

**MAYSA DA CRUZ LIBERATTI**

**Análise de conforto térmico em aeronaves:**  
aspectos da radiação térmica no conforto térmico de uma aeronave

**Maysa da Cruz Liberatti**

**Análise de conforto térmico em aeronaves:**  
aspectos da radiação térmica no conforto térmico de uma aeronave

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro  
Co-orientador: Prof. Dr. Sandro Tavares  
Conceição

Guaratinguetá - SP  
2018

L695a	<p>Liberatti, Maysa da Cruz Análise de conforto térmico em aeronaves: aspectos da radiação térmica no conforto térmico de uma aeronave / Maysa da Cruz Liberatti. – Guaratinguetá, 2018. 50 f : il. Bibliografia: f. 48-49</p> <p>Trabalho de Graduação em Licenciatura em Matemática – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro Coorientador: Dr. Sandro Tavares Conceição</p> <p>1. Conforto térmico. 2. Calor - Transmissão. 3. Ar condicionado. 4. Aeronáutica comercial. I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU: 699.86</p>
-------	---

Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária/CRB-8/9203

**MAYSA DA CRUZ LIBERATTI**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Orientador/UNESP – FEG

  
Prof. FERNANDO HENRIQUE MAY WORM DE ARAÚJO  
Membro da banca/UNESP – FEG

  
Prof. Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI  
Membro da banca/ UNESP – FEG

Novembro / 2018

## **DADOS CURRICULARES**

**Maysa da Cruz Liberatti**

<b>NASCIMENTO</b>	06.05.1992 – Londrina / PR
<b>FILIAÇÃO</b>	Valdecir Liberatti Marlene da Cruz Liberatti
<b>2013/2018</b>	Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
<b>2013/2018</b>	Equipe AEROFEG Aerodesign
<b>2017/2018</b>	Estágio em Engenharia de Desenvolvimento do Produto – EMBRAER S.A

Dedico este trabalho de modo especial, aos meus pais, que sempre lutaram para que hoje fosse possível a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Dedico esta, bem com todas as minhas demais conquistas, aos meus amados pais. Pelas pessoas que eles são, pelas chances e oportunidades que me foram dadas, por todo o apoio que sempre tive e por sempre considerarem as minhas vitórias as deles. Agradeço por toda a educação e amor que me foram dados, como todas as vivências espetaculares que tive até o dia de hoje. Sem vocês eu não seria absolutamente nada, e a alegria que eu sinto agora ao finalizar minha graduação não existiria se eu não pudesse dividi-la com vocês.

À uma das maiores paixões da minha vida, Andie. Sei que você jamais irá ler isso pela simples razão de ser um cachorro, mas espero que você possa sentir o tamanho do meu amor por você e toda a gratidão que tenho por você. Obrigada por ser o ser-humaninho mais puro e amoroso que tive a chance de conhecer.

Agradeço a equipe *AEROFEG* por ser uma das principais causas de tantas alegrias nos últimos anos. Por ajudar no meu desenvolvimento e na construção da minha vida profissional, além de me levar a alcançar lugares tão altos do pódio durante os cinco anos. Agradeço por terem me confiado a capitania durante dois anos, e levarei o peso de ter vestido e honrado essa camisa para o resto da minha vida.

À *República Puricanas*, por terem me acolhido no fim do meu primeiro ano de graduação, e me deixarem fazer parte dessa grande e louca família que cresce e se fortalece a cada ano.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, que jamais deixou de me incentivar. Convivemos juntos durante 5 anos na equipe *AEROFEG*, e você sempre esteve presente para o que eu precisasse, tanto na equipe quanto na realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Sandro Tavares, obrigada por toda a paciência e tempo para me instruir ao longo deste trabalho, e todo o conhecimento sobre o assunto que me foi passado e disponibilizado.

“Disciplina é a ponte que liga nossos sonhos às  
nossas realizações.”

Pat Tillman



## RESUMO

A atenção sobre a análise do conforto térmico em aeronaves cresce cada vez mais devido a limitações especiais dos sistemas de climatização e das características do ambiente térmico de uma cabine de aeronave. O objetivo principal deste trabalho visa calcular a temperatura média radiante (t<sub>mr</sub>) na troca de calor que ocorre entre o passageiro e a cabine de uma aeronave, utilizando um modelo através de uma ferramenta computacional para facilitar os dados de entrada e os cálculos necessários para se estimar o valor da t<sub>mr</sub>. Primeiramente, será apresentado uma revisão com todos os conceitos necessários sobre trocas de calor por radiação e conforto térmico. Serão apresentados estudos realizados de diferentes maneiras para se obter a temperatura média radiante em diferentes pontos da cabine. O trabalho analisa as trocas de calor por radiação de um passageiro com a cabine, que esteja sentado ao lado da parede mais fria próxima a janela, através de um modelo desenvolvido em uma ferramenta computacional que permite através de dados específicos iniciais, calcular o valor da t<sub>mr</sub> e os valores dos índices, voto médio estimado (PMV) e porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) para estimar o conforto térmico. Dessa forma, dados retirados de ensaios e testes realizados em aeronaves comerciais reais, auxiliaram nos cálculos realizados através do modelo com a finalidade de tornar os resultados obtidos os mais próximos possíveis dos valores reais. Por fim, foi realizada uma comparação entre os valores obtidos nos estudos em que este trabalho se baseou, e os valores encontrados através da metodologia aplicada, tornando possível o entendimento da importância da utilização de instrumentos de medição e da menor simplificação possível nos cálculos, para uma maior precisão do valor da temperatura média radiante e do seu impacto nos índices de conforto térmico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aviação comercial. Condicionamento de ar. Temperatura média radiante. Transferência de calor. Cabine de passageiros.

## ABSTRACT

The interest in the analysis of thermal comfort in aircrafts is growing more and more due to the special limitations of air conditioning systems and the thermal environment characteristics of an aircraft cabin. The main objective of this work is to calculate the Mean Radiant Temperature (tmr) in the heat exchange between the passenger and the cabin of an aircraft, using a model through a computational tool to facilitate the input data and calculations necessary to estimate the value of tmr. Firstly, a review will be presented with all the necessary concepts about heat exchange by radiation and thermal comfort. Studies will be presented in different way to obtain the mean radiant temperature at different points in the cabin. The work analyzes the heat exchange by radiation between the cabin and a passenger, which is sitting next to the cooler wall near the window. Through a model developed in a computational tool that allows through specific initial data, is going to be calculated the value of the tmr and the values of the Predicted Mean Vote (PMV) index and the predicted percentage dissatisfied (PPD) to estimate thermal comfort. Thus, data taken from tests and experiment performed on real commercial aircraft, aided in calculations performed through the model in order to make the results obtained as close as possible to the real values. Finally, a comparison was made between the values obtained in the studies in which this work was based on and the values found through the applied methodology. Therefore, making possible to understanding the importance of the use of measuring instruments and the less simplification possible in the calculation, for a greater accuracy of the value of mean radiant temperature, and the impact on the index of thermal comfort.

**KEYWORDS:** Commercial aviation. Air conditioning. Average radiant temperature. Heat transfer. Passenger cabin.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismo de termorregulação .....	21
Figura 2 – Processo de avaliação do conforto térmico .....	22
Figura 3 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à assimetria da temperatura radiante .....	24
Figura 4 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à velocidade do ar .....	24
Figura 5 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à diferença de temperatura do ar ....	25
Figura 6 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à temperatura do piso.....	25
Figura 7 – Modelo cilíndrico de interação térmica: corpo humano – meio envolvente.....	27
Figura 8 – Fraunhofer Flight Test Facility .....	29
Figura 9 – Posição do sensor no teto da cabine.....	31
Figura 10 – Posição do sensor na parede da cabine .....	31
Figura 11 – Valor médio entre o fator de forma entre a pessoa sentada e o retângulo horizontal ou vertical quando a pessoa gira em torno do eixo vertical.....	37
Figura 12 – Equações analíticas para calcular o fator de forma .....	38
Figura 13 – Mapa de assentos da cabine da aeronave A319 .....	39
Figura 14 – Vista do corte da secção transversal da cabine da aeronave A319 .....	39

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Escala de sensação térmica.....	23
Quadro 2 – Categorias de conforto térmico.....	26
Quadro 3 – Escala de sete pontos proposta aos passageiros.....	30
Quadro 4 – Valores de isolamento de vestuário .....	36
Tabela 1 – Comparação entre os resultados obtidos.....	45

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AMS	Air Management System
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers
EES	Engineering Equation Solver
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
ISO	International Organization for Standardization
FTF	Fraunhofer Flight Test Facility

## LISTA DE SÍMBOLOS

$T_p$	Temperatura superficial da pele	[°C]
$E_{es}$	Calor eliminado por evaporação do suor	[W/m <sup>2</sup> ]
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>	adimensional
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>	adimensional
$T_{mr}$	Temperatura média radiante	[K]
$M$	Taxa metabólica de produção de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$W$	Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo	[W/m <sup>2</sup> ]
$C$	Troca de calor por convecção por unidade de área	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$	Troca de calor por radiação por unidade de área	[W/m <sup>2</sup> ]
$C + R$	Calor sensível perdido pela pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{sk}$	Taxa total de perda de calor pela pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{res}$	Taxa total de perda de calor pela respiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$S$	Excedente ou Déficit armazenado	[W/m <sup>2</sup> ]
$C_{res}$	Taxa de perda de calor por convecção através da respiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{res}$	Taxa de perda de calor através da respiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_{cr}$	Taxa de armazenamento de calor no compartimento central	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_{sk}$	Taxa de armazenamento de calor na pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{sk}$	Energia perdida pela pele através da transpiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_c$	Energia perdida por convecção	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{lr}$	Calor latente de respiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{dr}$	Energia perdida através da respiração seca	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_r$	Energia perdida por radiação	[W/m <sup>2</sup> ]
$A_D$	Área superficial DuBois	[m <sup>2</sup> ]
$m$	Massa	[kg]
$l$	Altura	[m]
$h_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$h_r$	Coefficiente de transferência de calor	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$f_{cl}$	Fator de área das vestimentas	adimensional
$R_{cl}$	Resistência térmica das roupas	[(m <sup>2</sup> .K)/W]
$t_o$	Temperatura de operação	[°C]
$t_{sk}$	Temperatura da pele	[°C]
$w$	Umidade da pele	adimensional

$h_e$	Coefficiente de transferência de calor por evaporação	$[W/(m^2.KPa)]$
$p_{sk,s}$	Pressão de vapor de água na pele	$[KPa]$
$p_a$	Pressão parcial do vapor de água no ar ambiente	$[kPa]$
$Re_{cl}$	Resistência à transferência de calor por evaporação da camada de roupas	$[(m^2.KPa)/W]$
$m_{res}$	Ventilação pulmonar	$[kg/s]$
$h_{ex}$	Entalpia do ar inalado	$[J/kg]$
$h_a$	Entalpia do ar inspirado	$[J/kg]$
$m_{w,res}$	Taxa de perda de água pela respiração	$[kg/s]$
$W_{ex}$	Relação de umidade do ar exalado	$[kg(\text{vapor d'água})/kg(\text{vapor de ar seco})]$
$W_a$	Relação de umidade do ar inalado	$[kg(\text{vapor d'água})/kg(\text{vapor de ar seco})]$
$t_{cl}$	Temperatura da vestimenta	$[^{\circ}C]$
$q$	Perda de calor do manequim	$[W/m^2]$
$I_{clo}$	Resistência térmica da roupa	$[clo]$
$T_n$	Temperatura da superfície N	$[K]$
$F_{p-n}$	Fator de forma entre a pessoa e a superfície N	adimensional
RH	Umidade relativa	adimensional
$T_{ar}$	Temperatura do ar	$[^{\circ}C]$
$v_a$	Velocidade do ar	$[m/s]$
$\sigma$	Coefficiente de Stefan-Boltzmann	$[W/m^2.K]$
$\epsilon$	Emissividade da roupa	adimensional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTO.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	O SISTEMA TERMORREGULADOR.....	19
2.2	MÉTODO DE FANGER.....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Voto médio estimado (PMV).....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD).....</b>	<b>23</b>
2.3	DESCONFORTO TÉRMICO LOCAL.....	23
2.4	TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE.....	25
2.5	ISO 7730/2005 – AMBIENTES TÉRMICOS MODERADOS.....	25
2.6	CONFORTO TÉRMICO.....	26
2.7	TROCAS DE CALOR POR RADIAÇÃO EM UMA AERONAVE.....	27
2.8	CONFORTO TÉRMICO EM CABINES DE AERONAVES.....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
3.1	CÁLCULOS PARA PREVISÃO DE CONFORTO TÉRMICO.....	32
3.2	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE.....	36
3.3	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL NO ENTORNO DO PASSAGEIRO.....	40
3.4	FERRAMENTA COMPUTACIONAL.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
4.1	RESULTADOS OBTIDOS.....	42
4.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....</b>	<b>50</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

Na aviação comercial, ocorre uma crescente preocupação em torno do conforto e bem-estar dos passageiros em aeronaves. Os passageiros esperam um nível satisfatório de conforto durante as viagens, considerando que estarão durante horas dentro de uma cabine de aeronave, principalmente em voos mais longos. As companhias aéreas visando atender a demanda, tornarem-se mais sensíveis a este assunto, e em nível internacional, procuraram uma oportunidade de ter regalias e diferenciais em torno desse assunto, com o intuito de aumentarem suas vendas. Os fabricantes de aeronaves, como a Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), a terceira maior empresa de aviação do mundo e a principal líder do mercado de aeronaves até 150 passageiros, tem incorporado soluções sofisticadas, como pisos e interiores aquecidos, para atender a demanda de mercado.

A atenção sobre a análise do conforto térmico em aeronaves cresce cada vez mais devido a limitações especiais dos sistemas de climatização e das características do ambiente térmico de uma cabine de aeronave. Os sistemas costumam apresentar baixas vazões para não comprometer a eficiência e desempenho dos motores, que tem como uma de suas funções realizar a sangria do ar para dentro do sistema de refrigeração. O time de engenharia de Sistemas Ambientais (AMS, do inglês *Air Management System*) é responsável pelo desenvolvimento desse sistema.

As variações das condições térmicas externas também criam ambientes térmicos internos complexos, sendo que a temperatura da fuselagem pode variar muito em um pouco espaço de tempo, criando gradientes de temperatura facilmente observáveis ao longo da cabine.

Na aviação comercial, este ambiente é intensificado devido ao maior número de passageiros transportados, o pouco espaço entre as poltronas, e os compartimentos de bagagem na parte superior da cabine. O acesso limitado a mudança de vestimentas, além do controle das variáveis térmicas do ambiente, aumentam ainda mais a dificuldade para se atingir o conforto desejado.

O processo do estudo do conforto térmico visa analisar as reações fisiológicas do ser humano em relação as diversas condições de temperatura, pressão, velocidade do ar, umidade, de modo a criar um conforto térmico local.

O conforto térmico é um fenômeno subjetivo e sofre interferências de inúmeros fatores, como as condições ambientais de cabine, condições térmicas, acústicas, visuais e físicas, além do estado em que o passageiro se encontra naquele momento.

De modo geral, esse assunto vem ganhando espaço na indústria aeronáutica mundial e um número maior de pesquisas dedicadas a estudar, de modo mais efetivo, a distribuição de ar no interior de aeronaves, cresce a cada ano.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar os benefícios da análise e estudo do conforto térmico, através dos aspectos da radiação térmica, de modo a compreender melhor a ligação entre o indivíduo e o ambiente ao seu redor, e avaliar a influência no desconforto térmico local do indivíduo em relação à distribuição de ar no interior da cabine.

Através de uma modelagem é possível realizar comparações dessa temperatura entre diferentes posições na cabine, como o meio do corredor e o assento ao lado da parede, e a ligação dessas trocas de calor com os resultados do voto médio estimado (PMV).

## 1.3 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O conforto térmico em cabines de aeronaves começou a ganhar mais destaque nas últimas décadas em função de o tempo gasto com viagens utilizando aviões estar crescendo substancialmente, além de acabar se tornando um diferencial de competitividade dentro da indústria aeronáutica.

A necessidade de estudar o conforto térmico em cabines de aeronaves surgiu devido ao fato do ambiente térmico de uma aeronave ser completamente diferente do ambiente térmico para edificações comuns e outros ambientes que não sofrem com fenômenos em elevadas altitudes, onde a maioria dos estudos de conforto térmico são realizados.

Dessa maneira, torna-se relevante analisar a influência das trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente de cabines de aeronaves, como forma de contribuir para melhorias das condições de conforto térmico dos passageiros.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, será apresentado uma revisão da literatura referente a avaliação dos conceitos de conforto térmico, e os principais aspectos relacionados ao conforto térmico e de que maneira iniciaram-se os estudos nessa área.

No capítulo 3 é comentada a teoria sobre a avaliação de conforto térmico em ambientes gerais, e como se avalia o conforto local no ambiente em questão.

A metodologia principal e os dados experimentais serão exemplificados no capítulo 3, juntamente com o equacionamento utilizado para os cálculos de balanço térmico do corpo humano bem como da temperatura média radiante realizados com o software **EES** (*Engineering Equation Solver*).

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho serão descritos no capítulo 4. As conclusões finais estão no capítulo 5, além das limitações encontradas para a realização deste trabalho, e sugestões para trabalhos futuros no capítulo 6. O fechamento se dá na sequência com as referências e bibliografias utilizadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O calor é um tipo de energia que pode ser transferido de um corpo para o outro quando há diferença de temperatura entre eles. Essa transferência pode ocorrer de três formas: por radiação, condução ou convecção.

A radiação térmica ocorre por meio de ondas eletromagnéticas. Como pode ocorrer propagação dessas ondas no vácuo, não é necessário que haja contato entre os corpos para ocorrer transferência de calor. Todos os corpos emitem radiações térmicas que são proporcionais à sua temperatura, ou seja, quanto maior essa temperatura, maior a quantidade de calor irradiada.

O calor também pode ser transferido de um meio para outro através da condução. A energia se propaga em virtude da agitação molecular, sendo esse processo mais eficiente em materiais como metais, por serem bons condutores de calor (INCROPERA, 2014).

No conforto térmico, o corpo troca calor com o ar ambiente externo via convecção forçada, proporcional a diferença entre a temperatura superficial do corpo (roupa e ou pele) e a temperatura do ar no infinito.

O termo conforto deriva do latim “*confortare*” que significa fortalecer ou consolar de dor e fadiga (MALDONADO, 1987). Em português, o termo faz referência ao prazer, bem-estar, comodidade, plenitude. Algumas bibliografias definem conforto como uma reação experimentada pelo usuário durante ou após lidar com certo produto. O estado do indivíduo, físico, biológico e psicológico, além da tarefa que ele estava determinando no momento analisado, são determinantes importantes para o conforto.

Os estudos de conforto térmico se iniciaram devido a necessidade de um ambiente térmico adequado às atividades humanas, além de estabelecer uma metodologia e princípios para uma análise detalhada de análise térmica de um determinado ambiente.

A importância de estudos de conforto térmico está baseada principalmente em três fatores:

- a) A busca pelo bem-estar físico, fisiológico e psicológico do homem, causando a satisfação;
- b) Melhora da performance perceptiva, manual e intelectual, através de um ambiente em que o ser humano esteja confortável termicamente;
- c) A conservação de energia, pois ao conhecer as condições e os parâmetros relativos ao conforto térmico dos ocupantes do ambiente, evitam-se desperdícios com aquecimento e refrigeração, muitas vezes desnecessários (LAMBERTS, 2016).

Vale ressaltar que, devido à diferença de condições biológicas entre os seres humanos, é impossível que todos os ocupantes de um mesmo ambiente estejam confortáveis termicamente; e devido a essas variações, busca-se criar condições de conforto em que a maior porcentagem do grupo esteja em conforto térmico.

Conforto térmico pode ser definido como a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico (ASHRAE Standard 55, 1992 *apud* ASHRAE, 2001).

Neutralidade térmica é uma condição necessária, mas não suficiente, para que uma pessoa esteja em conforto térmico. Um indivíduo exposto a um campo de radiação que não seja simétrico pode estar em neutralidade térmica, mas não em conforto térmico.

Fanger (1970) definiu a neutralidade térmica como “A condição na qual uma pessoa não prefira sentir nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor”.

As pesquisas científicas colaboraram para o estudo e estabelecimentos dos princípios da avaliação térmica das pessoas em relação aos ambientes, o que possibilitou o surgimento das normas. Através de estudos desenvolvidos por Fanger nos anos 70, estabeleceu-se o método do Voto Médio Estimado (PMV), possibilitando prever a avaliação térmica do ambiente.

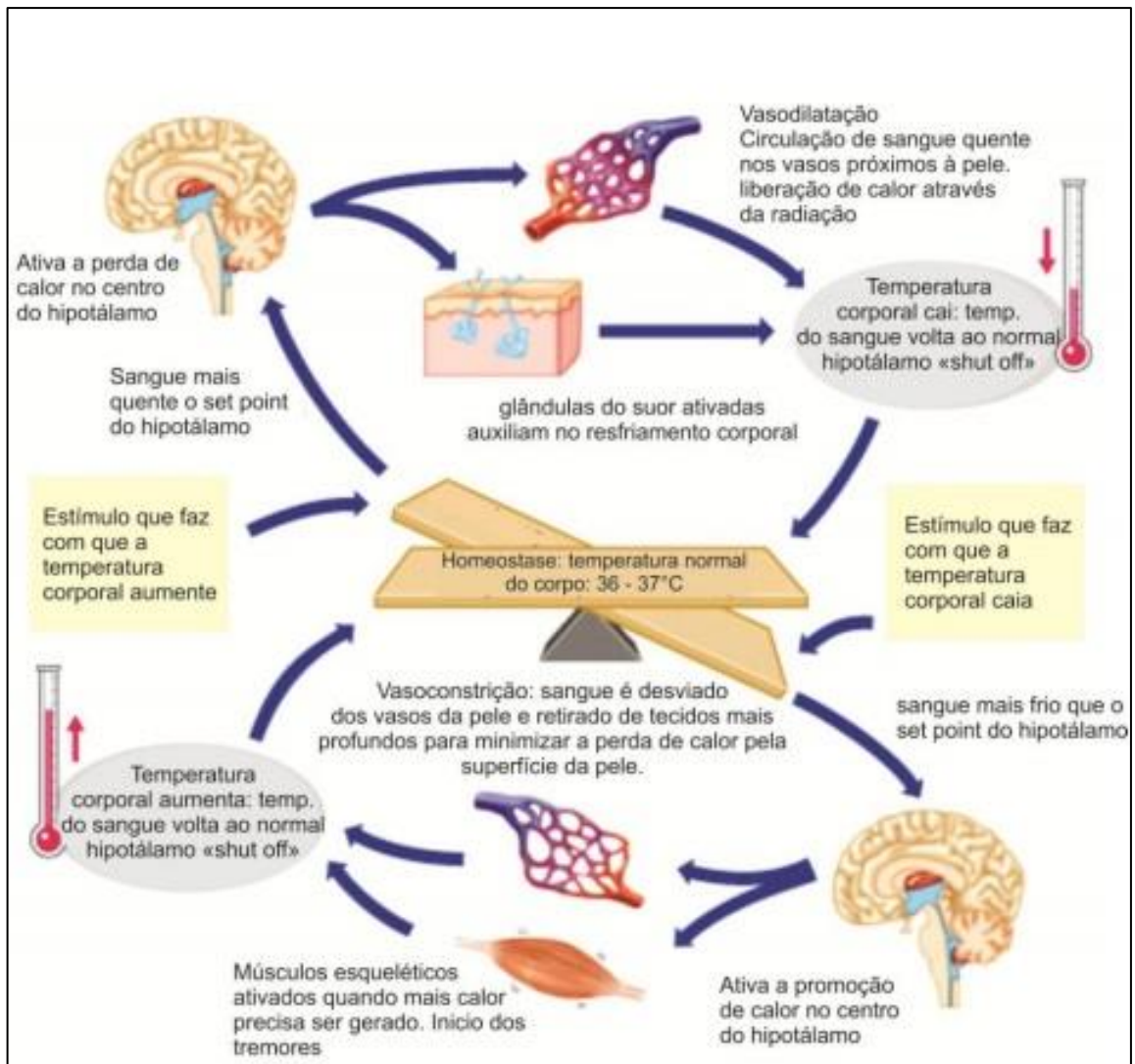
## 2.1 O SISTEMA TERMORREGULADOR

A avaliação do conforto térmico depende de vários dados que são influenciados por aspectos físicos, fisiológicos e psicológicos. Pode ser elucidado através dos conceitos de sensação e percepção. O corpo humano pode ser considerado como uma máquina térmica (necessita de certa quantidade de calor para funcionar corretamente), que dispõe de um mecanismo termorregulador que controla as variações térmicas do organismo.

Termorregulação refere-se ao conjunto de sistemas de regulação da temperatura corporal de alguns seres vivos. Essa regulação é exercida graças à coordenação entre a produção e liberação do calor interno. Na presença de oscilações térmicas externas possibilita a manutenção da temperatura corporal dentro de fronteiras adequadas (LAMBERTS, 2016).

Os mecanismos termorreguladores são ativados quando as condições térmicas do meio ultrapassam certas faixas de calor e de frio.

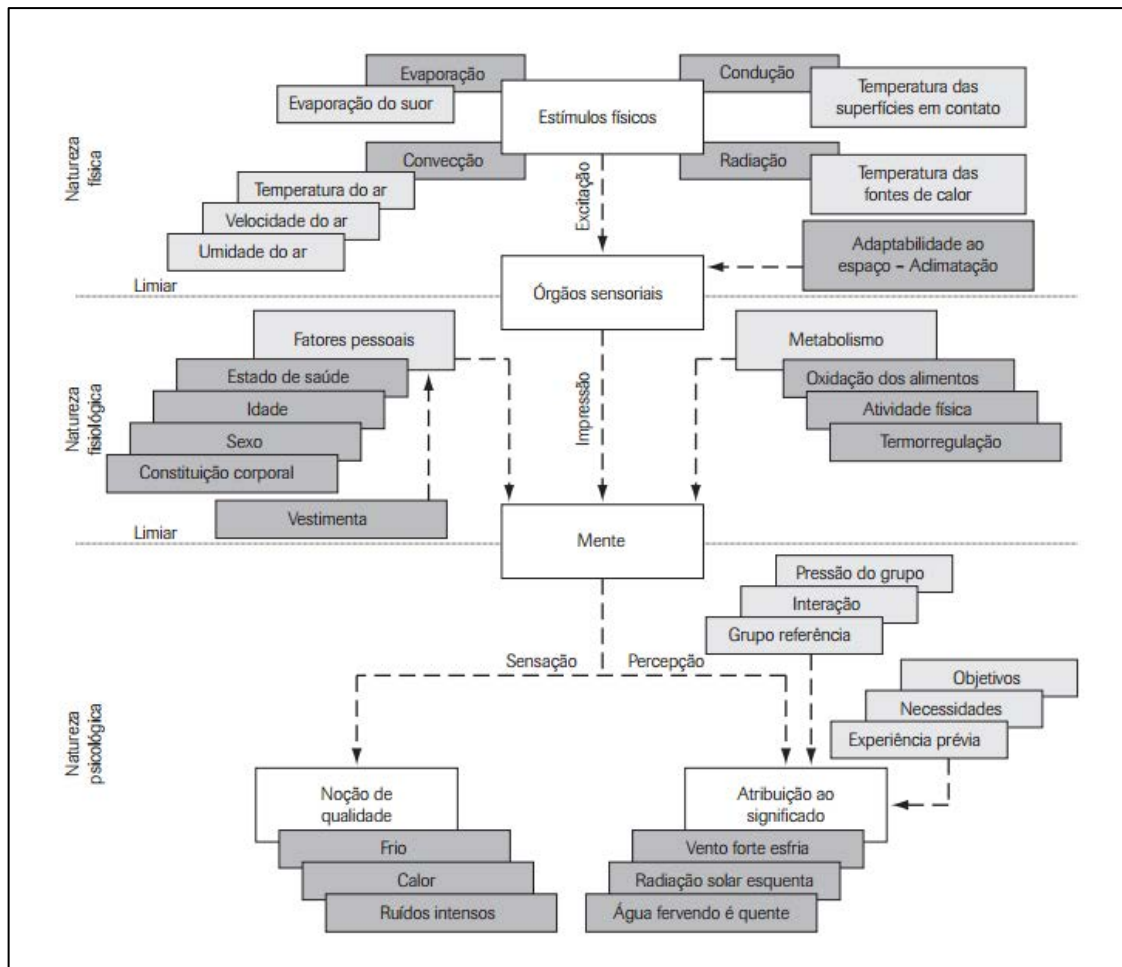
Figura 1 – Mecanismos de termorregulação



Fonte: Laboratório (2010).

O modelo proposto por Batiz e Goedert (2009), apresentado por meio da Figura 2, se baseia no fato de que as sensações percebidas pelos seres humanos permitem avaliar de forma exata as condições físicas no contexto do conforto térmico. Nesse processo, além das condições físicas do ambiente e do metabolismo, componentes relacionados ao processo cognitivo, como experiência prévia, também influenciam na atribuição de significado como a percepção de quente e frio.

Figura 2 – Processo de avaliação do conforto térmico



Fonte: Batiz e Goedert (2009).

A pele é o principal órgão termorregulador do organismo humano, sendo através dela que ocorrem as trocas de calor. A temperatura da pele é regulada pelo fluxo sanguíneo que percorre o corpo todo, de maneira que, quanto maior o fluxo, maior a temperatura corporal.

Outro mecanismo de termorregulação da pele é a transpiração ativa, que ocorre por meio das glândulas sudoríparas e devido às perdas por convecção e radiação. Os limites da transpiração são as perdas de sais minerais e a fadiga das glândulas sudoríparas (LAMBERTS,2016).

As perdas por convecção e radiação podem ser dificultadas através das vestimentas que são utilizadas como isolante térmico para o corpo, mantendo a camada de ar mais ou menos aquecida, conforme a porção do corpo que reveste. A roupa adequada será função da temperatura média ambiente, do movimento do ar, do calor produzido pelo organismo, pela umidade do ar e pela atividade que o indivíduo estará desempenhando. A vestimenta reduz o ganho de calor relativo à radiação solar, e as perdas em condições de baixa umidade e suor.

Além disso, auxilia na sensibilidade a qual o corpo está exposto devido às variações de temperatura e da velocidade do ar. A resistência térmica da roupa depende do tecido, da fibra e de como ela está ajustada ao corpo do indivíduo, e é medida através da unidade “*clo*” (LAMBERTS, 2016).

## 2.2 MÉTODO DE FANGER

Fanger (1972) estipulou as três condições básicas para uma situação de conforto térmico:

- a) A existência de equilíbrio por meio de troca de calor. O sistema termorregulador do corpo humano deve controlar a troca de calor com o meio dentro de um amplo limite de variação de condições ambientais, sem a qual o conforto não é estabelecido.
- b) A temperatura média da pele, *T<sub>p</sub>*.
- c) O calor eliminado por evaporação do suor na zona de regulação contra o calor, *E<sub>es</sub>*.

### 2.2.1 Voto médio estimado (PMV)

Esse índice desenvolvido por Fanger (1972) prevê a sensação de conforto térmico, fazendo uma relação entre 6 variáveis de entrada (temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar, umidade relativa do ar, vestimenta e atividade) e a porcentagem de pessoas insatisfeitas. Deve ser usado apenas para valores entre -2 e +2, pois acima destes limites teríamos aproximadamente mais de 80% de pessoas insatisfeitas.

Quadro 1 – Escala de sensação térmica

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

Fonte: Fanger (1972).



Fanger relacionou o *PMV* para o desequilíbrio entre o fluxo de calor real do corpo em um determinado ambiente e o fluxo de calor necessário para um ótimo conforto em determinada atividade exercida.

O *PMV* é utilizado para verificar se certo ambiente está em condições de aceitabilidade térmica, estabelecer maiores limites de aceitabilidade térmica, e com seu valor fixado em zero, estabelecer as melhores combinações das variáveis que fornecem a sensação de neutralidade térmica.

### **2.2.2 Porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD)**

O índice *PPD* estima a quantidade de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente, baseando-se em uma porcentagem de um grande número de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais frio ou quente, segundo a escala de sensação térmica.

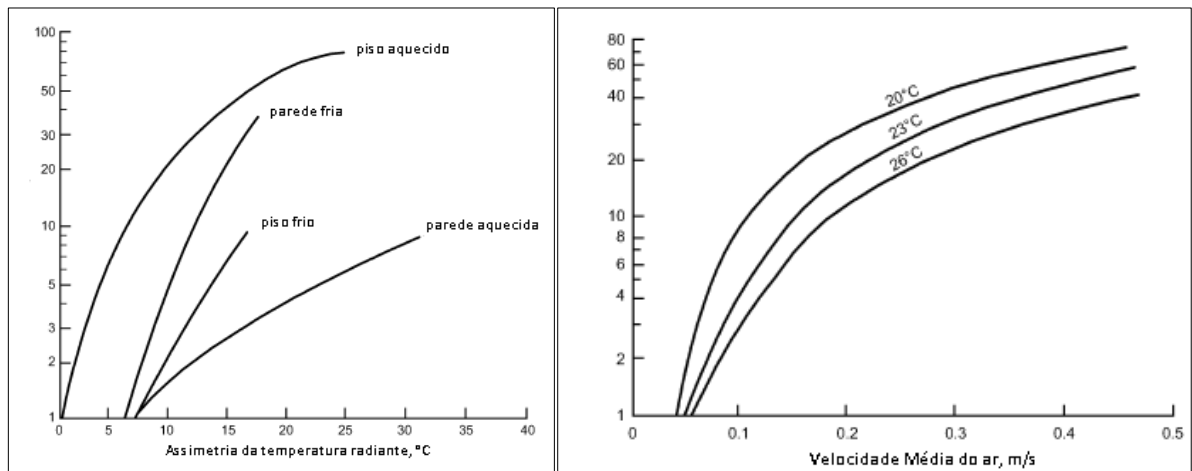
Assim como o *PMV*, pode ser estimado através de uma equação, e para o ambiente em estudo ser considerado termicamente aceitável, o percentual de pessoas insatisfeitas deve estar dentro de uma faixa adequada.

## **2.3 DESCONFORTO TÉRMICO LOCAL**

As condições de conforto térmico propostas por Fanger (1972) foram obtidas para um corpo como um todo, mas o indivíduo pode estar em estado de neutralidade térmica, e não estar confortável devido a uma parte estar mais quente e a outra mais fria.

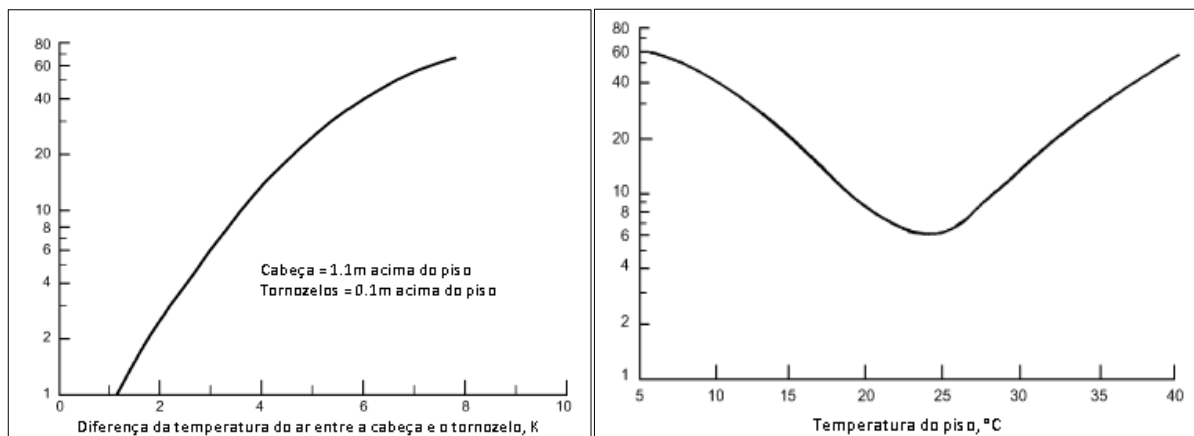
Este desconforto térmico local pode ser causado por correntes de ar, assimetria de radiação, diferença de temperatura vertical entre os pés e a cabeça e diferença de temperatura entre os pés e o piso.

Figuras 3 e 4 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à assimetria da temperatura radiante / Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à velocidade do ar



Fonte: adaptado de ASHRAE (2009).

Figuras 5 e 6 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas devida à diferença de temperatura de ar / Porcentagem de pessoas insatisfeitas devido à temperatura do piso



Fonte: adaptado de ASHRAE (2009).

O corpo está sujeito a uma assimetria de radiação devido por exemplo às diferenças de temperatura entre as superfícies próximas a região de ocupação, provocado pela radiação solar incidente somente em uma delas. Pode também ser causada por janelas frias, calor gerado pela boca de fornos ou máquinas, entre outros. Quando o indivíduo é exposto a alguma dessas situações, uma parte de seu corpo pode trocar mais calor por radiação do que as demais, causando o desconforto térmico que pode ser acentuado pela diferença de metabolismo e vestimentas de cada pessoa (ASHRAE, 2009).

## 2.4 TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE

É a temperatura de um ambiente imaginário em que a transferência de calor por radiação do corpo humano é igual à transferência de calor por radiação em um ambiente real não uniforme (LAMBERTS, 2016).

Um dos instrumentos usado para a medição é o termômetro de globo negro. A temperatura média radiante é influenciada pelo ambiente e pela precisão da temperatura de globo e da temperatura do ar. Como a temperatura média radiante é medida para estimar as trocas de calor por radiação entre o ambiente e o corpo humano, o termômetro de globo tipo esférico representa melhor o fator de forma de um corpo humano na posição sentada. Porém um sensor do tipo elipsoide representa melhor o fator de forma de um corpo na posição em pé.

A temperatura média radiante pode ser calculada através das medições das temperaturas superficiais das paredes ao redor da pessoa, das propriedades de emissividade e absorvidade das paredes e suas distâncias em relação à pessoa, o que possibilita o cálculo dos fatores de forma entre o corpo e as paredes (LAMBERTS, 2016).

## 2.5 ISO 7730/2005 – AMBIENTES TÉRMICOS MODERADOS

Segundo a norma ISO 7730 (2005), “conforto térmico é o estado da alma que expressa satisfação com o ambiente térmico.”. Esta norma apresenta um método para previsão da sensação térmica e do grau de desconforto das pessoas expostas ao ambiente de temperaturas moderadas, além de especificar as condições térmicas aceitáveis para o conforto.

Quando é possível medir parâmetros físicos de um ambiente como temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade do ar, bem como os parâmetros pessoais como atividade desempenhada e vestimenta utilizada, a sensação térmica para o corpo com um todo, pode ser calculada através do PMV. A norma também descreve como calcular o PPD.

Na nova versão também são apresentados métodos de avaliação para condições em estado não estacionário, pois o ambiente térmico sofre alterações com o tempo, e pode não ser sempre possível manter as condições dentro dos limites recomendados. Nesta versão também é fornecido recomendações de como levar em conta a adaptação de pessoas ao se projetar edifícios e sistemas.

No Quadro 2, são apresentados os exemplos de requerimentos de conforto térmico para diferentes categorias e espaços apresentados pela norma.

Quadro 2 – Categorias de conforto térmico

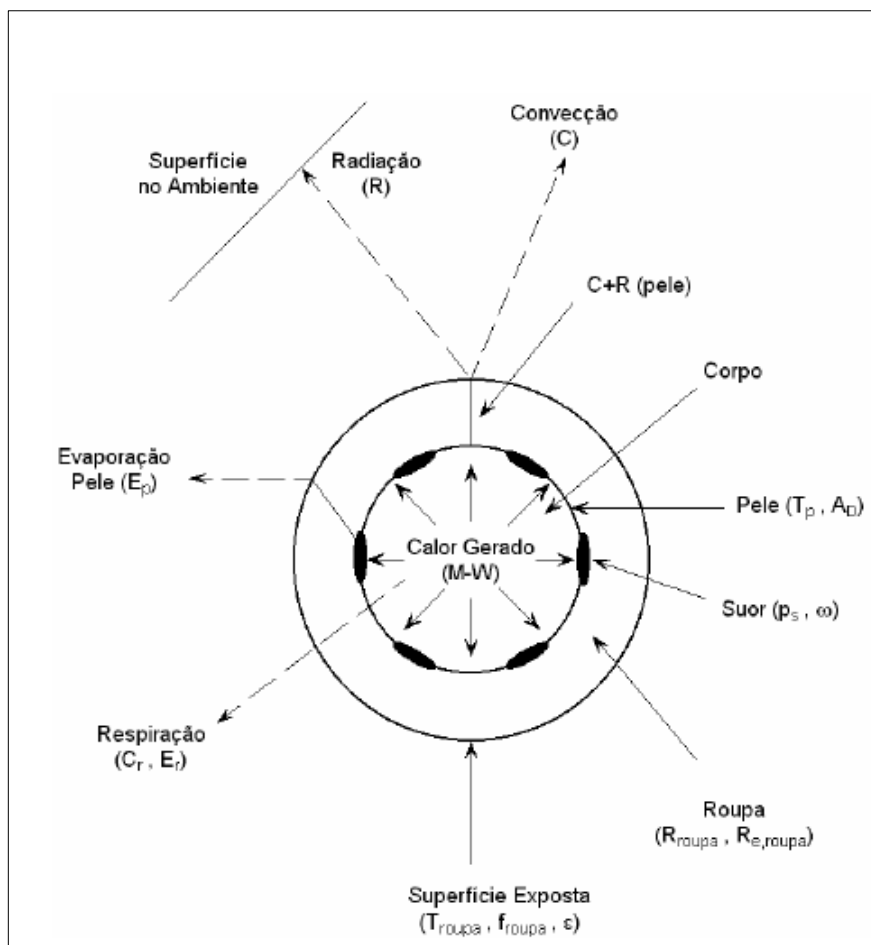
Categoria	Estado térmico do corpo		Desconforto local			
	PPD %	PMV	DR%	PD %		
				Diferença de temperatura na vertical	Piso quente ou frio	Radiação assimétrica
<b>A</b>	<6	-0,2<PMV<+0,2	<10	<3	<10	<5
<b>B</b>	<10	-0,5<PMV<+0,5	<20	<5	<10	<5
<b>C</b>	<15	-0,7<PMV<+0,7	<30	<10	<15	<10

Fonte: ISO 7730 (2005).

## 2.6 CONFORTO TÉRMICO

O corpo humano mantém uma temperatura constante em torno de 37 °C, que se mantém caso exista um equilíbrio entre o calor produzido e perdido pelo corpo. Os sensores mais importantes relacionados à temperatura do corpo localizam-se no hipotálamo e na pele, maior órgão do corpo humano. No hipotálamo, ocorre o processo de redução de temperatura quando esta passa de 37 °C, e o sensor localizado na pele inicia um processo de defesa quando a temperatura atinge valores menores a 34 °C (Fanger,1972). A pele promove um processo de transpiração para que seja possível diminuir a temperatura quando ela se eleva, e consequentemente diminui o fluxo sanguíneo. O sistema termorregulador já apresentado anteriormente é responsável pelo controle da temperatura interna e pela manutenção do equilíbrio térmico.

Figura 7 – Modelo cilíndrico da interação térmica: corpo humano – meio envolvente



Fonte: ASHRAE (2001).

A temperatura interna é mantida constante, mesmo variando as condições ambientais, mas como a capacidade do corpo de gerar calor e transpirar é limitada, existem limitações para a manutenção do equilíbrio térmico. Se a temperatura ambiente se eleva além do limite, ocorre um acúmulo de energia e a temperatura interna aumenta, sendo que se essa continua a ser elevada, pode chegar a um nível fatal próximo a 42 °C. Se a temperatura diminui além do limite do corpo, mesmo com vasoconstricção, o calor perdido será maior que o gerado, causando a diminuição da temperatura interna (TURCIO, 2003).

## 2.7 TROCAS DE CALOR POR RADIAÇÃO EM UMA AERONAVE

A transferência de calor entre os ocupantes e o ambiente de cabine dentro de uma aeronave ocorre principalmente por radiação térmica e por convecção.

Em solo num dia quente, a radiação solar maximiza o aquecimento da fuselagem que embora isolada termicamente via mantas termo-acústicas, permite o aquecimento das paredes internas da aeronave, chamadas tipicamente de “liner”. Nestes casos, as paredes internas podem ficar entre 4 e 6 °C mais quentes do que a temperatura média do ar de cabine. Além disso, a radiação solar incidente sobre as superfícies transparentes da aeronave, como as janelas, é absorvida, refletida e parte é transmitida para a superfície interna da cabine mais próxima dos ocupantes, podendo gerar temperaturas ainda maiores. Em dias ensolarados e limpos, a radiação solar é direta, não sofrendo dispersão e absorção iguais aos dias em que essa radiação é bloqueada por nuvens, e este efeito de aquecimento das superfícies internas pode ser maximizado.

Há uma grande diferença entre as temperaturas das paredes internas da aeronave durante operação em solo e em cruzeiro, e portanto, as trocas de calor por radiação entre os ocupantes da cabine e as paredes internas devem ser analisadas tanto em dias quentes em solo como em dias frios em voo.

## 2.8 CONFORTO TÉRMICO EM CABINES DE AERONAVES

Atualmente, é crescente a quantidade de estudos na área de conforto térmico em aeronaves, devido às particularidades do ambiente, como, por exemplo, temperaturas de parede muito frias, ou a proximidade do assento com a janela da aeronave. Dessa forma, o modo como a temperatura média radiante é calculada tem impacto significativo no cálculo do conforto térmico, devido aos diferentes resultados que podem ser alcançados, dependendo da análise que é realizada.

Nota-se que os artigos publicados referentes ao assunto têm utilizado simplificações para estimar a temperatura média radiante, de maneira a facilitar os cálculos, mas nem sempre essas simplificações podem ser a melhor forma de explicitar o conforto dentro da cabine.

Segundo estudo realizado por Park (2011), uma das maneiras de calcular a temperatura média radiante através de simplificações, foi considerar a  $t_{mr}$  do meio da cabine igual a temperatura do ar medido na mesma região. A cabine utilizada para o estudo é semelhante a cabine de uma aeronave A310 e fica em um laboratório para ensaios de voo na Fraunhofer Flight Test Facility (FTF). A instalação consiste em um vaso de pressão de 30m de comprimento, que contém os primeiros 16m de uma fuselagem completa de uma aeronave.

Figura 8 – Fraunhofer Flight Test Facility



Fonte: Instituto Franhofer (2018)

O estudo foi realizado no inverno de 2006 e consistiu em 11 simulações de voos de 3.5 horas de duração e duas simulações de voos de 7 horas de duração. Durante os testes, a temperatura do ar variou entre 20 °C e 25 °C, e para cada um dos voos, 40 pessoas diferentes foram utilizadas levando-se em consideração as diferentes faixas etárias e sexo. Aproximadamente 20 homens e 20 mulheres participaram de cada teste, com faixa etária de 18 a 55 anos. As pessoas puderam utilizar cobertores ao longo dos voos e escolher suas vestimentas.

As pessoas receberam questionários com uma escala de sete pontos para analisar a temperatura em voo, e responder perguntas sobre a percepção térmica local e a sensação (escala ASHRAE) e satisfação também foram consideradas.

Quadro 3 – Escala de sete pontos proposta aos passageiros

Temperatura quando está sentado na cabine							
	Muito frio				Muito quente		
	1	2	3	4	5	6	7
Geral							
Na cabeça							
No pescoço							
No corpo							
	Muito frio				Muito quente		
	1	2	3	4	5	6	7
Perna esquerda							
Perna direita							
Pé direito							
Pé esquerdo							
	Muito frio				Muito quente		
	1	2	3	4	5	6	7
Geral							
Na cabeça							
No pescoço							
No corpo							
Qual seu grau de satisfação dentro do Avião?							
Satisfeito			Insatisfeito				
Como você se sente neste momento?							
Gelado	Frio	Pouco Frio	Neutro	Pouco quente	Aquecido	Quente	

Fonte: adaptado de Park (2011).

Através dos dados foi possível estimar o PMV que variou de -0.7 a 0.5 e o PPD variou de 9% a 68%. Como conclusão final, Park (2011) relata a diferença dos parâmetros utilizados em relação a uma cabine de aeronave real. A temperatura da fuselagem não estava similar à temperatura real podendo causar uma sensação térmica local bem diferente de um voo real, em que há uma parede bem fria ao assento próximo a janela. O modo que os passageiros estavam alocados também pode causar interferências no resultado, além da velocidade do ar reportada na cabine, ser menor que em um voo real. Dessa forma os resultados encontrados podem ser maiores em uma situação real.

Em outro estudo, realizado por Giaconia (2015), a temperatura média radiante foi calculada no meio do corredor da cabine de um Airbus A319 durante 14 voos domésticos,



minuto a minuto, através do auxílio de um termômetro de globo negro conectado a um aparelho portátil para capturar os dados. Também utilizou-se sensores de temperatura colocados na parede da cabine da aeronave. A t<sub>mr</sub> variou de 24 °C a 26.2 °C, o PMV variou de -0.16 a 0.9 e o PPD variou de 5 a 22%, sendo estes calculados utilizando os resultados, e a média da temperatura do ar e da umidade relativa como parâmetros.

Para confirmar os valores calculados, questionários foram distribuídos para os passageiros do teste de voo, trinta minutos após a decolagem. Os resultados obtidos foram semelhantes. Com isso, pode-se perceber que as várias maneiras de se calcular a t<sub>mr</sub>, possuem um impacto significativo no valor final do PMV.

Figuras 9 e 10 – Posição do sensor no teto da cabine / Posição do sensor na parede da cabine



Fonte: adaptado de Park (2011).

Cada uma dessas metodologias apresenta um resultado diferente para a t<sub>mr</sub>, e esse valor tem um impacto significativo na análise final do conforto térmico.

Alguns estudos já citados e suas metodologias para o cálculo da temperatura média radiante serão comparados com a metodologia proposta no presente trabalho, visando enfatizar a importância deste processo de cálculo para a predição de conforto térmico dentro da cabine de uma aeronave comercial.

### 3 METODOLOGIA

No presente trabalho, serão utilizados resultados de medição de variáveis térmicas de dois estudos da literatura (Park e Giaconia) para mostrar que as premissas utilizadas para o cálculo da temperatura média radiante podem afetar significativamente as previsões de conforto térmico de ocupantes em cabine de avião.

O estudo será centrado no ocupante da cabine sentado próximo a janela, local que está mais sujeito as trocas de calor por radiação com o liner e janelas frias da aeronave.

Para tanto, serão utilizados os valores de temperatura do ar medidos pelos estudos citados, e valores típicos de temperatura de superfície de cabines para estimar os valores de t<sub>mr</sub> nesses voos em um assento próximo a janela. Com isso, o seguinte trabalho visa calcular, utilizando-se o equacionamento proposto por Fanger e ASHRAE, os fatores de forma necessários para estimar a t<sub>mr</sub> através da ferramenta computacional *Engineering Equation Solver* (EES).

Por fim, o valor de PMV e PPD serão estimados e comparados com os resultados apresentados pelos autores analisados.

#### 3.1 CÁLCULOS PARA PREVISÃO DE CONFORTO TÉRMICO

Conforme foi apresentado ao longo do capítulo 2 deste trabalho, para obtenção de um ambiente termicamente confortável devem ser consideradas a temperatura do ar, a umidade relativa, a temperatura média radiante e a velocidade do ar, além das características das vestimentas e o metabolismo dos passageiros. Através do balanço térmico do corpo de um determinado passageiro será possível a obtenção do voto médio estimado (*PMV*).

O balanço térmico pode ser estimado através da Equação 1, descrita por ASHRAE(2009).

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S = (C + R + Esk) + (Cres + Eres) + (Ssk + Scr) \quad (1)$$

Onde:

M – taxa metabólica de produção de calor, W/m<sup>2</sup>

W – trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo, W/m<sup>2</sup>

C + R – calor sensível perdido pela pele, W/m<sup>2</sup>

q<sub>sk</sub> – taxa total de calor perdida pela pele, W/m<sup>2</sup>

qres – taxa total de calor perdida através da respiração,  $W/m^2$

S – excedente armazenado,  $W/m^2$

Cres – taxa de perda de calor por convecção através da respiração,  $W/m^2$

Eres – taxa de perda de calor através da respiração,  $W/m^2$

Scr – taxa de armazenamento de calor no compartimento central,  $W/m^2$

Ssk – taxa de armazenamento de calor na pele,  $W/m^2$

Segundo a ISO 7730, utiliza-se a Equação 2 para estimar o PMV.

$$PMV = (0.303e^{-0.36M} + 0.028) * (M - W - Esk - Ec - Elr - Edr - Er) \quad (2)$$

Onde:

Esk – energia perdida pela pele através da transpiração,  $W/m^2$

Ec – energia perdida por convecção,  $W/m^2$

Elr – calor latente de respiração,  $W/m^2$

Edr – energia perdida através da respiração seca,  $W/m^2$

Er – energia perdida por radiação,  $W/m^2$

Depois de estimar o PMV, o percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) também pode ser estimado. Fanger (1972) relacionou o PPD ao PMV conforme demonstrado na Equação 3.

$$PPD = 100 - 95 \exp* [-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \quad (3)$$

O modelo PMV-PPD é amplamente utilizado e aceito para a avaliação das condições de conforto. O PMV pode ser considerado um parâmetro para o controle do sistema de ar condicionado com o intuito de minimizar a sensação de frio dos passageiros, devido à troca de calor que ocorre durante os voos entre o corpo humano e o meio.

Para o cálculo do balanço térmico do corpo humano deve ser realizada uma abordagem racional e empírica para descrever a troca de calor com o ambiente. Essa abordagem envolve mecanismos de troca de calor latente e sensível, e as expressões empíricas tem como função descrever essas trocas de calor.

São analisadas as trocas de calor entre a área superficial do corpo – dada pela Equação 4 –, a perda de calor sensível pela pele, a perda de calor por evaporação através da pele, as

perdas por respiração e todas as perdas que envolvem parâmetros ligados as vestimentas (ASHRAE, 2009), através das equações a seguir.

$$\mathbf{Ad} = 0.202 * m^{0.425} * l^{0.725} \quad (4)$$

Onde:

$A_D$  – Área superficial DuBois,  $m^2$

$m$  - massa, kg

$l$  – altura, m

A perda de calor sensível pela pele é dada pelas Equações 5, 6 e 7.

$$\mathbf{C} = fcl * hc * (tcl - ta) \quad (5)$$

$$\mathbf{R} = fcl * hr * (tcl - tr) \quad (6)$$

$$\mathbf{C} + \mathbf{R} = \frac{tsk - to}{Rcl + 1 / (fclh)} \quad (7)$$

Onde:

$hc$  – coeficiente de transferência de calor por convecção,  $W/(m^2.K)$

$hr$  – coeficiente de transferência de calor,  $W/(m^2.K)$

$fcl$  – fator de área das vestimentas, adimensional

$Rcl$  – resistência térmica das roupas,  $(m^2.K)/W$

$t_o$  – temperatura de operação,  $^{\circ}C$

$tsk$  – temperatura da pele,  $^{\circ}C$

A perda de calor por evaporação através da pele é dada pela Equação 8.

$$\mathbf{Esk} = \frac{w(psk,s - pa)}{Re,cl + 1 / (fcl * he)} \quad (8)$$

Onde:

$w$ - umidade da pele, adimensional

$he$  – coeficiente de transferência de calor por evaporação,  $W/(m^2.KPa)$

$psk,s$  – pressão de vapor de água na pele,  $KPa$

$p_a$  – pressão do vapor de água no ar ambiente, KPa

$R_{e,cl}$  – resistência à transferência de calor por evaporação da camada de roupas,  $(m^2.KPa)/W$

Já as perdas pela respiração são dadas a partir das Equações 9 e 10.

$$q_{res} = C_{res} + E_{res} = \frac{m_{res}(h_{ex}-h_a)}{A_d} \quad (9)$$

$$m_{w,res} = \frac{m_{res}(W_{ex}-W_a)}{A_d} \quad (10)$$

Onde:

$m_{res}$  – ventilação pulmonar, kg/s

$h_{ex}$  – entalpia do ar inalado, J/kg

$h_a$  – entalpia do ar inspirado, J/kg

$m_{w,res}$  – taxa de perda de água pela respiração, kg/s

$W_{ex}$  – relação de umidade do ar exalado, kg(vapor d'água)/kg(vapor de ar seco)

$W_a$  – relação de umidade do ar inalado, kg(vapor d'água)/kg(vapor de ar seco)

As formas mais precisas para determinar o isolamento pelas roupas são medições em manequins aquecidos e medições em sujeitos ativos. Manequins térmicos podem medir a perda de calor pela pele (C+R) no ambiente com as condições bem definidas.

A eficiência térmica do vestuário pode ser calculada através da equação (4) e os valores podem ser retirados de tabelas (ASHRAE, 2009) para valores típicos de conjuntos de roupas.

$$F_{cl} = \frac{t_{cl}-t_o}{t_{sk}-t_o} \quad (11)$$

Onde:

$t_{cl}$  - temperatura da vestimenta, °C

O isolamento intrínseco das roupas pode ser calculado a partir das medições realizadas em manequins térmicos, desde que o fator de área das vestimentas,  $F_{cl}$ , seja medido e as condições bem definidas para que o  $h$  possa ser determinado com precisão.

$$Rcl = \frac{tsk-to}{q} - \frac{1}{hfcl} \quad (12)$$

Onde:

q – perda de calor do manequim, W/m<sup>2</sup>

Quadro 4 – Valores de isolamento de vestuário

Descrição de vestuário	Iclo	Descrição de vestuário	Iclo	Descrição de vestuário	Iclo
<b>Roupas íntimas</b>		Camiseta comprida de flanela	0.34	Manga comprida fino	0.25
Cuecas	0.04	Camiseta de malha	0.17	Manga comprida grosso	0.36
Calcinhas	0.03	Suéter	0.34	<b>Vestidos e Saias</b>	
Sutiãs	0.01	<b>Calças e Macacões</b>		Saia fina	0.14
Camiseta	0.08	Shorts curto	0.06	Saia grossa	0.23
Camisola	0.16	Shorts de caminhada	0.08	Vestido de manga longa fino	0.33
Semi-camisola	0.14	Calças finas	0.15	Vestido de manga longa grosso	0.47
Roupas parte de cima	0.20	Calças grossas	0.24	Vestido curto fino	0.29
Roupas parte de baixo	0.15	Moletom	0.28	Vestido sem manga fino	0.23
<b>Calçados</b>		Macacão curto	0.30	Vestido sem manga grosso	0.27
Meias para esporte	0.02	Macacão comprido	0.49	<b>Pijamas e Robes</b>	
Meias até a canela	0.03	<b>Paletós e Coletes forrados</b>		Camisola curta sem mangas	0.18
Meias até o joelho	0.06	Trespasado único fino	0.36	Camisola comprida sem mangas	0.20
Meia-calça	0.02	Trespasado único grosso	0.44	Vestido curto hospitalar	0.31
Sandálias	0.02	Duplo trespasado fino	0.42	Camisola manga longa grossa	0.46
Chinelos	0.03	Duplo trespasado grosso	0.48	Pijamas de inverno	0.57
Botas	0.10	Sem mangas fino	0.10	Pijamas curtos finos	0.42
<b>Camisetas e Blusas</b>		Sem mangas grosso	0.17	Robe longo grosso	0.69
Regata	0.12	<b>Suéteres</b>		Robe manga curta grosso	0.48
Camiseta de manga curta	0.19	Colete sem mangas fino	0.13	Robe curto	0.34
Camiseta de manga longa	0.25	Colete sem mangas grosso	0.22		

1 clo = 0.155 (m<sup>2</sup>K)/W

Fonte: adaptado de ASHRAE (2009).

### 3.2 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE

As temperaturas de superfície das paredes internas da cabine de uma aeronave são tipicamente mais distantes que a temperatura média do ar do que em edificações, levando a temperaturas médias radiantes mais extremas e por consequência maiores trocas de calor por radiação. Quando em cruzeiro, as temperaturas das paredes são tipicamente menores do que a temperatura do ar. Com a diminuição da temperatura média radiante, ocorre um aumento da troca de calor por radiação entre o indivíduo e as superfícies da cabine, potencializando a

sensação de frio. De modo a compensar este efeito, temperaturas de ar mais elevadas devem ser utilizadas diminuindo a troca de calor por convecção (TURCIO, 2003).

No presente trabalho, o cálculo da  $t_{mr}$  é realizado através da temperatura de superfície do entorno do ocupante com o piso, o teto, mobílias, paredes e outros passageiros, e os respectivos fatores de forma, conforme Equação 13 (ASHRAE 2009).

$$T_{rm}^4 = T_1^4 F_{p-1} + T_2^4 F_{p-2} + \dots + T_n^4 F_{p-n} \quad (13)$$

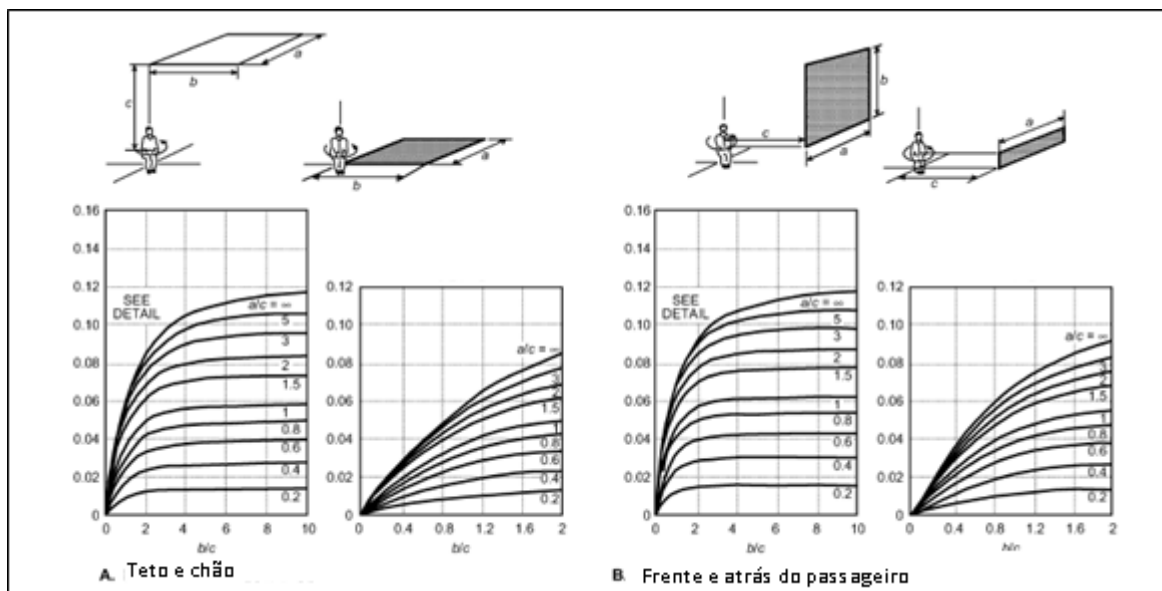
Onde:

$T_n$  – Temperatura da superfície N (K)

$F_{p-n}$  – Fator de forma entre a pessoa e a superfície N

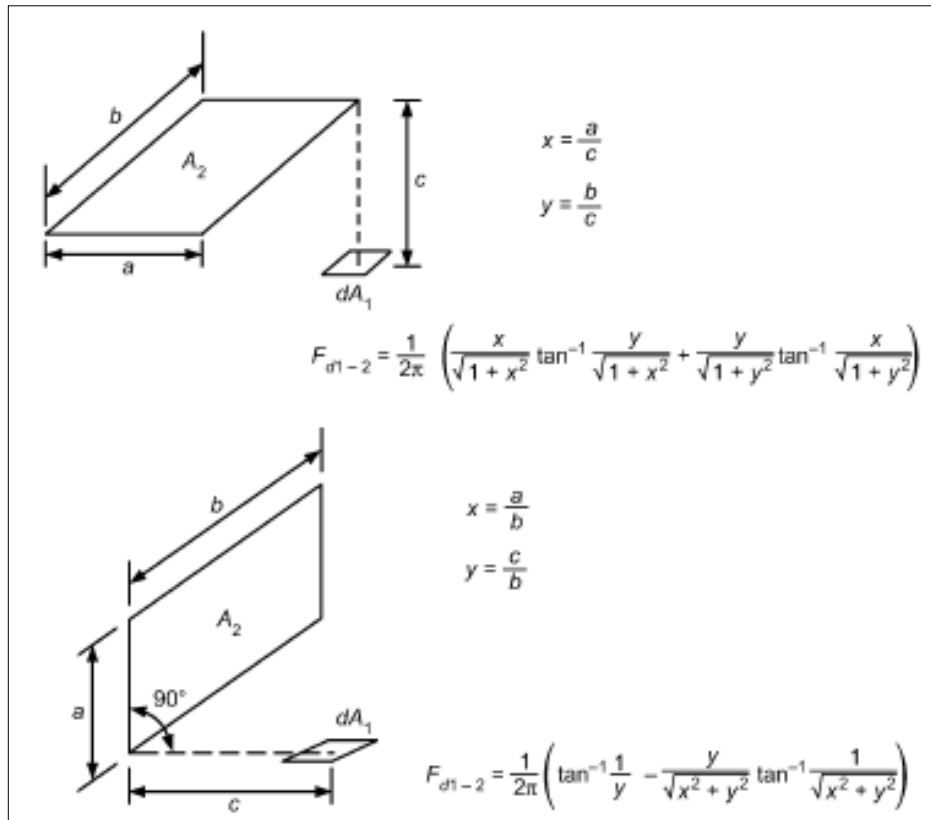
O fator de forma, dado através de  $F_{ij}$ , deve ser entendido como a fração de energia radiante que deixa a superfície i para a superfície j. Através dos ábacos da Figura 6, é possível estimar os fatores de forma através das distâncias a, b e c entre o ocupante e o entorno dentro de uma aeronave comercial.

Figura 11 – Valor médio entre o fator de forma entre a pessoa sentada e o retângulo horizontal ou vertical quando a pessoa gira em torno do eixo vertical.



Fonte: adaptado de ASHRAE (2009).

Figura 12 – Equações analíticas para calcular o fator de forma



Fonte: ASHRAE (2009).

Para se determinar a t<sub>mr</sub> algumas simplificações são realizadas de modo a facilitar os cálculos.

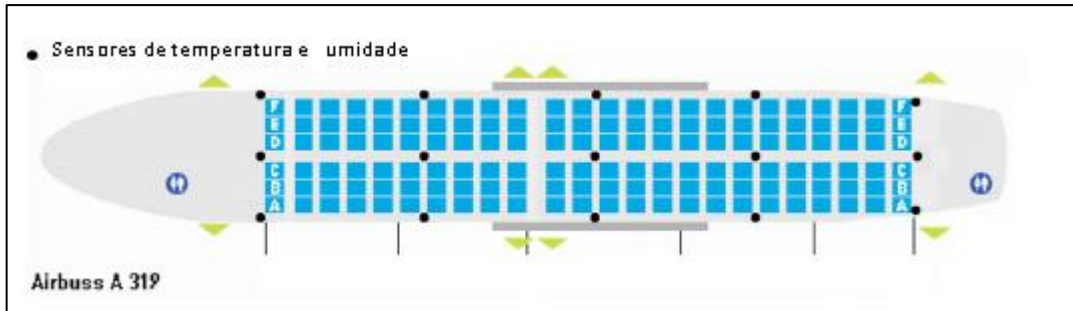
Considerando um passageiro sentado na janela ao lado direito da aeronave, as trocas de calor por radiação possíveis são com o teto, o piso, o assento da frente, lateral direita (parede fria) e com a lateral esquerda onde estaria um passageiro sentado ao lado.

A troca de calor por radiação com o piso foi descartada, pois quando se está sentado, o assento opaco impede a troca de calor por radiação. O mesmo ocorre com suas costas que está encostada na parte de trás do assento. Despreza-se também a troca de calor por radiação com o passageiro ao lado, pois ambos estão com temperatura corporal e temperatura das roupas semelhantes.

Portanto, para estimar o valor da t<sub>mr</sub>, considera-se a troca de calor por radiação com o teto, com a parede fria (janela) e o assento da frente – móvel da aeronave, semelhante ao método adotado por Turcio (2003).



Figura 13 – Mapa de assentos da cabine da aeronave A319



Fonte: adaptado de Giaconia (2015).

Dessa forma, através do ábaco da Figura 11 e 12, foi possível calcular os fatores de forma para a cabine da aeronave FTF e para o A319.

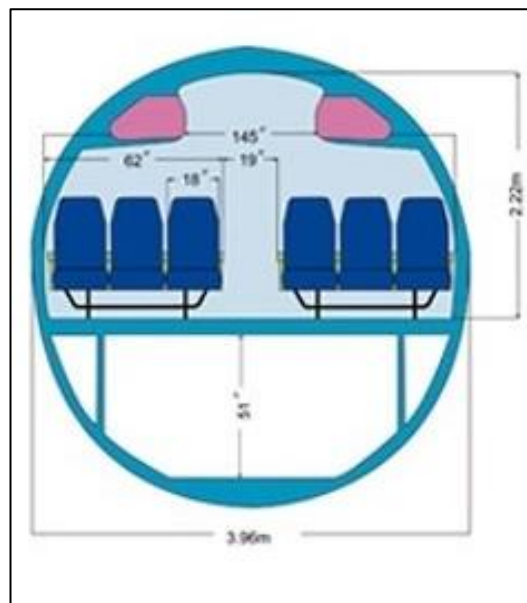
$$F_{\text{mteto}} = 0,358499$$

$$F_{\text{mmobília}} = 0,104323$$

$$F_{\text{mparede}} = 0,537179$$

Com os fatores de forma e os valores de temperatura superficial assumidos (vide item 3.3) foi possível estimar o valor da **t<sub>mr</sub>**, através da equação 13.

Figura 14 – Vista do corte da seção transversal da cabine da aeronave A319



Fonte: Global Security (2018).

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL NO ENTORNO DO PASSAGEIRO

Para o cálculo da temperatura média radiante foram estimadas as temperaturas das superfícies do entorno do ocupante escolhido, do teto, da parede e da mobília da cabine (assento a frente do mesmo). Para estipular o valor da temperatura de cada superfície, foram utilizados os estudos e ensaios já realizados para aeronaves comerciais reais, sendo os valores estipulados por uma média dos valores reais encontrados e medidos através de sensores de temperatura e analisados com a ajuda de fotos termográficas.

$$T_{\text{teto}} = 20^{\circ}\text{C} (293 \text{ K})$$

$$T_{\text{mobília}} = 24^{\circ}\text{C} (297 \text{ K})$$

$$T_{\text{parede}} = 18^{\circ}\text{C} (289 \text{ K})$$

Tipicamente ao longo do desenvolvimento do produto, no caso a cabine da aeronave, é necessário respeitar algumas especificações para conforto térmico como as exemplificadas na norma AHSRAE 161, a qual limita a variação da temperatura de parede em relação a temperatura do ar de cabine, em torno de  $5,6^{\circ}\text{C}$ . Sendo assim, os valores estipulados se enquadram nas normas, e ocorre uma assimetria com essa variação de temperatura, podendo gerar o desconforto térmico local.

### 3.4 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Com os dados estipulados, foi possível iniciar os cálculos através da ferramenta computacional utilizada para este trabalho, “*Engineering Equation Solver*” (EES), onde foram colocadas como input todos os dados necessários para as equações do balanço térmico do corpo humano, segundo as equações de Fanger, para que fosse possível ter como output a temperatura média radiante, o valor do PMV e do PPD, além dos valores das trocas de calor por radiação e pelo metabolismo.

A ferramenta computacional “*Engineering Equation Solver*” (EES) permitiu que fossem calculadas as equações com todas as variáveis necessárias para a resolução deste trabalho.

O programa desenvolvido em ambiente EES facilita os cálculos necessários para este trabalho, de modo que os realiza de forma rápida e automática, permitindo que as condições

de projeto e de contorno sejam especificadas, realizando vários cálculos simultâneos, permitindo apenas a mudança dos dados de entrada, podendo gerar gráficos e outras formas visuais que auxiliam em um melhor entendimento dos dados gerados.

Com o modelo utilizado no ambiente *EES* foi possível estimar a temperatura média radiante de um passageiro dentro da cabine, obter o valor do PMV e do PPD, e comparar a relação destes valores com a t<sub>mr</sub> encontrada nos estudos citados neste trabalho, a fim de analisar o impacto desses parâmetros no conforto térmico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS OBTIDOS

Conforme relatado na metodologia, este trabalho visa calcular o valor da temperatura média radiante mais próximo possível ao real de um passageiro sentado na janela de uma cabine de avião.

Com os valores encontrados através do cálculo da  $t_{mr}$ , conforme a Equação 13, e através do modelo utilizado no EES para o cálculo das equações do balanço de energia do corpo humano, foi possível estipular os valores do PMV e do PPD para este trabalho.

Os inputs utilizados para as equações foram:

**Altitude** = 7000 ft (pressão de cabine considerada em um intervalo de 5000 a 8000ft);

**Altura** = 1,75m;

**F<sub>mmóbil</sub>** = 0,104323;

**F<sub>mparede</sub>** = 0,537179;

**F<sub>mteto</sub>** = 0,358499;

**I<sub>clo</sub>** = 0,65clo (1clo = 0,155 m<sup>2</sup>.K/W);

**M** = 58,2 W/m<sup>2</sup> (1met);

**Massa** = 80 kg;

**RH** = 0,1;

**T<sub>ar</sub>** = 24°C (297,15 K);

**T<sub>mobília</sub>** = 24°C (297,15 K);

**T<sub>parede</sub>** = 18°C (289,15 K);

**T<sub>teto</sub>** = 20°C (293,15 K);

**v<sub>a</sub>** = 0,4 m/s;

**W** = 0 W/m<sup>2</sup> (geralmente igual a zero pelo fato do passageiro estar sentado);

**σ** = 5,668.10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>.K;

**ε** = 0,95

Os outputs gerados através do modelo foram:

**T<sub>p</sub>** = 34,1°C

**R** = 82,88 W

$$C = 26,93 \text{ W}$$

$$E_{sk} = 15,32 \text{ W}$$

$$\text{Totaldissipado} = 151,9 \text{ W}$$

$$PMV = -1,325$$

$$PPD = 41,54\%$$

$$T_{mr} = 19,4^\circ\text{C}$$

Os fatores de forma foram calculados novamente para um ocupante localizado próximo ao corredor, mas dessa vez desconsiderando o fator de forma e a temperatura da parede, pois não seriam aplicáveis à análise. Através da Equação 13, foi possível estipular a *t<sub>mr</sub>* para o novo assento em questão, por meio do modelo em ambiente *EES*.

Os resultados encontrados foram:

$$T_{teto} = 20^\circ\text{C} (293 \text{ K})$$

$$F_{mteto} = 0,6151;$$

$$T_{móbia} = 24^\circ\text{C} (297 \text{ K})$$

$$F_{mmóbia} = 0,3849;$$

Os inputs utilizados para as equações foram:

$$\text{Altitude} = 7000 \text{ ft (pressão de cabine considerada em um intervalo de 5000 a 8000ft);}$$

$$\text{Altura} = 1,75\text{m};$$

$$F_{mmóbia} = 0,3849;$$

$$F_{mteto} = 0,6151;$$

$$I_{clo} = 0,65\text{clo} (1\text{clo} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W});$$

$$M = 58,2 \text{ W}/\text{m}^2 (1\text{met});$$

$$\text{Massa} = 80 \text{ kg};$$

$$RH = 0,1;$$

$$T_{ar} = 24^\circ\text{C} (297,15 \text{ K});$$

$$T_{móbia} = 24^\circ\text{C} (297,15 \text{ K});$$

$$T_{teto} = 20^\circ\text{C} (293,15 \text{ K});$$

$$v_a = 0,4 \text{ m}/\text{s};$$

$$W = 0 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ (geralmente igual a zero pelo fato do passageiro estar sentado);}$$

$$\sigma = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K};$$

$$\epsilon = 0,95$$

Os outputs gerados através do modelo foram:

$$T_p = 34,1^\circ\text{C}$$

$$R = 68,32 \text{ W}$$

$$C = 31,14 \text{ W}$$

$$E_{sk} = 15,32 \text{ W}$$

$$\text{Totaldissipado} = 141,5 \text{ W}$$

$$\text{PMV} = -0,9752$$

$$\text{PPD} = 25,09\%$$

$$T_{mr} = 21,55^\circ\text{C}$$

## 4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No estudo de Park (2011), a temperatura média radiante é considerada igual a temperatura média do ar da cabine, premissa esta usualmente adotada em ambientes de escritório para posições de trabalho longe de janelas ou fontes de calor. Com base nas explicações apresentadas no item 2.4, o ambiente de cabine difere de um ambiente de edificação, principalmente pela distância entre o valor das temperaturas das paredes internas e a temperatura média do ar da cabine. Portanto, pode-se considerar que esta premissa assumida por Park (2011) não parece adequada, e pode prejudicar as estimativas de conforto térmico principalmente para o ocupante sentado na janela (vide Tabela 1).

No estudo realizado por Giaconia, o valor de  $t_{mr}$  foi calculada com base em medições com termômetro de globo negro posicionado no meio da cabine. Como o sensor está longe das paredes frias, não representa a condição de conforto sentida pelo passageiro sentado na janela. Sendo assim, os valores mais altos encontrados para a  $t_{mr}$ , podem ser justificados devido à maior distância entre a região em que a medida foi realizada até a parede fria. O valor do PMV calculado neste estudo foi semelhante ao encontrado nas respostas dos passageiros convidados preencher o questionário durante o voo (vide Tabela 1).

No presente trabalho, a temperatura média radiante foi calculada com base em valores típicos de temperatura das paredes internas da cabine. Com esses dados, foram estimados os valores do PMV e do PPD para o assento da janela.

Conforme dados apresentados na Tabela 1, a temperatura média radiante calculada pelo presente trabalho foi de 19,4 °C, gerando uma porcentagem de pessoas insatisfeitas de 41,54%. Deve-se lembrar que este valor representa o PPD de um ocupante sentado no assento mais próximo da janela, onde estaria localizada a parede mais fria da cabine, o que poderia gerar um desconforto térmico local maior que o restante.

Tabela 1 – Comparação entre os resultados obtidos

	<b>Park (2011)</b>	<b>Giaconia (2015)</b>	<b>TG (2018) – Próximo a janela</b>	<b>TG (2018) – Próximo ao corredor</b>
<b>t<sub>mr</sub> [°C]</b>	20 a 25	24 a 26.2	19,4	21,55
<b>PMV</b>	0.5 a -0.7	0.9 a -0.16	-1,325	-0,9752
<b>PDD</b>	10 a 37%	5% a 22%	41,54%	25,1%

Fonte: Autoria própria

Com os resultados finais, percebe-se que de fato os valores calculados para o assento próximo ao corredor, se aproximam mais dos valores apresentados por Park (2011) e Giaconia (2015). Como já comentado, a metodologia utilizada para estimar os valores de  $t_{mr}$  para ambos estudos, levam a prever melhor o conforto térmico dos ocupantes sentados no corredor. Já a metodologia proposta no presente trabalho, se mostrou mais indicada para estimar o conforto térmico de passageiros sentados nas regiões de maior desconforto térmico.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do modelo aplicado a metodologia escolhida para a realização deste trabalho, permitiu analisar a diferença nos valores da temperatura média radiante ( $t_{mr}$ ), do Voto Médio Estimado (PMV) e da Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD).

Primeiramente, após realizada a escolha do assento que seria analisado, levando em consideração o fato de que o assento próximo a janela possivelmente teria o maior desconforto térmico local devido às diferenças de temperatura, foi possível calcular a temperatura média radiante através do cálculo dos fatores de forma para todas as superfícies no entorno do passageiro que teriam relevância no resultado final.

Com o valor da  $t_{mr}$  encontrado, foi possível calcular o balanço térmico do corpo humano através do equacionamento proposto por Fanger e por ASHRAE, através do software *Engineering Equation Solver* (EES).

Para o cálculo da temperatura média radiante conclui-se que quanto menos simplificações forem realizadas, mais o resultado se aproxima de um ambiente real dentro de uma cabine de aeronave. Por essa razão, é importante que sejam analisados corretamente todos os fatores que influenciam o cálculo da  $t_{mr}$ , de modo a ter resultados mais concisos e precisos.

Com os resultados encontrados para as trocas de calor por radiação na cabine, e os valores para o PMV e o PPD, pode-se realizar a comparação com os valores encontrados nos estudos propostos por Park(2011) e Giaconia(2015), e concluir-se que de fato entre os valores encontrados, as maneiras com menos simplificações de cálculo resultam em valores mais próximos a realidade encontrada no ambiente da cabine da aeronave.

O modelo utilizado através do EES para o cálculo deste trabalho de graduação teve todas as suas equações revisadas, e já foi usado anteriormente como parte do estudo do conforto térmico de cabines de aeronaves reais, sendo assim considerado um bom meio de estudo e fornecendo uma boa aproximação da realidade que ocorreria a uma aeronave comercial.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos que possam vir a ser realizados sobre esse tema, poderiam ser feitas algumas mudanças na metodologia realizada. A análise da temperatura média radiante poderia ser medida com algum instrumento de precisão, como o termômetro de globo negro, em diversos locais diferentes na aeronave. Dessa forma seria possível fazer uma comparação entre os valores de PMV e PPD dos assentos mais próximos a janela, os assentos do corredor, e os assentos do meio da aeronave, e comprovar a diferença no desconforto térmico local que cada região gera.

Uma outra sugestão seria comparar o conforto térmico em aeronaves diferentes, pois nos artigos apresentados neste trabalho, foram utilizadas aeronaves Airbus praticamente com as mesmas dimensões. Seria interessante fazer um estudo levando em consideração aeronaves de diversas empresas, como Boeing e Embraer, para se ter uma grande gama de resultados de aspectos diferentes que levasse em conta as diferenças estruturais e as diferentes dimensões de cada aeronave analisada.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **Physiological principles for comfort and health**. In: \_\_\_\_\_. Handbook Fundamentals. Atlanta. p. 8.1 – 8.2. 2001.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **Thermal Comfort**. In: \_\_\_\_\_. Fundamentals Handbook. Atlanta: ASHRAE, cap. 9, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 161**: air quality within commercial aircraft. Atlanta, 2007.

BATIZ, Eduardo Concepción et al. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Produção**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 477-488, 2009.

FANGER, P. O. (1972). **Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering**, McGraw-Hill, New York, 245 p. 1972.

GIACONIA, Carlo; ORIOLI, Aldo; DI GANGI, Alessandra. 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.

GLOBAL SECURITY. **Vista do corte da seção transversal da cabine da aeronave A319**. Disponível em: < <https://www.globalsecurity.org/military/world/europe/a320.htm>>. Acesso em: 12 out. 2018.

GREGHI, Marina Fonseca et al. **Conforto e desconforto de passageiros em cabines de aeronaves**. 2002. 194 f. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L. **Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa**. Grupo Gen-LTC, 2014.

INSTITUTO FRAUNHOFER. **Instalação de teste de voo**. Disponível em: <[https://www.ibp.fraunhofer.de/en/Press/Press\\_releases/green\\_aviation.html](https://www.ibp.fraunhofer.de/en/Press/Press_releases/green_aviation.html)>. Acesso em : 03 out. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **Moderate thermal environments – Determination of the PMV/PPD**, 2005.

LAMBERTS, Roberto et al. **Conforto e stress térmico**. Apostila de Conforto Térmico em Edificações. LabEEE, UFSC, 2016.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EDIFICAÇÕES. **Aula de Conforto térmico**. LabEEE, Florianópolis, UFSC, 2010.

PARK, Sumee et al. Local and overall thermal comfort in an aircraft cabin and their interrelations. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1056-1064, 2011.

STANCATO, Fernando. **Análise do ambiente térmico de cabine de aeronave**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TURCIO, Wallace. **Estratégias de controle para Sistema de condicionamento de ar em aeronaves de passageiros**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

VINK, Peter (Ed.). **Comfort and design: principles and good practice**. Flórida, Estados Unidos, CRC press, 2004.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**. New York: ASHRAE, 2001.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. New York: ASHRAE, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ISO 7730/94**: ambientes térmicos moderados - determinação dos índices pmv e ppd e especificações das condições para conforto térmico. Rio de Janeiro, 1994.

FANGER, O.P. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. Danish Technical Press, Copenhagen, 244p, 1970.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering**, McGraw-Hill, New York, 245 p, 1972

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **Thermal environments - Instruments and methods for measuring physical quantities**, 1998.

MOURA, Danilo de. **Condições do escoamento e de conforto térmico em cabine de aeronave**. 2009. xx f. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos. Universidade de São Paulo, cidade, 2009.

WALKINSHAW, D. S. **Passenger aircraft ventilation system design challenges and solutions**. Indoor Air Technologies Inc, April 2005.