are several possible paths to be studied and better understood to provide the advancement of science and technology.

Relating the various variables that influence thermal comfort, transforming subjective thermal sensation into mathematical equations and comfort indexes is one of the major stages of studies related to the theme of comfort. Another approach, as observed in some research, is the modeling of the human body's thermoregulatory system, allowing to make thermal comfort models more accurate and more efficient. The application of these two approaches in different environments is another major area of research, as observed in the various researches found.

For the assessment of thermal comfort, mainly three methodologies can be adopted: through subjective analysis (very important for the creation of thermal comfort indexes), by experimental measurements (if used in conjunction with subjective analysis, it allows the validation of comfort models), and finally, numerical simulations (sources of study for many researchers today).

Through the discussions of the results by the observed works, numerous research gaps and trends for future works were identified, as reported below:

- a) the evaluation of the various types of environments that have not yet been studied, promotes the development of technology, placing more emphasis on the topic of thermal comfort and providing greater quality of life;
- b) the study of non-homogeneous and transient environments for the assessment of thermal comfort are trends for future work;
- c) the coupling between thermoregulation models of the human body with the computational fluid dynamics can provide great advances, bringing greater precision to the results obtained in the evaluation of thermal comfort;
- d) the use of optimization methods coupled with numerical simulations can also promote the advancement of technology in the area.

The literature review allows researchers and professionals to identify the best ways to conduct their research, observe the gaps that still need to be filled, know how the topic is being dealt with in the world and identify future trends, thus promoting the advancement of science and consequently the technology in this area is very important for human beings.

3 ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DO CONFORTO TÉRMICO NA CABINE DO MOTORISTA DE UM ÔNIBUS

Resumo: a pesquisa em torno do conforto térmico é motivada pela melhoria da qualidade de vida, segurança para atividades que exijam atenção, eficiência energética, diferencial competitivo para a indústria, e diversas atividades em que o ser humano está inserido. A Dinâmica dos fluidos computacional (CFD) permite simular variáveis ambientais, como temperatura do ar e velocidade do ar, as quais são relacionadas ao conforto térmico em diferentes ambientes. Assim, a CFD pode ser utilizada para aperfeiçoar as geometrias e condições de operação de sistemas a fim de melhorar as condições de conforto térmico e contribuir com o avanço da ciência e da tecnologia. Este trabalho propõe-se investigar, através de métodos numéricos e experimentais, o escoamento de ar, suas velocidades, umidade relativa e temperaturas, no ambiente de uma cabine de motorista de ônibus, a fim de relacioná-los ao conforto térmico neste ambiente. Foi utilizado um código comercial de CFD baseado no método de volumes finitos, e foram comparados os resultados com medições experimentais. A validação permitiu definir as boas práticas de modelagem para o sistema em questão. A determinação dos índices de conforto térmico (PMV-PPD) e os campos de temperaturas e velocidades do ar permitiram que fossem elaboradas recomendações voltadas a proporcionar melhores condições de conforto térmico para o projeto de cabines de ônibus. O modelo numérico desenvolvido apresentou bons resultados observando as comparações com as medições experimentais. A diferença absoluta média obtida para a temperatura foi de 0,8 °C enquanto para a velocidade do ar foi de 0,04 m/s. Através dos resultados numéricos, os índices PMV-PPD demonstram que 92,33% dos indivíduos iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,3582. Os resultados experimentais de temperatura e velocidade do ar médias demonstram que 93,27% iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,2882. A metodologia adotada para avaliação do conforto térmico através das simulações numéricas permite proporcionar ambientes confortáveis aos seres humanos através do estudo de melhorias em diferentes projetos.

Palavras-chave: CFD. conforto térmico. ensaio experimental. ônibus. PMV-PPD. simulação numérica.

3.1 INTRODUÇÃO

As pesquisas em torno do conforto térmico para o ser humano são fundamentais para promover melhorias na qualidade de vida, desenvolvimento de novas tecnologias e segurança.

O conforto térmico está diretamente relacionado com a satisfação do ser humano ao ambiente em que está situado. De acordo com a ISO 7730 (2005) são diversos fatores que influenciam no conforto térmico, sejam por variações de metabolismo, vestimentas, temperatura do ar, velocidade do ar, umidade, temperatura radiante, dentre outros que variam conforme o ser humano. Por se tratar de um conceito também subjetivo que depende de diversos fatores, proporcionar um ambiente térmico considerado aceitável a maioria das pessoas não é trivial.

Em atividades que exijam atenção, como por exemplo dirigir, o ambiente do motorista deve estar confortável termicamente, com qualidade aceitável do ar, baixos níveis de ruído e boa iluminação, evitando problemas como sonolência, desatenção no trânsito, irritação, dentre outros. Estes fatores colocam em risco não só a vida do motorista, como também dos passageiros no caso de transportes coletivos.

A utilização de transportes terrestres é de extrema importância no mundo inteiro. O uso de transportes coletivos proporciona inúmeros benefícios, citando como exemplos a melhora da mobilidade urbana e a redução da poluição gerada pelos veículos. Proporcionar conforto térmico aos ocupantes é fundamental para promover o uso desse veículo e ser um diferencial competitivo para as montadoras de ônibus. A produção anual de veículos no Brasil (incluindo ônibus, caminhões, automóveis e comerciais leves) está aumentando a cada ano (ANFAVEA, 2020).

Os ônibus são um dos principais meios de transporte coletivos no mundo. Para proporcionar condições adequadas de conforto no ambiente interior são utilizados sistemas de climatização projetados para o clima em que estarão inseridos.

Em um ônibus, o sistema de ar condicionado mais utilizado atualmente é o baseado no ciclo de compressão de vapor. O compressor é acoplado ao motor do veículo por meio de polias e correias. Sendo assim, a utilização do sistema influencia na eficiência energética do veículo. Os demais componentes principais do sistema de climatização como condensador, evaporador e válvula de expansão são normalmente posicionados sobre o teto do veículo. O ar condicionado é normalmente distribuído por meio de dutos para os passageiros e motorista. O projeto e dimensionamento

correto de todo o sistema poderá diminuir a demanda energética exigida ao sistema de ar condicionado.

O conforto térmico para motoristas de ônibus está diretamente relacionado ao desempenho de direção, tornando-se um requisito de segurança para todos os ocupantes. Conforme observado no estudo de Ismail *et al.* (2015), onde investigaram a correlação entre conforto térmico e desempenho de motoristas de ônibus na Malásia. O método de pesquisa utilizado foi o Survey, onde foram aplicados questionários para examinar a relação entre conforto térmico e fatores ambientais no desempenho dos motoristas. Aproximadamente 260 motoristas foram avaliados com um nível de confiança de 95% e precisão de 0,05. De acordo com a análise estatística, foi obtida uma correlação entre desempenho e conforto térmico. Como resultado, ficou evidente que o conforto térmico e os fatores ambientais influenciam significativamente o desempenho dos motoristas.

Riachi e Clodic (2014) desenvolveram um modelo numérico para avaliar o conforto térmico em um ônibus público. No modelo foram consideradas as cargas solares, dos passageiros e convectivas para identificar o nível de conforto utilizando do conceito de temperatura equivalente. O modelo ainda foi dividido em zonas, com o uso de manequins térmicos modelados e com condições de radiação solar, identificando os níveis de conforto em cada região. Os resultados possibilitaram determinar os níveis de conforto no interior do ônibus para cada zona considerada.

Khatoon e Kim (2017, 2020) investigaram o conforto térmico em uma cabine de carro usando simulação numérica, radiação solar e modelos de conforto térmico (Fanger, Fanger modificado e temperatura equivalente). Por meio dos resultados pode-se verificar que a combinação dos índices de conforto pode melhorar a precisão obtida na estimativa do conforto térmico do veículo. Comparando os modelos de conforto térmico, verificou-se que os modelos Fanger (PMV-PPD) proporcionaram resultados satisfatórios para o índice de conforto global.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) vem sendo utilizada como ferramenta em projetos de distribuição de ar, ventilação e conforto térmico em diversos ambientes, incluindo cabines veiculares.

Com base na revisão da literatura, o uso das simulações numéricas para avaliações de conforto térmico em ambientes internos ainda está em desenvolvimento, e desta forma existem algumas lacunas a serem preenchidas. No estudo do estado da arte realizado, poucos trabalhos foram encontrados utilizando a

CFD para avaliação em específico do conforto térmico no ambiente do motorista de um ônibus. Bem como a realização de validações experimentais dos resultados obtidos. Sendo assim, este trabalho propõe o estudo, trazendo as boas práticas de simulação como simplificações da geometria e condições de contorno, além da validação experimental.

O uso de técnicas numéricas traz diversas vantagens como permitir uma análise local e não invasiva, avaliar diferentes configurações dos sistemas a baixo custo, definir a melhor geometria antes da construção de protótipos reais, dentre outros. Nos dias atuais ainda há algumas dificuldades na utilização das simulações, como o custo computacional elevado para análises de escoamentos turbulentos e tridimensionais, onde há necessidade de tecnologia em hardware avançada.

Observando tais características desta ferramenta, verifica-se que ela pode ser útil no projeto e análise do conforto térmico em cabines veiculares. O uso da CFD pode auxiliar no desenvolvimento de produtos, ganhando com redução de tempo do projeto, e evitando a necessidade de diversos protótipos. Com isso, se torna possível melhorar geometrias e sistemas para atingir um nível de projeto que permita proporcionar condições aceitáveis de conforto térmico e qualidade de vida aos seres humanos.

Estudos relacionados a pesquisa e desenvolvimento estão cada vez mais inseridos na indústria. Nos dias atuais, a união da indústria com a universidade pode proporcionar o avanço da ciência, pois torna possível a união da teoria com a prática e os recursos necessários. Além disso, traz a inovação como diferencial competitivo para os produtos desenvolvidos.

Sendo assim, este trabalho tem o objetivo de investigar o escoamento de ar, suas velocidades, umidade relativa e temperaturas no ambiente da cabine do motorista de um ônibus e analisar o desempenho de um modelo numérico na simulação deste sistema para a avaliação do conforto térmico.

3.2 METODOLOGIA

Este trabalho tem por objetivo investigar o escoamento de ar, suas velocidades, umidade relativa e temperaturas, no ambiente da cabine do motorista de um ônibus e analisar o desempenho de modelos numéricos na simulação deste sistema para a avaliação do conforto térmico.

A estratégia de pesquisa utilizada será através do método de pesquisa numérico experimental. Na Tabela 3 está apresentado de uma forma geral o delineamento da pesquisa através das principais etapas, objetivos, questões a serem respondidas da pesquisa e fontes de evidência.

Visando demonstrar o fluxo macro utilizado para atingir os objetivos do trabalho, na Figura 12 é apresentado de forma visual as etapas.

Figura 12 - Fluxograma de etapas do trabalho.

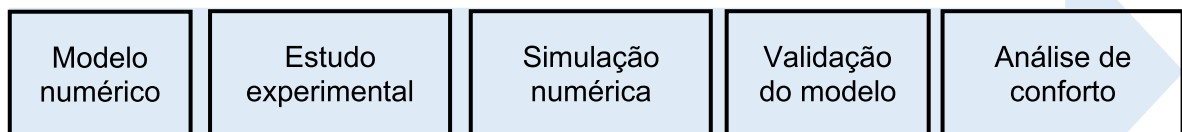


Tabela 3 - Delineamento da pesquisa.

Etapas	Questão da pesquisa	Fontes de evidências
Propor um modelo numérico para o sistema em estudo: <i>modelagem da geometria e simplificações geométricas</i>	Qual o modelo a ser estudado?	Software CAD / Ansys
Propor um modelo numérico para o sistema em estudo: <i>modelagem da turbulência, convecção e condições de contorno</i>	Quais os resultados numéricos esperados?	Software Ansys / FLUENT
Coleta experimental	Quais os dados experimentais obtidos?	Sensoriamento do modelo de ônibus
Investigar o efeito das condições de contorno e modelo de turbulência no desempenho de simulações numéricas frente a dados experimentais	Qual a acurácia do modelo numérico?	Análise estatística no Excel
Investigar parâmetros relacionados ao conforto térmico no sistema, distribuição de velocidades e temperaturas	Como avaliar o conforto térmico?	Referências de conforto térmico

Estas etapas definem a metodologia do trabalho. A seguir, são apresentados os métodos experimentais, métodos numéricos e método para análise do conforto térmico, utilizados na condução do trabalho.

3.2.1 Métodos experimentais

Nas avaliações foi utilizada a cabine do motorista de um ônibus modelo rodoviário utilizado em viagens de longas distâncias. A Figura 13 demonstra o modelo representativo utilizado para as avaliações.

Figura 13 - Modelo representativo de veículo utilizado para as avaliações.



Fonte: adaptado de Vidor (2018).

As avaliações experimentais foram realizadas baseando-se nas normas ABNT NBR 16401-2 (2008), ISO 7726 (1998) e ISO 7730 (2005).

O ensaio foi conduzido de modo a obter as condições de contorno para o modelo numérico, os resultados para comparação com o método numérico e dados para análise de conforto térmico do ambiente. Nas avaliações permaneceu um ocupante em repouso na poltrona do motorista. A Tabela 4 indica as condições para as avaliações experimentais.

Tabela 4 - Condições para as avaliações experimentais.

Condição do veículo	Condição ambiente	Local
Estático	Temperatura: > 28°C UR: 40% a 60%	Pavilhão fechado

O sistema de climatização do ônibus apresenta evaporadores de ar separados para a cabine do motorista e para o salão de passageiros. O ciclo termodinâmico que complementa o circuito térmico possui ainda o condensador, a válvula de expansão e um compressor para ambos os evaporadores. A Tabela 5 demonstra as condições do sistema de climatização que foram utilizadas durante as avaliações e que serviram como dados de entrada para validação do modelo numérico e condições de contorno.

Tabela 5 - Condições do sistema de climatização para as avaliações.

	Cabine	Salão de passageiros
Modo	Recirculação de ar	Recirculação de ar
Velocidade	Baixa (controlável)	Baixa (controlável)
Dutos	Para o motorista	Para os passageiros
Setpoint	22 °C	

Para as avaliações experimentais foram seguidos os passos a seguir:

1. manter o veículo fechado ao Sol até atingir condições de temperaturas maiores do que o ambiente;
2. estacionar o veículo ao abrigo do Sol, em um pavilhão fechado;
3. com o motor ligado com rotação normalmente utilizada em viagens (1500 RPM), acionar o sistema de ar condicionado nas condições descritas na Tabela 5;
4. manter na condição descrita por pelo menos 1 hora e 30 minutos ou até atingir o setpoint por pelo menos 30 minutos;
5. finalizar as avaliações e coletar os dados.

Para as coletas experimentais foram utilizados sensores para obter resultados a fim de validar os dados numéricos obtidos e utilizar no modelo como condições de contorno.

A frequência de aquisição dos dados foi de 1 em 1 minuto para a variável de temperatura do ar, visando avaliar os erros envolvidos e possibilitar cálculos estatísticos.

De modo a avaliar as incertezas de medição envolvidas nas coletas experimentais, para os dados de temperaturas do ar, temperaturas de superfícies, temperatura de globo e umidade relativa utilizou-se o desvio padrão do período de medição realizado. Para os dados de velocidades do ar foram adotadas as precisões dos equipamentos, visto que os sensores não possuíam aquisitores de dados no tempo.

Para as avaliações foram distribuídos sensores na cabine do motorista que permitam determinar as condições de contorno, validar o modelo numérico, e realizar

análises de conforto térmico. A Tabela 6 apresenta a instrumentação que foi utilizada para a coleta dos dados.

Tabela 6 - Instrumentação para os ensaios experimentais.

Propriedade de medição	Tipo de sensor	Fabricante	Precisão	Resolução	Faixas de uso
Temperatura do ar e de superfícies	PT100 encapsulado	Novus	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	0,1 $^\circ\text{C}$	-20 a 70 $^\circ\text{C}$
Temperatura de globo	Termômetro de globo	Instrutherm	$\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	0,1 $^\circ\text{C}$	-10 a 150 $^\circ\text{C}$
Umidade relativa	Higrômetro	Kestrel	3% da leitura	0,10%	5% a 95%
Velocidade do ar	Anemômetro de pás	Kestrel	3% da leitura	0,1 m/s	0,6 a 40 m/s
Velocidade do ar	Anemômetro de fio quente	Kimo	3% da leitura $\pm 0,05 \text{ m/s}$	0,01 m/s	0,10 a 3,00 m/s
Velocidade do ar	Tubo de Pitot	Kimo	$\pm 0,7 \text{ m/s}$	0,1 m/s	0 a 40 m/s

Para obter as condições de contorno para a simulação numérica foram distribuídos sensores de temperatura junto aos difusores de ar condicionado na cabine, regiões de paredes e realizadas medições da velocidade do ar.

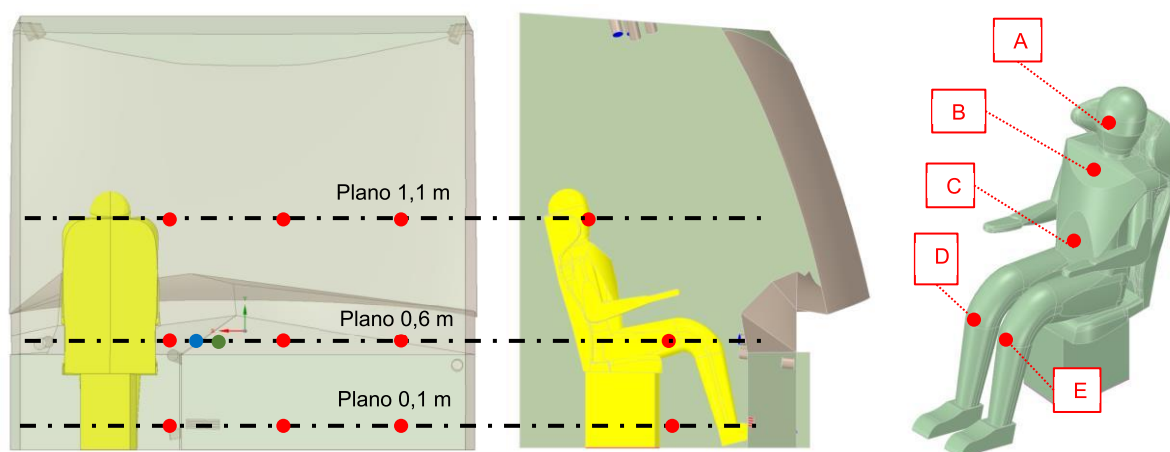
Como condição de entrada no modelo foram utilizados a temperatura do ar e velocidade do ar médias nos difusores de ar condicionado da cabine. Para determinar a condição de contorno nas paredes do modelo, foram fixados sensores de temperatura colados nas superfícies do veículo, nas seguintes regiões: assoalho, laterais, teto, para-brisa, parede de separação e painel. Sendo considerado a temperatura média destas regiões para condição de contorno de parede do modelo. A condição de saída foi considerada nula, 0 Pa e para o boneco foi utilizado taxa de calor, sendo 100 W.

Também foram distribuídos sensores de temperatura do ar (pontos vermelhos) em três alturas (0,1 m, 0,6 m e 1,1 m) na região do motorista e em mais dois planos transversais da cabine, distribuídos simetricamente. Além destes locais também foram instalados sensores de temperatura em alguns locais do motorista sentado na poltrona, a aproximadamente 5 cm de distância da superfície para coleta de dados do

ambiente, e coletadas também velocidades de ar nestas regiões com o anemômetro de fio quente, no sentido onde apresentou a maior velocidade do fluxo do ar.

Os sensores de umidade relativa (ponto azul) e temperatura de globo (ponto verde) foram posicionados na região ao lado do posto do motorista, a 0,6 m do assoalho, para realizar a análise de conforto térmico após as validações do modelo. A Figura 14 demonstra os locais dos sensores posicionados na região do motorista.

Figura 14 - Sensores posicionados na região do motorista.



Com as coletas experimentais realizadas, os dados foram tabulados em planilhas do Software Excel para análise.

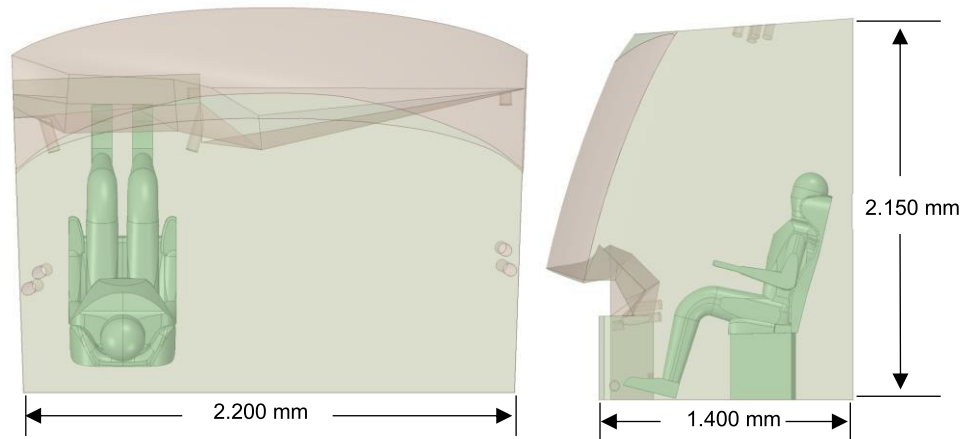
3.2.2 Métodos numéricos

3.2.2.1 Modelo físico

Para a criação do domínio, foi utilizado o modelo em CAD 3D da geometria do veículo disponibilizado pela empresa apoiadora do projeto.

Sobre o modelo 3D do veículo avaliado experimentalmente foram realizadas simplificações de modo a não influenciar nos resultados esperados conforme objetivo da pesquisa. As principais simplificações foram a eliminação de acabamentos, detalhes do painel, botoeiras, perfis e maçanetas de portas, detalhes da poltrona e do motorista. Na Figura 15 pode ser observado o domínio sobre o qual foi gerada a malha computacional.

Figura 15 - Domínio simplificado do modelo numérico da cabine.



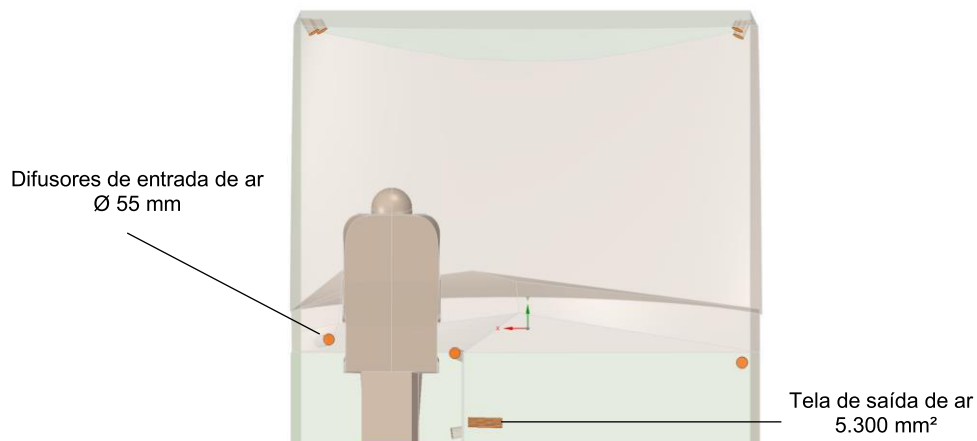
A área útil do boneco representando o corpo humano foi de aproximadamente $1,8 \text{ m}^2$ (área de DuBois) baseado em ASHRAE 55 (2004). Para este estudo foram consideradas as propriedades de roupa conforme Tabela 7 baseando-se nas referências (KHATOON e KIM, 2017 e 2020).

Tabela 7 - Propriedades da roupa utilizada no modelo.

Objeto	Condutividade térmica [W/mK]	Massa específica [kg/m³]	Calor específico [J/kgK]
Roupa	0,04	1297,07	1480,1

Para a condição de entrada foram considerados os difusores com as velocidades e temperaturas do ar medidas experimentalmente. Para a condição de saída foram consideradas as aletas da tela de saída de ar da mesma forma que o modelo experimental avaliado. As condições podem ser observadas na Figura 16.

Figura 16 - Condição de contorno na cabine.



3.2.2.2 Modelo matemático

Sobre o domínio simplificado foi construída a malha para a simulação computacional utilizando o software ANSYS Fluent Meshing, baseado no método de volumes finitos.

O escoamento do ar no interior da cabine do motorista foi considerado turbulento. Conforme observado na revisão bibliográfica da literatura, o modelo de turbulência RNG k- ϵ é o mais utilizado para estudos de distribuição de ar em cabines. Devido a isso, este modelo foi o escolhido para a investigação nesta pesquisa.

A Equação 1 e a Equação 2, escritas para um referencial cartesiano retangular, são as chamadas *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). Elas representam o balanço de massa e de quantidade de movimento para escoamento turbulento respectivamente (ANSYS FLUENT, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

Onde u_i é a componente do vetor velocidade média, ρ é a densidade, p é a pressão média, x_i é a componente do vetor posição, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, δ_{ij} é o delta de Kronecker, u'_i é a componente do tensor de Reynolds na direção i . O termo final da equação representa a hipótese de Boussinesq.

A utilização da abordagem média de Reynolds requer que os esforços sejam modelados adequadamente. A hipótese de Boussinesq relaciona as tensões de Reynolds com os gradientes médios de velocidade. A Equação 3 representa o termo final da equação de movimento (Equação 2), com esta hipótese adicionada (ANSYS FLUENT, 2013).

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

Conforme observado na equação, o método que emprega a hipótese de Boussinesq relaciona as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidades médias.

Os modelos k- ϵ apresentam duas equações de transportes separadas, sendo para energia cinética (k) e para sua taxa de dissipação (ϵ). Devido a sua robustez e

precisão são amplamente utilizados na indústria. O modelo RNG k- ϵ é semelhante ao modelo padrão, entretanto com alguns termos adicionais que melhoram sua precisão. A Equação 4 e a Equação 5 representam as equações de transporte para este modelo (ANSYS FLUENT, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (5)$$

Nas equações, G_k representa a geração de energia cinética de turbulência, G_b é devido a flutuabilidade, Y_M demonstra a contribuição do fluante de dilatação em turbulência compressível para a taxa de dissipação geral, α_k e α_ϵ são o inverso dos números de Prandtl, S_k e S_ϵ são os termos fontes.

A solução da equação de energia em termos de temperatura é realizada através da Equação 6 (ANSYS FLUENT, 2013).

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-K \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho c_p \overline{u_i' T'} \right) + \bar{\phi} \quad (6)$$

Onde c_p é o calor específico, T a temperatura média, K a condutividade térmica, u_i' a componente da flutuação de velocidade na direção x, e $\bar{\phi}$ o termo de dissipação total.

O escoamento foi considerado em regime permanente. Para o acoplamento da pressão e velocidade foi utilizado o algoritmo *COUPLED*. Equações de primeira ordem foram utilizadas para as variáveis de turbulência e de segunda ordem para as demais, pressão, momento e energia.

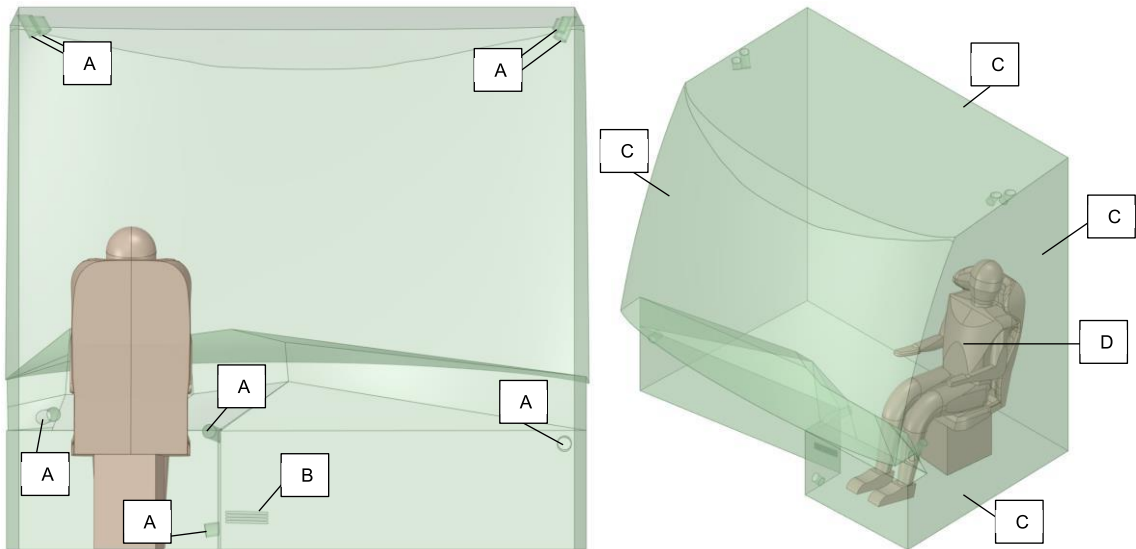
Também foram consideradas as funções de parede para capturar o efeito do fluido adjacente a esta área na cabine do motorista.

Na Tabela 8 são apresentadas as condições de contorno que foram consideradas para a simulação numérica. A Figura 17 indica as condições de contorno no domínio relacionando com os parâmetros da Tabela 8 através do índice de letras.

Tabela 8 - Condições de contorno utilizadas na cabine.

Entrada (A)	Saída (B)	Paredes (C)	Boneco (D)
Médias das temperaturas e velocidades do ar medidas experimentalmente.	0 Pa.	Temperatura média medida experimentalmente.	Taxa de calor (100 W).

Figura 17 - Condições de contorno para a cabine.



Através das simulações numéricas foram obtidas as distribuições de temperaturas do ar e velocidades do ar no ambiente da cabine do motorista. Após realizadas as simulações numéricas foram validadas com base nas medições experimentais.

3.2.2.3 Modelo numérico

O software utilizado para as soluções foi o Ansys Fluent 2019 R2, baseado no método de volumes finitos (MVF).

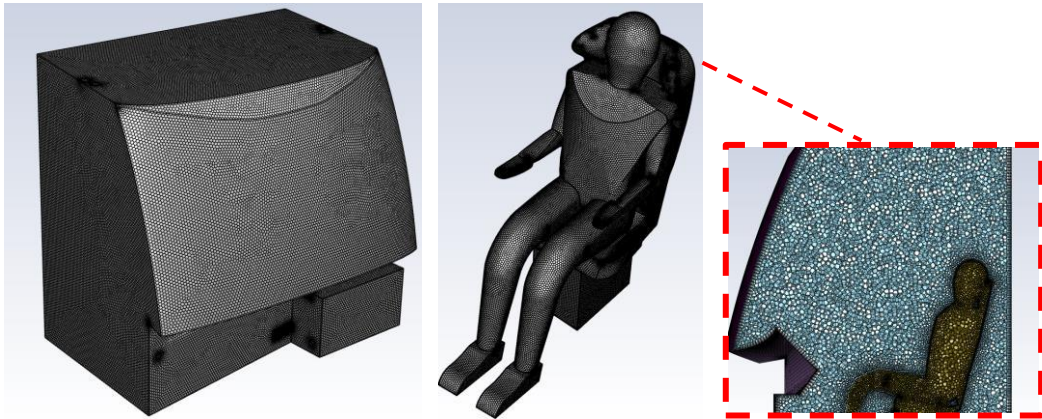
Para obter a convergência foi utilizado o critério RMS com resíduos inferiores a 1×10^{-3} para conservação de massa, 1×10^{-4} para movimento e turbulência e de 1×10^{-6} para a conservação da energia.

O tempo físico para a solução com este critério de convergência foi de aproximadamente 6 horas utilizando um computador com processadores intel^(R) Core (TM) i7 (2 núcleos e 4 processadores lógicos) e com 16 Gb de memória RAM.

Para malha computacional gerada a partir do domínio criado foram utilizados elementos predominantemente em formatos poliédricos com camadas prismáticas

sobre as superfícies do boneco representando o motorista e nas paredes. Este modelo foi adotado devido a geometria complexa utilizada. A malha gerada apresenta aproximadamente $1,9 \times 10^6$ elementos de volumes. A Figura 18 demonstra a malha gerada e utilizada para os cálculos no domínio da cabine.

Figura 18 - Malha gerada a partir do domínio da cabine.



3.2.3 Análise do conforto térmico

Para a análise do conforto térmico foram avaliados o escoamento de ar, suas velocidades, umidade relativa e temperaturas no ambiente da cabine do ônibus observando a região próxima ao motorista.

Com isso, foi realizada uma análise global do ambiente térmico do motorista, onde através dos índices PMV-PPD, os quais são regulamentados pela norma ISO 7730 (2005), foi possível estimar o grau de satisfação do ser humano com o ambiente térmico da cabine do ônibus.

De acordo com a ISO 7730 (2005), o conforto do ser humano depende, além de outros fatores, do equilíbrio térmico com relação ao ambiente em que está inserido. São diversos fatores que influenciam no conforto, sendo os principais relacionados a seguir:

- a) atividades físicas (taxa metabólica);
- b) vestimentas utilizadas;
- c) temperatura do ar;
- d) velocidade do ar;
- e) temperatura radiante média;
- f) umidade relativa.

Através destes fatores pode-se estimar a sensação térmica pelo índice de voto médio previsto (PMV). Este índice foi determinado de forma empírica através de pesquisadores avaliando um grande grupo de pessoas em um ambiente controlado (ISO 7730, 2005). Através destes estudos, foi possível a determinação de uma escala de sensação térmica que relaciona valores obtidos por meio da Equação 7 até a Equação 10 com a sensação do ser humano. A Tabela 9 demonstra os valores relacionando a sensação com a escala utilizada pela norma.

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

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

$$h_c = \begin{cases} 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{para } 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2,38|t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \tag{9}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \end{cases} \tag{10}$$

Onde M é o fluxo metabólico (W/m^2), W é a fluxo mecânico efetivo (W/m^2), I_{cl} é o isolamento da roupa ($\text{m}^2\text{K/W}$), f_{cl} é um fator de superfície da roupa, t_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), \bar{t}_r é a temperatura radiante média ($^{\circ}\text{C}$), v_{ar} é a velocidade relativa do ar (m/s), p_a é a pressão parcial do vapor de água (Pa), h_c é o coeficiente de transmissão de calor por convecção ($\text{W/m}^2\text{K}$), t_{cl} é a temperatura da superfície da roupa ($^{\circ}\text{C}$).

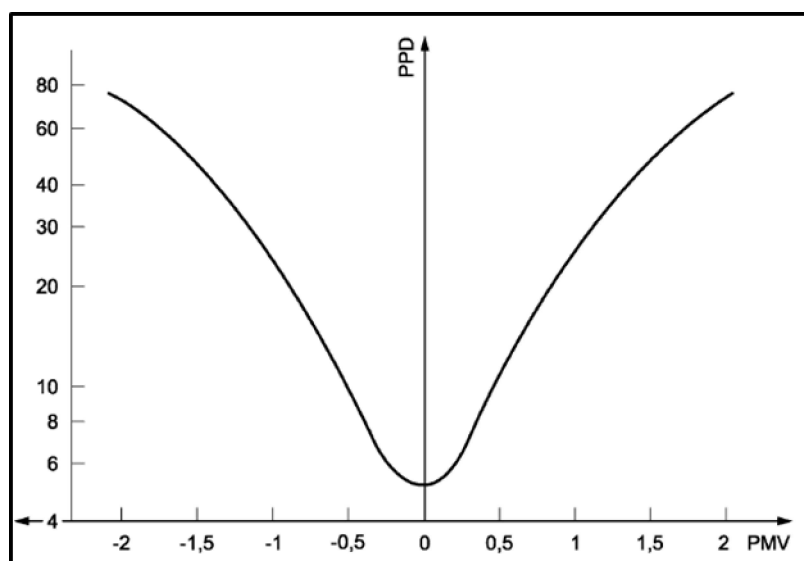
Tabela 9 - Escala de sensação térmica.

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

Mediante a previsão de um percentual de pessoas que avaliaram a sensação térmica do ambiente, o índice PPD relaciona os valores de sensação térmica a um percentual de insatisfeitos com o ambiente térmico. A Equação 11 calcula com base no PMV este índice PPD. A Figura 19 demonstra o índice PMV em função do PPD. De acordo com as pesquisas, não será possível obter o conforto térmico para todos os seres humanos, desta forma se observa que o índice PMV na faixa entre -0,5 e 0,5 apresenta um ambiente confortável a pelo menos 90% dos indivíduos.

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (11)$$

Figura 19 - PMV-PPD.



Fonte: ISO 7730 (2005).

Através dos resultados experimentais e numéricos obtidos foi avaliado o conforto térmico na região da cabine do motorista considerando as seguintes hipóteses assumidas para os cálculos e análises:

- a) taxa metabólica de 1,0 met que representa a atividade “repouso, sentado” conforme norma ISO 7730 (2005), representando a condição das avaliações experimentais;
- b) vestimenta de 1,0 clo, observando as mesmas condições utilizadas nas medições experimentais;
- c) para o cálculo foram utilizadas as temperaturas e velocidades médias do ar na região do motorista, obtidos através da simulação numérica e também pelos dados experimentais. Para os cálculos utilizou-se os parâmetros médios destas variáveis, sendo desconsiderados desconfortos térmicos localizados para o motorista para a análise da satisfação térmica. Optou-se por utilizar estes parâmetros por se tratar de uma análise global do ambiente do motorista, baseando-se na normativa estudada;
- d) a umidade relativa média do ambiente foi medida experimentalmente;
- e) a temperatura média radiante foi calculada a partir da temperatura de globo medida experimentalmente. Para o cálculo são utilizadas da Equação 12 até a Equação 15 (ABNT NBR 16401-2, 2008).

$$h1 > h2 \quad \bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (12)$$

$$h1 \leq h2 \quad \bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 V_{ar}^{0,6} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (13)$$

$$h1 = 1,4 \left(\frac{t_g - t_a}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

$$h2 = 6,3 \left(\frac{V_{ar}^{0,6}}{D^{0,4}} \right) \quad (15)$$

Onde \bar{t}_r é a temperatura radiante média (°C), t_g é a temperatura de globo (°C), t_a é a temperatura do ar (°C), V_{ar} é a velocidade relativa do ar (m/s), $h1$ e $h2$ são os coeficientes de transferência de calor, D é o diâmetro do globo (igual a 0,15 m).

Com estes parâmetros obtidos e definidos, foi possível realizar a análise de conforto térmico global através dos índices PMV-PPD.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

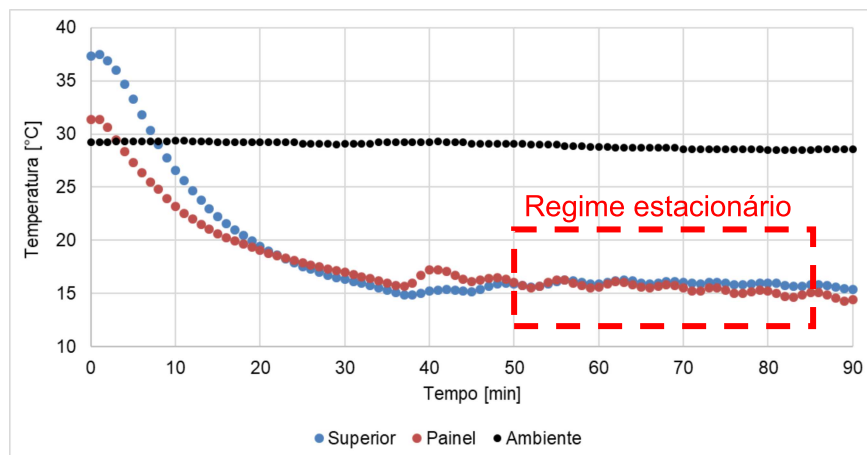
A apresentação dos resultados foi dividida em quatro etapas: as coletas experimentais, os resultados da simulação numérica, a verificação do modelo numérico criado, e a avaliação do conforto térmico no ambiente.

3.3.1 Coletas experimentais

Foram realizadas coletas experimentais para obter as condições de contorno do modelo numérico, a validação do modelo e visando também a avaliação do conforto térmico do ambiente do motorista.

Os dados obtidos foram analisados após o ambiente da cabine do motorista atingir condições estacionárias, conforme ilustrado na Figura 20 pela distribuição do insuflamento do ar condicionado.

Figura 20 - Temperaturas médias de insuflamento do ar condicionado.



A temperatura média de insuflamento do ar condicionado utilizada para as simulações pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 10 - Temperaturas médias de insuflamento do ar.

Difusores de ar condicionado	Temperatura média [°C]	Incerteza de medição [°C]
Superior	15,7	± 0,7
Painel	16,2	± 1,0

Além das temperaturas de insuflamento foram medidas as velocidades do ar nas saídas dos dutos, junto aos difusores de ar, para utilizar como condição de contorno no modelo numérico. Na Tabela 11 podem ser observados os resultados obtidos através das medições na região de saída dos difusores.

Tabela 11 - Velocidades de ar nos difusores.

Difusores de ar condicionado	Velocidade média do ar [m/s]	Incerteza de medição [m/s]
Superior	0,10	± 0,05
Painel	0,55	± 0,07

Nas condições avaliadas (temperatura do ambiente em 22 °C e sem radiação solar) baixas velocidades podem proporcionar conforto térmico aos ocupantes do ambiente (ISO 7730, 2005). Comparando ao estudo realizado por Khatoon e Kim (2020), o qual realizaram uma simulação numérica de um automóvel de passeio, observa-se também as baixas velocidades de insuflamento do ar nos difusores do painel, muito próximas as avaliadas neste estudo, corroborando com os resultados desta pesquisa.

Neste período em que foram avaliados os dados, foram coletadas as demais variáveis para a validação do modelo e a análise do conforto térmico. Na Tabela 12 podem ser observados os dados obtidos da distribuição de temperaturas médias no ambiente da cabine.

Tabela 12 - Distribuição de temperaturas médias na cabine.

Região	Temperatura média [°C]	Incerteza de medição [°C]
Plano horizontal à 1,1 m de altura	22,6	± 0,2
Plano horizontal à 0,6 m de altura	22,2	± 0,3
Plano horizontal à 0,1 m de altura	22,4	± 0,6

Como condição de contorno foi utilizada a temperatura média das superfícies coletadas experimentalmente, onde o valor obtido foi de $24,7 \pm 0,9$ °C.

Para a avaliação do conforto térmico também foram coletados dados de umidade relativa do ar, e da temperatura de globo visando avaliar a temperatura radiante na cabine, próximo ao motorista. Na Tabela 13 podem ser observados estes resultados.

Tabela 13 - Temperatura de globo e umidade relativa.

Temperatura de globo [°C]		Umidade relativa [%]	
Média	Incerteza de medição	Média	Incerteza de medição
22,3	± 0,2	42,4	± 1,9

Através destas avaliações também foi possível comparar os resultados numéricos e experimentais para posterior avaliação do conforto térmico. Desta forma, foram coletados dados de temperaturas e velocidades de ar a aproximadamente 5 cm da superfície do ocupante representando o motorista, visando obter os dados mais precisos do ambiente em torno dele. Na Figura 21 estão indicados os pontos avaliados, enquanto na Tabela 14 podem ser verificados os resultados obtidos.

Figura 21 - Pontos monitorados na região do motorista.

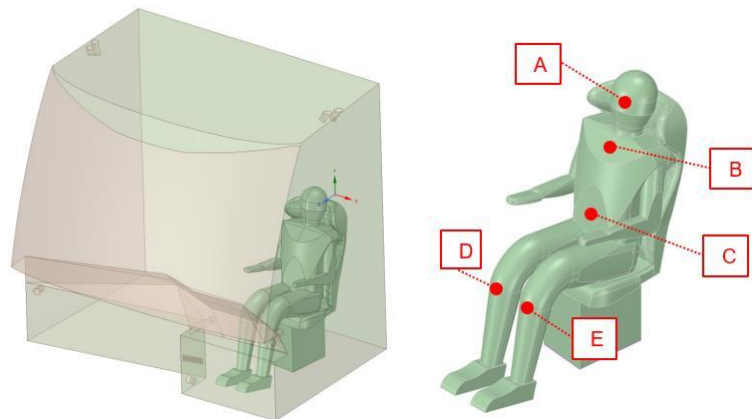


Tabela 14 - Resultados obtidos junto ao ocupante do posto do motorista.

Região	Temperatura do ar [°C]		Velocidade do ar [m/s]	
	Média	Incerteza de medição	Média	Incerteza de medição
A	-	-	0,10	± 0,05
B	22,6	± 0,7	0,10	± 0,05
C	22,0	± 0,2	0,20	± 0,06
D	23,1	± 0,3	0,00	± 0,05
E	21,1	± 0,2	0,00	± 0,05

Analisando os resultados das medições na região do motorista observa-se que as coletas da temperatura do ar apresentaram baixas incertezas de medição. Entretanto, devido as baixas velocidades do ar, a medição experimental com o

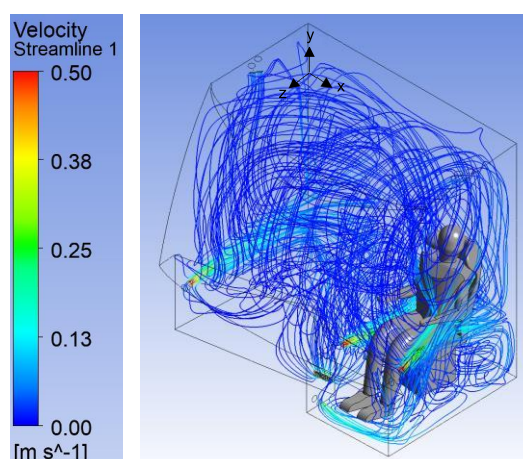
equipamento disponível para esta coleta, apresentou incertezas de medição maiores perante os valores medidos. Destaca-se que durante as medições os valores estavam estáveis em cada região avaliada do motorista. Ressalta-se ainda que técnicas mais avançadas que permitiriam maior precisão, como a técnica *Particle Image Velocity* (PIV) para medições de velocidades do ar ainda apresentam elevado custo no Brasil. Com o intuito de comparar e validar a simulação numérica obteve-se tais resultados de temperatura do ar e velocidade do ar nesta região próxima do motorista.

3.3.2 Simulação numérica

Com o modelo numérico desenvolvido foi possível obter os campos de temperaturas e de velocidades do ar em planos na cabine do motorista e nas regiões do motorista.

Visando analisar o comportamento da distribuição de ar dentro da cabine foram geradas linhas de corrente conforme demonstra a Figura 22, onde foi possível observar o escoamento do ar no ambiente. Através do gráfico pode ser avaliado o fluxo de ar em torno do motorista, o qual é predominantemente direcionado pelos difusores para a região dos pés e do abdômen.

Figura 22 - Linhas de corrente na cabine do motorista.



A distribuição de temperaturas nos planos pode ser observada na Figura 23, enquanto a distribuição de velocidades do ar na Figura 24. Avaliando os gráficos gerados pode ser observado a uniformidade do ambiente nesta condição, sendo as temperaturas mais baixas em volta do motorista conforme esperado.

Figura 23 - Distribuição de temperaturas nos planos.

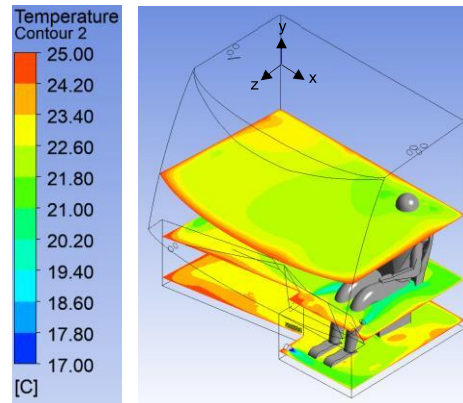
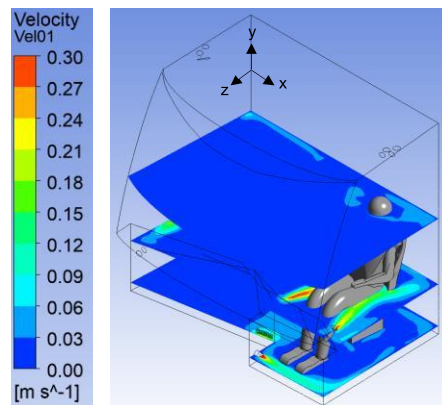
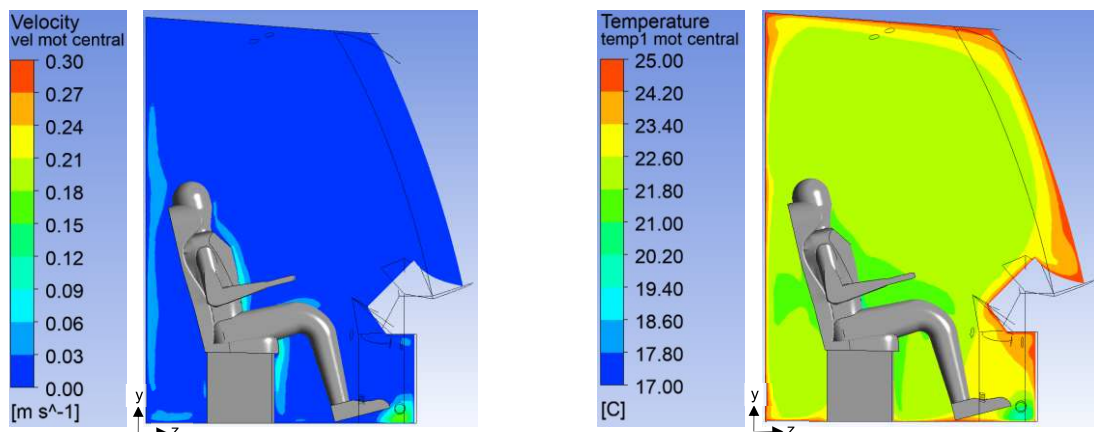


Figura 24 - Distribuição de velocidades nos planos.



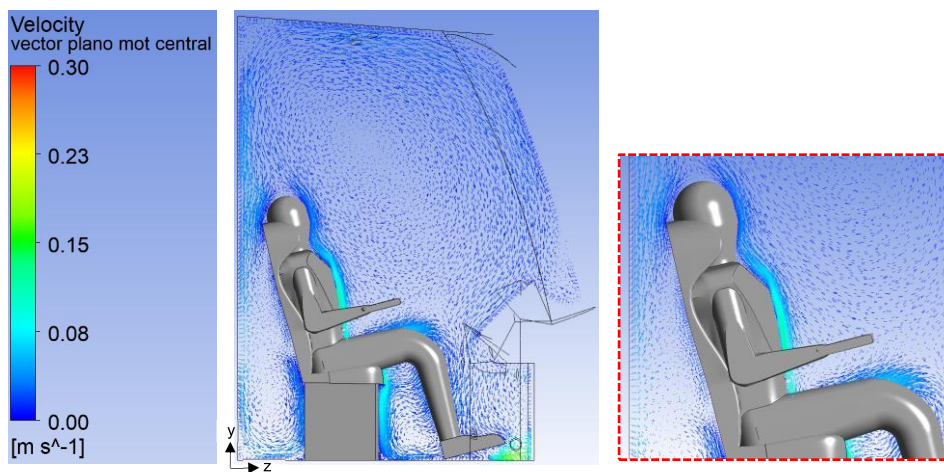
Além destas análises, pode ser observado a distribuição de temperaturas e velocidades nas regiões centrais do motorista conforme Figura 25, dados estes utilizados para validação do modelo e análise do conforto térmico. Avaliando os gráficos verifica-se as menores temperaturas em torno do motorista observando também o contorno com maiores velocidades na região do abdômen.

Figura 25 - Distribuição de temperaturas e velocidades na região do motorista.



Visando demonstrar o comportamento do escoamento do ar na região próxima ao motorista, foram gerados vetores os quais possibilitam a análise de vórtices, e sentidos do escoamento. A Figura 26 demonstra os vetores obtidos no plano central do motorista. Os vetores indicam que o sentido do escoamento na região do motorista está ascendente, o que era esperado devido a inclinação e posição dos difusores em relação ao boneco. Também pode se observar o baixo fluxo de ar nas demais regiões do plano, com velocidades praticamente nulas.

Figura 26 - Vetores do escoamento do ar na região do motorista.



3.3.3 Validação e verificação do modelo numérico

Os resultados numéricos de temperaturas e velocidades do ar foram comparados aos valores experimentais coletados na região em torno do motorista. Na Tabela 15 podem ser observados os valores experimentais e numéricos, de temperaturas e velocidades do ar, e as diferenças absolutas entre eles visando determinar a acurácia do modelo numérico.

Tabela 15 - Validação e verificação do modelo numérico.

Região	Temperatura experimental [°C]	Temperatura numérico [°C]	Diferença absoluta [°C]	Velocidade experimental [m/s]	Velocidade numérico [m/s]	Diferença absoluta [m/s]
A	-	-	-	0,10	0,03	0,07
B	22,6	21,5	1,1	0,10	0,08	0,02
C	22,0	21,0	1,0	0,20	0,11	0,09
D	23,1	22,3	0,8	0,00	0,00	0,00
E	21,1	21,5	0,4	0,00	0,01	0,01

Os resultados obtidos indicaram boa correlação entre o método numérico e o experimental demonstrando a possibilidade deste tipo de avaliação para análise do conforto térmico. A diferença absoluta média obtida para a temperatura foi de 0,8 °C enquanto para a velocidade do ar foi de 0,04 m/s.

Poucos estudos foram encontrados comparando os dados experimentais coletados para validação do modelo numérico da cabine desenvolvido, dentre estes, com o intuito de comparar com as diferenças obtidas nesta pesquisa, observou-se o trabalho de Mao *et al.* (2018) que encontraram as maiores diferenças de 3,5 °C entre os valores de temperatura experimental e da simulação numérica. Lian *et al.* (2004) obtiveram diferenças máximas de temperaturas de 2,36 °C, apresentando resultados aceitáveis para o trabalho realizado. Nesta pesquisa, a diferença absoluta máxima foi de 1,1 °C entre o experimental e o numérico para as regiões avaliadas.

3.3.4 Análise de conforto térmico

Com o modelo numérico validado, foi realizada a próxima etapa desta pesquisa, que é a análise do conforto térmico do ambiente.

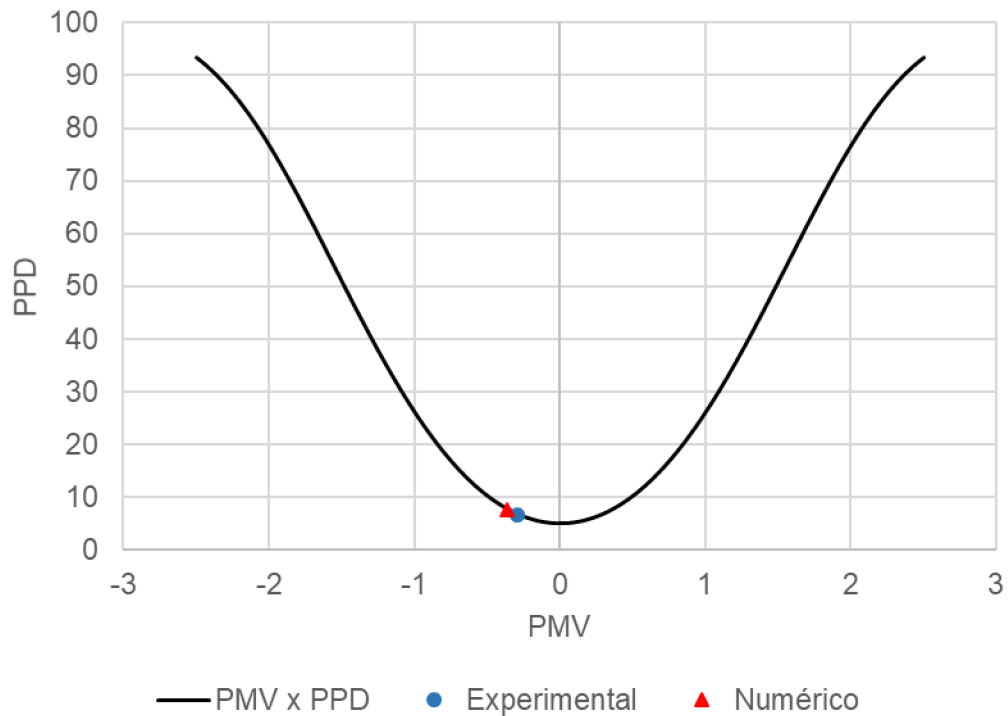
Para determinação dos níveis de conforto térmico no ambiente de uma forma global foram utilizados os índices PMV-PPD. Para isso, foram utilizados os parâmetros descritos na metodologia. A Tabela 16 resume estes parâmetros utilizados para a determinação destes índices.

Tabela 16 - Parâmetros utilizados para entrada do cálculo de PMV-PPD.

Parâmetros	Valor experimental	Valor numérico
Temperatura média do ar [°C]	22,2	21,6
Velocidade média do ar [m/s]	0,08	0,05
Umidade relativa média [%]	42,4	
Temperatura de globo média [°C]	22,3	
Vestimentas [clo]	1,0	
Taxa metabólica [met]	1,0	

Com estes parâmetros definidos, os índices PMV-PPD foram calculados e podem ser observados no gráfico conforme Figura 27.

Figura 27 - Gráfico dos índices PMV-PPD.



Através dos resultados numéricos, os índices PMV-PPD demonstram a sensação térmica onde 92,33% dos indivíduos iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,3582. Os resultados experimentais de temperatura e velocidade do ar médias demonstram que 93,27% iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,2882.

3.4 CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de investigar o escoamento de ar, suas velocidades, umidade relativa e temperaturas, no ambiente da cabine do motorista de um ônibus e analisar o desempenho de modelos numéricos na simulação deste sistema para a avaliação do conforto térmico.

A partir dos resultados experimentais e da base de dados da literatura, foi desenvolvido o modelo numérico observando as características do sistema e o objetivo da pesquisa. Os resultados da CFD possibilitam uma análise detalhada dos campos de distribuição de temperaturas e velocidades do ar no ambiente do motorista.

Os resultados obtidos indicaram boa correlação entre o método numérico e o experimental demonstrando a possibilidade deste tipo de avaliação para análise do

conforto térmico. A diferença absoluta média obtida para a temperatura foi de 0,8 °C enquanto para a velocidade do ar foi de 0,04 m/s.

Poucos estudos foram encontrados comparando os dados experimentais coletados para validação do modelo numérico da cabine desenvolvido, dentre estes, com o intuito de comparar com as diferenças obtidas nesta pesquisa, observou-se o trabalho de Mao *et al.* (2018) que encontraram as maiores diferenças de 3,5 °C entre os valores de temperatura experimental e da simulação numérica. Lian *et al.* (2004) obtiveram diferenças máximas de temperaturas de 2,36 °C, apresentando resultados aceitáveis para o trabalho realizado. Nesta pesquisa, a diferença absoluta máxima foi de 1,1 °C entre o experimental e o numérico para as regiões avaliadas.

Através dos resultados numéricos, os índices PMV-PPD demonstram que 92,33% dos indivíduos iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,3582. Os resultados experimentais de temperatura e velocidade do ar médias demonstram que 93,27% iriam se sentir confortáveis com o ambiente, o que representa um índice PMV de -0,2882.

A metodologia adotada permite determinar os níveis de conforto térmico no ambiente bem como estudar em nível de projetos possibilidades de melhorias de todos os complexos sistemas que envolvem uma cabine veicular ou diversos ambientes em que o ser humano está inserido. Como exemplo de melhorias que poderiam ser estudadas são as variações de velocidades e temperaturas de insuflamento, o isolamento térmico das paredes da cabine e as posições e formatos dos difusores de ar.

Estudos de conforto térmico do ser humano em diversos ambiente estão em constante desenvolvimento em todo o mundo e possibilitam o desenvolvimento desta importante área para a sociedade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do conforto térmico associado ao uso da Dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para a avaliação de ambientes em que o ser humano está inserido é amplamente discutido em todo o mundo.

Na primeira parte deste trabalho pode-se observar diversos autores relevantes para este tema, contribuindo para a assertividade e atendimento dos objetivos da pesquisa realizada na segunda parte do trabalho.

O uso de métodos para determinar os níveis de conforto térmico como o amplamente utilizado PMV-PPD permitem relacionar os diversos fatores que contribuem para a sensação térmica do ser humano e conseqüentemente possibilitar a realização de melhorias do ambiente ainda em nível de projeto.

O uso da CFD aplicada ao ambiente da cabine do motorista de um ônibus possibilitou o avanço da ciência visto que na base de dados investigada poucos estudos foram encontrados para este ambiente, motivado também pela inserção e aproximação da universidade e a indústria.

Os resultados obtidos indicaram boa correlação entre o método numérico e o experimental demonstrando a possibilidade deste tipo de avaliação para análise do conforto térmico. A diferença absoluta média obtida para a temperatura foi de 0,8 °C enquanto para a velocidade do ar foi de 0,04 m/s.

Poucos estudos foram encontrados comparando os dados experimentais coletados para validação do modelo numérico da cabine desenvolvido, dentre estes, com o intuito de comparar com as diferenças obtidas nesta pesquisa, observou-se o trabalho de Mao *et al.* (2018) que encontraram as maiores diferenças de 3,5 °C entre os valores de temperatura experimental e da simulação numérica. Lian *et al.* (2004) obtiveram diferenças máximas de temperaturas de 2,36 °C, apresentando resultados aceitáveis para o trabalho realizado. Nesta pesquisa, a diferença absoluta máxima foi de 1,1 °C entre o experimental e o numérico para as regiões avaliadas.

O método utilizado para avaliar o conforto térmico da cabine do motorista de um ônibus se mostrou uma importante metodologia para aplicação nos diversos projetos da empresa fabricante de carrocerias de ônibus que apoiou a realização deste trabalho e demonstrou potencial para aplicação nos seus processos de desenvolvimento.

Com base nos resultados obtidos na pesquisa, a revisão da literatura e as aplicações do objeto de estudo, surgiram diversas possibilidades de desenvolvimento e pesquisa neste importante tema que é o conforto térmico do ser humano, possibilitando sugestões para trabalhos futuros conforme os destacados a seguir:

- a) utilização de métodos experimentais mais precisos para avaliação destes ambientes como os manequins aquecidos que representem o corpo humano, e até mesmo técnicas precisas de medição como a ferramenta *Particle Image Velocity* (PIV) que permite determinar os campos de velocidade do ar no ambiente. Salienta-se que estas técnicas ainda apresentam elevados custos envolvidos;
- b) outro importante ponto a ser avaliado no conforto térmico são os modelos transientes;
- c) a partir do modelo desenvolvido poderia ser verificado também a influência da radiação solar incidente na cabine veicular e no conforto térmico;
- d) avaliação do modelo em condição dinâmica visando estudar as demais cargas térmicas sobre a cabine;
- e) avaliação de outros métodos para determinação dos níveis de conforto térmico como por exemplo a determinação da temperatura equivalente, comparando aos índices PMV-PPD utilizados neste trabalho;
- f) visto a complexidade e o alto custo computacional em avaliar todo o sistema de ar condicionado de cabines veiculares, sugere-se a utilização de modelos de ferramentas de simulação 0D / 1D do sistema de ar condicionado acoplado as ferramentas da CFD.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2**: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AMPOFO, F.; MAIDMENT, G.; MISSENDEN, J. Underground railway environment in the UK Part 1: Review of thermal comfort. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, n. 5–6, p. 611–631, 2004.

ANFAVEA. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br>. Acesso em: 20/02/2020.

ANSYS FLUENT. ANSYS Fluent Theory Guide. **ANSYS Inc., USA**, v. 15317, n. Novembro, p. 1–759, 2013.

ANSI, **ASHRAE Standard 55-2004**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.

ANSI, **ASHRAE Standard 55-2017**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2017.

CHENG, Y.; LIN, Z. Experimental investigation into the interaction between the human body and room airflow and its effect on thermal comfort under stratum ventilation. **Indoor Air**, v. 26, n. 2, p. 274–285, 2016.

CHENG, Y.; NIU, J.; GAO, N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. **Building and Environment**, v. 47, n. 1, p. 13–22, 2012.

CUI, W.; OUYANG, Q.; ZHU, Y. Field study of thermal environment spatial distribution and passenger local thermal comfort in aircraft cabin. **Building and Environment**, v. 80, p. 213–220, 2014.

DIXIT, A.; GADE, U. A case study on human bio-heat transfer and thermal comfort within CFD. **Building and Environment**, v. 94, n. P1, p. 122–130, 2015.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. V. **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: 2015.

FAN; ZHOU. **A Review about Thermal Comfort in Aircraft FAN**. 2018.

FANGER, P. O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. In: **McGraw-Hill Book Company**. New York: 1972.

FOJTLÍN, M. et al. Local clothing properties for thermo-physiological modelling: Comparison of methods and body positions. **Building and Environment**, v. 155, Março, p. 376–388, 2019.

GAO, N.; NIU, J.; ZHANG, H. Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation. **HVAC and R Research**, v. 12, n. 3, p. 497–518, 2006.

GAO, S.; OOKA, R.; OH, W. Formulation of human body heat transfer coefficient under various ambient temperature, air speed and direction based on experiments and CFD. **Building and Environment**, v. 160, n. Março, p. 106168, 2019.

GIACONIA, C.; ORIOLI, A.; DI GANGI, A. A correlation linking the predicted mean vote and the mean thermal vote based on an investigation on the human thermal comfort in short-haul domestic flights. **Applied Ergonomics**, v. 48, p. 202–213, 2015.

HOFF, J. V.; MAZEJ, M.; HENSEN, J. L. M. **Thermal comfort: research and practice**. Joost. n. 2, p. 2–4, 2010.

HUIZENGA, C.; HUI, Z.; ARENS, E. A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. **Building and Environment**, v. 36, n. 6, p. 691–699, 2001.

ISMAIL, A. R. et al. Relationship between thermal comfort and driving performance among Malaysian bus driver. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 10, n. 17, p. 7406–7411, 2015.

ISO 7726. **ISO 7726: Ergonomics of the environment - Instruments for measuring physical quantities**. Geneva: 1998.

ISO 7730. **ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Geneva: 2005.

KHATOON, S.; KIM, M. H. Human thermal comfort and heat removal efficiency for ventilation variants in passenger cars. **Energies**, v. 10, n. 11, 2017.

KHATOON, S.; KIM, M. H. Thermal comfort in the passenger compartment using a 3-D numerical analysis and comparison with Fanger's comfort models. **Energies**, v. 13, n. 3, 2020.

LIAN, Z. et al. Presentation and evaluation of a new type of air supply system in a passenger carriage in China. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, n. 5–6, p. 703–715, 2004.

LIN, T. P. et al. Passenger thermal perceptions, thermal comfort requirements, and adaptations in short- and long-haul vehicles. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 3, p. 221–230, 2010.

LIU, S. et al. Predicted percentage dissatisfied with vertical temperature gradient. **Energy and Buildings**, v. 220, 2020.

MAIER, J. et al. Ceiling-based cabin displacement ventilation in an aircraft passenger cabin: Analysis of thermal comfort. **Building and Environment**, v. 146, p. 29–36, 2017.

MAO, Y.; WANG, J.; LI, J. Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. **Applied Thermal Engineering**, v. 137, n. Março, p. 356–367, 2018.

MOON, J. H. et al. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 107, p. 77–88, 2016.

NASA. Disponível em: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp>. Acesso em: 20/02/2020.

OZEKI, Y.; TAKABAYASHI, T.; TANABE, S. I. Effects of spectral properties of glass on thermal comfort of car occupants. **SAE Technical Papers**, p. 289–297, 2003.

PAN, S. et al. A thermal comfort field study on subway passengers during air-conditioning season in Beijing Song. **Sustainable Cities and Society**, 2020.

POST, E. et al. The polar regions in a 2°C warmer world. **Science Advances**, v. 5, n. 12, 2019.

RIACHI, Y. A Numerical Model for Simulating Thermal Comfort Prediction in Public Transportation Buses. **International Journal of Environmental Protection and Policy**, v. 2, n. 1, p. 1, 2014.

ROSENDAHL, J.; OLESEN, B. W. Comparison of temperature measurement methods for evaluation of the thermal environment in vehicles. **International Journal of Vehicle Design**, v. 42, n. 1–2, p. 22–34, 2006.

RUŽIĆ, D.; STEPANOV, B. Estimation of heat flux caused by solar irradiation on a driver of passenger car using numerical simulation. **Journal of Applied Engineering Science**, v. 11, n. 4, p. 169–176, 2013.

SCHELLEN, L. et al. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: Coupling with the indoor environment and thermal sensation. **Building and Environment**, v. 59, p. 10–22, 2013.

SCHIAVON, S.; LEE, K. H. Predictive clothing insulation model based on outdoor air and indoor operative temperatures. **Proceedings of 7th Windsor Conference: The Changing Context of Comfort in an Unpredictable World**, v. 59, p. 250–260, 2012.

SCHMELING, D.; BOSBACH, J. On the influence of sensible heat release on displacement ventilation in a train compartment. **Building and Environment**, 2017.

TARTARINI, F. et al. CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. **SoftwareX**, v. 12, 2020.

TIAN, L. et al. The impact of temperature on mean local air age and thermal comfort in a stratum ventilated office. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 501–510, 2011.

TREECK, C. et al. Integrated thermal comfort analysis using a parametric manikin model for interactive real-time simulation. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 2, n. 4, p. 233–250, 2009.

VELT, K. B.; DAANEN, H. A. M. Optimal bus temperature for thermal comfort during a cool day. **Applied Ergonomics**, v. 62, p. 72–76, 2017.

VIDOR, B. V. **Desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo da carga térmica de resfriamento e avaliação do conforto térmico de um ônibus rodoviário**, 2018.

VIDOR, B. V.; ZINANI, F. **Thermal Comfort Analysis: a Systematic Literature Review**. 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2020.

WEI, Y. et al. Integrated inverse design of ventilation for an aircraft cabin. **E3S Web of Conferences**, v. 85, p. 1–6, 2019.

WU, L. et al. Indoor air quality and passenger thermal comfort in Beijing metro transfer stations. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 78, 2020.

YANG, A. M. et al. Numerical study on aerodynamic characteristics of high-speed trains with considering thermal-flow coupling effects. **Journal of Vibroengineering**, v. 19, n. 7, p. 5606–5626, 2017.

YOU, R. et al. Experimental and numerical study of airflow distribution in an aircraft cabin mock-up with a gasper on. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 9, n. 5, p. 555–566, 2016.

YOU, R. et al. An innovative personalized displacement ventilation system for airliner cabins. **Building and Environment**, v. 137, p. 41–50, jun. 2018.

ZHANG, H. et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. **Building and Environment**, v. 45, n. 2, p. 399–410, 2010.

ZHANG, S.; LIN, Z. Standard effective temperature based adaptive-rational thermal comfort model. **Applied Energy**, v. 264, n. Dezembro, 2020.

ZHU, X. et al. Air quality and passenger comfort in an air-conditioned bus micro-environment. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 5, 2018.