EVANDRO SOUZA DA SILVA

ARQUITETURAS DE DISTRIBUIÇÃO DE AR EM CABINES DE AERONAVES: ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESCONFORTO TÉRMICO LOCAL

São Paulo

2013

EVANDRO SOUZA DA SILVA

ARQUITETURAS DE DISTRIBUIÇÃO DE AR EM CABINES DE AERONAVES: ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESCONFORTO TÉRMICO LOCAL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Arlindo Tribess

São Paulo

2013

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de novembro de 2013.

Assinatura do Autor _____

Assinatura do Orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Evandro Souza da

Arquiteturas de distribuição de ar em cabines de aeronaves: Análise experimental de desconforto térmico local. Evandro Souza da Silva. – ed. rev. – São Paulo, 2013.

131p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Ventilação 2. Arquiteturas de distribuição de ar 3. Desconforto térmico local 4. Correntes de ar 5. Aeronaves I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t

À memória de minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arlindo Tribess pelo apoio técnico e científico na realização desta pesquisa e, principalmente, pela ajuda, dedicação e compreensão.

Aos amigos e aos professores da Escola Politécnica da USP, especialmente ao engenheiro e amigo Douglas Fabichak Junior que participou ativamente na realização desta pesquisa.

À minha amável esposa Daniely da Silva Canova pela compreensão e companheirismo.

E por fim, à minha família, principalmente ao meu pai Oswaldo e a meu irmão Evaristo.

SUMÁRIO

1. Introdução 1

1.1. Sistema de distribuição de ar 2

1.2. Estudos do escoamento e de conforto térmico em cabines de aeronaves 5

1.3. Motivação do trabalho 6

1.4. Objetivos do trabalho 7

1.5. Organização do trabalho 7

2. Conforto Térmico 9

2.1. O sistema termorregulador 9

2.2. Balanço térmico do corpo humano 11

2.3. Equação de conforto de Fanger 12

2.4. Avaliação de ambientes térmicos 16

2.4.1. Voto médio estimado (PMV) 16

2.4.2. Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) 20

2.5. Desconforto térmico local 22

2.5.1. Correntes de ar 22

2.5.2. Diferença vertical de temperatura do ar 23

2.5.3. Assimetria da temperatura radiante 24

2.5.4. Temperatura do piso 24

2.5.5. Formas de análise de desconforto térmico local 25

3. Correntes de Ar 27

3.1. Introdução 27

3.2. Velocidade do ar e turbulência 31

3.3. Modelo de predição do risco de correntes de ar 34

3.4. Análise simultânea de desconforto global (PPD) e local (PD) 38

4. Avaliação de Conforto Térmico em Cabines 42

4.1. Avaliação por meio do índice PMV/PPD. 42
4.2. Avaliação por meio dos campos de velocidade e de temperatura do ar 42
4.3. Avaliação por meio da temperatura equivalente 46
4.3.1. Manequins térmicos 48
4.3.2. Equacionamento das trocas de calor 51
4.3.3. Calibração do manequim térmico 52
4.3.4. Diagramas de sensação térmica 53
4.4. Avaliação de conforto térmico em cabines com pessoas..... 55
5. Avaliação Experimental..... 60
5.1. Introdução 60
5.2. O Laboratório 60
5.3. O *Mock-up*..... 61
5.4. Arquiteturas de distribuição de ar..... 62
5.5. Condições do ensaio 64
5.5.1. Temperatura do ar de insuflamento 64
5.5.2. Temperaturas superficiais de paredes 65
5.5.3. Vazão de ar e taxa de renovação de ar 65
5.5.4. Umidade relativa do ar 65
5.5.5. Vestimenta e atividade (metabolismo) 66
5.6. Medições, instrumentação e procedimento de ensaio 66
5.6.1. Medição de velocidade e temperatura do ar 66
5.6.2. Medição da temperatura superficial de paredes..... 69
5.6.3. Medição da vazão de ar..... 70
5.6.4. Determinação de temperaturas equivalentes 70
5.6.5. Os manequins aquecidos 72
5.6.6. Repetitividade dos ensaios 72
5.6.7. Sequência experimental..... 73

6. Resultados 74

6.1. Perfis de velocidade e de temperatura do ar 74

6.1.1. Resultados para temperatura de insuflamento do ar de 18 °C..... 74

6.1.2. Resultados para temperatura de insuflamento do ar de 22 °C..... 93

6.2. Desconforto térmico local devido às correntes de ar..... 111

6.3. Temperaturas equivalentes e análise de desconforto térmico local utilizando o manequim térmico..... 116

7. Conclusão..... 123

Sugestões para trabalhos futuros 124

8. Referências Bibliográficas..... 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Níveis de metabolismo (ISO 7730, 2005). 15

Tabela 2.2 – Escala de sensação térmica da ASHRAE (ASHRAE 55, 2010)..... 16

Tabela 2.3 – Determinação do voto médio estimado – PMV – Atividade de escritório (1,2 Met) e umidade relativa do ar de 50% (ISO 7730, 2005)..... 19

Tabela 4.1 – Escala de sensação térmica conforme a norma (ISO 14505-2, 2006)..... 55

Tabela 4.2 – Escalas de sensação térmica (ISO 14505-3, 2006). 57

Tabela 4.3 – Escala de desconforto (ISO 14505-3, 2006)..... 58

Tabela 4.4 – Escala de aderência (ISO 14505-3, 2006) 58

Tabela 4.5 – Escala de preferência (ISO 14505-3, 2006)..... 58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema de ventilação com mistura de ar na cabine, MV (adaptado – HUNT e SPACE, 1995). 3

Figura 1.2 – Representação do sistema de ventilação por deslocamento, DV. 3

Figura 1.3 – Representação do sistema de distribuição de ar com insuflamento pelo piso, UFAD. 4

Figura 1.4 – Sistemas de distribuição de ar personalizados (Adaptado – GAO e NIU, 2007; ZHANG, LI e WANG, 2011). 5

Figura 2.1 – Controle da termorregulação humana (adaptado de CHARKOUDIAN, 2003). 10

Figura 2.2 – Modelo cilíndrico de iteração térmica, corpo humano e meio envolvente (adaptado – ASHRAE, 2009). 12

Figura 2.3 – Carta de Conforto da ASHRAE ($1{,}2\ Met, Var < 0{,}2\ m/s, Tr \cong Tar$). 20

Figura 2.4 – Percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) como função do voto médio estimado (PMV) (ASHRAE 55, 2010). 21

Figura 2.5 – Percentual de pessoas insatisfeitas com a diferença vertical de temperatura do ar entre os pés e a cabeça (ASHRAE 55, 2010). 23

Figura 2.6 – Percentual de pessoas insatisfeitas devido à assimetria da temperatura radiante (ASHRAE 55, 2010). 24

Figura 2.7 – Percentual de pessoas insatisfeitas com a temperatura do piso (ASHRAE 55, 2010). 25

Figura 3.1 – Disposição dos difusores em uma sala habitável com sistema de insuflamento pelo piso UFAD (ZUKOWSKI, 2007). 29

Figura 3.2 – Detalhes do sistema de distribuição de ar personalizado no plano y-z de uma cabine de aeronave. (adaptado de ZHANG e CHEN, 2007). 30

Figura 3.3 a) seção transversal da terceira linha de poltronas b) seção longitudinal (ZHANG, LI, e WANG, 2011). 31

Figura 3.4 – Exemplo típico de flutuação de velocidade do ar durante o período de um experimento..... 32

Figura 3.5 – Representação tridimensional do modelo de sensação de correntes de ar. (adaptado – FANGER *et al*., 1988)..... 37

Figura 3.6 – Porcentagem de insatisfeitos igual a 10% (adaptado – FANGER *et al*., 1988). 37

Figura 3.7 – Porcentagem de insatisfeitos igual a 20% (adaptado – FANGER *et al*., 1988). 38

Figura 3.8 - Índice de conforto térmico para isolamento de 0,6 clo (adaptado - GAN, 1994)..... 40

Figura 3.9 – Índice de conforto térmico para isolamento de 1,0 clo (adaptado – GAN, 1994)..... 41

Figura 4.1 – Mapa dos vetores velocidade do ar e mapa de contorno (WANG *et al*., 2008). 44

Figura 4.2 – Campo dos vetores velocidade média e distribuição de temperatura no plano de medida (adaptado – KOSKELA *et al*., 2001). 44

Figura 4.3 – Linhas de corrente no sistema de insuflamento convencional, MV (ZHANG e CHEN, 2007). 45

Figura 4.4 – Linhas de corrente no sistema de insuflamento pelo piso, UFAD (ZHANG e CHEN, 2007). 46

Figura 4.5 – Linhas de corrente no sistema de insuflamento pelo piso, UFAD e distribuição personalizada de ar (ZHANG e CHEN, 2007). 46

Figura 4.6 – Ilustração da definição de temperatura equivalente (Adaptado – NILSSON, 2004)..... 47

Figura 4.7 – Manequim térmico (http://pt-teknik.dk - acessado em 07/09/13). 51

Figura 4.8 – Manequim térmico com dezesseis segmentos (ISO 14505-2, 2006)..... 54

Figura 4.9 – Diagrama para avaliação da temperatura equivalente em função da sensação térmica: condição de verão, resfriamento (ISO 14505-2, 2006)..... 54

Figura 4.10 – Diagrama para avaliação da temperatura equivalente em função da sensação térmica: condição de inverno, aquecimento (ISO 14505-2, 2006). 55

Figura 5.1 – Representações esquemáticas externa e interna do *mock-up*. 61

Figura 5.2 – Vista interna do *mock-up* mostrando os manequins aquecido e o manequim térmico. 62

Figura 5.3 – Arquitetura 1: Ventilação por mistura (MV)..... 63

Figura 5.4 – Arquitetura 2: Ventilação por insuflamento de ar pelo piso (UFAD). 63

Figura 5.5 – Arquitetura 3: Ventilação por sistema UFAD modificado. 64

Figura 5.6 – Planos e alturas de medição de velocidade e temperatura do ar. 67

Figura 5.7 – Posicionamento das sondas para medição de temperatura e velocidade do ar na altura de 0,60 m e de 1,10 m a partir do piso. 68

Figura 5.8 – Posicionamento da sonda para medição de temperatura e velocidade do ar na altura de 0,10 m a partir do piso..... 68

Figura 5.9 – Tempo de estabilização da temperatura do ar após perturbação. 69

Figura 5.10 – O manequim térmico na sala de calibração..... 71

Figura 5.11 – Os manequins aquecidos e suas respectiva dimensões. 72

Figura 6.1 – Velocidade do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 18 °C.75

Figura 6.2 – Temperatura do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 18 °C. 76
Figura 6.3 – Velocidade do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 18 °C. 77
Figura 6.4 – Temperatura do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 18 °C. 77
Figura 6.5 – Velocidade do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 18 °C. 78
Figura 6.6 – Temperatura do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 18 °C. 78
Figura 6.7 – Velocidade do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 18 °C. 79
Figura 6.8 – Temperatura do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 18 °C. 79
Figura 6.9 – Velocidade do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 80
Figura 6.10 – Temperatura do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 80
Figura 6.11 – Velocidade do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 18 °C. 81
Figura 6.12 - Temperatura do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 18 °C. 81
Figura 6.13 – Velocidade do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 18 °C. 82
Figura 6.14 – Temperatura do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 18 °C. 82
Figura 6.15 – Velocidade do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 18 °C. 83

Figura 6.16 – Temperatura do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 18 °C. 83

Figura 6.17 – Velocidade do ar na posição 2D para temperatura de insuflamento de 18 °C. 84

Figura 6.18 – Temperatura do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 84

Figura 6.19 – Velocidade do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 85

Figura 6.20 – Temperatura do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 85

Figura 6.21 – Velocidade do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 18 °C. 86

Figura 6.22 – Temperatura do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 18 °C. 86

Figura 6.23 – Velocidade do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 18 °C. 87

Figura 6.24 – Temperatura do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 18 °C. 87

Figura 6.25 – Velocidade do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 18 °C. 88

Figura 6.26 – Temperatura do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 18 °C. 88

Figura 6.27 – Velocidade do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 18 °C. 89

Figura 6.28 – Temperatura do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 18 °C. 89

Figura 6.29 – Velocidade do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 90

Figura 6.30 – Temperatura do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 18 °C. 90

Figura 6.31 – Perfis de velocidade do ar em todas as posições na cabine para temperatura de insuflamento de 18 °C. 91

Figura 6.32 – Perfis de temperatura do ar em todas as posições na cabine para temperatura de insuflamento de 18 °C. 92

Figura 6.33 – Velocidade do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 22 °C. 93

Figura 6.34 – Temperatura do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 22 °C. 94

Figura 6.35 – Velocidade do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 22 °C. 94

Figura 6.36 – Temperatura do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 22 °C. 95

Figura 6.37 – Velocidade do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 22 °C. 96

Figura 6.38 – Temperatura do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 22 °C. 96

Figura 6.39 – Velocidade do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 22 °C. 97

Figura 6.40 – Temperatura do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 22 °C. 97
Figura 6.41 – Velocidade do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 22 °C. 98
Figura 6.42 – Temperatura do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 22 °C. 98
Figura 6.43 – Velocidade do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 22 °C. 99
Figura 6.44 – Temperatura do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 22 °C. 99
Figura 6.45 – Velocidade do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 22 °C. 100
Figura 6.46 – Temperatura do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 22 °C. 100
Figura 6.47 – Velocidade do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 22 °C. 101
Figura 6.48 – Temperatura do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 22 °C. 101
Figura 6.49 – Velocidade do ar na posição 2D para temperatura de insuflamento de 22 °C. 102
Figura 6.50 – Temperatura do ar na posição 2D para temperatura de insuflamento de 22 °C. 102
Figura 6.51 – Velocidade do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 22 °C. 103

Figura 6.52 – Temperatura do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 22 °C. 103

Figura 6.53 – Velocidade do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 22 °C. 104

Figura 6.54 – Temperatura do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 22 °C. 104

Figura 6.55 – Velocidade do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 22 °C. 105

Figura 6.56 – Temperatura do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 22 °C. 105

Figura 6.57 – Velocidade do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 22 °C. 106

Figura 6.58 – Temperatura do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 22 °C. 106

Figura 6.59 – Velocidade do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 22 °C. 107

Figura 6.60 – Temperatura do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 22 °C. 107

Figura 6.61 – Velocidade do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 22 °C. 108

Figura 6.62 – Temperatura do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 22 °C. 108

Figura 6.63 – Perfis de velocidade do ar em todas as posições da cabine para temperatura de insuflamento de 22 °C. 109

Figura 6.64 – Perfis de temperatura do ar em todas as posições da cabine para temperatura de insuflamento de 22 °C. 110
Figura 6.65 – Velocidade em função do tempo. 111
Figura 6.66 – Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura MV, com temperatura de insuflamento do ar de 18 °C. 112
Figura 6.67 – Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD, com temperatura de insuflamento do ar de 18 °C. 112
Figura 6.68 – Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD modificado, com temperatura de insuflamento do ar de 18 °C. 113
Figura 6.69 - Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura MV, com temperatura de insuflamento do ar de 22 °C. 114
Figura 6.70 - Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD, com temperatura de insuflamento do ar de 22 °C. 115
Figura 6.71 - Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD modificado, com temperatura de insuflamento do ar de 22 °C. 115
Figura 6.72 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura MV para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C. 117
Figura 6.73– Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C. 118
Figura 6.74 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD modificado para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C. 119
Figura 6.75 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura MV para temperatura do ar de insuflamento de 22 °C. 120
Figura 6.76 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD para temperatura do ar de insuflamento de 22 °C. 121

Figura 6.77 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD modificado para temperatura do ar de insuflamento de 22 °C..... 122

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{cal}	Coeficiente de transferência de calor calibrado	[W/m²°C]
h	Coeficiente de transferência de calor combinado	[W/m²°C]
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m²°C]
h_r	Coeficiente de transferência de calor por radiação	[W/m²°C]
f_r	Fator de área da vestimenta	[adimensional]
v'_{ar}	Flutuação da velocidade	[m/s]
L	Índice de atividade térmica	[W/m²]
I_r	Índice de isolamento térmico da roupa	[clo]
T_u	Intensidade de turbulência	[%]
PD_d	Percentagem de pessoas insatisfeitas devido à resposta dinâmica	[%]
PD_e	Percentagem de pessoas insatisfeitas devido à resposta estática	[%]
DR	Percentual de insatisfeito devido ao risco de correntes de ar	[%]
$p_{v_{ar}}$	Pressão parcial do vapor d'água no ambiente	[kPa]
$\dot{Q}$	Soma da troca de calor por convecção e radiação	[W/m²]
C_R	Taxa de calor convectivo perdido pela respiração	[W/m²]
E_R	Taxa de calor evaporativo perdido pela respiração	[W/m²]
C	Taxa de calor perdido pela pele por convecção	[W/m²]
E_{dif}	Taxa de calor perdido pela pele por difusão de vapor d'água	[W/m²]
E_{es}	Taxa de calor perdido pela pele por evaporação do suor	[W/m²]
R	Taxa de calor perdido pela pele por radiação	[W/m²]
W	Taxa de energia gasta pelo trabalho dos músculos	[W/m²]
M	Taxa de produção de energia, metabolismo	[W/m²]
$\dot{U}$	Taxa de variação de energia interna	[W/m²]

T_p	Temperatura da pele	[°C]
T_{roupa}	Temperatura da roupa	[°C]
T_s	Temperatura da superfície	[°C]
T_{ar}	Temperatura do ar	[°C]
T_{eq}	Temperatura equivalente	[°C]
T_o	Temperatura operativa	[°C]
$\overline{T_r}$	Temperatura radiante média	[°C]
v_{ar}	Velocidade instantânea	[m/s]
$\overline{v_{ar}}$	Velocidade média	[m/s]

Símbolos Gregos

$\sigma_{v_{ar}}$	Desvio padrão da velocidade do ar	[m/s]
Ψ	Função de análise simultânea	[%]
ω	Umidade absoluta do ar	[g/kg]
ϕ	Umidade relativa do ar	[%]

LISTA DE ABREVIATURAS

$ABNT$	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
CLP	Controlador Lógico Programável
DR	*Draught Rate*
DV	*Displacement Ventilation*
$EMBRAER$	Empresa Brasileira de Aeronáutica
$ENCAC$	Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
$FAPESP$	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
$FINEP$	Financiadora de Estudos e Projetos
HA	Hipotálamo Anterior
$HVAC$	*Heating, Ventilation and Air Conditioning*
ISO	*International Organization for Standardization*
LDA	*Laser Doppler Anemometer*
LDV	*Laser Doppler Velocimeter*
MV	*Mixing Ventilation*
NBR	Norma Brasileira
PD	*Percentage Dissatisfied*
PIV	*Particle Image Velocimetry*
PMV	*Predicted Mean Vote*
PO	Pré – Ótico
PPD	*Predicted Percentage of Dissatisfied*
$SIMEA$	Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva

SNC	Sistema Nervoso Central
$UFAD$	*Under Floor Air Distribution*
USP	Universidade de São Paulo

RESUMO

SILVA, E. S. **Arquiteturas de distribuição de ar em cabines de aeronaves: Análise experimental de desconforto térmico local**. 2013. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

O sistema de ventilação por mistura (MV), utilizado atualmente em cabines de aeronaves na distribuição do ar tratado, não tem propiciado condições adequadas de conforto térmico e pode, devido às suas características de mistura, propagar rapidamente doenças infecciosas na cabine. Sistemas de ventilação utilizados em ambientes de edificações, como o sistema de distribuição de ar por deslocamento (DV) e o sistema de distribuição de ar pelo piso (UFAD) e variantes destes sistemas, estão começando a ser propostos. Função disto, o presente trabalho comparou três arquiteturas de distribuição de ar: o sistema tradicional (MV), o sistema de insuflamento de ar pelo piso (UFAD) e uma variação do sistema UFAD, incluindo insuflamento lateral abaixo dos bagageiros, denominado de UFAD modificado. Os ensaios foram realizados em cabine de *mock up* de aeronave com 12 lugares, ocupados por manequins aquecidos simulando os passageiros, considerando duas temperaturas para o ar insuflado na cabine: 18 °C e 22 °C. Os resultados mostram influência significativa da temperatura de insuflamento do ar nas condições de desconforto térmico local, juntamente com resultados promissores para o sistema UFAD, com percentuais de desconforto devido às correntes de ar menores que 20%, com exceção da região de insuflamento do ar no corredor.

ABSTRACT

SILVA, E. S. **Air distribution architectures in aircraft cabins: Experimental analysis of local thermal discomfort**. 2013. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

Mixing ventilation system (MV), currently used in aircraft cabins for treated air distribution, has not provided adequate conditions for thermal comfort and may, due to its mixing characteristics, spread quickly infectious diseases in the cabin. Ventilation systems used in buildings environments, such as displacement ventilation system (DV) and underfloor air distribution system (UFAD) and variants of these systems are beginning to be proposed. Due to that, the present study compared three air distribution architectures: the traditional system (MV), underfloor air distribution system (UFAD) and a variation of the UFAD system, including side air supply under bins, called UFAD modified. Tests were performed in aircraft cabin mock up with 12 seats, occupied by heated manikins simulating passengers, considering two air supply temperatures into the cabin: 18 °C and 22 °C. Results show significant influence of air supply temperature in conditions of local thermal discomfort, together with promising results for UFAD system, with percentages of discomfort due to draught less than 20%, except in the air insufflation area in aisle.

.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O ambiente térmico no interior de um espaço confinado é bastante complexo e não homogêneo. Nas cabines de veículos automotivos, por exemplo, ocorrem grandes variações de temperatura do ar, velocidade do ar e de temperaturas radiantes, mesmo em condições que possam ser tratadas com sendo de regime permanente.

Em cabines de aeronaves o escoamento do ar é dificultado pela elevada densidade de ocupação, com pequeno espaço de circulação de ar que, juntamente com o *layout*, muitas vezes proporciona regiões de estagnação, aumentando o desconforto. As limitações de adaptação dos passageiros a este complexo ambiente térmico causam uma dificuldade ainda maior para se atingir o conforto, como o acesso limitado à mudança de vestimenta e o controle das variáveis ambientais na cabine.

As variações das condições térmicas externas em aeronaves também criam ambientes térmicos internos complexos e assimétricos. A temperatura externa da fuselagem pode ir de 80 ºC em solo a – 40 ºC em menos de uma hora. Em voo, temperaturas baixas das paredes internas da fuselagem podem criar assimetrias térmicas para os passageiros. Em função das mudanças bruscas de carga térmica, o sistema de climatização de uma aeronave pode mudar de uma situação de elevado resfriamento a uma situação de aquecimento. Assim, gradientes de temperatura do ar na cabine são facilmente observáveis. Em função destas grandes diferenças térmicas, correntes de ar localizadas são geradas próximas a superfícies pouco isoladas como portas de serviço, de passageiros e de emergência (STANCATO, 2009).

Para propiciar conforto térmico aos ocupantes em diferentes posições nestes ambientes térmicos complexos e com condições de contorno com grandes variações, há a necessidade de se permitir ajustes nos sistemas de climatização de fatores relacionados ao insuflamento do ar (temperatura e vazão), à distribuição do ar e prover a utilização de sistemas de conforto personalizados.

As opções para o controle local do ambiente ou microclima têm sido amplamente estudadas e já aplicadas na indústria automobilística, e não se apresentam somente como soluções alternativas à climatização convencional, quando não é possível controlar todo o espaço considerado, como nas aeronaves ou automóveis, mas também como tecnologia avançada para prover um ambiente aceitável para cada passageiro.

Na indústria aeronáutica, estudos estão sendo realizados em colaboração com centros de pesquisas e novas tecnologias de distribuição de ar e de dispositivos de ventilação personalizada estão sendo testadas. Ambientes que reproduzem cabines de aeronaves, os *mock-ups*, estão sendo construídos e condições de conforto e de qualidade do ar de cabines avaliadas (IRGENS e MELIKOV, 2004; JACOBS e GIDS, 2005; STRØM-TEJSEN *et al.*, 2005; STRØM-TEJSEN *et al.*, 2007; ZHANG e CHEN, 2007; ZHANG *et al.*, 2007a; GAO e NIU, 2007; WANG *et al.*, 2008; MOURA, 2009; STANCATO, 2009; YAN *et al.*, 2009).

1.1. Sistema de distribuição de ar

O sistema de distribuição de ar é um dos mais importantes componentes do sistema de controle ambiental na correta distribuição de ar tratado para prover condições de saúde e de conforto em cabines. Atualmente, o sistema de distribuição de ar comumente utilizado em cabines de aeronaves consiste no insuflamento de ar na parte superior e retorno na parte inferior com mistura do ar na cabine – *Mixing Ventilation* – MV, Figura 1.1. Este sistema, contudo, tem apresentado problemas de conforto térmico e pode, devido à sua característica de mistura, espalhar rapidamente doenças infecciosas pelo ar na cabine (ZHANG *et al.*, 2007a).

Por outro lado, sistemas de distribuição de ar por deslocamento, *Displacement ventilation* – DV (CHEN e GLICKSMAN, 2003) e sistema de ventilação pelo piso, *Underfloor air distribution* – UFAD (BAUMAN e DAYLE, 2003) têm sido utilizados com sucesso em edificações (Figura 1.2 e 1.3).

Estes sistemas de distribuição de ar podem gerar melhores condições de qualidade do ar (ZHANG e CHEN, 2007; PEREIRA *et al.*, 2009) e de conforto térmico (BAUMAN e DAYLE, 2003; LEITE e TRIBESS, 2006). Em um sistema com insuflamento pelo piso (UFAD) ou de ventilação por deslocamento (DV) ar frio e limpo é insuflado no ambiente a partir do piso. As fontes de calor no ambiente, tais como o corpo humano, geram plumas

que levam os contaminantes para cima, com exaustão ao nível do teto (LEITE e TRIBESS, 2006; PEREIRA *et al.*, 2009).

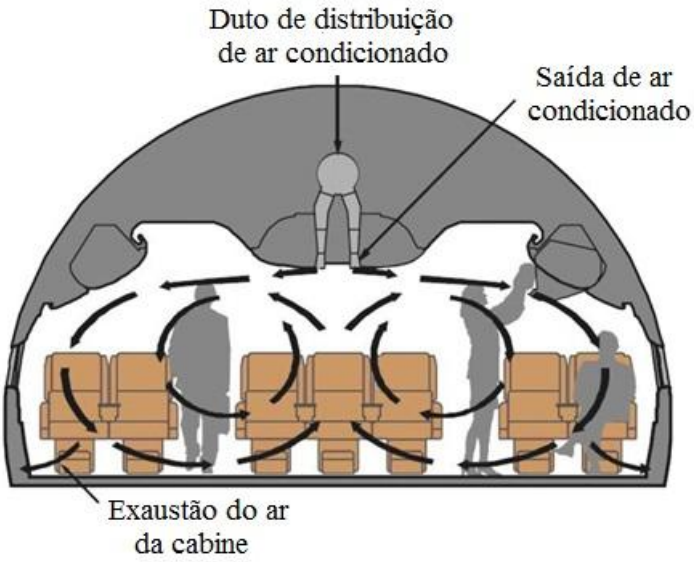


Figura 1.1 – Sistema de ventilação com mistura de ar na cabine, MV (adaptado – HUNT e SPACE, 1995).

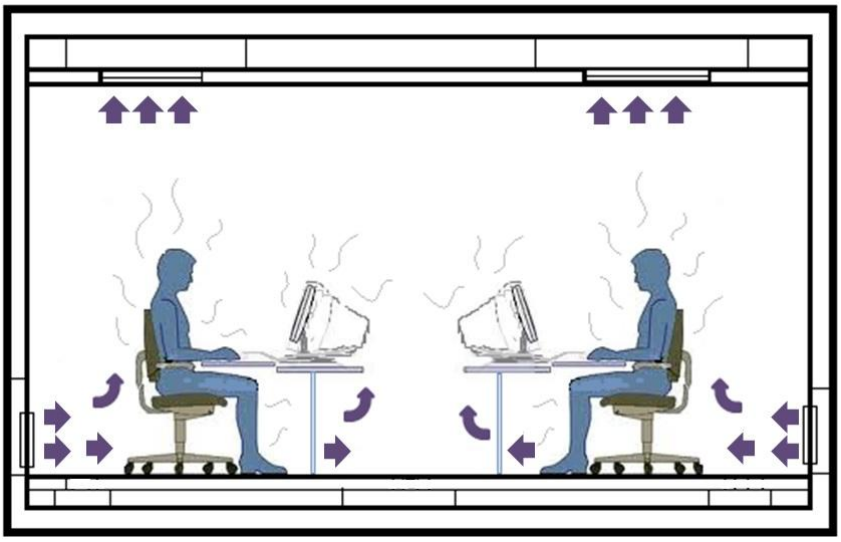


Figura 1.2 – Representação do sistema de ventilação por deslocamento, DV.

Embora os sistemas DV e UFAD possam promover melhor qualidade do ar, por meio de uma maior eficiência na remoção de contaminantes como o CO_2, por exemplo, que um sistema de distribuição de ar por mistura, estes podem causar estratificação de temperatura (BAUMAN e DAILY, 2003; LEITE e TRIBESS, 2006). Esta estratificação de temperatura, juntamente com as condições de velocidade do ar e turbulência do ar, pode

causar desconforto devido às correntes de ar (*draught risk)* (ZUKOWSKI, 2007; ZHANG, LI e WANG, 2011).

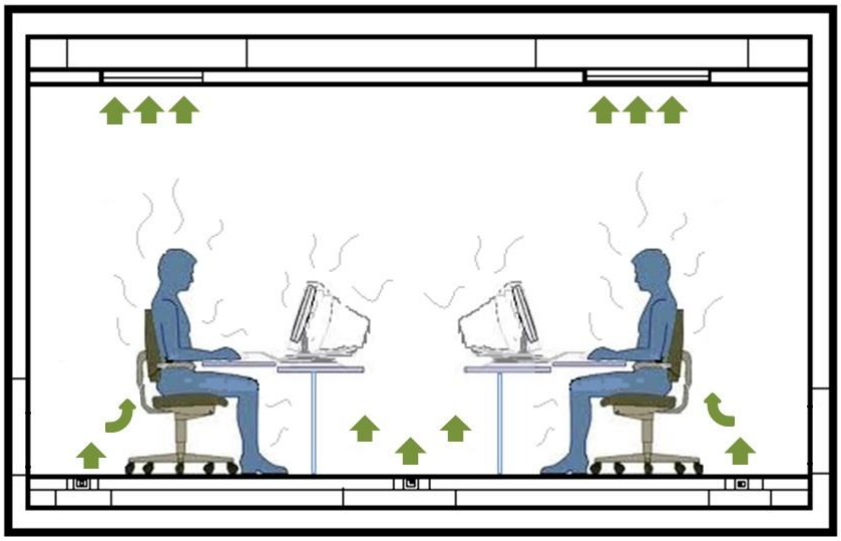


Figura 1.3 – Representação do sistema de distribuição de ar com insuflamento pelo piso, UFAD.

Paralelamente ao desenvolvimento de sistemas DV e UFAD, estão sendo desenvolvidos sistemas com suprimento de ar individualizado (KACZMARCZYK, MELIKOV e FANGER, 2004; LEITE, 2003; LEITE e TRIBESS, 2004; KACZMARCZYK *et al.*, 2006; GAO e NIU, 2007; ZHANG, LI e WANG, 2011). Sistemas de distribuição de ar personalizados fornecem ar limpo e fresco diretamente na zona de respiração da pessoa formando um microclima. O sistema personalizado pode prover qualidade do ar superior, mas o risco de correntes de ar pode ser ainda maior que nos sistemas DV e UFAD (KACZMARCZYK, MELIKOV e FANGER, 2004; ZHANG e CHEN, 2007). A Figura 1.4 ilustra o sistema com suprimento de ar individualizado.

Embora, tanto os sistemas DV e UFAD quanto os sistemas personalizados estejam sendo aplicados com sucesso em ambientes de edificações, eles ainda não têm sido utilizados em cabines de aeronaves. Contudo, estudos em *mock-up* e de simulação utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*) estão sendo desenvolvidos (JACOBS e GIDS, 2005; ZHANG e CHEN, 2007; GAO e NIU, 2007; ZHANG, YIN e WANG, 2010; ZHANG, LI e WANG, 2011).

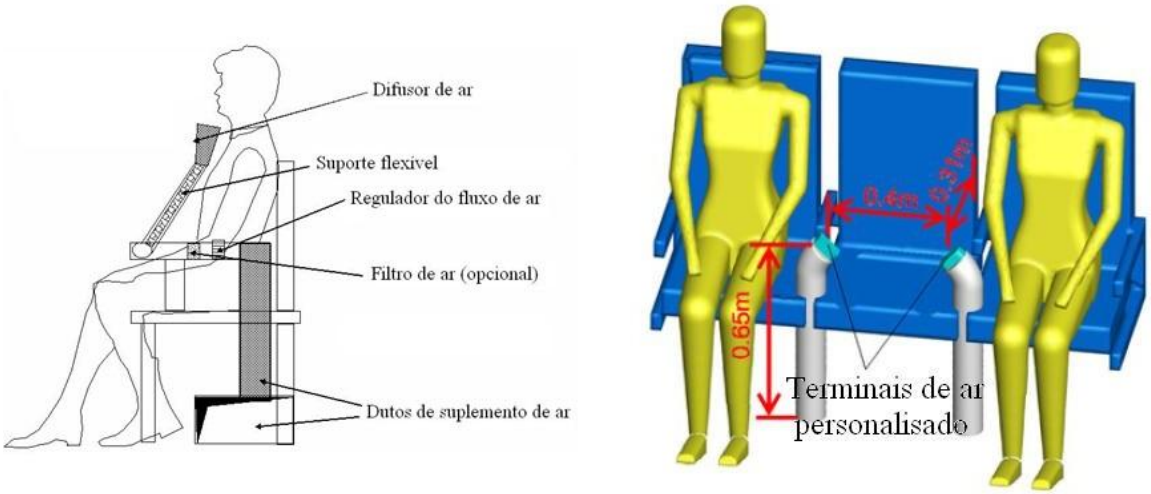


Figura 1.4 – Sistemas de distribuição de ar personalizados (Adaptado – GAO e NIU, 2007; ZHANG, LI e WANG, 2011).

1.2. Estudos do escoamento e de conforto térmico em cabines de aeronaves

Estudos de medição experimental e de simulação computacional do escoamento e de conforto térmico em cabines de aeronaves ainda são em números bastante reduzidos, com poucos grupos e publicações de artigos sobre o assunto na literatura aberta.

Com relação aos estudos experimentais, a maioria está sendo realizada em *mock-ups* de uma seção da cabine ou em aeronaves paradas simulando condições de escoamento em voo. Isto porque estudos experimentais em condições reais de voo, quando conduzidos com razoável resolução espacial para obtenção de resultados confiáveis, são extremamente caros (ZHANG e CHEN, 2007).

No *International Center for Indoor Environment and Energy*, da Dinamarca, pesquisadores têm realizado estudos em um *mock-up* com 21 assentos (três fileiras de sete assentos), instalado em uma câmara climática com temperatura controlada de forma a obter superfícies das paredes externas com temperaturas “realisticamente” baixas. Nos ensaios estão sendo utilizados 14 cilindros aquecidos e dois manequins térmicos para simular a carga térmica, os efeitos de convecção natural e de obstrução do fluxo de ar (IRGENS e MELIKOV, 2004; STRØM-TEJSEN *et al.*, 2005; STRØM-TEJSEN *et al.*, 2007).

Irgens e Melikov (2004) apresentaram resultados de distribuição de temperatura e intensidade turbulenta na cabine. Mais recentemente, Strøm-Tejsen *et al.*, (2007) correlacionam resultados de medições em manequins com resultados de avaliação

subjetiva de sensação térmica em diferentes partes do corpo em quatro grupos de 17 pessoas que participaram de voo transatlântico simulado de 7 horas, com cada grupo submetido às mesmas condições térmicas. Os resultados de avaliação subjetiva de sensação térmica foram publicados anteriormente (STRØM-TEJSEN *et al.*, 2005).

No *Air Tranportation Center of Excellence for Airliner Cabin Environmental Research*, dos Estados Unidos, estão sendo desenvolvidos estudos experimentais e de simulação (CFD) em *mock-up* com quatro assentos por fileira para avaliar e validar simulações numéricas e avaliar a influência da distribuição de ar e do escoamento no transporte de contaminantes (ZHANG e CHEN, 2007; ZHANG *et al.*, 2007a).

No *German Aerospace Center*, da Alemanha, estão sendo realizados estudos em Airbus 380. Resultados de estudos comparativos do escoamento em uma parte da fuselagem de um Airbus 380, utilizando simulação numérica (CFD) e medidas de velocidade com técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*), foram apresentados (PENNECOT *et al.*, 2004).

No *TNO Building and Construction Research* da Holanda, também estão sendo realizados estudos em cabines de aeronaves no âmbito de projeto da comunidade europeia. Loomans *et al.*, (2004) apresentaram resultados de estudo comparativo entre medições realizadas em voo cruzeiro e resultados de simulação (CFD), em aeronave com sete poltronas por fileira, sem passageiros a bordo.

No Centro de Engenharia de Conforto da Escola Politécnica da USP estão sendo desenvolvidos estudos em *mock-ups* de quatro assentos por fileira na análise do conforto térmico, acústico, lumínico e de qualidade do ar em parceria com a EMBRAER e apoio da FAPESP e da FINEP. Com relação ao conforto térmico e à qualidade do ar estão sendo realizados estudos de escoamento, da sensação de conforto e de contaminação aérea por biocontaminantes (MOURA, 2009; STANCATO, 2009; CONCEIÇÃO, 2012).

1.3. Motivação do trabalho

O conforto térmico dos ocupantes em cabines de aeronave está ganhando maior importância e destaque em função de estar crescendo substancialmente o tempo que as pessoas gastam em viagens e por ser um diferencial de competitividade na indústria aeronáutica.

A necessidade de estudar os impactos no conforto térmico em cabines surgiu, entre outras questões, devido às cabines apresentarem características diferenciadas com relação a outros ambientes. Assim, torna-se necessário desenvolver estudos com objetivo de avaliar e prever o impacto no conforto térmico do usuário e prover mecanismos que melhorem a sensação de conforto no interior dessas cabines.

Neste sentido, torna-se relevante propor e analisar a influência de novas arquiteturas de distribuição de ar em cabines de aeronaves como forma de contribuir na melhoria de condições de conforto térmico neste meio de transporte.

1.4. Objetivos do trabalho

Esse trabalho tem por objetivo propor novas arquiteturas de distribuição de ar em cabines de aeronaves e avaliar a sua influência no desconforto térmico local a partir de medições de variáveis ambientais e utilização de manequim térmico.

1.5. Organização do trabalho

No capítulo 2 são apresentadas as condições para conforto térmico e os métodos de avaliação de ambientes climatizados, conforme o trabalho de Fanger (1972) e as normas ASHRAE 55 (2010), ISO 7730 (2005) e NBR 16401-2 (ABNT, 2008).

O capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos sobre correntes de ar, sua definição e a relação com o percentual de pessoas insatisfeitas. Uma comparação entre PPD e PD é realizada.

No capítulo 4 são apresentados os métodos para avaliação de conforto térmico em cabines conforme trabalhos já publicados e conforme a norma ISO 14505-2 (2006).

No capítulo 5 é apresentado o método experimental, com a descrição do laboratório de conforto térmico, em especial o *mock-up* e os instrumentos utilizados para a realização do trabalho, as arquiteturas de distribuição de ar analisadas, bem como o procedimento experimental e as condições de ensaio.

O capítulo 6 apresenta os resultados e discussões sobre a avaliação do desconforto térmico local no interior do *mock-up* para as arquiteturas de distribuição de ar propostas. Os perfis de velocidade e temperatura do ar, bem como a análise do desconforto devido às

correntes de ar e de temperaturas equivalentes obtidas com a utilização de manequim térmico, são apresentados.

O capítulo 7 apresenta as conclusões e as sugestões para a realização de trabalhos futuros. Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as referências bibliográficas.

Capítulo 2

CONFORTO TÉRMICO

A busca em se prover condições de conforto térmico é para satisfazer o desejo do ser humano de se sentir termicamente confortável em um determinado ambiente para realizar melhor suas tarefas. Isto acontece nos mais variados ambientes: residências, *shoppings centers*, escritórios, hospitais, escolas, teatros, cinemas, restaurantes, museus, igrejas, bem como nos diversos tipos de veículos: automóveis, ônibus, caminhões, trens, aeronaves e navios.

O conforto térmico é definido pela norma ASHRAE 55 (2010) como sendo "um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa". Assim, se a condição necessária para o indivíduo sentir-se termicamente confortável é conquistada, a sensação de bem estar será atingida.

Em função da ampla variação fisiológica e psicológica, de pessoa para pessoa, é difícil satisfazer a todos simultaneamente em um determinado ambiente climatizado ou não. As condições ambientais requeridas para o conforto térmico não são as mesmas para todos. Se o ambiente não proporciona tais condições, o organismo provoca reações desencadeadas pelo sistema termorregulador, que irá agir para manter a temperatura interna do corpo constante frente a variações térmicas externas, causando o desconforto.

2.1. O sistema termorregulador

O sistema termorregulador permite ajustes fisiológicos frente às variações térmicas. O efeito decorrente de uma mudança nas condições ambientais produz uma reação no interior do corpo relativa às respostas fisiológicas autônomas, mas, também, ativa a regulação comportamental. A regulação comportamental pode ser conquistada pelo movimento do corpo ou ajuste nas vestimentas.

A termorregulação fisiológica em seres humanos compreende a mudança na dissipação de calor (vasodilatação cutânea e sudorese) e a geração de energia (tremores) em resposta a vários estímulos térmicos internos e externos. O controle central da termorregulação é no pré-ótico/ hipotálamo anterior (PO/HA) no Sistema Nervoso Central

(SNC). A informação no interior (núcleo) e a temperatura da superfície (pele) são retransmitidas para o hipotálamo, que coordena a resposta apropriada. Conceitualmente, essa área do cérebro pode ser relacionada a um termostato, que inicia a resposta à dissipação de calor quando a temperatura do corpo é percebida como “muito quente” e à conservação de calor ou geração de energia quando a temperatura do corpo é percebida como “muito fria” (CHARKOUDIAN, 2003). O controle da termorregulação é resumido na Figura 2.1, onde A é a vasodilatação cutânea e sudorese e B é a vasoconstricção cutânea e aumento da geração de energia (tremores).

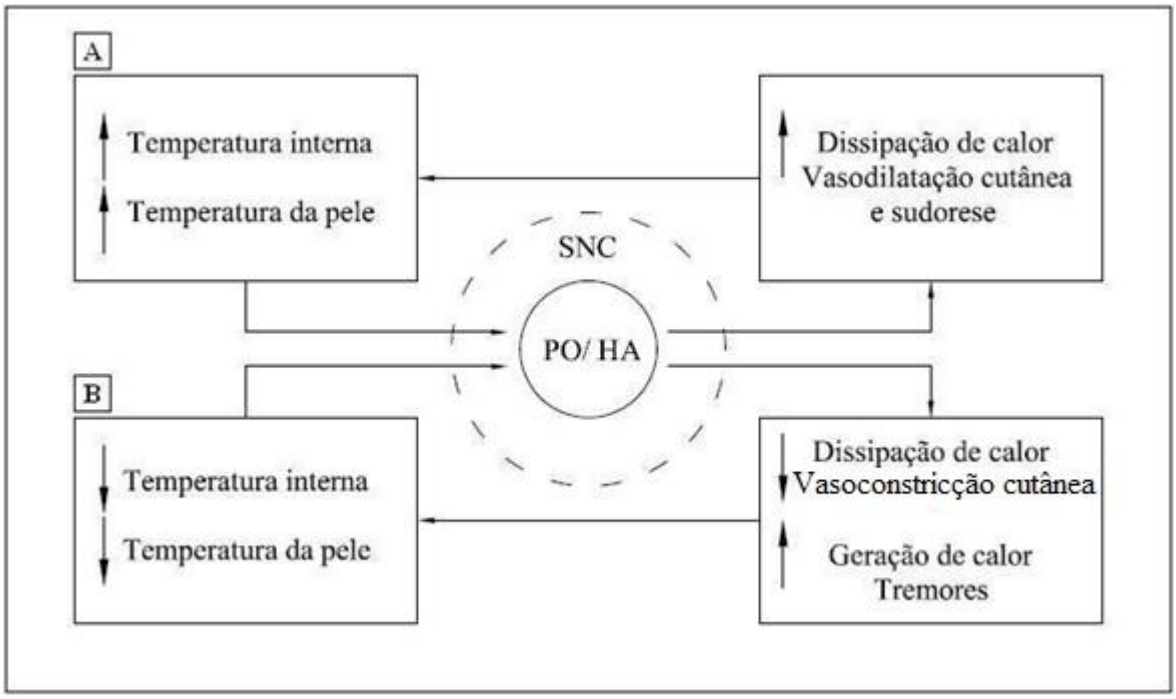


Figura 2.1 – Controle da termorregulação humana (adaptado de CHARKOUDIAN, 2003).

O ponto de ajuste da temperatura pode mudar durante diferentes condições fisiológicas. As terminações nervosas dos receptores termosensíveis enviam sinais para o centro de regulação. Esses receptores são sensíveis para mudanças bruscas na temperatura e são altamente suscetíveis à adaptação. Em ambientes frios, a estimulação dos receptores de frio pode baixar o ponto de ajuste da temperatura e a perda de energia diminuirá por vasoconstricção e tremores. Já, em ambientes quentes, o ponto de ajuste da temperatura pode se tornar elevado e a perda de energia pode aumentar pela vasodilatação e sudorese (NILSSON, 2004).

O propósito do sistema termorregulador humano é manter a temperatura interna do corpo em torno dos 37 °C (atividade sedentária). A temperatura do corpo precisa ser mantida dentro de um pequeno intervalo de variação independentemente das condições ambientais. Assim, o equilíbrio térmico é adequado e a pessoa se sente termicamente neutra. O sistema termorregulador é bastante efetivo e realiza o balanço térmico dentro de amplos limites de variáveis ambientais, mesmo se a sensação de conforto não existir.

2.2. Balanço térmico do corpo humano

Se o corpo humano é exposto a um ambiente térmico moderado por longos períodos, com uma taxa metabólica constante, ocorrerá um equilíbrio entre a energia produzida e a energia liberada. A produção de energia (metabolismo) será igual à dissipação de calor e não haverá armazenamento significativo de energia. A Figura 2.2 ilustra a iteração do corpo humano com o meio envolvente.

A partir da 1ª lei da termodinâmica, o balanço térmico do corpo humano é dado por:

$$\dot{U} = M - W - \left(C + R + E_{dif} + E_{es}\right) - \left(E_R + C_R\right) \qquad 2.1$$

em que:

$\dot{U}$	taxa de variação de energia interna	[W/m²];
M	taxa de produção de energia, metabolismo	[W/m²];
W	taxa de realização de trabalho pelos músculos	[W/m²];
C	taxa de calor perdido pela pele por convecção	[W/m²];
R	taxa de calor perdido pela pele por radiação	[W/m²];
E_{dif}	taxa de calor perdido por evaporação da água que difunde pela pele	[W/m²];
E_{es}	taxa de calor perdido pela pele por evaporação do suor	[W/m²];
E_R	taxa de calor evaporativo perdido pela respiração	[W/m²];
C_R	taxa de calor convectivo perdido pela respiração	[W/m²].

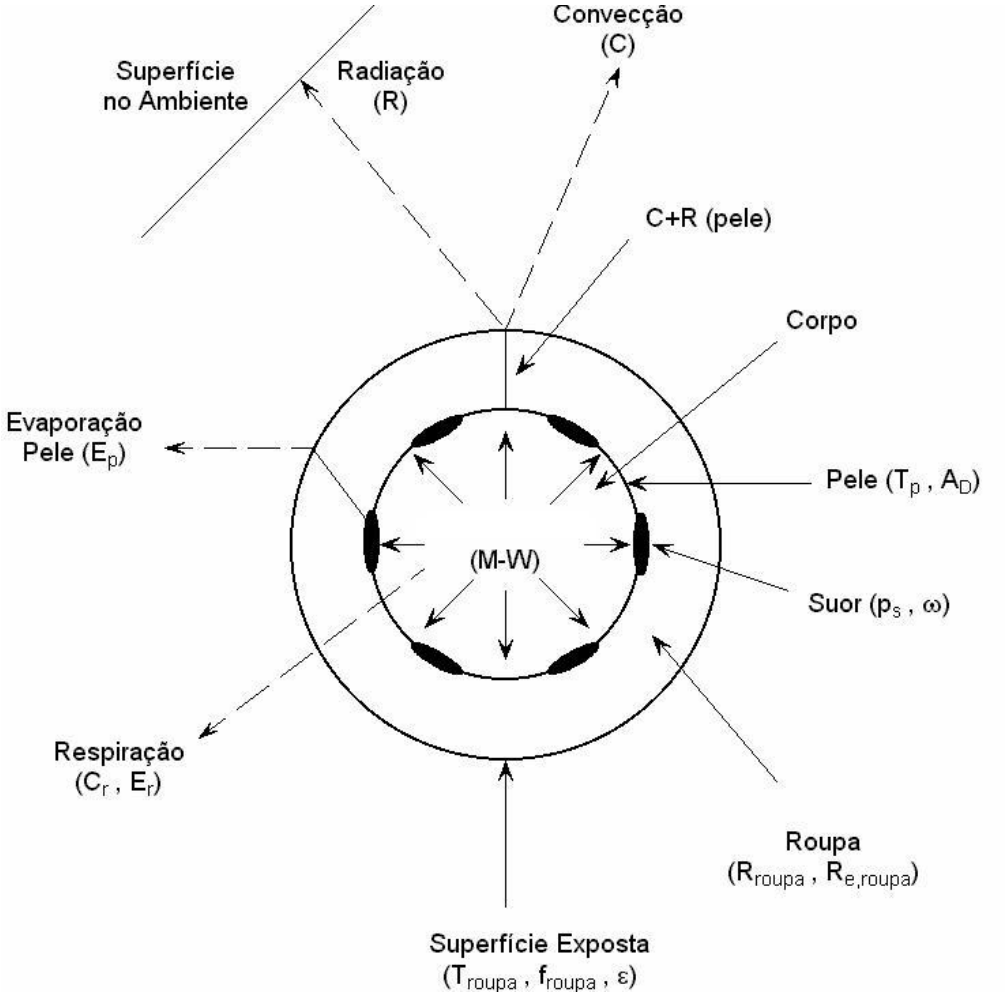


Figura 2.2 – Modelo cilíndrico de iteração térmica, corpo humano e meio envolvente (adaptado – ASHRAE, 2009).

A sensação térmica dos seres humanos está relacionada principalmente com o balanço térmico do corpo como um todo. Esse balanço é influenciado pela atividade física (metabolismo) e vestimentas (resistência térmica da roupa), assim como, por parâmetros ambientais: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar. Desta forma, o conforto térmico pode ser conquistado por diferentes combinações dessas variáveis (FANGER, 1972).

2.3. Equação de conforto de Fanger

Segundo Fanger (1972), a equação geral do conforto térmico ideal é baseada no estabelecimento de três condições básicas.

A primeira condição necessária para o conforto térmico é a existência de um balanço térmico para uma pessoa exposta a um dado ambiente por um longo período. Essa condição é naturalmente necessária, mas está longe de ser suficiente.

$$\dot{U} = 0 \qquad 2.2$$

Adicionalmente, para um dado nível de atividade, a temperatura da pele, T_p, e secreção do suor, E_{es}, são as únicas duas variáveis físicas que influenciam no balanço térmico e a sensação de conforto térmico é relacionada com a magnitude dessas variáveis. Experimentos envolvendo um grupo de pessoas foram realizados para determinar valores da temperatura da pele e secreção de suor como função dos níveis de atividade.

$$T_p = 35{,}7 - 0{,}0275(M - W) \qquad 2.3$$

$$E_{es} = 0{,}42(M - W - 58{,}2) \qquad 2.4$$

As equações 2.3 e 2.4 são, respectivamente, a segunda e terceira condições básicas de conforto térmico, obtidas a partir de regressões lineares de dados experimentais.

Das condições de conforto de Fanger, uma pessoa em atividade sedentária (58,2 W/m²) em condições de conforto térmico não produzirá suor, pois a secreção de suor é igual a zero (Equação 2.4) e a temperatura da pele será de 34,1 °C (Equação 2.3).

Ao inserir as Equações 2.2 a 2.4 na equação do balanço térmico (Equação 2.1), juntamente com as equações de transferência de calor, obtém-se a equação geral de conforto térmico (FANGER, 1972), dada por:

$$\begin{aligned} M - W = {} & 0{,}42[M - W - 58{,}2] + 3{,}05\left[5{,}73 - 0{,}007(M - W) - p_{v_{ar}}\right] \\ & + 0{,}0173M\left(5{,}87 - p_{v_{ar}}\right) + 0{,}0014M(34 - T_{ar}) + f_r h_c\left(T_{roupa} - T_{ar}\right) \\ & + 3{,}96 \times 10^{-8} f_r \left[\left(T_{roupa} + 273\right)^4 - (\overline{T_r} + 273)^4\right] \end{aligned} \qquad 2.5$$

com a temperatura da roupa, T_{roupa}, dada por:

$$\begin{aligned} T_{roupa} = {} & 35{,}7 - 0{,}0275(M - W) \\ & - 0{,}155 I_r\{(M - W) - 3{,}05\left[5{,}73 - 0{,}007(M - W) - p_{v_{ar}}\right] \\ & - 0{,}42[M - W - 58{,}2] - 0{,}0173M\left(5{,}87 - p_{v_{ar}}\right) \\ & - 0{,}0014M(34 - T_{ar})\} \end{aligned} \qquad 2.6$$

e

$$h_c = \begin{cases} 2{,}38\left(T_{roupa} - T_{ar}\right)^{0{,}25}, & 2{,}38\left(T_{roupa} - T_{ar}\right)^{0{,}25} \geq 2{,}1\sqrt{v_{ar}} \\ 12{,}1\sqrt{v_{ar}}, & 2{,}38\left(T_{roupa} - T_{ar}\right)^{0{,}25} \leq 2{,}1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \qquad 2.7$$

$$f_r = \begin{cases} 1{,}0 + 0{,}2I_r, & I_r \leq 0{,}5\ m^2°C/W \\ 1{,}05 + 0{,}1I_r, & I_r > 0{,}5\ m^2°C/W \end{cases} \qquad 2.8$$

em que:

M	taxa de produção de energia, metabolismo	[W/m²];
W	taxa de realização de trabalho pelos músculos	[W/m²];
$p_{v_{ar}}$	pressão parcial do vapor d'água no ambiente	[kPa];
T_{ar}	temperatura do ar	[°C];
f_r	fator de área da vestimenta	[adimensional];
h_c	coeficiente de troca de calor por convecção	[W/m² °C];
T_{roupa}	temperatura da roupa	[°C];
$\overline{T_r}$	temperatura radiante média	[°C];
I_r	índice de isolamento da roupa	[clo];
v_{ar}	velocidade média do ar	[m/s].

Em aplicações convencionais de ambientes térmicos, não há trabalho dos músculos, ou seja, $W = 0$. O metabolismo é sempre dado na unidade "Met", na qual 1 Met é igual ao metabolismo para uma pessoa sentada em repouso, isto é, em atividade sedentária (1 Met = 58,2 W/m²). Na Tabela 2.1, são listadas algumas atividades e seus valores de metabolismo correspondentes.

A vestimenta apresenta uma resistência térmica à troca de calor entre o corpo e o meio envolvente e, portanto, afeta o equilíbrio térmico. O isolamento térmico da roupa, I_r, é normalmente expresso na unidade "clo", onde 1 clo = 0,155 m² °C/W.

Durante os meses de primavera e verão, as roupas usadas por pessoas que trabalham em escritórios no Brasil são tipicamente leves ou de meia estação (calças / saias, blusas de algodão, poliéster ou mistas, de manga curta ou comprida), cuja composição apresenta isolamento térmico na faixa de 0,5 a 0,7 clo. Nas estações de outono e inverno, as pessoas vestem roupas um pouco mais pesadas (as mesmas anteriores, acrescidas de

blaser ou paletó de tecido leve), cujo conjunto apresenta isolamento térmico de 0,9 a 1,0 clo (LEITE, 2003).

Tabela 2.1 – Níveis de metabolismo (ISO 7730, 2005).

Atividade	**Metabolismo**	
	W/m²	**Met**
Reclinado	46	0,8
Sentado, relaxado	58	1,0
Sentado em atividade de escritório, residência, escola e laboratório	70	1,2
Em pé, atividades leves (shopping, laboratório e indústria leve)	93	1,6
Em pé, atividades médias (assistente de loja, trabalho doméstico e trabalho em máquinas	116	2,0
Andando ao nível do solo		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Para a obtenção das variáveis ambientais: velocidade média do ar, v_{ar}, temperatura radiante média, $\overline{T_r}$, temperatura do ar, T_{ar}, umidade absoluta, ω e umidade relativa, ϕ, são realizadas medições no ambiente. A norma ISO 7726 (1998) apresenta procedimentos de medição e métodos para a determinação destas variáveis ambientais.

2.4. Avaliação de ambientes térmicos

A solução da equação geral do conforto (Equação 2.5) é uma condição para o conforto térmico. Porém, essa equação somente fornece informações sobre a forma como às variáveis devem ser combinadas para se obter conforto térmico. Mas isso não é adequado para verificar a sensação térmica das pessoas em um ambiente qualquer. A equação geral do conforto pode ser usada como um ponto de partida, mas há a necessidade de avaliações com pessoas quanto às condições de conforto que o ambiente proporciona.

A avaliação subjetiva, normalmente, é realizada por meio do voto das pessoas segundo critérios definidos na escala de sensação térmica da ASHRAE (Tabela 2.2), no estabelecimento do método de predição da sensação térmica para qualquer combinação de nível de atividade, vestimenta e dos quatros parâmetros ambientais.

Tabela 2.2 – Escala de sensação térmica da ASHRAE (ASHRAE 55, 2010).

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

2.4.1. Voto médio estimado (PMV)

O modelo do voto médio estimado (*Predicted Mean Vote*, PMV) usa o princípio do balanço térmico para relacionar os seis parâmetros chaves (metabolismo, vestimenta, temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade do ar) para o conforto térmico com o voto das pessoas.

Fanger (1972) realizou ensaios com pessoas, desempenhando certa atividade (metabolismo, M) e vestindo determinada roupa (isolamento da roupa, I_r), em câmaras

climatizadas com condições ambientais controladas. Cada pessoa preenchia um questionário com o seu voto representando a sua sensação térmica, baseando-se nos valores da Tabela 2.2.

Segundo Fanger (1972), “quando a equação de conforto é satisfeita, espera-se, para um grande grupo de pessoas, um voto médio igual a zero (neutro). Como, então, pode uma expressão física, tendo relação com uma sensação térmica, ser estabelecida para desvios (variações) da equação do conforto?”.

Ainda, segundo Fanger (1972), a relação é obtida, para um dado nível de atividade, por meio de uma função atividade térmica do corpo, definida como a diferença entre a produção interna de energia e a perda de calor para o ambiente, para uma pessoa hipoteticamente mantida nos valores de conforto da temperatura média da pele e secreção de suor no nível de atividade atual.

Conforme esta definição, o índice de atividade térmica L pode ser expresso matematicamente como:

$$L = M - W - \left(C + R + E_{dif} + E_{es}\right) - \left(E_R + C_R\right) \qquad 2.9$$

Com base nas experiências com cerca de 1.300 pessoas, Fanger relacionou a atividade térmica (L) e o metabolismo (M) com o voto médio estimado (PMV) das pessoas em diferentes condições do ambiente, resultando em:

$$PMV = (0{,}303e^{-0{,}036M} + 0{,}028)L \qquad 2.10$$

Fanger (1972) enfatiza que o uso do PMV para avaliação de conforto térmico deve ser restringido a faixa de $-2 \leq PMV \leq +2$ e que os principais parâmetros estejam dentro dos seguintes intervalos:

$M = 46\ a\ 232\ W/m^2\ (0{,}8\ a\ 4{,}0\ Met)$

$I_r = 0\ a\ 0{,}310\ m^2\ °C/W\ (0\ a\ 2{,}0\ clo)$

$T_{ar} = 10\ a\ 30\ °C$

$\overline{T_r} = 10\ a\ 40\ °C$

$v_{ar} = 0\ a\ 1{,}0\ m/s$

$p_{v_{ar}} = 0\ a\ 2{,}7\ kPa$

ϕ = 30 a 70 %

Uma vez que o cálculo do voto médio estimado é um pouco trabalhoso, Fanger (1972) e a norma ISO 7730 (2005) apresentam tabelas e uma rotina para utilização em microcomputador, que permitem determinar mais facilmente o PMV para diferentes atividades, tipos de vestimenta e condições ambientais. A Tabela 2.3, por exemplo, apresenta valores de PMV para atividade de escritório (1,2 Met) e umidade relativa do ar de 50%, apresentados em função da temperatura operativa[1].

A norma ASHRAE 55 (2010) apresenta gráficos para a determinação das condições de conforto térmico em ambientes climatizados de edificações - as Cartas de Conforto da ASHRAE. A Figura 2.3 mostra uma carta psicrométrica modificada com a zona de conforto representada pela área hachurada.

As zonas de conforto são definidas pela norma ASHRAE 55 (2010) em termos do intervalo das temperaturas operativas que fornecem condições ambientais térmicas aceitáveis ou em termos das combinações da temperatura do ar e temperatura radiante média em que as pessoas encontram os ambientes termicamente aceitáveis. Por exemplo:

Verão (clo = 0,5)

Termperatura operativa e umidade relativa dentro da zona delimitada por:

- 22,5 °C a 25,5 °C e umidade relativa de 65%
- 23,0 °C a 26,0 °C e umidade relativa de 35%

Inverno (clo = 0,9)

Temperatura operativa e umidade relativa dentro da zona delimitada por:

- 21,0 °C a 23,5 °C e umidade relativa de 60%
- 21,5 °C a 26,0 °C e umidade relativa de 30%

[1] Temperatura operativa, T_o, é a temperatura uniforme de um invólucro negro imaginário, na qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação e convecção do que se estivesse num ambiente real não uniforme (ISO 7730, 2005; ASHRAE 55, 2004). O cálculo da temperatura operativa é apresentado no Anexo A.

Tabela 2.3 – Determinação do voto médio estimado – PMV – Atividade de escritório (1,2 Met) e umidade relativa do ar de 50% (ISO 7730, 2005).

Vestimenta		**Temperatura operativa**	**Velocidade relativa do ar m/s**							
clo	**m²°C/W**	**°C**	**<0,10**	**0,10**	**0,15**	**0,20**	**0,30**	**0,40**	**0,50**	**1,00**
0	**0**	**25**	**-1,33**	**-1,33**	**-1,59**	**-1,92**				
		26	-0,83	-0,83	-1,11	-1,40				
		27	-0,33	-0,33	-0,63	-0,88				
		28	0,15	0,12	-0,14	-0,36				
		29	0,63	0,56	0,35	0,17				
		30	1,10	1,01	0,84	0,69				
		31	1,57	1,47	1,34	1,24				
		32	2,03	1,93	1,85	1,78				
0,25	**0,039**	**23**	**-1,18**	**-1,18**	**-1,39**	**-1,61**	**-1,97**	**-2,25**		
		24	-0,79	-0,79	-1,02	-1,22	-1,54	-1,80	-2,01	
		25	-0,42	-0,42	-0,64	-0,83	-1,11	-1,34	-1,54	-2,21
		26	-0,04	-0,07	-0,27	-0,43	-0,89	-1,06	-1,65	-0,68
		27	0,33	0,29	0,11	-0,03	-0,25	-0,43	-0,58	-1,09
		28	0,71	0,64	0,49	0,37	0,18	0,03	-0,10	-0,54
		29	1,07	0,99	0,87	0,77	0,61	0,49	0,39	0,03
		30	1,43	1,35	1,25	1,17	1,05	0,95	0,87	0,58
0,50	**0,078**	**18**	**-2,01**	**-2,01**	**-2,17**	**-2,38**	**-2,70**			
		20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,25	-2,04	-2,42	
		22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17
		24	-0,17	-0,20	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35
		26	0,44	0,39	0,26	0,16	-0,01	-0,11	-0,21	-0,52
		28	1,05	0,98	0,88	0,81	0,70	0,61	0,54	-0,31
		30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14
		32	2,25	2,20	2,17	2,15	2,11	2,09	2,07	1,99
0,75	**0,116**	**16**	**-1,77**	**-1,77**	**-1,91**	**-2,07**	**-2,31**	**-2,49**		
		18	-1,27	-1,27	-1,42	-1,56	-1,77	-1,93	-2,05	-2,45
		20	-0,77	-0,77	-0,92	-1,04	-1,23	-1,36	-1,47	-1,82
		22	-0,25	-0,27	-0,40	-0,51	-0,66	-0,78	-0,87	-1,17
		24	0,27	0,23	0,12	0,03	-0,10	-0,19	-0,27	-0,51
		26	0,78	0,73	0,64	0,57	0,47	0,40	0,34	0,14
		28	1,29	1,23	1,17	1,12	1,04	0,99	0,94	0,80
		30	1,80	1,74	1,70	1,67	1,62	1,58	1,55	1,46
1,00	**0,155**	**16**	**-1,18**	**-1,18**	**-1,31**	**-1,43**	**-1,59**	**-1,72**	**-1,82**	**-2,12**
		18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59
		20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07
		22	0,13	0,10	0,00	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52
		24	0,58	0,54	0,46	0,40	0,31	0,24	0,19	0,02
		26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,70	0,58
		28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12
		30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67
1,50	**0,233**	**12**	**-1,09**	**-1,09**	**-1,19**	**-1,27**	**-1,39**	**-1,48**	**-1,55**	**-1,75**
		14	-0,75	-0,75	-0,85	-0,93	-1,03	-1,11	-1,17	-1,35
		16	-0,41	-0,42	-0,51	-0,58	-0,67	-0,74	-0,79	-0,96
		18	-0,06	-0,09	-0,17	-0,22	-0,31	-0,37	-0,42	-0,56
		20	0,28	0,25	0,18	0,13	0,05	0,00	-0,04	-0,16
		22	0,63	0,60	0,54	0,50	0,44	0,39	0,36	0,25
		24	0,99	0,95	0,91	0,87	0,82	0,78	0,76	0,67
		26	1,35	1,31	1,27	1,24	1,20	1,18	1,15	1,08
2,00	**0,310**	**10**	**-0,77**	**-0,78**	**-0,86**	**-0,92**	**-1,01**	**-1,06**	**-1,11**	**-1,24**
		12	-0,49	-0,51	-0,58	-0,63	-0,71	-0,76	-0,80	-0,92
		14	-0,21	-0,23	-0,29	-0,34	-0,41	-0,46	-0,49	-0,60
		16	0,08	0,06	0,00	-0,04	-0,10	-0,15	-0,18	-0,27
		18	0,37	0,34	0,29	0,26	0,20	0,17	0,14	0,05
		20	0,67	0,63	0,59	0,56	0,52	0,48	0,46	0,39
		22	0,97	0,93	0,89	0,87	0,83	0,80	0,78	0,72
		24	1,27	1,23	1,20	1,18	1,15	1,13	1,11	1,06

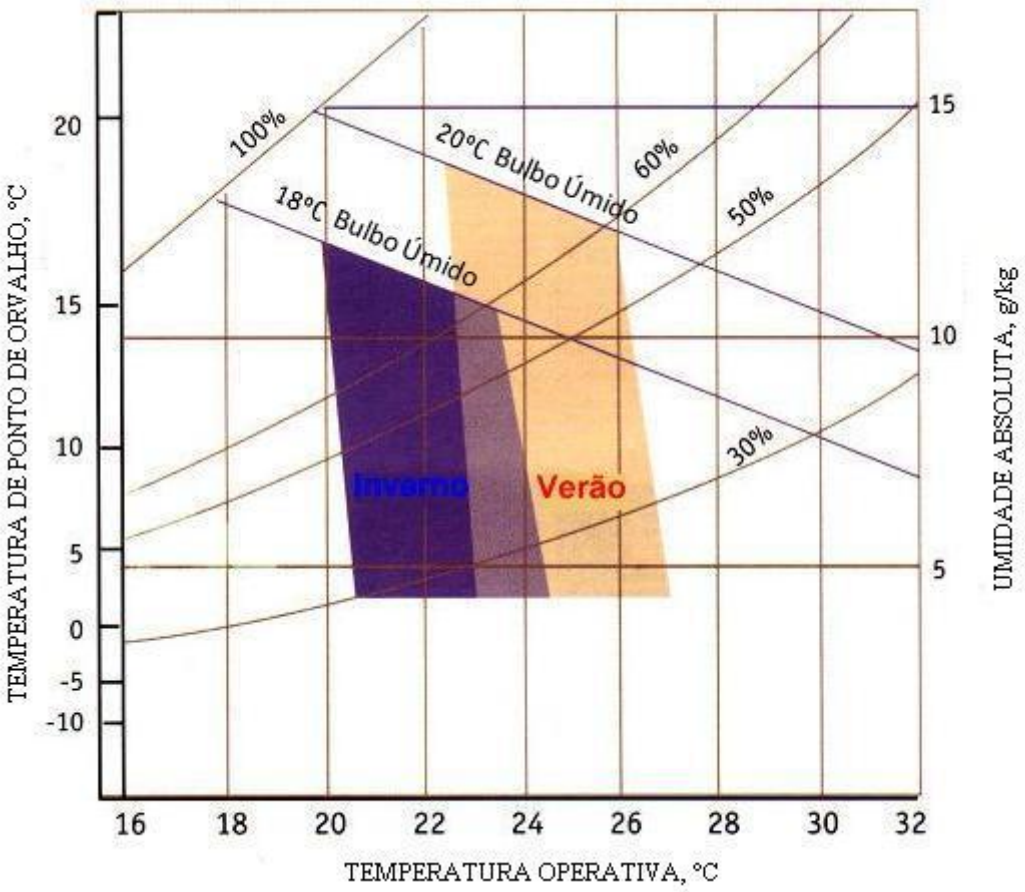


Figura 2.3 – Carta de Conforto da ASHRAE ($\mathbf{1,2\ Met, V_{ar} < 0,2\ m/s, \overline{T_r} \cong T_{ar}}$).

2.4.2. Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD)

Fanger (1972) relatou a percentagem estimada de insatisfeitos (PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied)* em função do voto médio estimado (PMV – *Predicted Mean Vote*):

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2)} \qquad 2.11$$

O percentual de pessoas insatisfeitas PPD dado pela Equação 2.11 estima o número de pessoas termicamente insatisfeitas entre um grande número de pessoas. O gráfico da Figura 2.4 apresenta a relação entre PMV e PPD da Equação 2.11.

Na construção da carta da ASHRAE (Figura 2.3) e no estabelecimento das zonas de conforto da ISO 7730 (Tabela 2.3) foi considerado percentual de pessoas insatisfeitas PPD = 20%, que corresponde ao intervalo – 0,82 < PMV < + 0,82 (Figura 2.4).

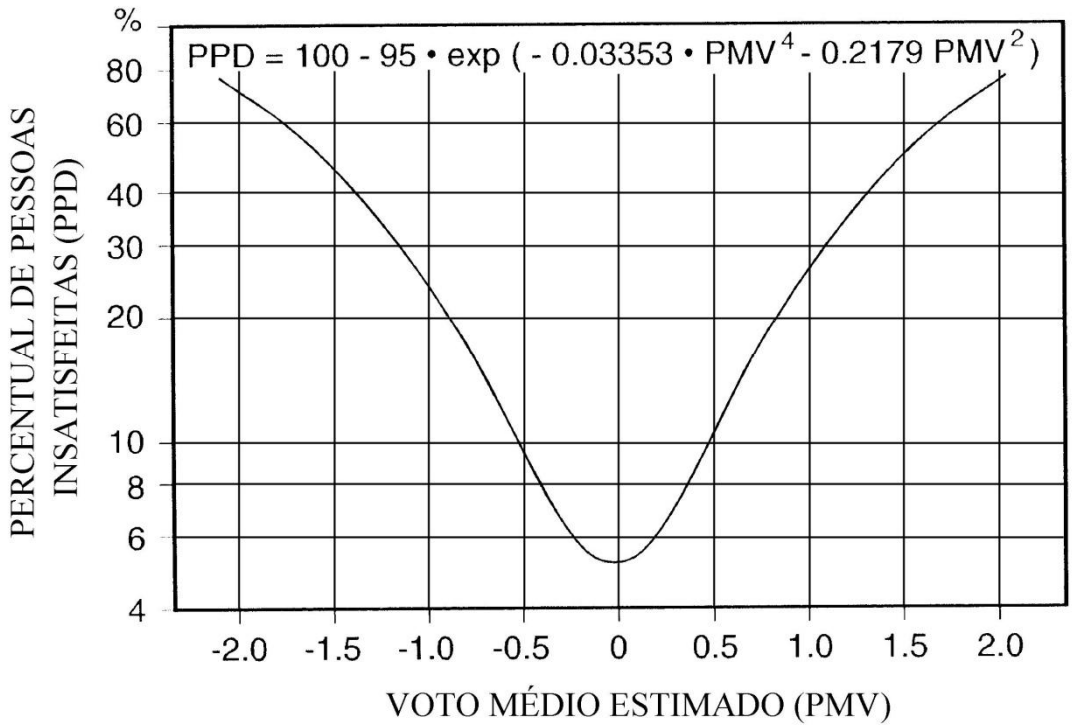


Figura 2.4 – Percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) como função do voto médio estimado (PMV) (ASHRAE 55, 2010).

As tabelas apresentadas na norma ISO 7730 (2005) e as faixas de conforto apresentadas pela ASHRAE 55 (2010) e pela NBR 16401-2 (ABNT, 2008) referem-se à análise de condições de conforto térmico para o corpo como um todo. Mas, mesmo que sejam satisfeitas as condições de conforto ou de desconforto térmico dentro dos limites aceitáveis previstos nestas normas técnicas, insatisfações térmicas locais podem ocorrer ocasionando sensação de “frio” ou “calor” em uma parte particular do corpo.

Neste caso, a ASHRAE 55 (2010), a ISO 7730 (2005) e a NBR 16401-2 (ABNT, 2008) recomendam limites adicionais para a aceitação do ambiente, baseados em um critério de 5% a 15% de insatisfação. Esses percentuais não são aditivos, pois pessoas que sentem conforto ou desconforto podem sentir ou não desconforto localizado e de modos diferentes. Sendo assim, as normas admitem que um ambiente estará confortável, sob os dois pontos de vista, se satisfazer a, pelo menos, 80% dos ocupantes.

2.5. Desconforto térmico local

O desconforto térmico local ocorre devido a fatores que alteram a uniformidade no ambiente. Tais fatores podem ser devido às correntes de ar, diferença vertical de temperatura do ar, janelas ou superfícies frias ou quentes ou variações destas.

2.5.1. Correntes de ar

Quando ocorre um resfriamento localizado e indesejado no corpo, devido ao movimento do ar, há uma sensação de correntes de ar, que depende da velocidade do ar, da temperatura do ar, da intensidade de turbulência, da atividade e da vestimenta das pessoas. A sensibilidade a correntes de ar é maior em partes do corpo descobertas, especialmente na região da cabeça, pescoço e ombros e na região dos pés, tornozelos e pernas, e em atividade leve ou sedentária.

Assim, a ocorrência de correntes de ar deve ser analisada principalmente na altura da cabeça e tronco das pessoas (1,10 m do piso para pessoas sentadas e 1,70 m para pessoas em pé). Se a pessoa estiver com as pernas descobertas, deve ser feita a verificação também na altura a 0,10 m do piso.

Segundo Fanger *et al*. (1988), para atividade sedentária ou leve, o percentual de insatisfação (PD) com correntes de ar é dada pela Equação 2.12

$$PD = 3{,}143(34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^{0{,}6223} + 0{,}3696\,\overline{v_{ar}}\,T_u\,(34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^{0{,}6223} \qquad 2.12$$

em que:

T_{ar}	temperatura do ar local	[°C];
$\overline{v_{ar}}$	velocidade média do ar local	[m/s];
T_u	intensidade de turbulência	[%].

Na Equação 2.12 a intensidade de turbulência (T_u) é a relação entre o desvio padrão $\sigma_{v_{ar}}$e a média da velocidade do ar $\overline{v_{ar}}$, expresso em porcentagem. Esta relação pode ser calculada pela Equação 2.13, com base nos valores da velocidade do ar medidos com intervalos de 0,2 segundo durante, pelo menos, três minutos e o desvio padrão $\sigma_{v_{ar}}$, referente à respectiva coleção de dados.

$$T_u = \frac{\sigma_{v_{ar}}}{\overline{v_{ar}}} \times 100 \qquad 2.13$$

Conforme visto no Capítulo 1, é de fundamental importância analisar o desconforto térmico devido às correntes de ar quando do estudo de sistemas de distribuição de ar. Função disto, no Capítulo 3 são detalhados os fundamentos teóricos sobre desconforto térmico relacionado com correntes de ar, bem como apresentados e discutidos os principais trabalhos relacionados sobre o assunto.

2.5.2. Diferença vertical de temperatura do ar

Geralmente, em ambientes interiores a temperatura do ar aumenta do piso para o teto. Se este aumento é muito grande, pode ocorrer desconforto local expresso por calor na cabeça e frio nos pés, embora o corpo como um todo possa estar em situação de conforto. A Figura 2.5 pode ser usada para determinar a máxima diferença de temperatura no ambiente, de acordo com o limite do percentual de insatisfação para o caso.

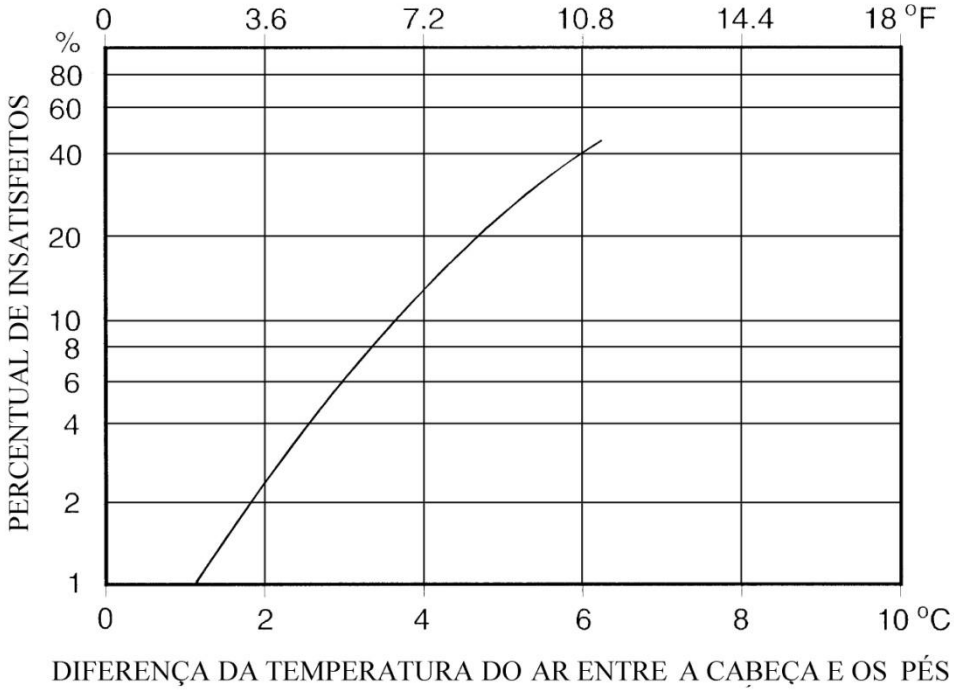


Figura 2.5 – Percentual de pessoas insatisfeitas com a diferença vertical de temperatura do ar entre os pés e a cabeça (ASHRAE 55, 2010).

2.5.3. Assimetria da temperatura radiante

A radiação térmica em torno da pessoa pode não ser uniforme, devido tanto a superfícies frias ou quentes quanto à radiação solar direta. Esta assimetria pode causar desconforto local e reduzir a aceitabilidade térmica do ambiente. Em geral, as pessoas são mais sensíveis à radiação assimétrica causada por teto quente do que àquelas por superfícies verticais frias ou quentes.

Para indivíduos desenvolvendo atividade sedentária ou leve, os limites para a assimetria da temperatura radiante são apresentados na Figura 2.6.

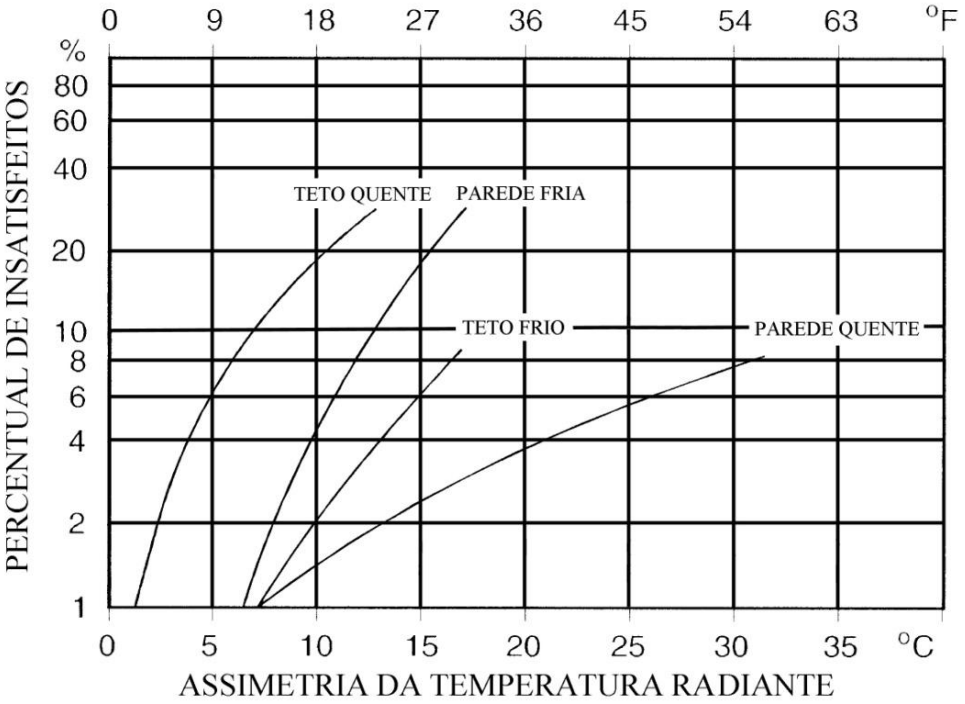


Figura 2.6 – Percentual de pessoas insatisfeitas devido à assimetria da temperatura radiante (ASHRAE 55, 2010).

2.5.4. Temperatura do piso

Ocupantes de ambientes interiores podem sentir desconforto nos pés, mesmo calçados, devido ao contato direto com o piso, se este estiver frio ou quente. Os limites de temperatura do piso são apresentados na Figura 2.7.

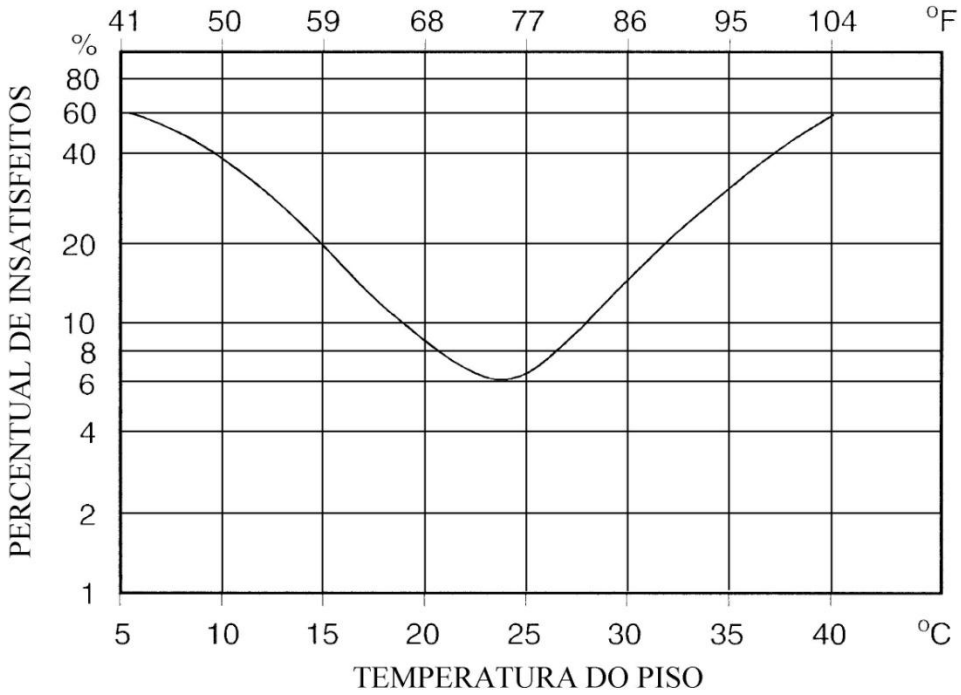


Figura 2.7 – Percentual de pessoas insatisfeitas com a temperatura do piso (ASHRAE 55, 2010).

2.5.5. Formas de análise de desconforto térmico local

A forma convencional de análise de condições de desconforto térmico local consiste na medição de variáveis ambientais (temperatura e velocidades do ar, temperaturas de superfícies e de assimetrias da temperatura radiante), com procedimentos preconizados na norma ISO 7726 (1998), e posterior análise dos resultados utilizando equações e figuras ou valores recomendados nas normas ASHRAE 55 (2010), ISO 7730 (2005) e NBR 16401-2 (ABNT, 2008). Além disto, outra forma usualmente utilizada é aquela da análise percentual de insatisfação a partir de resultados da aplicação de questionários.

Uma terceira forma, não usual em edificações, mas de uso corrente na indústria automobilística é a de avaliação do efeito combinado dos diversos fatores ambientais no conforto térmico com o uso de manequins (GAMEIRO DA SILVA, 2002; NILSSON, 2004). Neste caso, tem-se a avaliação simultânea do conforto térmico para o corpo como um todo, similar ao método do Fanger (1972), e do desconforto térmico local, pois avaliam as condições de conforto térmico em cada segmento do corpo.

No presente trabalho as condições de conforto térmico e de desconforto térmico local são analisadas utilizando manequim térmico e realizando medições de variáveis ambientais, na verificação da ocorrência de estratificação de temperatura do ar e de desconforto térmico local devido às correntes de ar, críticos em cabines de aeronaves.

Capítulo 3

CORRENTES DE AR

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos sobre desconforto térmico relacionado com correntes de ar, sua definição e a relação com o percentual de pessoas insatisfeitas. Uma comparação entre PPD e PD é realizada.

3.1. Introdução

Um dos propósitos dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC – *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) é propiciar um ambiente térmico aceitável para os seres humanos. Para uma pessoa se sentir confortável termicamente, um dos requisitos é que a pessoa esteja em neutralidade térmica, conforme a equação geral do conforto e os índices PMV e PPD. Outro requisito é que não exista desconforto térmico localizado em qualquer parte do corpo.

Segundo a norma ASHRAE 55 (2010), "correntes de ar (*draft* ou *draught*) é um resfriamento local indesejado do corpo causado pelo movimento do ar". Conforme explicado no Capítulo 2, a sensação de correntes de ar depende da velocidade do ar, temperatura do ar, da intensidade de turbulência, da atividade (metabolismo) e vestimentas. A sensibilidade em relação às correntes de ar é maior onde a pele não é coberta, especialmente, na região da cabeça (a região da cabeça compreende cabeça, pescoço e ombros) e região das pernas (a região das pernas compreende pernas, tornozelos e pés).

Correntes de ar foram identificados como um dos dois fatores ambientais mais irritantes em estações de trabalho e o fator mais irritante em escritórios (BOLINDER *et al.*, 1970, ARBEJDSMILJØGRUPPEN, 1972 *apud* FANGER e CHRISTENSEN, 1986). As correntes de ar podem fazer as pessoas desligarem sistemas de ventilação ou fecharem os difusores de ar. Os ocupantes também podem aumentar a temperatura do ar do ambiente para reagir às correntes de ar, principalmente no período do inverno (FANGER e CHRISTENSEN, 1986).

Embora, as correntes de ar sejam a maior causa de reclamações, poucos estudos foram conduzidos a esse respeito. Em um dos primeiros estudos realizados, Fanger *et al.* (1988), citado no item 2.5 investigaram o impacto da intensidade de turbulência na

sensação de correntes de ar. Cinquenta pessoas, vestidas para atingir condição de neutralidade térmica, foram expostas, em três experimentos, a fluxos de ar com baixa, média e alta intensidade de turbulência, velocidade do ar variando entre 0,05 m/s a 0,40 m/s e temperatura a 23 °C. Nesse experimento, os autores propuseram um modelo para predizer a percentagem de pessoas insatisfeitas (PD) devido às correntes de ar como função da temperatura do ar, velocidade média do ar e intensidade de turbulência. Resultados deste trabalho são detalhados no item 3.3.

Posteriormente, Heiselberg (1994) avaliou a percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar em uma sala com uma fachada de vidros durante o período de inverno. O fluxo de ar proveniente de uma superfície vertical gelada (fachada de vidros), bem como a temperatura do ar foram medidos com um anemômetro de fio quente. O autor estabeleceu equações na quais caracterizou o fluxo de ar e concluiu que a percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar diminui rapidamente nos dois primeiros metros a partir da superfície vertical gelada por causa da diminuição da velocidade máxima do ar (25 % menor, a partir dessa posição). A porcentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar tornou-se quase constante no restante da sala.

Zukowski (2007) propôs uma nova fórmula para determinar um valor mínimo recomendado de velocidade de insuflamento de ar em uma sala composta por uma janela com a superfície fria (Figura 3.1). Devido à diferença entre as temperaturas internas e externas à sala, um fluxo natural de convecção ao longo da janela é gerado. Para minimizar os efeitos de correntes de ar, o autor propôs um sistema de insuflamento de ar quente pelo piso (UFAD), através de difusor localizado próximo à parede onde se encontrava a janela. Na outra extremidade, lado oposto da sala, estava localizado o retorno (exaustão) do ar. Para a avaliação, o autor utilizou simulação numérica, por meio de um programa de CFD. Dez casos foram analisados em que parâmetros como temperatura externa à janela, velocidade e temperatura de insuflamento do ar foram variados. O autor concluiu que uma velocidade mínima de insuflamento de ar quente de 0,33 m/s previne os ocupantes do risco de correntes de ar. O autor também calculou a percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar para esse caso

Gao e Niu (2007) utilizaram um código CFD para simular e avaliar o sistema de distribuição de ar padrão, ou seja, ventilação por mistura (MV), de uma cabine de aeronave 767-300. Os autores também propuseram um sistema de distribuição de ar personalizado,

flexível e ajustável, no qual fornece ar fresco (2,5 L/s por pessoa) diretamente para a zona de respiração e mais 7,5 L/s por pessoa por meio de insuflamento padrão. Os autores concluíram que na maior parte da zona de ocupação (para o sistema MV), a velocidade do ar está entre 0,1 a 0,4 m/s, que é suficiente para evitar a sensação de ar estagnado e, também, a sensação de correntes de ar. Os autores nada mencionaram a respeito da sensação de correntes de ar para o sistema personalizado.

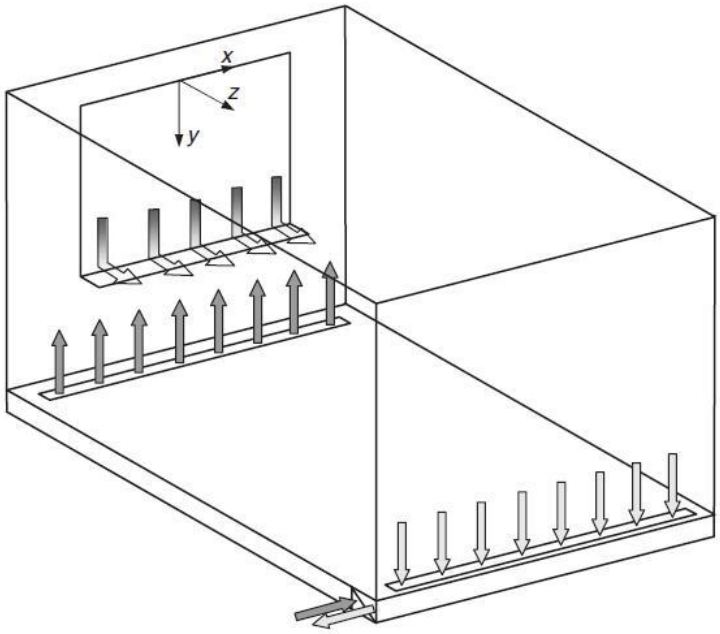


Figura 3.1 – Disposição dos difusores em uma sala habitável com sistema de insuflamento pelo piso UFAD (ZUKOWSKI, 2007).

Zhang e Chen (2007) propuseram, por meio de simulação numérica CFD, dois novos sistemas de distribuição de ar no interior de uma cabine de aeronave. O primeiro consistiu de insuflamento de ar pelo piso (UFAD) e retorno pela parte superior da cabine e o segundo de um sistema de distribuição personalizado em que metade da vazão de ar foi insuflada diretamente na zona de respiração por um dispositivo localizado na parte de traz da poltrona à frente do passageiro e a outra metade consistiu de insuflamento pelo piso. Foi notado que, no sistema personalizado, a velocidade do ar permaneceu abaixo de 0,25 m/s na região da cabeça e do peito e, portanto, era improvável que os passageiros sentissem desconforto causado pelas correntes de ar. A Figura 3.2 detalha o fluxo de ar do sistema de distribuição de ar personalizado.

Nielsen *et al.* (2008) realizaram experimentos sobre correntes de ar, com um manequim térmico de dezesseis partes, em um túnel de vento da Universidade Aalborg. Um sistema de distribuição de ar personalizado, no formato de um travesseiro para o pescoço de assento de aeronave, foi desenvolvido. Esse sistema fornecia ar fresco diretamente para a zona de respiração a uma velocidade de até 0,2 m/s (0,0 a 16 l/s). Os autores concluíram que o sistema tem a melhor eficiência para taxas de insuflamento de 7 a 8 L/s e o risco de correntes de ar pode ser evitado pelo controle da temperatura do ar do sistema. As medições da temperatura equivalente, em manequim térmico, mostraram que as correntes de ar somente tiveram um pequeno efeito na avaliação do conforto térmico na região da cabeça e do peito.

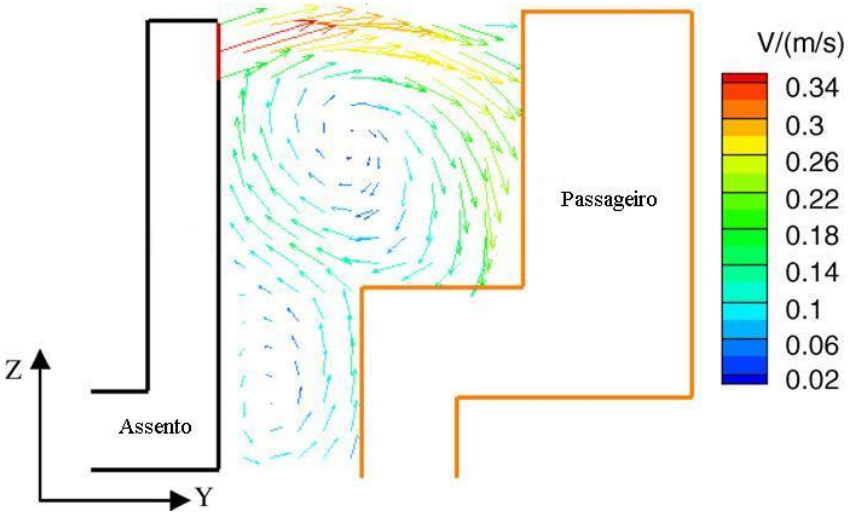


Figura 3.2 – Detalhes do sistema de distribuição de ar personalizado no plano y-z de uma cabine de aeronave. (adaptado de ZHANG e CHEN, 2007).

Zhang, Li e Wang (2011) propuseram um sistema de distribuição de ar personalizado para uma cabine de aeronave. O sistema fornece parte do ar diretamente para a zona de respiração por meio de um difusor localizado nos braços do assento e a outra parte era fornecida por um sistema de insuflamento de ar pelo piso, UFAD (região do corredor entre as poltronas). O ar contaminado é extraído por exaustores localizados acima da cabeça dos ocupantes, na região do teto. O estudo foi conduzido tanto experimentalmente como por meio de simulação numérica utilizando programa de CFD. Os autores calcularam a percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar utilizando o programa de CFD. O resultado é apresentado na Figura 3.3, onde a

porcentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar em uma cabine de aeronave é avaliada quando todos os passageiros utilizam o sistema personalizado.

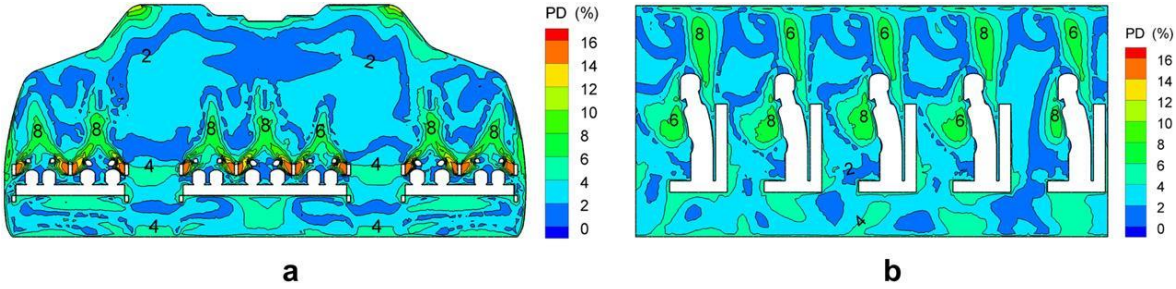


Figura 3.3 a) seção transversal da terceira linha de poltronas b) seção longitudinal (ZHANG, LI, e WANG, 2011).

3.2. Velocidade do ar e turbulência

O conforto térmico em ambientes ventilados depende principalmente da temperatura e da velocidade do ar. As flutuações da velocidade do ar caracterizadas pela intensidade de turbulência aumentam a sensação de correntes de ar e afetam o conforto térmico (FANGER e CHRISTENSEN, 1986; FANGER *et al.*, 1988).

O fluxo de ar em ambientes ventilados é tipicamente turbulento, isto é, a velocidade do ar flutua aleatoriamente. Esse fluxo turbulento pode ser caracterizado pela velocidade instantânea, velocidade média, desvio padrão, intensidade de turbulência e espectro de energia. A velocidade instantânea que é assumida como sendo a soma da velocidade média e flutuações da velocidade do ar na direção principal do fluxo é apresentada como:

$$v_{ar} = \overline{v_{ar}} + v'_{ar} \qquad 3.1$$

em que:

v_{ar}	velocidade instantânea	[m/s];
$\overline{v_{ar}}$	velocidade média	[m/s];
v'_{ar}	flutuação da velocidade	[m/s].

A velocidade média é a média da velocidade instantânea sobre um intervalo de tempo, que é definida como:

$$\overline{v_{ar}} = \frac{1}{t}\int_{t_0}^{t_0+t} v_{ar}\, dt \qquad 3.2$$

O desvio padrão da velocidade, $\sigma_{v_{ar}}$, é igual ao RMS (*Root-Mean-Square*) da flutuação da velocidade, $\sqrt{\overline{v'_{ar}}^2}$ e fornece informações sobre a dispersão da velocidade instantânea em relação à média sobre um intervalo de tempo. A Figura 3.4 ilustra um fluxo turbulento medido em um ambiente climatizado em que o desvio padrão e a velocidade média são utilizados para caracterizar a intensidade de turbulência, que é definida como:

$$T_u = \frac{\sigma_{v_{ar}}}{\overline{v_{ar}}} \times 100 \qquad 3.3$$

em que:

$\sigma_{v_{ar}}$ desvio padrão [m/s];

T_u intensidade de turbulência [%].

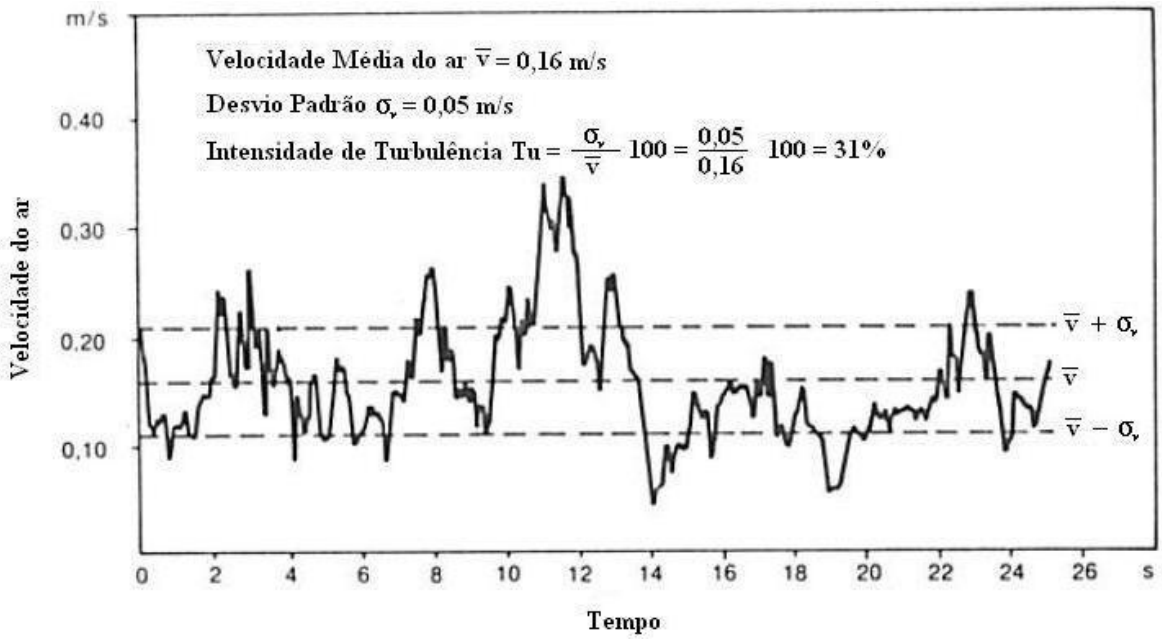


Figura 3.4 – Exemplo típico de flutuação de velocidade do ar durante o período de um experimento.

O espectro de energia da flutuação da velocidade é definido por:

$$\int_0^\infty E(n)\, dn = \overline{v'_{ar}}^2 \qquad 3.4$$

A Equação 3.4 mostra a distribuição de densidade de $\overline{v'_{ar}}^2$ no intervalo de frequências, n. $E(n)$ é conhecido como a função de distribuição espectral de $\overline{v'_{ar}}^2$. É conveniente

considerar o número de onda $k = \frac{2\pi n}{\overline{v_{ar}}}$ ao invés da freqüência n e introduzir a função espectro de energia $E(k)$ definida como $E(k) = \frac{\overline{v_{ar}}}{2\pi} E(n)$ resultando:

$$\int_0^\infty E(k)\, dk = \overline{v'_{ar}}^{\,2} \qquad 3.5$$

Uma boa revisão do assunto pode ser encontrada em Tennekes e Lumley (1972), Schlichting (1979) e Pope (2005).

A velocidade média e a intensidade de turbulência não são suficientes para caracterizar a natureza do fluxo de ar em ambientes interiores. Nesses ambientes é possível encontrar dois fluxos turbulentos com a mesma velocidade média e intensidade de turbulência, mas com diferentes frequências da flutuação da velocidade. Portanto, é importante conhecer o espectro de energia da flutuação da velocidade.

Fanger e Pedersen (1977) realizaram um dos primeiros estudos sobre correntes de ar com fluxo turbulento e mostraram que uma flutuação periódica do fluxo de ar é mais desconfortável do que um fluxo sem flutuação. Em uma câmara, dezesseis pessoas em atividade sedentária foram expostas a um fluxo horizontal na parte de trás do pescoço com uma flutuação periódica da velocidade bem definida. A velocidade média e a amplitude da flutuação foram mantidas constantes, mas a frequência da flutuação da velocidade foi alterada durante o experimento. Foi encontrado que o grau de desconforto teve um máximo entre as frequências de 0,3 a 0,5 Hz.

Fanger e Christensen (1986) expuseram cem pessoas em atividade sedentária a um fluxo turbulento horizontal, na parte de trás do corpo, tipicamente igual àqueles de ambientes ventilados. Durante o experimento a velocidade média variou de 0,05 a 0,40 m/s e a temperatura do ar foi de 20, 23 e 26 °C. Os resultados foram apresentados em cartas de correntes de ar predizendo a percentagem de pessoas insatisfeitas como função da velocidade média e da temperatura do ar para intensidade de turbulência entre 30 e 60%. A percentagem de pessoas insatisfeitas foi determinada pela equação de regressão, Equação 3.6:

$$PD = 13.800\left[\left(\frac{\overline{v_{ar}} - 0{,}04}{T_{ar} - 13{,}7} + 0{,}0293\right)^2 - 0{,}000857\right] \qquad 3.6$$

Embora a Equação 3.6 tenha sido obtida a partir de dados experimentais com intensidade de turbulência entre 30 e 60%, essa equação de regressão não considera a intensidade de turbulência como um de seus parâmetros.

Na continuidade do trabalho, Fanger *et al.* (1988) investigaram o impacto da intensidade de turbulência na sensação de correntes de ar. Cinquenta pessoas em atividade sedentária, vestidas para obter sensação térmica neutra, também foram expostas a um fluxo de ar com velocidade de 0,05 a 0,40 m/s, com temperatura do ar de 23 °C e três níveis diferentes de intensidade de turbulência. Os níveis foram $(T_u < 12\%)$, para baixa intensidade, $(20\% < T_u < 35\%)$, para média intensidade e $(T_u > 55\%)$ para alta intensidade. Os intervalos de intensidade de turbulência foram selecionados para ser equivalente àqueles medidos em situações convencionais.

3.3. Modelo de predição do risco de correntes de ar

Fanger *et al.* (1988) desenvolveram um modelo que prediz a percentagem de pessoas insatisfeitas (PD) devido às correntes de ar como função da temperatura do ar, T_{ar}, velocidade média do ar, $\overline{v_{ar}}$ e intensidade de turbulência, T_u. Os autores desenvolveram um modelo semi-empírico que relaciona a intensidade de turbulência com a flutuação da temperatura da pele e o estudo dos termoreceptores de Hensel e Zotterman (1951) para relacionar a sensação térmica com essas flutuações da temperatura da pele. A teoria foi aplicada para as temperaturas do ar de 20, 23 e 26°C.

Foram assumidos, para o modelo semi-empírico, dois tipos de respostas dos termoreceptores, a estática e a dinâmica. A dinâmica depende da taxa de mudança de temperatura da pele, enquanto a estática depende do valor da temperatura da pele. A resposta estática corresponde ao escoamento laminar, que pode causar desconforto. Devido à convecção natural do fluxo de ar ao longo do corpo humano aquecido, foi assumido que somente velocidades acima de 0,05 m/s atingiriam a camada da pele. A percentagem de pessoas insatisfeitas devido à resposta estática, PD_e, é representada pela Equação 3.7:

$$PD_e = a\left(T_p - T_{ar}\right)\left(\overline{v_{ar}} - 0{,}05\right)^b \qquad 3.7$$

Como o fluxo de calor da pele depende do termo convectivo, a resposta dinâmica também é proporcional a $\left(T_p - T_{ar}\right)\left(\overline{v_{ar}} - 0{,}05\right)^b$. Flutuações da velocidade do ar

causam mudanças na transferência de calor que por sua vez, causam flutuações da temperatura da pele em torno do valor médio. Desta forma, a percentagem de pessoas insatisfeitas em relação à resposta dinâmica, PD_d, é dada por:

$$PD_d = c\,\overline{v_{ar}}\,T_u\left(T_p - T_{ar}\right)\left(\overline{v_{ar}} - 0{,}05\right)^b \qquad 3.8$$

Combinando a parte dinâmica e estática, Equações 3.7 e 3.8, e assumindo a temperatura da pele de 34 °C para pessoas sentindo-se termicamente neutras (PMV = 0) em atividade sedentária, a expressão matemática do modelo semi-empírico para determinar a percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar foi determinada por:

$$PD = a(34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^b + c\,\overline{v_{ar}}\,T_u\,(34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^b \qquad 3.9$$

em que a, b e c são constantes.

A partir dos dados experimentais e correspondentes valores da temperatura do ar, velocidade média do ar e intensidade de turbulência, Fanger *et al*. (1988) encontraram os valores de a = 3,143, b = 0,6223 e c = 0,3696 para a Equação 3.9, resultando a Equação 3.10, que permite prever o percentual de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar:

$$PD = 3{,}143(34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^{0{,}6223} + 0{,}3696\,\overline{v_{ar}}\,T_u\,(34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^{0{,}6223} \qquad 3.10$$

O modelo de Fanger *et al*. (1988), Equação 3.10, foi obtido a partir dos dados experimentais considerando os seguintes intervalos de temperatura do ar, velocidade média do ar e intensidade de turbulência:

$T_{ar} = 20\ a\ 26°C$

$\overline{v_{ar}} = 0{,}05\ a\ 0{,}40\ m/s$

$T_u = 0\ a\ 70\%$

Para valores de velocidade média do ar menores do que 0,05 m/s deve-se utilizar $\overline{v_{ar}} = 0{,}05\ m/s$ e, embora sejam possíveis matematicamente valores de PD > 100%, eles não têm significado físico, utiliza-se PD = 100% nesses casos.

Os resultados de Fanger *et al*. (1988) foram adotados pelas normas ISO 7730 (2005) e ASHRAE 55 (2010), com a percentagem de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar (PD) sendo denominada de *Draught Rate* – DR, e a Equação 3.10 reescrita e apresentada na forma:

$$DR = (34 - T_{ar})(\overline{v_{ar}} - 0{,}05)^{0{,}62}(0{,}37\,\overline{v_{ar}}\,T_u + 3{,}14) \qquad 3.11$$

O modelo é aplicado para pessoas em atividades leves, principalmente sedentária, com sensação térmica do corpo como um todo próximo à neutralidade térmica e para sensação de correntes de ar na região do pescoço. Na altura dos braços e pés, o modelo poderia sobrestimar a percentagem de pessoas insatisfeitas. A sensação de correntes de ar é menor em atividades mais intensas (Met > 1,2) e para pessoas sentindo calor ao invés da neutralidade térmica (ISO 7730, 2005).

As variáveis do modelo semi-empírico: temperatura do ar, velocidade média do ar e intensidade de turbulência são mostrados na Figura 3.5, em uma representação tridimensional para 10, 15 e 20% de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar. Elevadas percentagens de pessoas insatisfeitas podem ser associadas com elevadas intensidade de turbulências, elevados valores de velocidade média do ar e baixas temperaturas do ar.

As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram a intersecção entre os planos de intensidade de turbulência e as superfícies de 10 e 20% de insatisfeitos devido às correntes de ar, respectivamente.

Temperaturas e velocidades do ar devem ser medidas a 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m e 1,7 m acima do piso, na zona de ocupação nos ambientes ASHRAE 55 (2010). As alturas de 0,1 m, 0,6 m e 1,1 m correspondem, respectivamente, aos pés, braços e cabeça para uma pessoa sentada e a altura de 1,7 m correspondem à região da cabeça para uma pessoa em pé.

Função dos resultados do trabalho de Fanger *et al*. (1988), a ISO 7730 (2005), ASHRAE 55 (2010) e NBR 16401-2 (ABNT, 2008) estabelecem dois grupos com os respectivos limites recomendados para velocidade do ar em ambientes climatizados:

- Atividade leve, principalmente sedentária, durante o inverno (período de aquecimento), com temperaturas operativas entre 20 e 24 °C. Velocidade média do ar, $\overline{v_{ar}}$, menor que 0,15 m/s;

- Atividade leve, principalmente sedentária, durante o verão (período de resfriamento), com temperaturas operativas entre 23 e 26 °C. Velocidade média do ar, $\overline{v_{ar}}$, menor que 0,25 m/s.

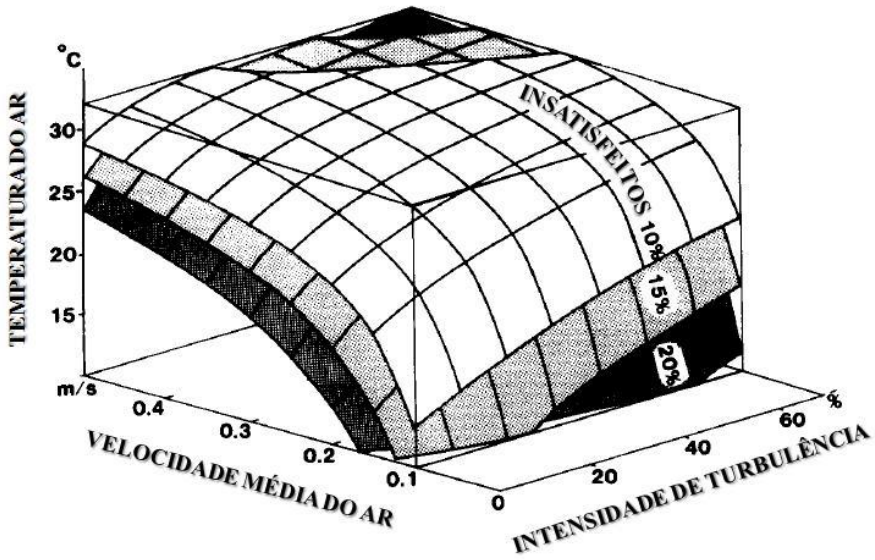


Figura 3.5 – Representação tridimensional do modelo de sensação de correntes de ar. (adaptado – FANGER *et al.*, 1988).

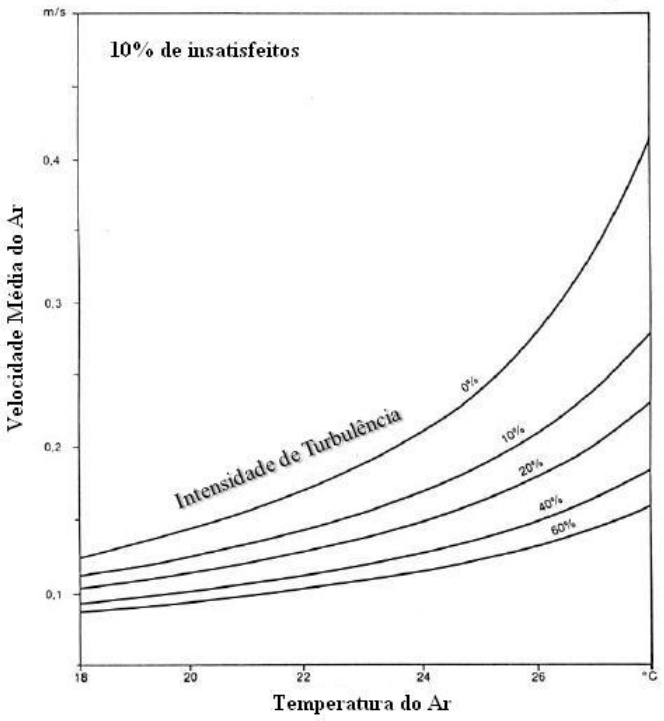


Figura 3.6 – Porcentagem de insatisfeitos igual a 10% (adaptado – FANGER *et al.*, 1988).

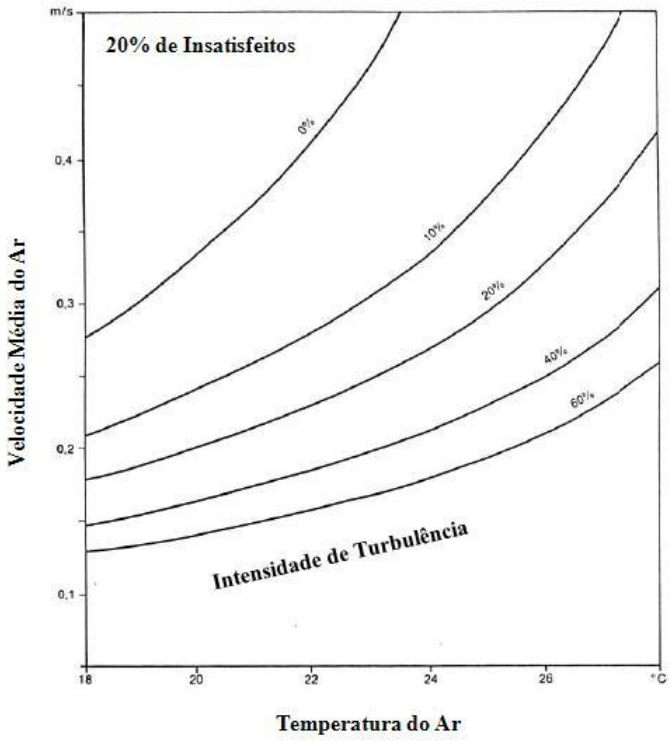


Figura 3.7 – Porcentagem de insatisfeitos igual a 20% (adaptado – FANGER *et al*., 1988).

3.4. Análise simultânea de desconforto global (PPD) e local (PD)

Gan (1994) propôs um índice para análise simultânea do desconforto para o corpo como um todo (PPD) e do desconforto devido às correntes de ar (PD) correlacionando os índices PPD e PD, na função Ψ.

$$\Psi = máx[PPD, PD] \qquad 3.12$$

em que Ψ é o maior valor entre PPD e PD

Usando esse índice, a prevalência do desconforto global (PPD) ou desconforto local (PD) pode ser analisado facilmente. Por exemplo, se em determinada região da zona de ocupação o valor de PPD é superior ao valor de PD, $\Psi = PPD$.

Gan (1994) aplicou esse índice na avaliação de conforto térmico em uma sala ocupada a partir do desenvolvimento de um programa computacional para determinação numérica das variáveis ambientais ($\overline{v_{ar}}, T_{ar}, \phi\ e\ \overline{T_r}$). As Figuras 3.8 e 3.9 mostram os

resultados para quatro níveis de intensidade de turbulência 10%, 30%, 50% e 70% e dois níveis de isolamento de roupas 0,6 clo (condição de verão) e 1,0 clo (condição de inverno).

A linha pontilhada na qual os índices PPD e PD se intersectam é dada pela relação PPD = PD. Quando a velocidade do ar é baixa, $\overline{v_{ar}} < 0{,}08\ m/s$, a percentagem de pessoas insatisfeitas, PPD, é em geral mais crítica do que o risco de correntes de ar, PD, e, portanto $\Psi = PPD$. Isto quer dizer que se a exigência para PPD é a mesma para PD, as correntes de ar não causarão desconforto significativo, desde que o nível de conforto seja aceitável e não haja outras fontes de desconforto como assimetria de radiação ou diferenças verticais de temperatura (estratificação de temperatura), por exemplo. Portanto, o uso do PPD é suficiente para avaliar conforto térmico.

Quando a velocidade do ar aumenta, o risco de correntes de ar é maior do que a percentagem de pessoas insatisfeitas, PPD, especialmente se o nível de turbulência é alto. Portanto, $\Psi = PD$.

As Figuras 3.8 e 3.9 são aproximadamente simétricas ao redor das temperaturas do ar de 24 e 22,5 °C (temperatura neutra para velocidade do ar, $\overline{v_{ar}} < 0{,}1\ m/s$) para isolamentos térmicos da roupa de 0,6 e 1,0 clo, respectivamente. Acima dessas temperaturas, a sensação de desconforto é causada pela sensação de calor e abaixo pela sensação de frio para o corpo como um todo (PPD).

É importante destacar que o nível de isolamento térmico da roupa aumenta significativamente o risco de correntes de ar, devido à menor temperatura de conforto térmico, razão pela qual as pessoas são mais suscetíveis as correntes de ar no inverno.

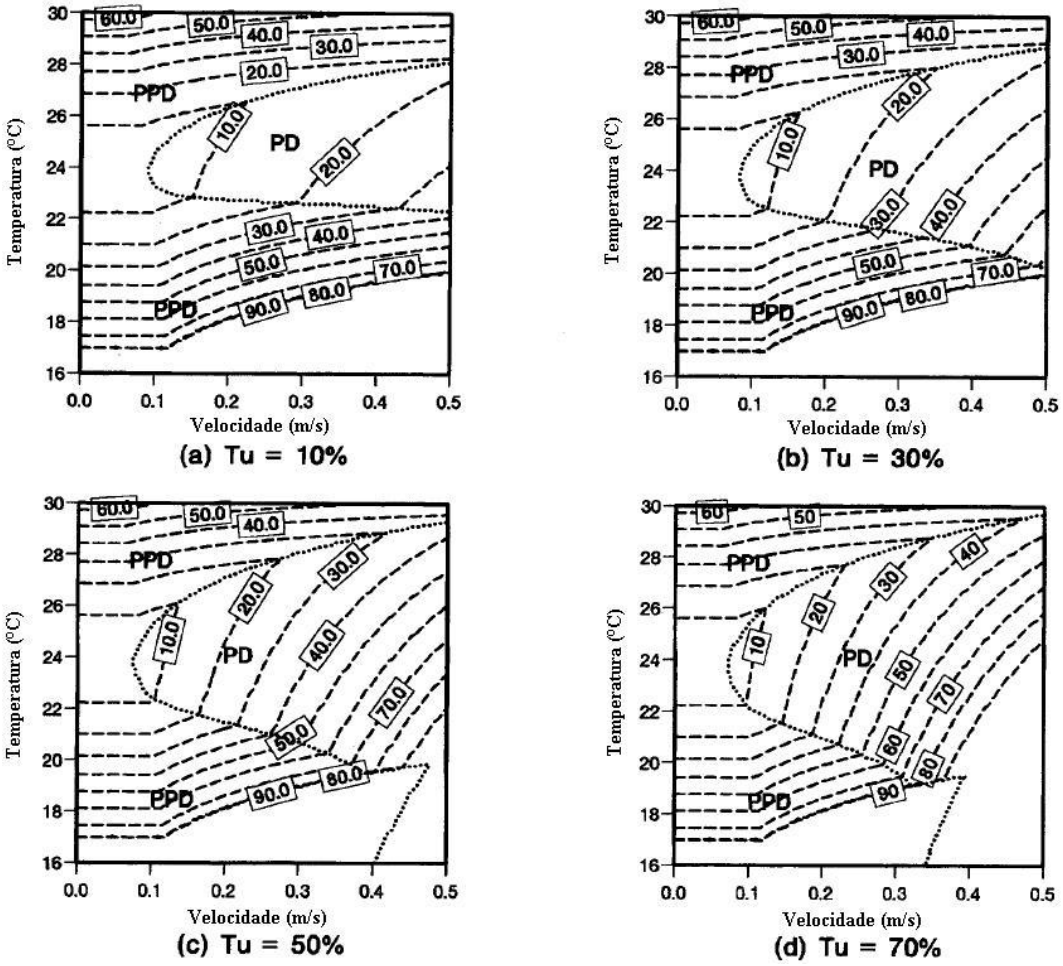


Figura 3.8 - Índice de conforto térmico para isolamento de 0,6 clo (adaptado - GAN, 1994).

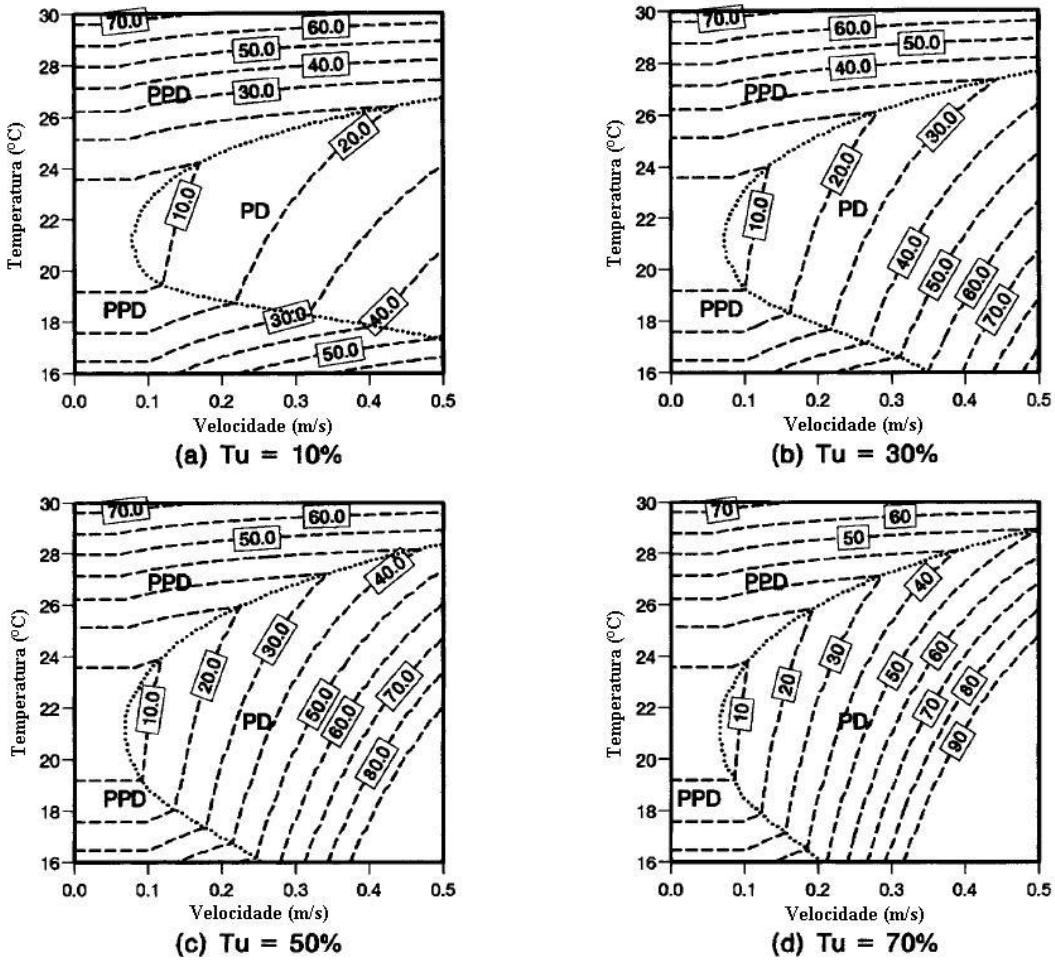


Figura 3.9 – Índice de conforto térmico para isolamento de 1,0 clo (adaptado – GAN, 1994).

Capítulo 4

AVALIAÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO EM CABINES

A avaliação de conforto térmico em cabines é bastante complexa e devem ser considerados diversos fatores em sua avaliação. Os métodos utilizados para a avaliação de conforto térmico em cabines de veículos são o índice PMV/PPD, campos de velocidade e de temperatura, determinação de temperaturas equivalente utilizando manequins térmicos calibrados e a avaliação subjetiva por meio do voto térmico médio das pessoas.

4.1. Avaliação por meio do índice PMV/PPD.

O estudo do conforto térmico no interior de cabines, principalmente de automóveis, vem sendo realizada há algumas décadas. Atualmente, existem padrões internacionais que resultaram de estudos baseados na proposição de modelos, na realização de medições e na avaliação subjetiva, quantificados por meio de índices específicos. Um desses índices é o voto médio estimado, PMV, que prediz a resposta média do voto térmico de um determinado grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente. Conforme visto no Capítulo 2, o índice PMV/PPD foi estabelecido por Fanger (1972) a partir do balanço térmico do corpo humano relacionando parâmetros ambientais com parâmetros pessoais em condições de regime permanente.

Por ter sido proposto e estabelecido considerando ambientes homogêneos, o índice PMV/PPD quando aplicado em ambientes não homogêneos, como em cabines de veículos, não fornece uma avaliação precisa (MADSEN *et al*., 1986; FURUSE e KOMORIYA, 1997; GAMEIRO DA SILVA, 2002; GUAN *et al*, 2003; ROY *et al*., 2003; NILSSON, 2004; TANABE, 2002; STRϕM-TEJSEN *et al.*, 2007; NILSSON, 2007; TRIBESS, 2008; ALAHMER *et al*, 2011).

4.2. Avaliação por meio dos campos de velocidade e de temperatura do ar

A medição de campos de temperatura e de velocidade do ar em cabines tem sido largamente utilizada para analisar o ambiente térmico. Trata-se de uma fase anterior da

avaliação de conforto térmico, pois a sensação térmica experimentada pelas pessoas é função direta das trocas térmicas e do balanço térmico do corpo humano. Em aeronaves os passageiros trocam calor, basicamente, por convecção e por radiação e o seu efeito é avaliado com a determinação da temperatura equivalente.

Atualmente, diversos métodos são utilizados para realizar o levantamento dos campos de velocidade e de temperatura do ar. Dentre esses métodos estão às medições de campos de temperatura e de velocidade do ar utilizando termopares e técnicas VPTV (*Volumetric Particle Tracking Velocimetry*), PIV (*Particle Image Velocimetry*), LDA ou LDV (*Laser Doppler Anemometry* ou *Laser Doppler Velocimetry*), além de anemômetros de fio quente, que são amplamente utilizados em medições de sistemas de ventilação e ar condicionado e a simulação numérica (CFD).

A técnica VPTV tem sido usada com sucesso para caracterizar fluxos de ar em cabines de veículos de aeronaves. O sistema caracteriza os fluxos de ar padrão de ambientes interiores em escala natural usando o conceito de imagem estereoscópica. A percepção de profundidade é dada pela gravação dos fluxos de ar com duas câmeras em diferentes localizações. Desta forma, uma descrição tridimensional da distribuição de ar pode ser obtida depois dos dados serem processados.

Wang *et al*. (2008), utilizaram a técnica VPTV para caracterizar o fluxo de ar em uma seção da cabine de um Boeing 767-300, em tamanho natural, com cinco fileiras de sete assentos. O mapa dos vetores de velocidade do ar foi obtido e está representado na Figura 4.1.

Semelhante ao VPTV, o PIV é uma técnica do campo total do fluxo fornecendo medições do vetor velocidade instantâneo em uma seção do fluxo. Dois componentes da velocidade são medidos, mas o uso da aproximação estereoscópica permite a gravação dos três componentes da velocidade, resultando em vetores de velocidade instantâneos tridimensionais para a área total. O uso de modernas câmeras digitais e computadores resultam em um mapa de velocidade em tempo real.

O LDA ou o LDV são técnicas de medições óticas, não intrusivas, baseadas na utilização de dois feixes de *laser*, de mesma intensidade que são focalizados e se cruzam em um ponto de interesse do escoamento. Nesse cruzamento dos feixes forma-se um volume de medida que é constituído por uma rede de franjas de interferência que possui um ângulo de separação. Quando uma partícula atravessa as franjas de interferência gera

uma frequência devido ao efeito Doppler, assim a velocidade do escoamento pode ser determinada.

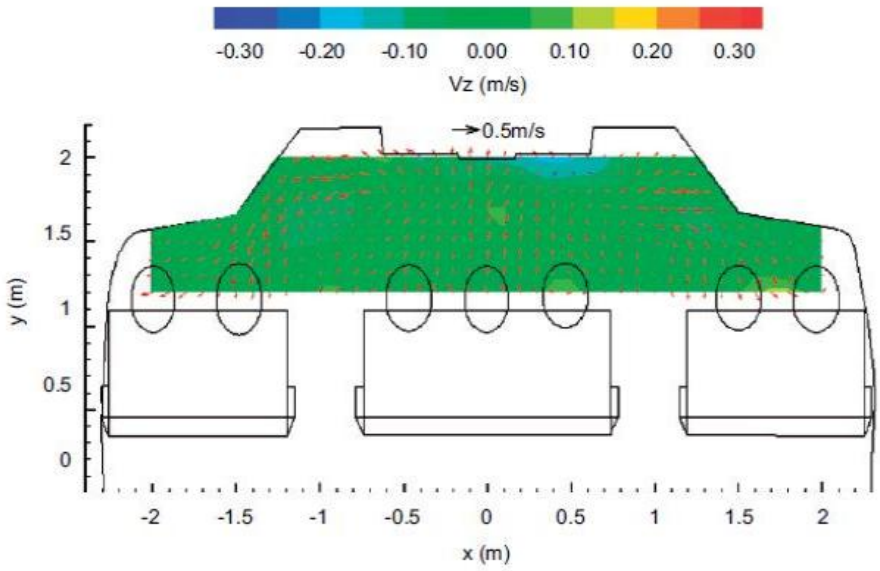


Figura 4.1 – Mapa dos vetores velocidade do ar e mapa de contorno (WANG *et al*., 2008).

Koskela *et al*.(2001), utilizaram dois anemômetros ultrasônicos e termistores para medir os campos de velocidade e temperatura do ar (Figura 4.2), respectivamente, em um laboratório com dois dutos superiores de insuflamento de ar e com três aquecedores convectivos. Os dados foram utilizados para verificar as diferenças entre os vetores velocidade do ar e a sua resultante.

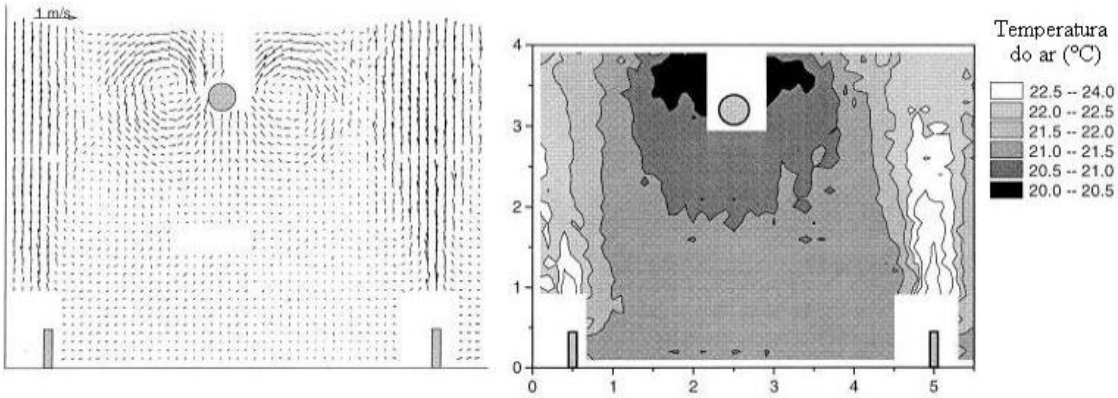


Figura 4.2 – Campo dos vetores velocidade média e distribuição de temperatura no plano de medida (adaptado – KOSKELA *et al*., 2001).

A predição dos campos de velocidade, pressão, temperatura, concentração e propriedades turbulentas são efetuadas por meio de modelos matemáticos baseados nos princípios de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo.

Zhang e Chen (2007) utilizaram um programa de CFD, o software FLUENT, com um modelo RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), modelo RNG $k - \varepsilon$, para levar em conta os efeitos da turbulência. Os autores simularam e compararam a distribuição de ar e o nível de CO_2 em uma seção de cabine de um Boeing 767-300, composta de quatro fileiras com sete assentos, com três diferentes sistemas de insuflamento de ar: o sistema tradicional, por mistura (MV), o sistema de insuflamento pelo piso (UFAD) e o sistema UFAD junto com o sistema de distribuição de ar personalizado.

Dos resultados da simulação (Figuras 4.3 a 4.5), os autores concluíram que o sistema convencional proporciona temperatura mais homogênea. Porém, esse sistema oferece um risco maior de espalhar a contaminação de um local para os demais. Nos sistemas com insuflamento pelo piso o risco de contaminação diminui, pois as velocidades são menores e o ar segue um fluxo ascendente, mais regular.

Stancato (2009) também utilizou programa de CFD, software FLUENT, para analisar o escoamento em um *mock-up* de cabine de avião com doze assentos, distribuídos em três fileiras de quatro assentos. Resultados do trabalho mostraram que o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ realizável apresentou os melhores resultados com refinamento de malha que permitiu atingir valores y+ próximos de 4. Resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa correlação, tanto nos campos de velocidade e temperatura do ar, quanto nas temperaturas equivalentes.

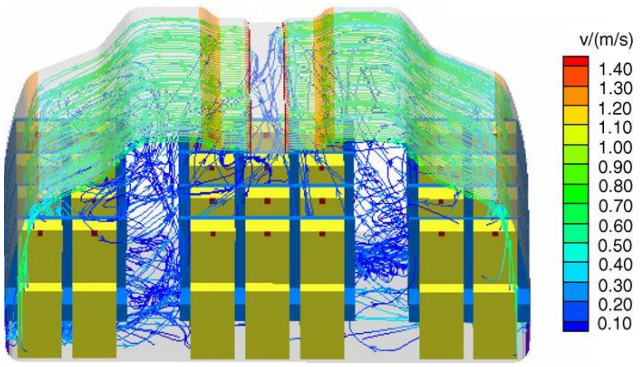


Figura 4.3 – Linhas de corrente no sistema de insuflamento convencional, MV (ZHANG e CHEN, 2007).

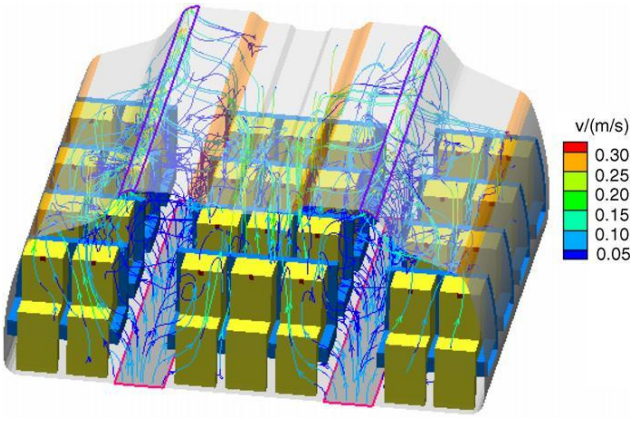


Figura 4.4 – Linhas de corrente no sistema de insuflamento pelo piso, UFAD (ZHANG e CHEN, 2007).

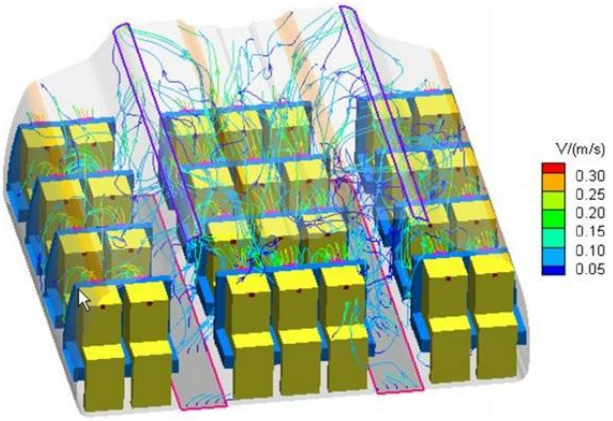


Figura 4.5 – Linhas de corrente no sistema de insuflamento pelo piso, UFAD e distribuição personalizada de ar (ZHANG e CHEN, 2007).

4.3. Avaliação por meio da temperatura equivalente

Devido à complexidade na avaliação de ambientes não homogêneos, onde diferentes partes do corpo experimentam diferentes condições térmicas, mesmo em condições de regime permanente, o índice de temperatura equivalente, sua medição com manequins térmicos e a avaliação do conforto em diagramas de sensação térmica, é a forma mais utilizada em cabine de veículos (GAMEIRO DA SILVA, 2002; NILSSON, 2004).

Segundo a norma ISO 14505-2 (2006), temperatura equivalente é definida como “temperatura de um espaço homogêneo, com velocidade do ar igual a zero e com temperatura radiante média igual à temperatura do ar, na qual uma pessoa tem a mesma

perda de calor por radiação e convecção como nas condições atuais sobre avaliação". A Figura 4.6 ilustra a definição de temperatura equivalente.

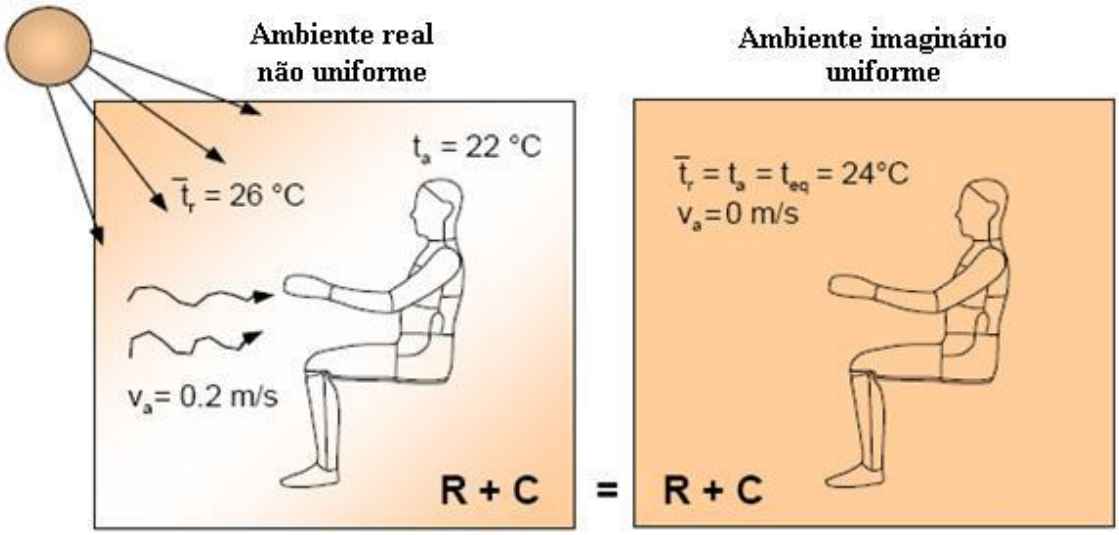


Figura 4.6 – Ilustração da definição de temperatura equivalente (Adaptado – NILSSON, 2004).

Madsen *et al*. (1984) propuseram uma correlação empírica para o cálculo da temperatura equivalente, definida por:

$$T_{eq} = T_o = \frac{T_{ar} + \overline{T_r}}{2}, \qquad para \quad v_{ar} \leq 0{,}1\ m/s \qquad 4.1$$

$$T_{eq} = 0{,}55T_{ar} + 0{,}45\overline{T_r} + \frac{0{,}24 - 0{,}75\sqrt{v_{ar}}}{1 + I_r}(36{,}5 - T_{ar}) \quad para \quad v_{ar} > 0{,}1\ m/s \qquad 4.2$$

em que:

T_{ar}	temperatura do ar	[°C];
$\overline{T_r}$	temperatura radiante média	[°C];
v_{ar}	velocidade do ar	[m/s];
I_r	resistência térmica da roupa	[clo].

É importante observar que a temperatura equivalente é derivada da temperatura operativa com a inclusão do efeito da velocidade do ar sobre um corpo aquecido. A temperatura operativa somente considera a temperatura do ar e a temperatura radiante

média e, é definida para a velocidade real do ar, enquanto a temperatura equivalente é definida para uma velocidade padronizada, próximo de zero.

A norma ISO 14505-2 (2006) também define a temperatura equivalente local e do corpo inteiro respectivamente por “temperatura uniforme de um invólucro imaginário com velocidade do ar igual a zero e temperatura do ar igual à temperatura das superfícies circundantes na qual uma ou mais zonas selecionadas de um manequim térmico trocarão a mesma quantidade de calor sensível por radiação e convecção como em um ambiente real” e “temperatura de um invólucro imaginário com velocidade do ar igual a zero e temperatura do ar igual à temperatura das superfícies circundantes na qual um sensor aquecido, no formato humano, em tamanho natural, trocará a mesma quantidade de calor sensível por radiação e convecção como em um ambiente real”.

O procedimento para avaliação de condições de conforto térmico utilizando manequins e o conceito de temperatura equivalente requer o equacionamento das trocas de calor entre os diversos segmentos do manequim e o ambiente, a calibração do manequim e a utilização de diagramas de sensação térmica. A norma ISO 14505-2 (2006) estabelece o procedimento para avaliação de conforto térmico em cabines veiculares.

4.3.1. Manequins térmicos

Segundo Gameiro da Silva (2002), o manequim térmico seria o único instrumento capaz de avaliar simultaneamente os efeitos da temperatura do ar local, troca de calor do corpo por radiação, velocidade do ar e a radiação solar em um veículo. Todos estes fenômenos estão presentes em um ambiente pequeno como a cabine de veículos e tem uma distribuição bastante irregular. O bloqueio causado pelo corpo, o isolamento dos bancos e as trocas de calor do corpo contribuem para tornar este tipo de ambiente térmico não homogêneo.

Um manequim térmico deve ter algumas características para poder ser usado em avaliação de conforto térmico no interior de veículos. Este deve ter o tamanho e o formato de um corpo humano, ser capaz de ser colocado na posição sentada, ser capaz de ser vestido com roupas e permitir a determinação da influência dos parâmetros físicos relevantes ao conforto térmico ao longo de todo o corpo e com a possibilidade de dividir este corpo em partes ou zonas. (NILSSON, 2004).

Os manequins atualmente utilizados são divididos em dezesseis zonas ou mais, até um limite de trinta e duas zonas, independentemente controladas. Para reduzir custos e peso são utilizados materiais como alumínio e plástico. Os controles de regulação dos manequins mais modernos são do tipo digital, mas ainda existem diversos manequins com controles de regulação analógicos.

Uma completa compreensão da troca de calor do corpo humano requer o conhecimento das perdas de calor do corpo por convecção, condução, radiação e, em alguns casos, perda de calor do corpo por evaporação de suor. Por este motivo, muitos manequins que simulam a sudorese humana estão em desenvolvimento.

Um manequim térmico com formato humano mede a perda de calor por convecção, condução e radiação de toda a superfície do corpo e em todas as direções. Somando as perdas de calor das áreas das zonas em que o manequim térmico está dividido se determina a perda de calor do corpo inteiro. Um manequim térmico determina a perda de calor de uma maneira relevante, confiável e com acurácia. Este método é rápido, facilmente padronizado e reproduzível.

Um manequim térmico típico, que não simula sudorese, é construído com estrutura em alumínio revestida por espuma plástica. Cada zona aquecida independentemente é coberta por resistências elétricas que depois são cobertas por uma resina plástica. Na superfície do manequim são montados sensores de temperatura. Cada uma destas zonas é regulada para uma temperatura constante, por exemplo: 24 °C, e a potência requerida para manter esta temperatura é indicada pelo sistema de regulação do manequim. Durante estados de equilíbrio esta potência usada para manter o manequim à temperatura constante é igual à potência dissipada pelo manequim, ou seja, igual à perda de calor sensível do manequim. A determinação desta perda de calor sensível leva em consideração fatores como a temperatura do ar, a velocidade do ar, a radiação e o isolamento térmico das vestimentas do manequim.

O manequim requer um determinado tempo para responder a uma alteração no equilíbrio de troca de calor. Dependendo da construção do manequim e do sistema de regulação utilizado, este tempo pode variar entre 20 e 30 minutos.

Uma vez que os manequins térmicos atuais só permitem determinar a perda de calor sensível, em condições ambientais onde o ser humano começar a suar para perder calor por evaporação do suor haverá uma subestimação do calor total perdido. Entretanto,

para pesquisas de conforto térmico realizadas próximo da zona de neutralidade térmica em atividade leves, onde não ocorre sudorese, não haverá interferência nos resultados se for utilizado um manequim térmico que não seja capaz de reproduzir a sudorese humana.

Antes de ser utilizado, um manequim precisa ser calibrado em um ambiente térmico padrão. O manequim deve ser calibrado com as mesmas vestimentas e na mesma posição que será usado para avaliar o ambiente térmico em estudo. As vestimentas afetam o coeficiente de transferência de calor sensível e, portanto, devem ser escolhidas adequadamente para a situação climática a ser avaliada e devem ser mantidas durante todo o processo de avaliação. Após a calibração (ver item 4.3.3), o manequim é colocado no local a ser avaliado, os fluxos de calor e as temperaturas superficiais das diferentes zonas do manequim são medidos e controlados pelo sistema de regulação do manequim. Devido ao atraso de resposta as condições transientes dos manequins, os dados do sistema de regulação são levados em consideração somente quando o manequim entra em equilíbrio térmico.

Atualmente, existe um grande número de manequins térmicos sendo construídos e utilizados, mas a falta de uma norma padronizando sua construção dificulta a comparação entre resultados obtidos por diferentes manequins em diferentes ambientes. A Figura 4.7 ilustra um manequim térmico, masculino de 1,75 m, 20 kg, tensão de alimentação de 100/240 V, perda de calor de 0 a 200 W/m² e temperatura de superfície de 18 a 42 °C, fabricado pela empresa PT TECNIK.

Figura 4.7 – Manequim térmico (http://pt-teknik.dk - acessado em 07/09/13).

4.3.2. Equacionamento das trocas de calor

A determinação de temperaturas equivalentes, T_{eq}, em manequins sem sudorese, é baseada na transferência de calor por convecção e radiação.

$$R = h_r(T_s - \overline{T_r}) \quad 4.3$$

$$C = h_c(T_s - T_{ar}) \quad 4.4$$

em que:

C	troca de calor por convecção	[W/m²];
R	troca de calor por radiação	[W/m²];
h_c	coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m²°C];
h_r	coeficiente de transferência de calor por radiação	[W/m²°C];
T_s	temperatura da superfície	[°C];
$\overline{T_r}$	temperatura radiante média	[°C];
T_{ar}	temperatura do ar	[°C].

Uma vez que as trocas de calor por convecção e radiação ocorrem simultaneamente, a temperatura equivalente é função destas trocas de calor e é dada por:

$$T_{eq} = T_s - \frac{\dot{Q}}{h} \qquad 4.5$$

em que:

$\dot{Q}$	soma do fluxo de calor por convecção com o de radiação	[W/m²];
T_{eq}	temperatura equivalente	[°C];
T_s	temperatura média da superfície	[°C];
h	coeficiente de transferência de calor combinado	[W/m²°C].

4.3.3. Calibração do manequim térmico

Para se aplicar o conceito de temperatura equivalente o manequim precisa ser calibrado em um ambiente térmico padrão com as mesmas vestimentas e na mesma posição na qual será usado para avaliar o ambiente térmico em estudo. As vestimentas afetam o coeficiente de transferência de calor sensível e, portanto, devem ser escolhidas adequadamente para a situação ambiental e mantidas durante todo o processo de avaliação.

O procedimento de calibração consiste na determinação de coeficientes de transferência de calor combinado, h, Equação 4.5, para os diversos segmentos do corpo em um ambiente padrão. Para satisfazer o conceito de temperatura equivalente, o ambiente padrão é um ambiente homogêneo com temperatura de bulbo seco igual à temperatura radiante média e com velocidade do ar próximo de zero, portanto: $T_{ar} = \overline{T_r} = T_{eq}$ para $v_{ar} < 0{,}1\ m/s$.

Satisfeitas estas condições em ensaio realizado em câmera climatizada e obtidas as condições de regime permanente nas trocas de calor do manequim com o ambiente, são realizadas leituras de temperaturas superficiais, T_s, e do fluxo de calor, $\dot{Q}$, para cada segmento do corpo e calculados os valores do coeficiente de troca de calor de calibração, h_{cal}.

$$h_{cal} = \frac{\dot{Q}}{T_s - T_{eq}} \qquad 4.6$$

Os valores dos coeficientes de transferência de calor de calibração serão os valores do coeficiente de troca de calor combinado, Equação 4.5, no cálculo das temperaturas equivalentes no ambiente real.

Uma vez calibrado o manequim para a posição e vestimenta do ensaio real, o método de avaliação consiste em posicionar o manequim no ambiente real e medir os fluxos de calor e as temperaturas superficiais de cada segmento. Por meio da Equação 4.5 é possível determinar a temperatura equivalente para cada segmento ou para o corpo inteiro utilizando os valores de h_{cal}, $\dot{Q}$ e T_s.

$$T_{eq} = T_s - \frac{\dot{Q}}{h_{cal}} \qquad 4.7$$

As temperaturas equivalentes determinadas pela Equação 4.7 são indicadores do nível de afastamento entre as condições do ambiente e as condições correspondentes a uma sensação térmica de neutralidade.

4.3.4. Diagramas de sensação térmica

Segundo a norma ISO 14505-2 (2006), para avaliar quão distantes as condições do ambiente se encontram das condições correspondentes a uma sensação térmica de neutralidade, são apresentados diagramas para avaliação de temperaturas equivalentes em função da sensação térmica para manequim com dezesseis segmentos, Figura 4.8.

Os diagramas apresentados na norma ISO 14505-2 (2006) referem-se a uma condição de verão, com o sistema de climatização operando na condição de resfriamento e pessoas usando roupas leves com isolamento térmico igual a 0,6 clo, Figura 4.9, e a uma condição de inverno, com sistema operando na condição de aquecimento e pessoas usando roupas pesadas com resistência térmica igual a 1,0 clo, Figura 4.10.

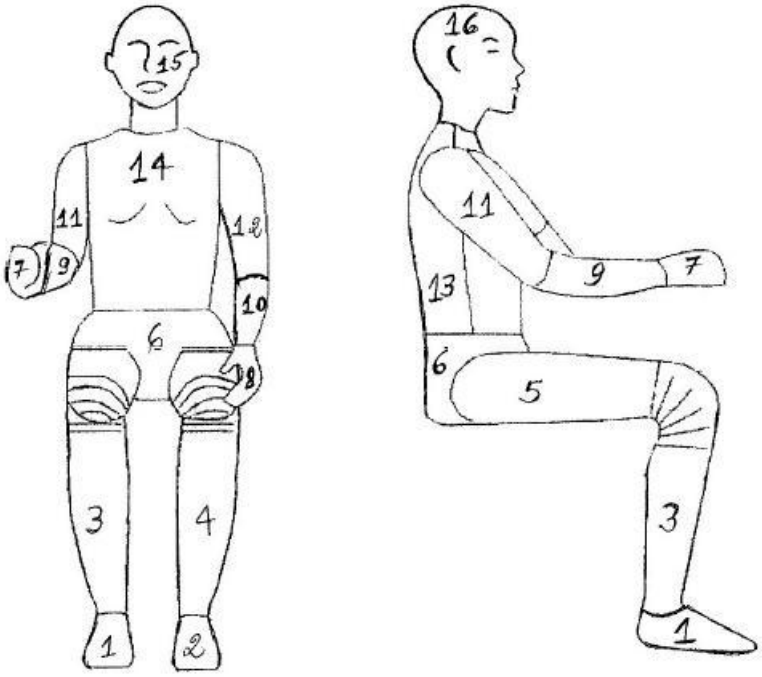


Figura 4.8 – Manequim térmico com dezesseis segmentos (ISO 14505-2, 2006).

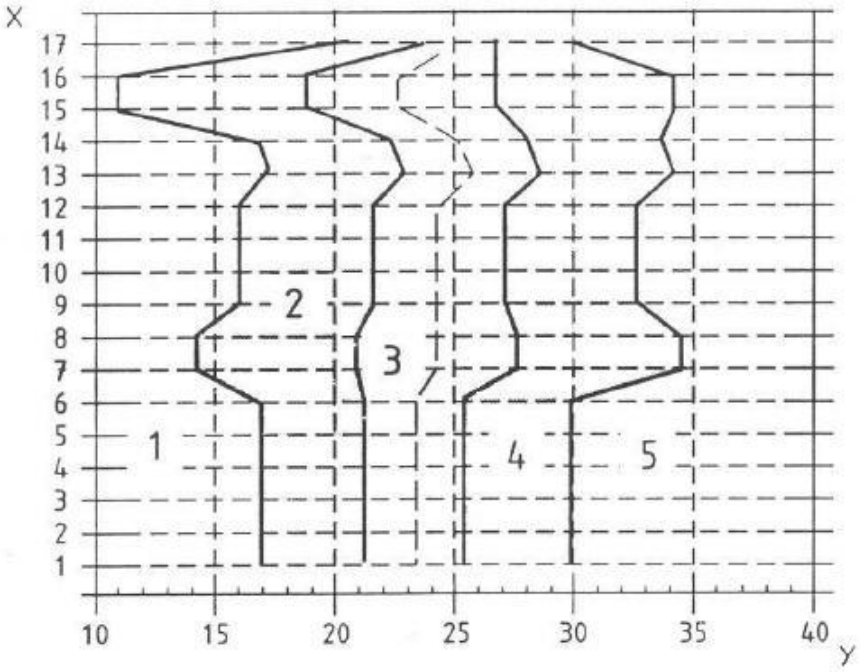


Figura 4.9 – Diagrama para avaliação da temperatura equivalente em função da sensação térmica: condição de verão, resfriamento (ISO 14505-2, 2006).

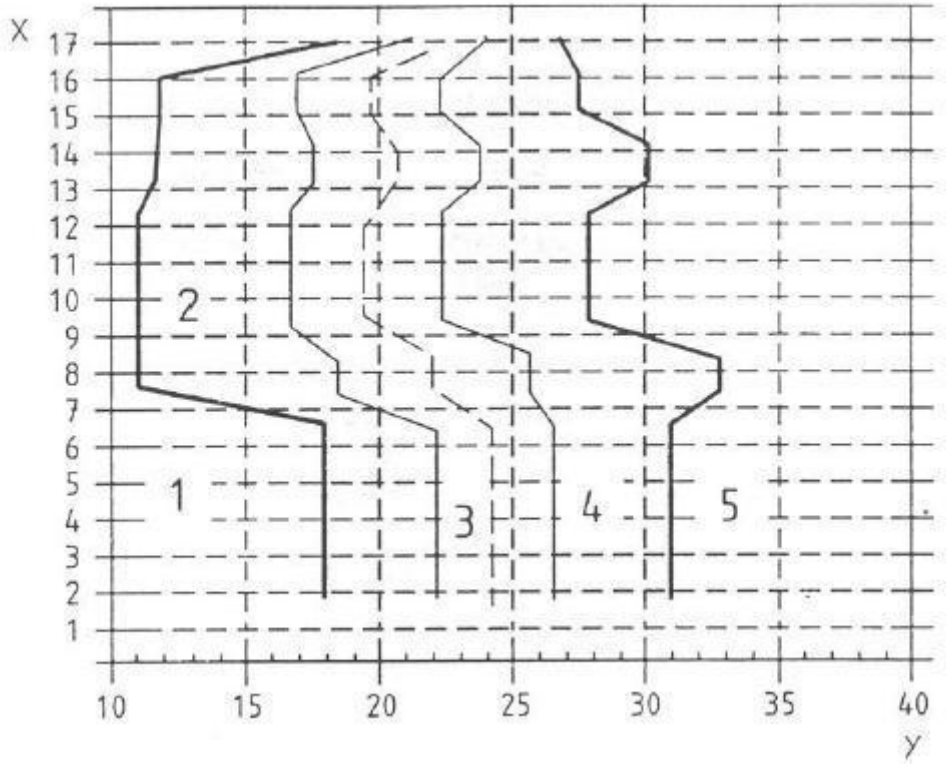


Figura 4.10 – Diagrama para avaliação da temperatura equivalente em função da sensação térmica: condição de inverno, aquecimento (ISO 14505-2, 2006).

Os valores de Y nas Figuras 4.9 e 4.10 correspondem às temperaturas equivalentes e os valores de X aos segmentos do corpo do manequim. O segmento 17 corresponde à temperatura equivalente do corpo inteiro. Os números de 1 a 5 representam as faixas de sensação térmica, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Escala de sensação térmica conforme a norma (ISO 14505-2, 2006).

Escala de sensação térmica				
1	2	3	4	5
Frio	Levemente frio	Neutro	Levemente quente	Quente

4.4. Avaliação de conforto térmico em cabines com pessoas

Um grande número de modelos tem sido desenvolvido durante os últimos anos para avaliar as condições de conforto térmico em cabines de veículos. As pesquisas sobre

conforto térmico dos ocupantes de cabines veiculares têm aumentado e se tornado uma das principais características no projeto de cabines, aliado à da competição tecnológica.

Embora modelos matemáticos e físicos e índices térmicos possam proporcionar repetitividade, métodos confiáveis de avaliação em ambientes de veículos são frequentemente complexos, dinâmicos e influenciados por muitos fatores. Assim, modelos e índices são de validade limitada. Seres humanos são utilizados para fornecer um meio direto de medir o conforto térmico e validar outras técnicas.

Segundo a norma ISO 14505-3 (2006), a avaliação com seres humanos é aplicada a todos os tipos de cabines, incluindo automóveis, ônibus, caminhões, veículos off-road, trens, navios, submarinos, guindastes, escavadeiras, aviões e similares. Os métodos mais apropriados para avaliar o conforto térmico em cabines de veículos, são os métodos diretos que envolvem medições das respostas de seres humanos (calor, moderado ou frio). Existem três métodos de avaliação, a saber: método subjetivo; método objetivo e; método comportamental.

O método subjetivo quantifica as respostas das pessoas para um ambiente usando escalas subjetivas. Tais escalas são baseadas em condições psicológicas relevantes para o fenômeno psicológico de interesse. É importante conhecer as propriedades das escalas a fim de interpretar corretamente os resultados. Escalas de sensação térmica (calor ou frio), preferências, conforto e aderência (calor e umidade) são frequentemente usados para a avaliação de conforto térmico.

Métodos objetivos são aqueles que quantificam as condições físicas ou mentais de uma pessoa pelo uso de instrumentação ou medidas de saídas, tais como medidas de desempenho. O princípio do método é que a medida pode ser interpretada em termos das condições humanas de interesse.

Métodos comportamentais quantificam ou representam o comportamento humano em resposta ao ambiente. O aspecto particular do comportamento humano observado é relacionado para as condições humanas de interesse e um método de interpretação é necessário. A vantagem de se utilizar o método subjetivo é que os dados são simples de serem trabalhados e estão diretamente relacionados com os fenômenos psicológicos das pessoas (ISO 14505-3, 2006).

Na avaliação do método subjetivo, é usual identificar uma amostra aleatória de seres humanos como representante da população de interesse. Esta é uma questão de

amostragem estatística e os fatores relevantes, tais como sexo, idade, experiência de condução e antropometria poderiam identificar e influenciar a seleção de pessoas. O número de pessoas selecionadas dependerá dos objetivos e projeto experimental. O número de oito ou mais pessoas são frequentemente considerados como um tamanho aceitável (ISO 14505-3, 2006).

As condições de operação usadas determinarão os ambientes que são avaliados para conforto. Em testes de cabines de veículos seria difícil criar condições de operação idênticas do dia a dia. Isso somente seria possível em câmaras climáticas, embora existam lugares no mundo onde condições climáticas consistentes prevaleçam. Se condições consistentes são requeridas, é importante lembrar que as condições de configuração do sistema de ventilação e de climatização das cabines, as condições iniciais, hora do dia, incidência solar e vestimentas devem ser controladas. Portanto, se o objetivo do teste da cabine é avaliar o conforto térmico do modelo, um apropriado intervalo de condições deve ser investigado (ISO 14505-3, 2006).

As escalas subjetivas são divididas em quatro categorias: escala de sensação térmica; escala de desconforto; escala de aderência, isto é, quanto quente e úmido o ambiente está e; escala de preferência.

As escalas do método subjetivo são apresentadas nas Tabelas 4.2 a 4.5.

Tabela 4.2[2] **–** Escalas de sensação térmica (ISO 14505-3, 2006).

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

[2] A Tabela 4.2 é a mesma Tabela 2.2

Tabela 4.3 – Escala de desconforto (ISO 14505-3, 2006)

Escala	Grau de desconforto
3	Muito desconfortável
2	Desconfortável
1	Levemente desconfortável
0	Não desconfortável

Tabela 4.4 – Escala de aderência (ISO 14505-3, 2006)

Escala	Grau de aderência
3	Muito aderente
2	Aderente
1	Levemente aderente
0	Não aderente

Tabela 4.5 – Escala de preferência (ISO 14505-3, 2006)

Escala	Como o ambiente deveria estar
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Sem mudança
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Park *et al*. (2011), ressaltam que o método da avaliação subjetiva associado com uma palavra “quente” ou “frio” dependerá das condições climáticas externas. Uma pessoa em um ambiente frio ou no período de inverno, provavelmente associará a palavra “quente” como conforto e uma pessoa em um ambiente quente ou no período de verão associará a palavra “frio” como conforto.

No presente trabalho não são realizados ensaios com pessoas, mas são utilizados resultados de trabalhos onde houve a participação de pessoas na sua obtenção, como as cartas de sensação térmica da ISO 14505-2 (2006), e o equacionamento realizado por Fanger, *et al.* (1998) na avaliação de desconforto térmico local devido às correntes de ar (ISO 7730, 2005; ASHRAE 55, 2010).

Capítulo 5

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o método de trabalho para a análise de condições de desconforto térmico local na avaliação de arquiteturas de distribuição de ar em uma cabine de *mock-up* de aeronave, por meio da medição de variáveis ambientais e da utilização do manequim térmico.

5.1. Introdução

Conforme ressaltado no Capítulo 1, o sistema de distribuição de ar em cabines de aeronaves comerciais tem um papel fundamental para criar um ambiente seguro, saudável e confortável no interior dessas cabines. Atualmente, o sistema de distribuição de ar é por mistura (MV), ou seja, insuflamento de ar à alta velocidade pela parte superior e lateral inferior dos *bins* (bagageiros) e exaustão pela parte inferior lateral da cabine. Nesse sistema, uma parte do ar contaminado é filtrada e se mistura com ar novo e é insuflado novamente para o interior da cabine. A distribuição de temperaturas nesse sistema é mais uniforme, entretanto ocorre grande recirculação de ar, o que não proveja boas condições de conforto térmico e pode espalhar doenças infecciosas.

Na busca de uma melhor solução, no presente trabalho são investigadas três arquiteturas de distribuição de ar: o sistema MV, o sistema UFAD e um sistema UFAD modificado, quanto às condições de desconforto térmico local no interior de uma cabine de *mock-up* de aeronave regional.

5.2. O Laboratório

Para a realização dos ensaios foi realizada a montagem de um Laboratório que permite a análise de diferentes arquiteturas de distribuição de ar, bem como de sistemas de ventilação personalizados, em *mock-up* de aeronave regional instrumentado.

O laboratório é dotado de um sistema de climatização do tipo expansão indireta, composto por *chiller* e *fan coil*, e possibilidade de aquecimento e umidificação do ar, com controlador lógico programável, CLP, que fornece ar tratado ao *mock-up* instrumentado.

O controle e o ajuste da temperatura e umidade do ar são obtidos por meio dos transdutores de temperatura e umidade relativa da Vaisala, modelo HMT-333, com faixas de operação de 0 a 100 % UR ± (1,0 + 0,008 x leitura) % UR e – 40 a 80 °C (± 0,2 °C @ + 20 °C), que foram instalados nos dutos de insuflamento do ar no *mock-up*.

5.3. O *Mock-up*

O *mock-up* foi projetado e construído com três fileiras de quatro assentos por fileira, separadas por um corredor central, totalizando doze assentos, representando em escala real parte de uma cabine de uma aeronave regional. A Figura 5.1 apresenta as representações esquemáticas externa e interna deste *mock-up*.

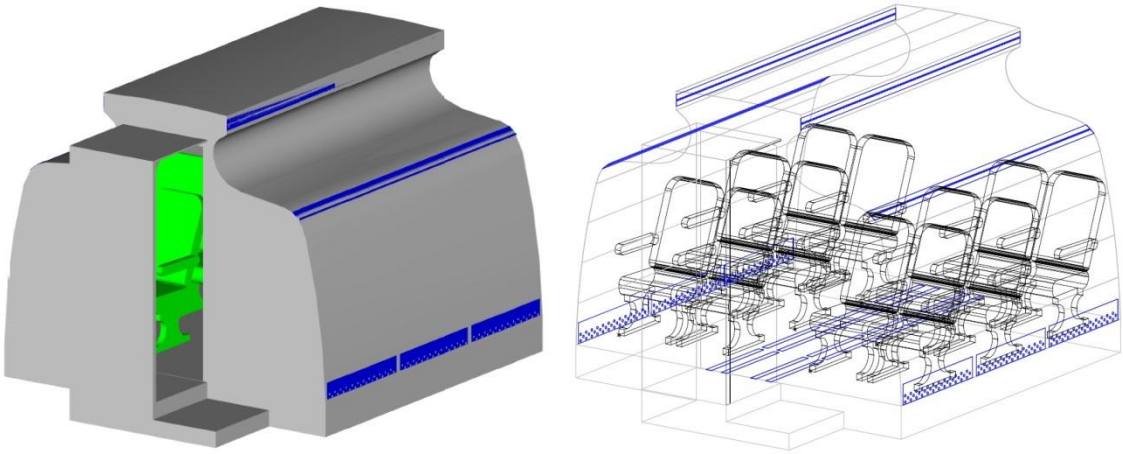


Figura 5.1 – Representações esquemáticas externa e interna do *mock-up***.**

Os assentos utilizados são assentos de aeronave comercial e suas dimensões e espaçamentos representam o interior de uma cabine de aeronave regional. A Figura 5.2 mostra o interior do *mock-up*, juntamente com o manequim térmico e os manequins aquecidos, simulando a presença de passageiros.

Figura 5.2 – Vista interna do *mock-up* mostrando os manequins aquecido e o manequim térmico.

5.4. Arquiteturas de distribuição de ar

As três arquiteturas de distribuição de ar avaliadas no presente trabalho são apresentadas nas Figuras 5.3 a 5.5, sendo:

- Arquitetura 1 – Ventilação por mistura (MV), com 40% de vazão de ar insuflada por difusores instalados na parte superior dos *bins* (bagageiros) e 60% da vazão de ar[3] insuflada pelos difusores na parte lateral inferior dos *bins* e com exaustão de 100% da vazão de ar por grelhas instaladas na parte inferior lateral da cabine, sistema convencional de distribuição de ar, Figura 5.3.
- Arquitetura 2 – Ventilação por insuflamento pelo piso (UFAD), com 100% de vazão de ar insuflada por difusores instalados na região central da cabine, e com exaustão de 40% da vazão de ar por grelhas localizadas na parte

[3] A utilização da proporção da vazão de ar de 40% na parte superior dos *bins* e de 60% na parte lateral inferior dos *bins* é usual no setor aeronáutico (fonte: comunicação pessoal).

superior dos *bins* (bagageiros) e com exaustão de 60% da vazão de ar pelas grelhas localizadas na parte lateral inferior dos *bins*, Figura 5.4.

- Arquitetura 3 – Ventilação UFAD modificada, com 40% da vazão de ar insuflada por difusores instalados na região central da cabine e 60% da vazão de ar insuflada por difusores instalados na parte lateral inferior dos *bins* e com exaustão de 100% da vazão do ar pelas grelhas instaladas na parte superior dos *bins* (bagageiros), Figura 5.5.

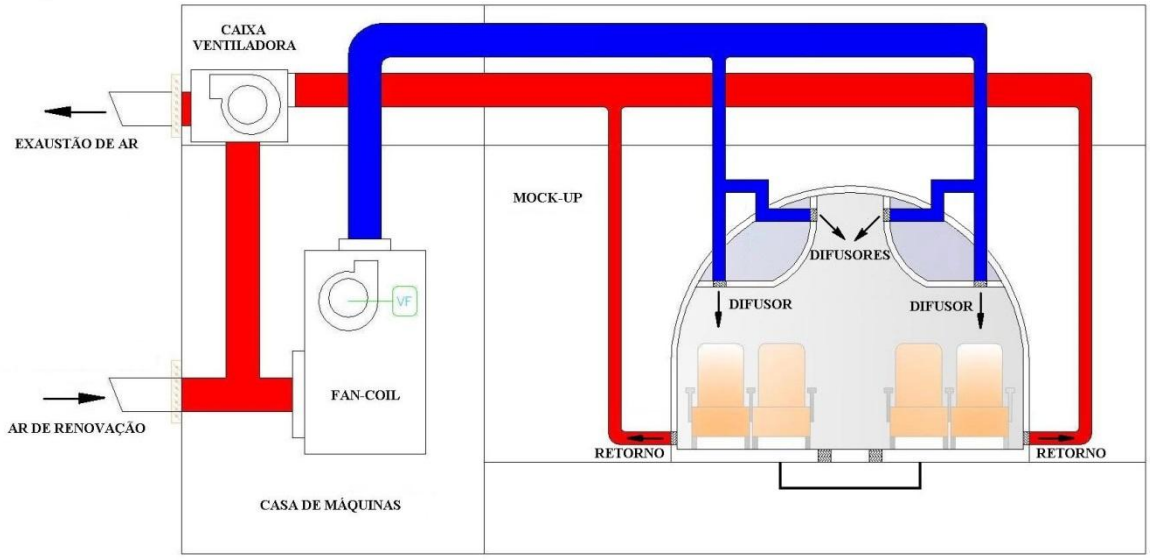


Figura 5.3 – Arquitetura 1: Ventilação por mistura (MV).

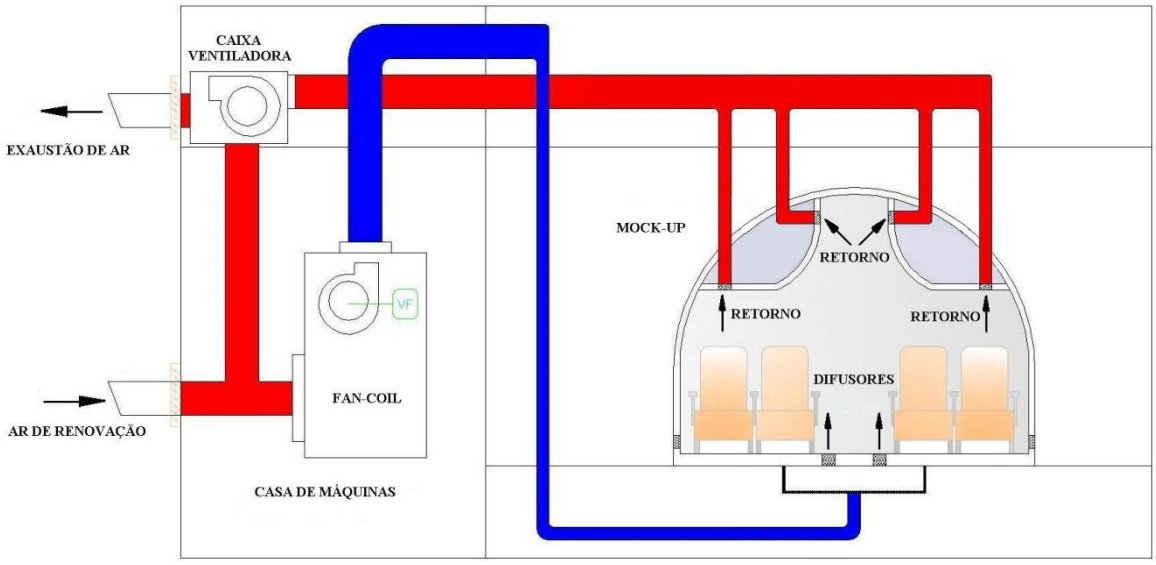


Figura 5.4 – Arquitetura 2: Ventilação por insuflamento de ar pelo piso (UFAD).

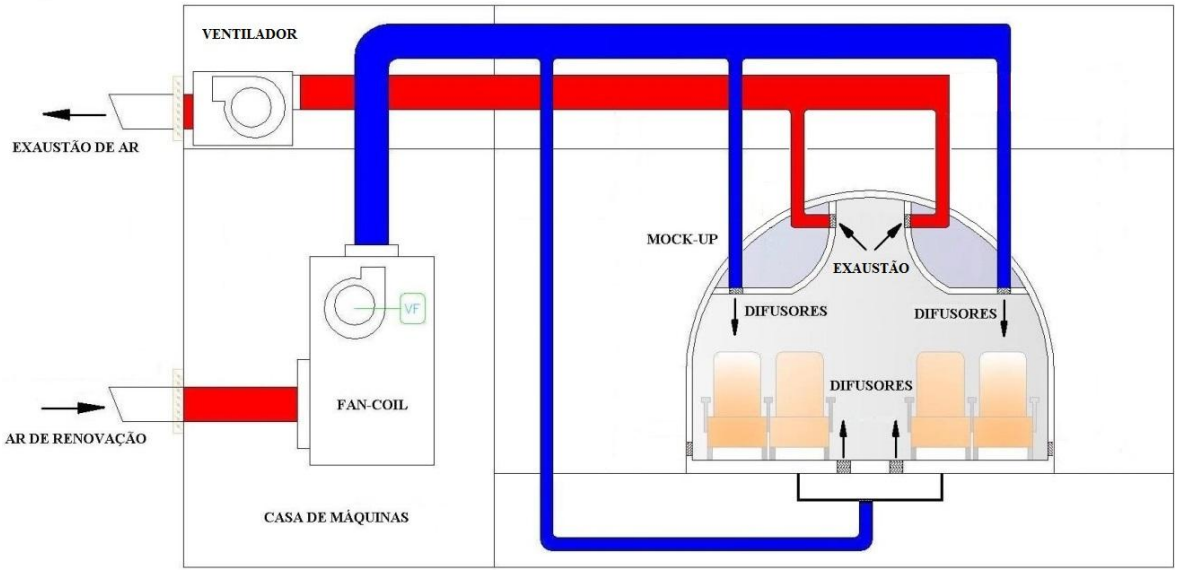


Figura 5.5 – Arquitetura 3: Ventilação por sistema UFAD modificado.

5.5. Condições do ensaio

As condições do experimento no interior do *mock-up* foram baseadas em Hunt e Space (1995) e nas normas ISO 7726 (1998), ISO 7730 (2005), ASHRAE 161 (2007) e ASHRAE 55 (2010).

5.5.1. Temperatura do ar de insuflamento

As temperaturas do ar de insuflamento para as três arquiteturas avaliadas foram estabelecidas em:

- Temperatura de insuflamento igual a 18 °C ± 0,5 °C e;
- Temperatura de insuflamento igual a 22 °C ± 0,5 °C.

Essas temperaturas foram estabelecidas com base em requerimentos de operação da ASHRAE 161 (2007), que estabelece temperaturas do ar de cabine de 18,3 °C a 23,9 °C com tolerância do *set point* de ± 1,1 °C.

A cabine foi isolada termicamente do ambiente externo, com isolamento térmico colocado na parte externa da cabine, de tal forma que a temperatura radiante média, $\overline{T_r}$, no interior da cabine fosse praticamente igual à temperatura média do ar na cabine. Este procedimento foi utilizado para que não ocorresse a interferência de assimetria de radiação

na análise dos resultados de desconforto térmico local relacionado com as condições de escoamento do ar no *mock-up*.

5.5.2. Temperaturas superficiais de paredes

As temperaturas superficiais das paredes do *mock-up* foram monitoradas para a verificação do estabelecimento de condições de regime permanente. A monitoração destas temperaturas também foi necessária para a verificação da condição de temperatura radiante média, $\overline{T_r}$, no interior da cabine ser praticamente igual à temperatura média do ar na cabine. O estabelecimento desta condição foi conseguido com a colocação de material de isolamento na parte externa do *mock-up*, bem como com o controle da temperatura do ar no ambiente externo ao *mock-up*.

Além disto, temperaturas superficiais também foram monitoradas nas paredes da sala de calibração, no estabelecimento de condições para aplicação do conceito de temperatura equivalente, com $T_{ar_{sala}} = \overline{T_r}\ e\ v_{ar} \approx 0\ m/s$.

5.5.3. Vazão de ar e taxa de renovação de ar

Para as arquiteturas de distribuição de ar propostas, a vazão de referência utilizada foi de 9,4 L/s por pessoa, que corresponde a 34 m³/h (20 cfm) por pessoa, valor recomendado pela norma ASHRAE 161 (2007). Uma vez que o *mock-up* possui 12 assentos, foi estabelecida vazão total de insuflamento de ar de 406 m³/h em todos os ensaios.

Na maioria das aeronaves comerciais 50% do ar fornecido ao passageiro é recirculado como forma de melhorar o controle da umidade do ar e da eficiência no consumo de combustível (MANGILI e GENDREAU, 2005). Entretanto, por facilitar o controle do sistema de climatização, no presente trabalho foi estabelecida taxa de renovação de ar de 100 %, em todos os ensaios.

5.5.4. Umidade relativa do ar

Durante o voo a umidade do ar no interior da cabine tende a ser baixa, devido à aridez do ar externo, da altitude e da umidade mínima que é gerada pelos ocupantes e

equipamentos. Segundo Hunt e Space (1995), a umidade relativa do ar em aeronaves fica entre 5 e 35%, com média entre 15 e 20%. Gao e Niu (2007) afirmam que a umidade relativa do ar é muito baixa em voos intercontinentais, tipicamente de 3 a 8%. Park *et al*. (2011) mencionam que a umidade relativa é baixa, inferior a 15%. A norma ASHRAE 161 (2007) não estabelece valores para a umidade do ar.

Quando da realização de ensaios em que se considera a avaliação com pessoas, a umidade relativa interfere na percepção do conforto por parte dessas pessoas. Contudo, em avaliações sem pessoas, os ensaios podem ser feitos em condições normais de ensaios em ambientes climatizados (ASHRAE 55, 2010), com umidade relativa do ar em torno de 50%, que foi o procedimento adotado no presente trabalho.

5.5.5. Vestimenta e atividade (metabolismo)

Nos ensaios com o manequim térmico foi utilizada uma vestimenta com resistência térmica de 0,6 clo, tanto para a temperatura de insuflamento de 18 °C como para 22 °C.

Em atividades reais realizadas em uma cabine de aeronave, as pessoas normalmente permanecem sentadas, conversando, dormindo, lendo ou utilizando algum dispositivo eletrônico. Na maioria dessas atividades, o metabolismo é próximo ao sedentário. Em função disso, foi adotada a atividade metabólica de 1,0 Met (58,2 W/m²). Esse valor foi ajustado nos manequins aquecidos, que simulam a presença de passageiros, via software.

5.6. Medições, instrumentação e procedimento de ensaio

A seguir são detalhadas as medições realizadas para análise das condições de desconforto térmico local nas três arquiteturas de distribuição de ar, bem como a instrumentação utilizada e os procedimentos de ensaio realizados em conformidade com a norma ISO 7726 (1998).

5.6.1. Medição de velocidade e temperatura do ar

A medição de velocidades e temperaturas do ar na cabine, bem como o levantamento da intensidade de turbulência para os sistemas de distribuição de ar analisados, seguiram as recomendações da norma ASHRAE 55 (2010) com medição nas alturas 0,10, 0,60, e 1,10 m a partir do piso, correspondendo à região dos pés e tornozelos,

das mãos e braços e do pescoço e cabeça, respectivamente, de uma pessoa sentada. Para a situação de pessoas em pé (corredor) foi adotada altura de 1,60m. As medições foram realizadas entre cada fileira de assentos (Figura 5.6), perfazendo três fileiras no total.

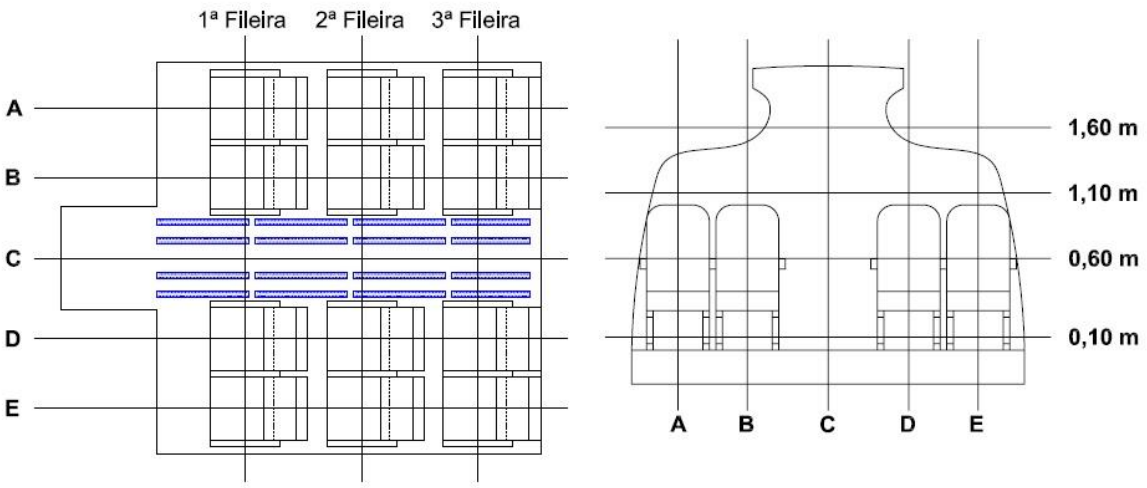


Figura 5.6 – Planos e alturas de medição de velocidade e temperatura do ar.

Para as medições de velocidade e temperatura do ar foi utilizado o sistema Comfort Sense da Dantec Dynamics, que consiste de três mini estruturas modulares, 54N95, com entrada para um canal e dois *drivers* DAQmx da National Instruments para a conexão com o computador. Foram utilizados três transdutores 54T33, que são sondas omnidirecionais de medição de velocidade do ar com frequência de resposta superior a 2 Hz, com faixa de operação de 0 a 5 m/s e incerteza de medição de ± 0,02 m/s para faixa de medição de 0 a 1 m/s, com sensores de temperatura integrados, de resposta rápida, com faixa de operação de – 20 °C até 80 °C, e incerteza de medição de ± 0,2 °C para a faixa de medição de 0 a 45 °C. Um programa de computador faz a interface amigável com o usuário. Nesse programa é possível configurar a posição de cada sonda no ambiente em estudo e um gráfico em tempo real mostra o comportamento da temperatura do ar, velocidade do ar, intensidade de turbulência e *Draught Rate* para cada sonda. Para a aquisição dos dados, o usuário configura o tempo desejado para a gravação. Após esse período, é possível exportar os resultados para uma planilha, exportar os gráficos ou ainda emitir um relatório em pdf com um resumo das informações de uma dada aquisição. A título de ilustração, as Figuras 5.7 e 5.8 mostram a instalação das três sondas na cabine.

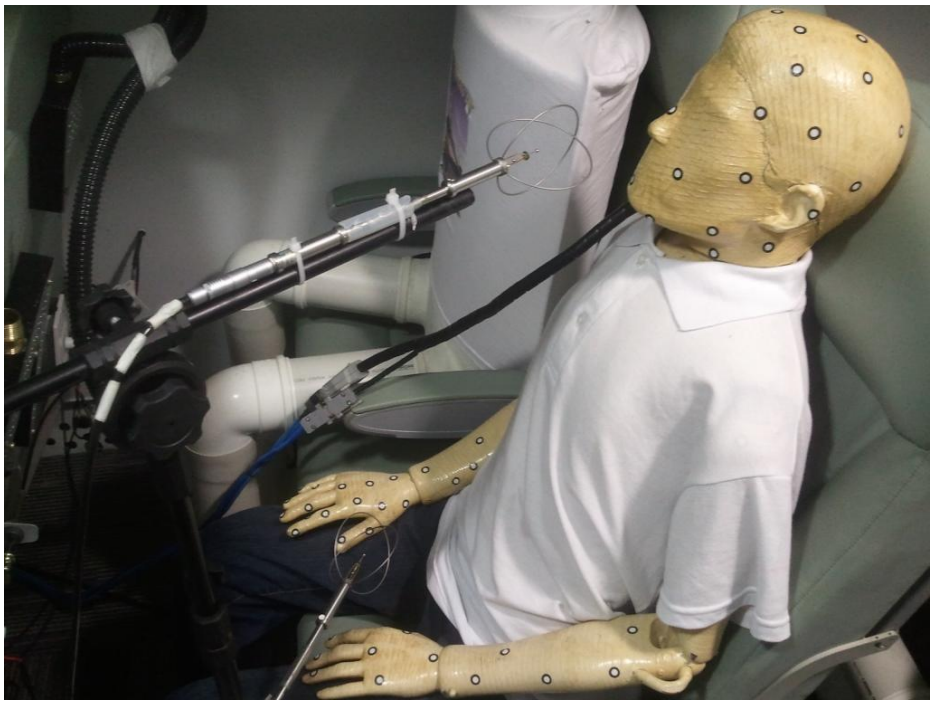


Figura 5.7 – Posicionamento das sondas para medição de temperatura e velocidade do ar na altura de 0,60 m e de 1,10 m a partir do piso.

Figura 5.8 – Posicionamento da sonda para medição de temperatura e velocidade do ar na altura de 0,10 m a partir do piso.

As medições obedeceram à sequência alfanumérica do plano de medições, com a exceção da coluna C que foi efetuada por último, pois eram necessários ajustes nas alturas das sondas em relação ao tripé, suporte de fixação das sondas. A ordem sequencial ficou da

seguinte forma: iniciou-se na posição 1A e finalizou-se na posição 3E, pulando as posições do corredor central. Após ajustar as alturas das sondas, foram efetuadas as medições nas posições 1C, 2C e 3C.

Após a mudança do tripé para uma nova posição na cabine, as leituras de velocidade e de temperatura do ar somente eram feitas após a estabilização das condições na cabine. O critério de estabilização adotado foi o da temperatura do ar, conforme mostrado na Figura 5.9. Uma vez que a variação da temperatura do ar não foi significativa nos intervalos de tempo analisados na Figura 5.9, foi estabelecido que o tempo de aquisição dos dados seria de 5 minutos e o tempo entre uma medição e outra, após efetuar a troca de posição do tripé, seria de 10 minutos. Procedimento similar foi adotado por Zhang et al. (2007a), que adotaram tempo de amostragem de 4 minutos.

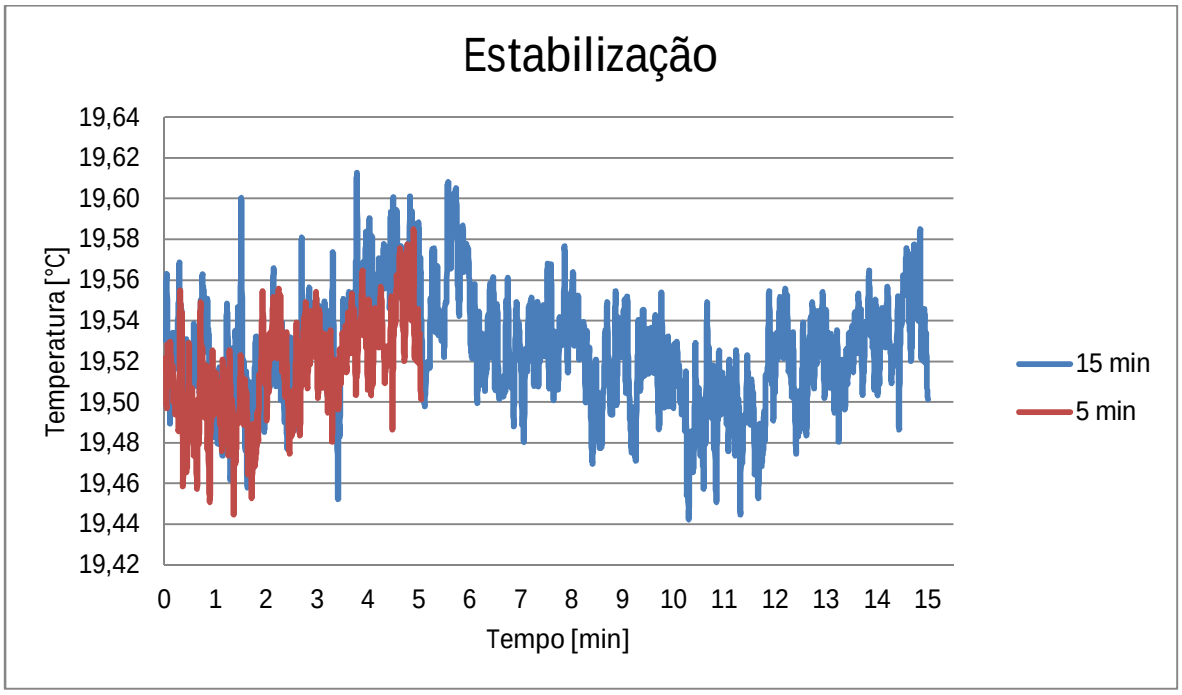


Figura 5.9 – Tempo de estabilização da temperatura do ar após perturbação.

5.6.2. Medição da temperatura superficial de paredes

As temperaturas superficiais das paredes do *mock-up* e da sala de calibração foram monitoradas por meio de termopares tipo T (cobre/constantan), bitola AWG 8 (Ø = 3,26 mm) e haste de 200 mm de comprimento, com faixa de operação – 270 °C a 370 °C e f.e.m. (força eletromotriz) de – 6,258 mV a 20,872 mV. Os termopares foram

conectados a um *data logger* Agilent, modelo 34970A. Um dos termopares foi posicionado no duto de insuflamento para comparar os valores com o transmissor do sistema de automação e controle.

O *data logger* possui um programa de computador para a aquisição de dados denominado Agilent BenchLink Data Logger 3 que permite configurar os canais (termopares) que serão utilizados para monitorar a temperatura das superfícies. O programa também gera, em tempo real, o gráfico da temperatura da parede em função do tempo. Essa função é importante para estabelecer se as temperaturas das paredes encontram-se em regime permanente (condição de estabilidade).

5.6.3. Medição da vazão de ar

Para medir e monitorar a vazão de ar no interior do mock-up foi projetado um sistema composto por um conjunto de manômetros diferenciais e tubos de Pitot instalados em tubos de PVC de 100 mm de diâmetro nas linhas de exaustão[4] do *mock-up.*

A fim de garantir condições de perfil completamente desenvolvido no local de medição de velocidades do ar no centro dos dutos (FOX, Mc DONALD e PRITCHARD, 2006), na entrada das linhas de exaustão (saídas do *mock-up*) foram instaladas telas metálicas retificadoras de fluxo e a 1000 mm (correspondente a 10 diâmetros dos dutos de PVC) das telas retificadoras foram instalados os tubos de Pitot. Para o controle da vazão nas diferentes arquiteturas propostas e analisadas, em cada linha de exaustão foram instalados *dampers*[5].

5.6.4. Determinação de temperaturas equivalentes

Para a determinação das temperaturas equivalentes foi utilizado um manequim térmico de fabricação nacional. O corpo do manequim foi confeccionado em material siliconado, com proporções similares a um corpo humano adulto, medindo 1,77 m de altura. Os membros superiores e inferiores, bem como a cabeça e o tronco (divisão entre as

---

[4] Em função da perda de carga nas linhas de exaustão, ao final destas linhas foram instalados exaustores centrífugos de 75W de potência e vazão máxima de ar de 385 m³/h.

[5] Memorial de cálculo das velocidades do ar e da vazão, a partir das medições de diferença de pressão nos manômetros diferenciais, é apresentado no Anexo B

costas, parte superior e inferior, e também entre o peito e o abdômen) são articulados. A Figura 5.10 mostra o manequim térmico na sala de calibração.

Figura 5.10 – O manequim térmico na sala de calibração.

O manequim possui 23 segmentos aquecidos por fios de resistência elétrica. Para obter uma leitura mais representativa da temperatura média na superfície foram utilizados fios trançados em direção ligeiramente diferente dos fios de resistência elétrica. A informação das temperaturas e dos fluxos de calor é transmitida por um cabo em uma caixa receptora, que contém as placas controladoras de cada segmento.

O ajuste e o controle dos segmentos do manequim térmico são realizados por um programa de computador que se comunica com uma caixa receptora intermediária através de cabo serial. O programa possui uma tela de interface com o usuário, onde é possível escolher o tipo de controle (temperatura ou potência controlada), definir a temperatura ou potência de em cada segmento, ler e iniciar ou finalizar a gravação de dados. O programa registra os valores de temperatura e potência em intervalos de 1s.

É possível ainda visualizar de forma gráfica os valores de potência e de temperatura de cada segmento em função do tempo. Essa função é útil para estabelecer quando o manequim ou segmentos do manequim entram em regime permanente (condição de estabilidade).

5.6.5. Os manequins aquecidos

Os manequins aquecidos para simular a presença de passageiros foram construídos em fibra de vidro e tubos e conexões de PVC, com forma semelhante a um corpo humano sentado (Figura 5.11). Internamente, em cada manequim existe uma resistência elétrica que dissipa calor e um ventilador que propicia uma distribuição uniforme da temperatura do ar ao longo de toda a superfície do manequim. Os manequins são acoplados a uma unidade de potência por meio de cabos tripolares. A potência de dissipação de calor é ajustável por meio de software. A faixa de operação dos manequins aquecidos é de 30 a 120 W/m^2.

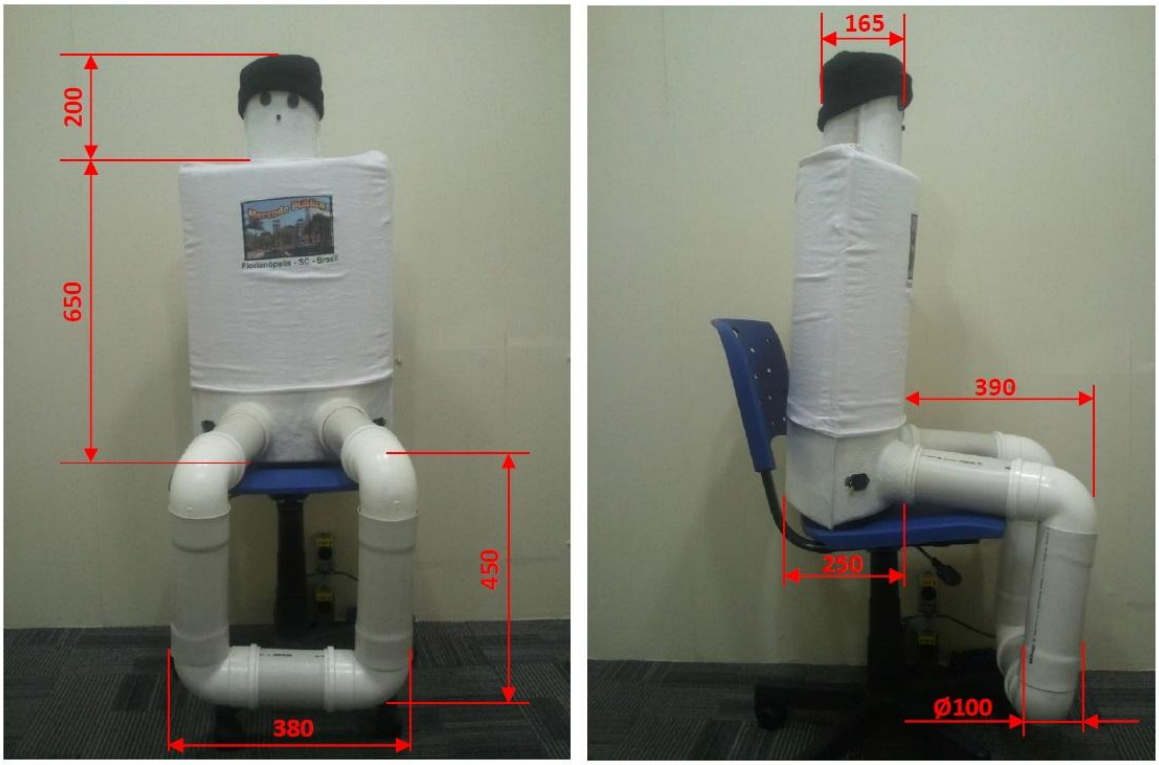


Figura 5.11 – Os manequins aquecidos e suas respectiva dimensões.

5.6.6. Repetitividade dos ensaios

Para aumentar a confiabilidade das medições e diminuir as incertezas dos resultados, para cada uma das arquiteturas propostas e para cada temperatura de insuflamento, os ensaios foram repetidos em três dias diferentes.

5.6.7. Sequência experimental

Nesse tópico é apresentada a sequência experimental para efetuar as medições. Essa sequência experimental é apresentada em forma de rotina:

- Inicialmente, são ajustadas as válvulas dos dutos de insuflamento e exaustão do ar para a arquitetura em estudo;
- Em seguida, é ligado o sistema de automação e controle e demais equipamentos e configurados todos os parâmetros para o ensaio;
- Depois, são ligados os manequins aquecidos e o manequim térmico para iniciar o processo de estabilização;
- Feito isso, são ligados os ventiladores instalados nos dutos de exaustão do *mock-up*;
- Em seguida, são realizadas medições da diferença de pressão nos manômetros diferenciais e realizados cálculos de vazão de ar (ver Anexo B), para o ajuste das vazões utilizando os *dampers* instalados em cada linha de exaustão;
- Depois, é iniciado o registro de dados do sistema de automação e controle e no *data logger* para determinar o período de estabilização das condições ambientais na cabine;
- Feito isso, as sondas omnidirecionais são posicionadas na posição 1A;
- Após a estabilização das condições ambientais na cabine, são efetuadas as medições para cada uma das posições do plano de medição do *mock-up*;
- Finalizadas as medições, são efetuados os registros e armazenamento dos dados;
- Finalmente, verifica-se novamente a diferença de pressão nos manômetros para assegurar que não houve variação durante os ensaios e;
- Após as etapas anteriores, os equipamentos são desligados e o processo de medição é concluído.

Capítulo 6

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, de forma comparativa, os resultados das medições das variáveis ambientais para cada uma das arquiteturas de distribuição de ar proposta. É apresentada também a avaliação do desconforto térmico local devido à estratificação da temperatura e ao risco de correntes de ar, bem como, a avaliação do conforto térmico pelas temperaturas equivalentes.

Resultados preliminares do presente trabalho foram apresentados no ENCAC 2013 e no SIMEA 2013 (SILVA, FABICHAK Jr, TRIBESS, 2013a, SILVA, FABICHAK Jr, TRIBESS, 2013b).

6.1. Perfis de velocidade e de temperatura do ar

Os dados das medições foram tabulados e geraram gráficos relativos a cada grandeza, temperatura do ar e velocidade do ar, e em cada posição, que foram simplificados pelas curvas representativas das médias em cada posição e em cada nível, agrupados pelo tipo de arquitetura estudada (arquitetura MV, arquitetura UFAD e arquitetura UFAD modificada). Os eixos das coordenadas e o eixo das ordenadas foram padronizados para o mesmo intervalo em cada uma das posições estudas para facilitar a comparação. Os desvios padrões das grandezas mensuradas não foram exibidos nos gráficos para não poluir a visualização, entretanto esses valores foram disponibilizados nas Tabelas C1 a C6 (Anexo C). Essas simplificações permitiram tanto a análise pontual quanto global das condições térmicas do ambiente. Para facilitar a leitura, inicialmente, é reapresentada a Figura 5.6.

6.1.1. Resultados para temperatura de insuflamento do ar de 18 °C

A seguir, são apresentados os gráficos e as análises das condições térmicas para a temperatura de insuflamento de ar igual a 18 °C obtidas no ambiente. A análise foi realizada com base nos resultados dos perfis de temperatura e velocidade do ar para cada posição, apresentadas nos gráficos das Figuras 6.1 a 6.30.

Para uma visão geral das velocidades e temperaturas do ar em todas as posições, os perfis de velocidade e de temperatura do ar, em todas as posições da cabine, também são apresentados nas Figuras 6.31 e 6.32, respectivamente.

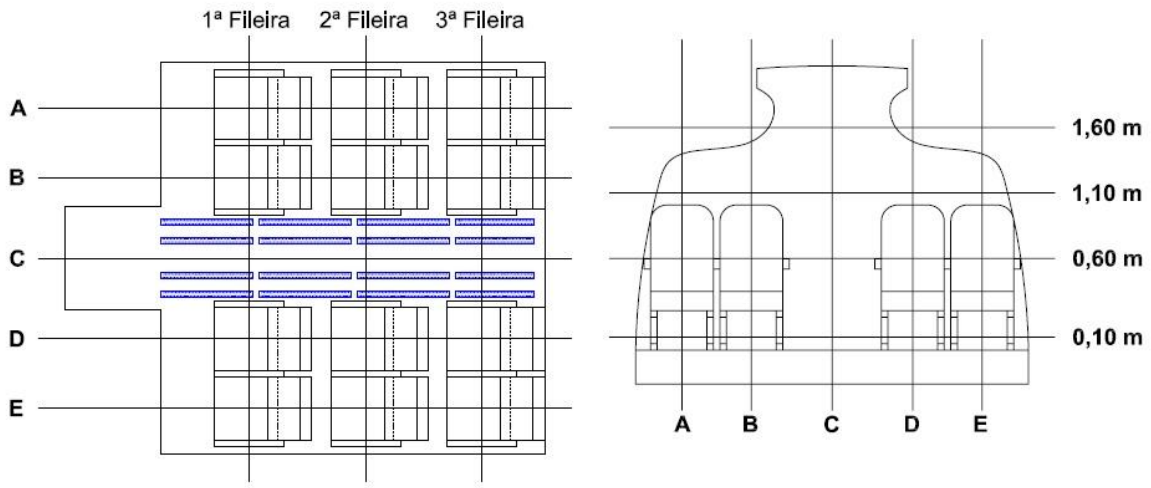


Figura 5.6 – Planos e alturas de medição de velocidade e temperatura do ar.

A altura de 0,10 m corresponde à região inferior, nível dos pés e tornozelos, a altura de 0,60 m corresponde à região central, nível das coxas, mãos e antebraços de uma pessoa sentada e a altura de 1,10 m corresponde à região superior, nível da cabeça, pescoço e ombros também de uma pessoa sentada. Essa altura, para uma pessoa em pé, corresponde à região central, nível da cintura, coxas e mãos. A altura de 1,60 m corresponde à região superior, nível da cabeça, pescoço e ombros de uma pessoa em pé (Figura 5.6).

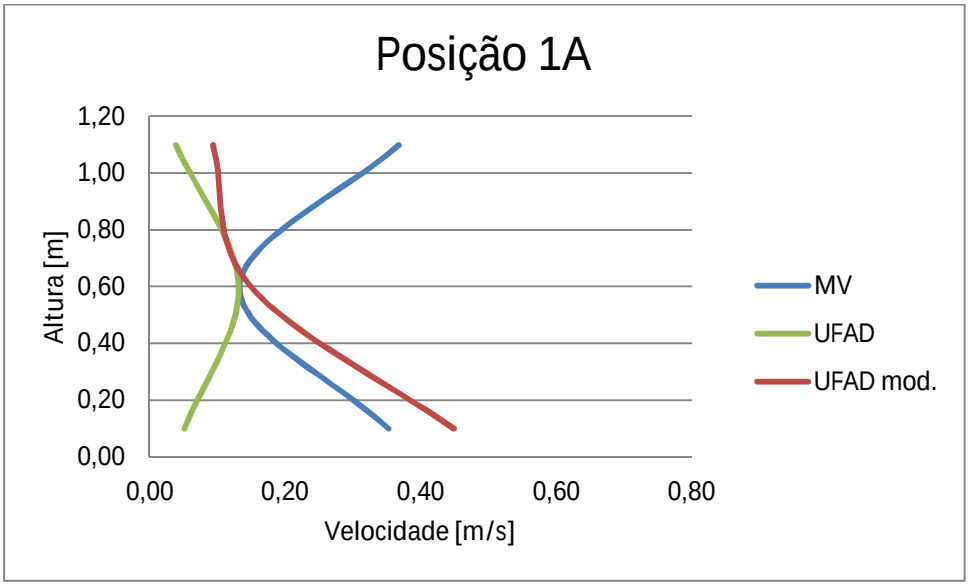


Figura 6.1 – Velocidade do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 18 °C.

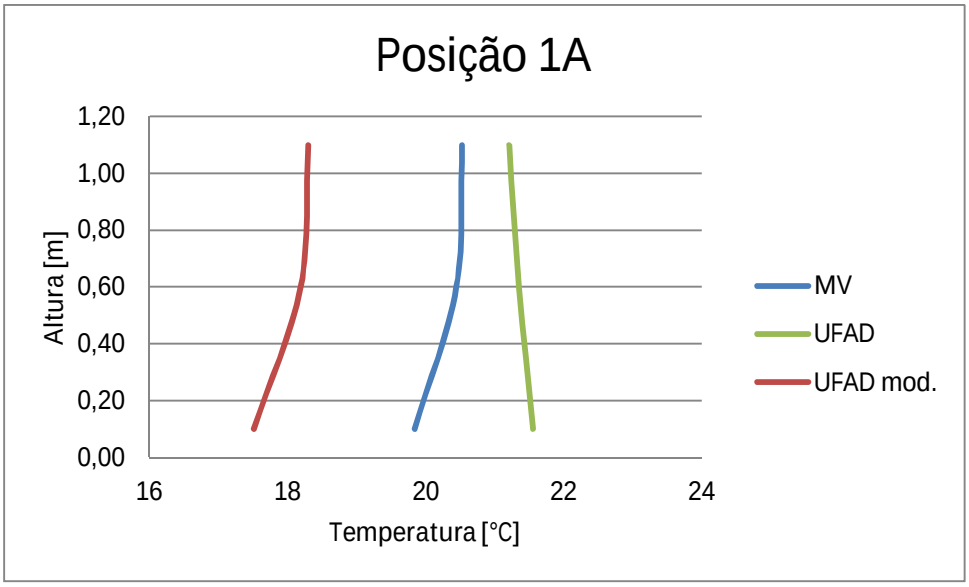


Figura 6.2 – Temperatura do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A análise da Figura 6.1, posição 1A, permite observar que a arquitetura UFAD apresentou os menores valores de velocidade do ar, inferiores a 0,15 m/s. Devido à característica desse tipo de sistema, na região correspondente à altura de 0,60 m, região com o maior efeito da pluma térmica, a velocidade do ar apresentou o maior valor. A arquitetura MV apresentou os maiores valores de velocidade do ar, superiores a 0,30 m/s na região inferior e superior e uma redução na região central, característica desse tipo de arquitetura. A arquitetura UFAD modificado apresenta velocidades elevadas na região inferior, maiores que 0,40 m/s, diminuindo com a altura.

A Figura 6.2 mostra homogeneidade das temperaturas. Observa-se que as arquiteturas MV e UFAD modificado, com insuflamento de ar pela parte lateral inferior dos *bins*, apresentam menores temperaturas, devido à incidência direta do ar insuflado.

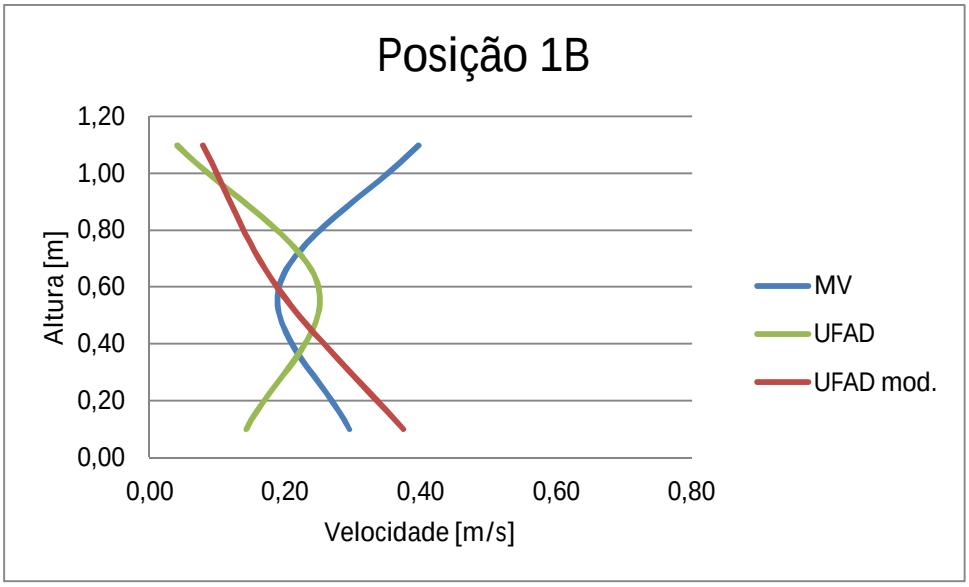


Figura 6.3 – Velocidade do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 18 °C.

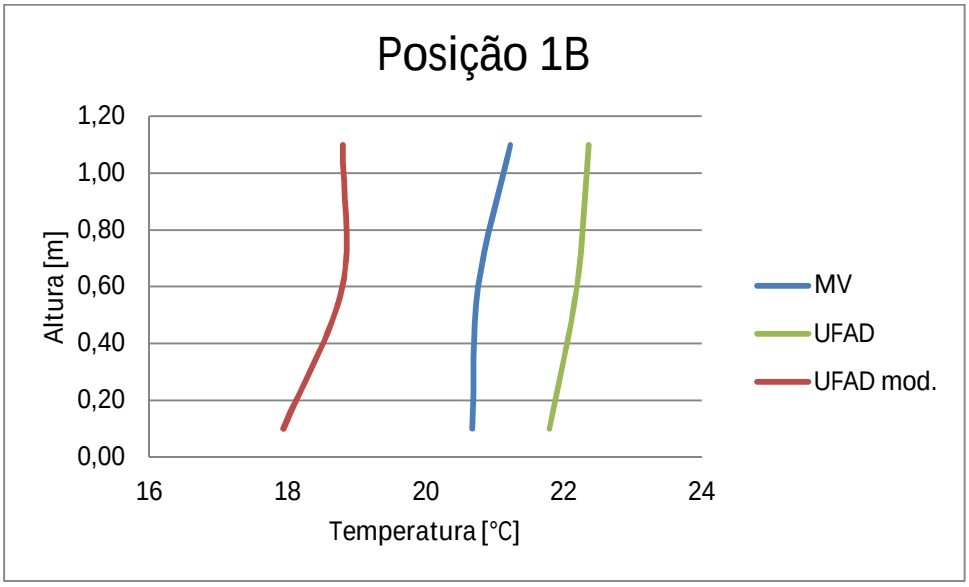


Figura 6.4 – Temperatura do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 18 °C.

O gráfico da Figura 6.3, posição 1B, mostra perfis similares aos da posição 1A. A diferença observada, para a arquitetura UFAD, consiste no aumento da velocidade em relação à posição 1A. Esse aumento pode ser explicado pela proximidade com a área de insuflamento de ar pelo piso no corredor central, principalmente para o nível inferior 0,10 m e para o nível de 0,60 m. Observa-se que mais uma vez a pluma térmica gerada pelo manequim aquecido influenciou nesse aumento. Essa diferença não foi observada para o nível superior, 1,10 m, pois há uma redução da pluma térmica. A

Figura 6.4 mostra a mesma homogeneidade da posição 1A. Não se observam diferenças significativas com a altura.

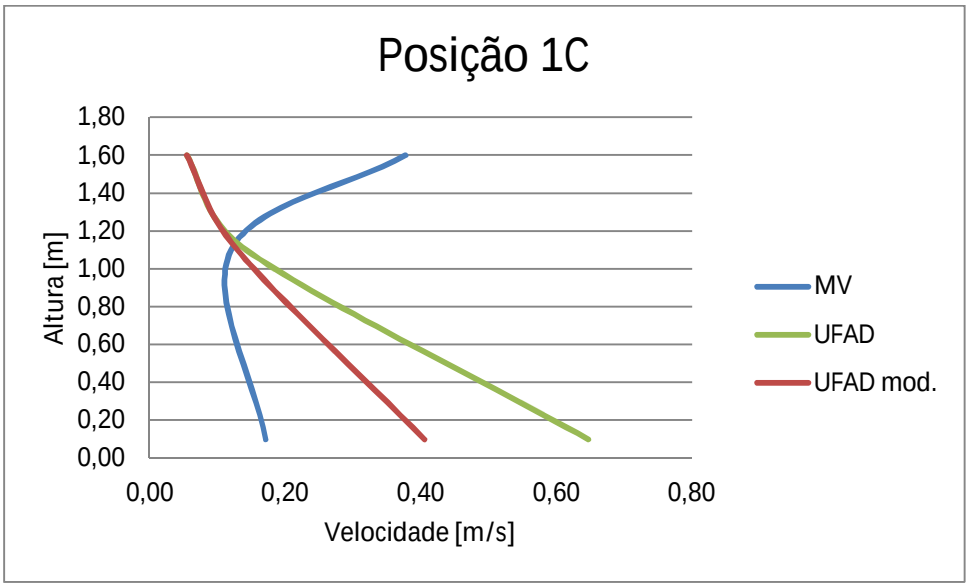


Figura 6.5 – Velocidade do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 18 °C.

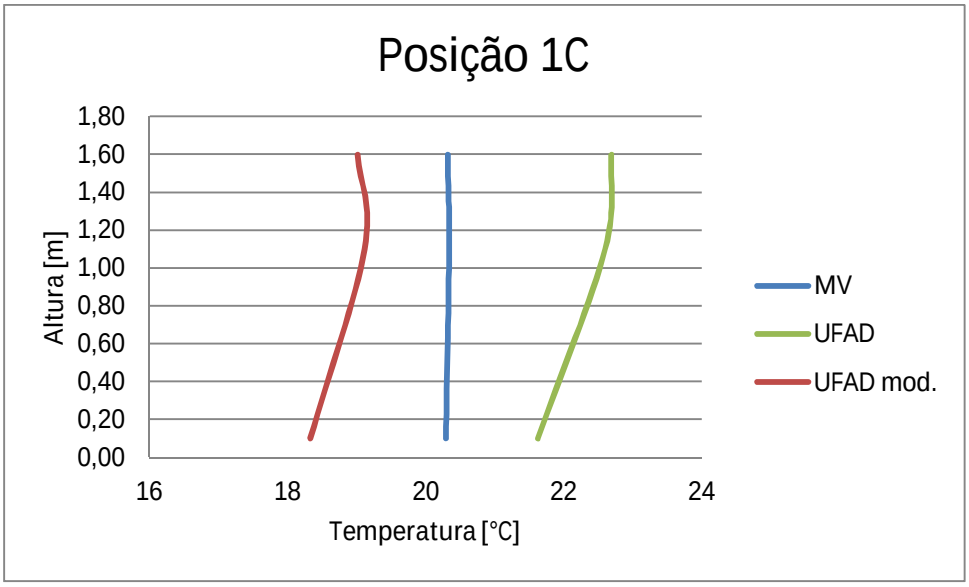


Figura 6.6 – Temperatura do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 18 °C.

As Figuras 6.5 e 6.6 representam a região do corredor central. Para a arquitetura UFAD, a velocidade do ar no nível inferior, 0,10 m, foi superior às posições anteriores, que é uma característica do insuflamento de ar pelo piso. Observa-se também que a velocidade diminuiu gradativamente para as alturas de 1,10 m e 1,60 m. Entretanto, devido à arquitetura UFAD modificado apresentar parte da característica da arquitetura pelo piso, esperava-se que também ocorreria um aumento da velocidade, principalmente no nível

inferior. A não ocorrência desse fato está relacionada com a divisão do fluxo de ar dessa arquitetura. A temperatura do ar apresentou as mesmas características das posições anteriores com um acréscimo para a arquitetura UFAD modificado. Essa diferença pode ser relacionada com o deslocamento do escoamento de ar devido à parede estar mais distante (área de entrada da aeronave).

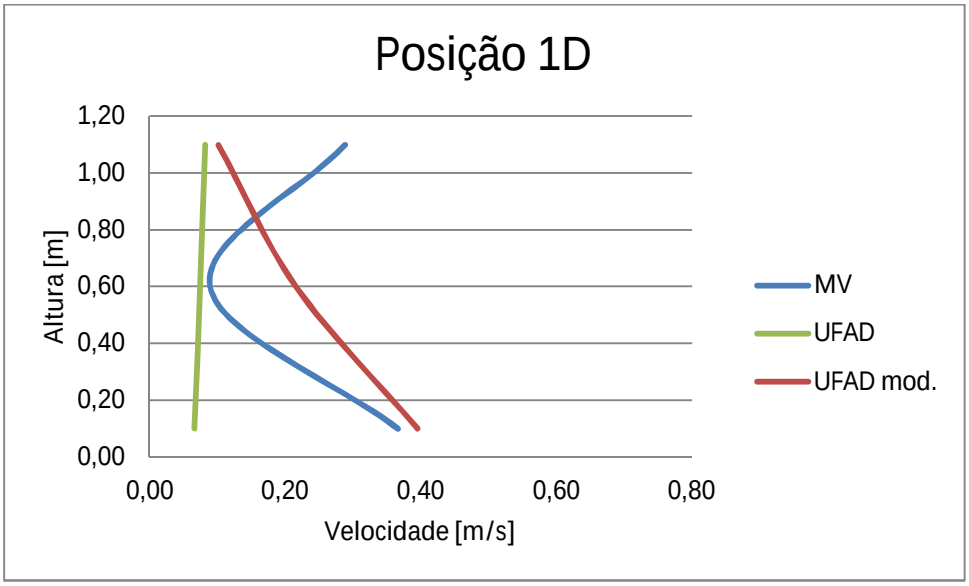


Figura 6.7 – Velocidade do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 18 °C.

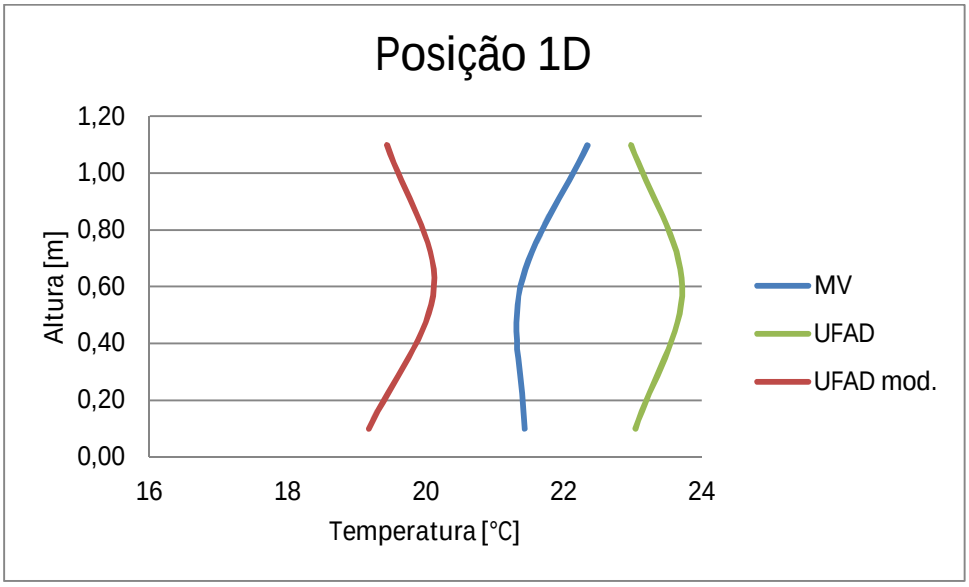


Figura 6.8 – Temperatura do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.7 apresentou um perfil homogêneo para a arquitetura UFAD, variando de 0,07 m/s na altura de 0,10 m até 0,08 m/s para a altura de 1,10 m. Não foi observado o

efeito da pluma térmica na altura de 0,60 m. Entretanto, observa-se por meio da Figura 6.8 que a temperatura do ar medida foi de 23,7 °C. Observa-se também que a temperatura do ar para todas as arquiteturas foi maior que nas posições anteriores.

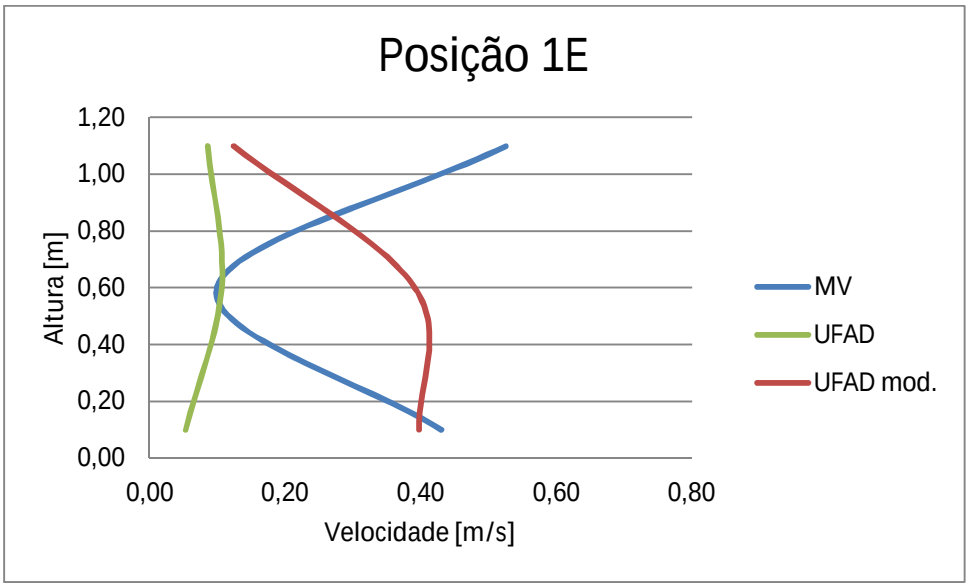


Figura 6.9 – Velocidade do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

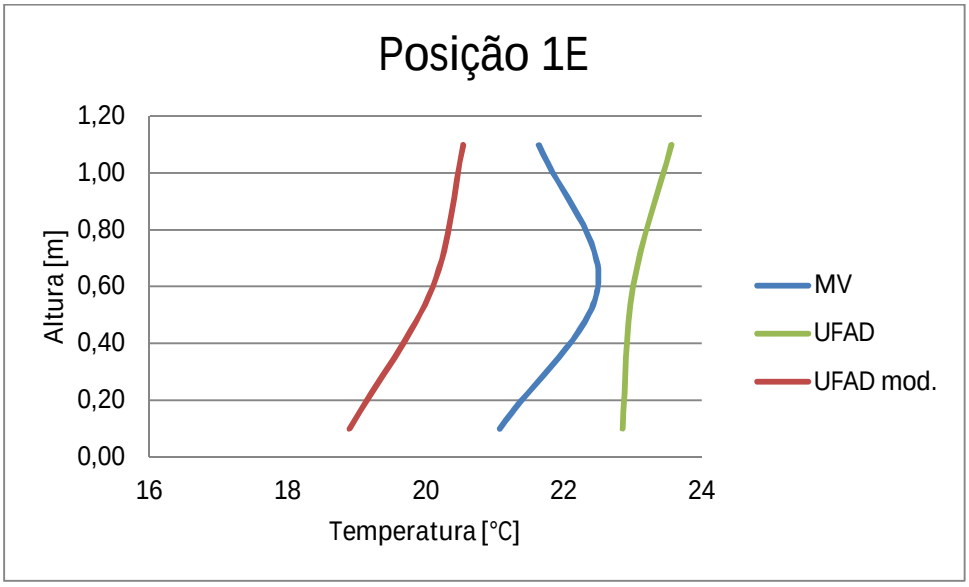


Figura 6.10 – Temperatura do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam perfis similares às outras posições com um acréscimo de temperatura similar, porém superior à posição 1D. Além de ter ocorrido esse acréscimo, a homogeneidade não se manteve, embora tenha ocorrido uma estratificação da

temperatura menor que 3 °C, atendendo ao preconizado nas normas ASHARE 55 (2010) e ISO 7730 (2005). Observa-se também que o perfil de velocidade do ar para a arquitetura UFAD modificado sofreu um acréscimo na altura de 0,60 m. Esse acréscimo relaciona-se com a pluma térmica do manequim aquecido.

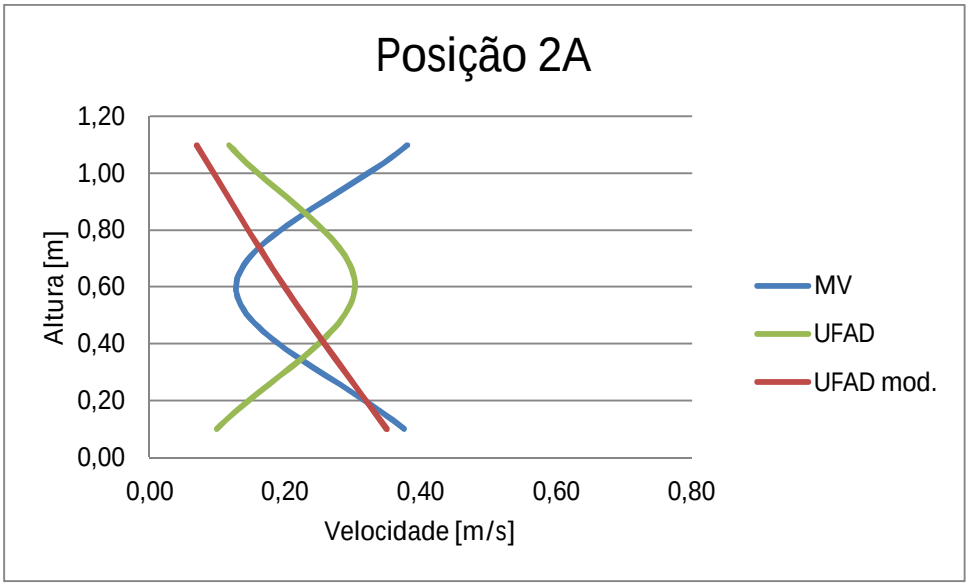


Figura 6.11 – Velocidade do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 18 °C.

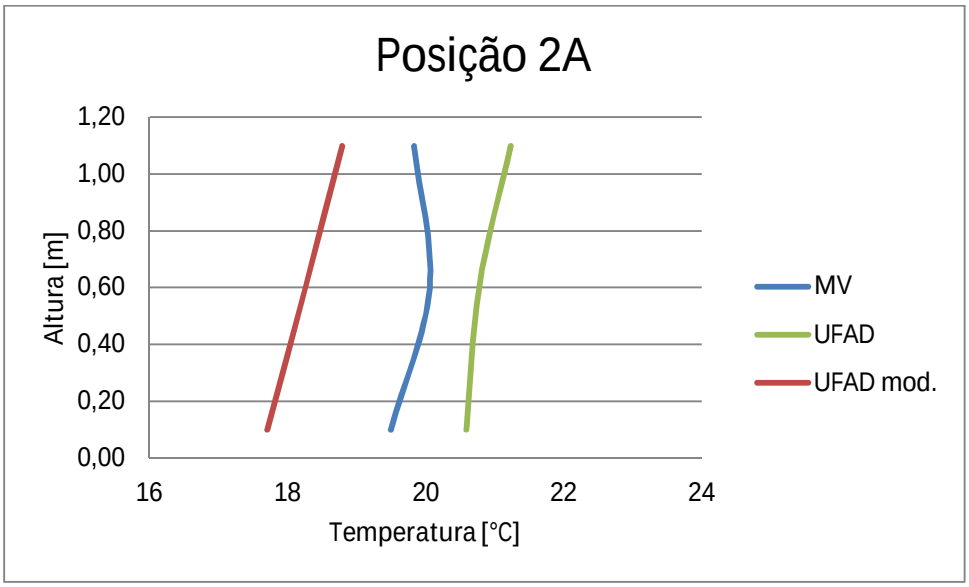


Figura 6.12 - Temperatura do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A análise da Figura 6.11 permite observar que as arquiteturas MV e UFAD apresentam perfis opostos, sendo a arquitetura UFAD influenciada pela pluma térmica na

altura de 0,60 m, enquanto a arquitetura MV não. A arquitetura UFAD modificado manteve o mesmo padrão em relação às outras posições. A Figura 6.12 também mostra homogeneidade nas temperaturas para cada uma das arquiteturas analisadas.

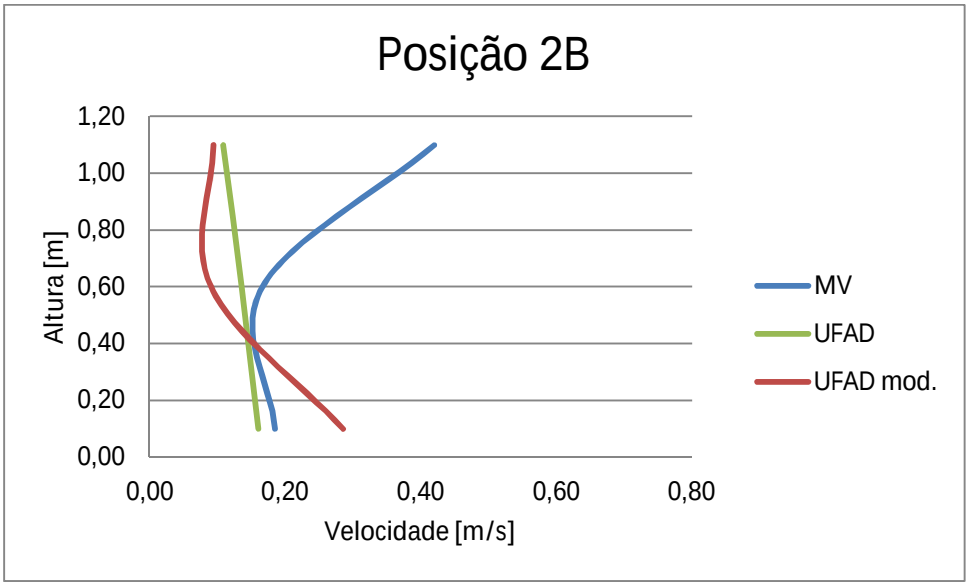


Figura 6.13 – Velocidade do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 18 °C.

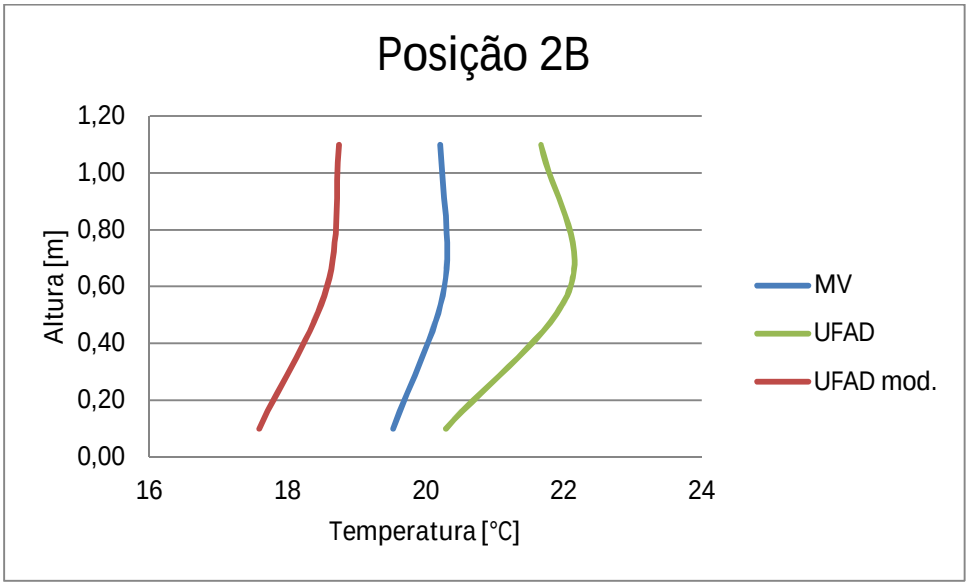


Figura 6.14 – Temperatura do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 18 °C.

As Figuras 6.13 e 6.14 representam a posição onde foi instalado o manequim térmico. Para a arquitetura pelo piso, não foi observada a influência da pluma térmica, principalmente para a altura de 0,60 m. O perfil de velocidade manteve-se homogêneo para essa arquitetura. Uma redução na intensidade da velocidade foi observada para o nível

inferior, região dos pés na arquitetura MV e UFAD modificado. Essa redução pode estar relacionada ao fato do manequim térmico possuir pés, enquanto os manequins aquecidos não. A temperatura do ar manteve a homogeneidade para as arquiteturas MV e UFAD modificado e apresentou uma diferença próxima a 2 °C entre as alturas de 0,10 e 0,60 m. Em relação à altura de 1,10 m essa diferença foi menor.

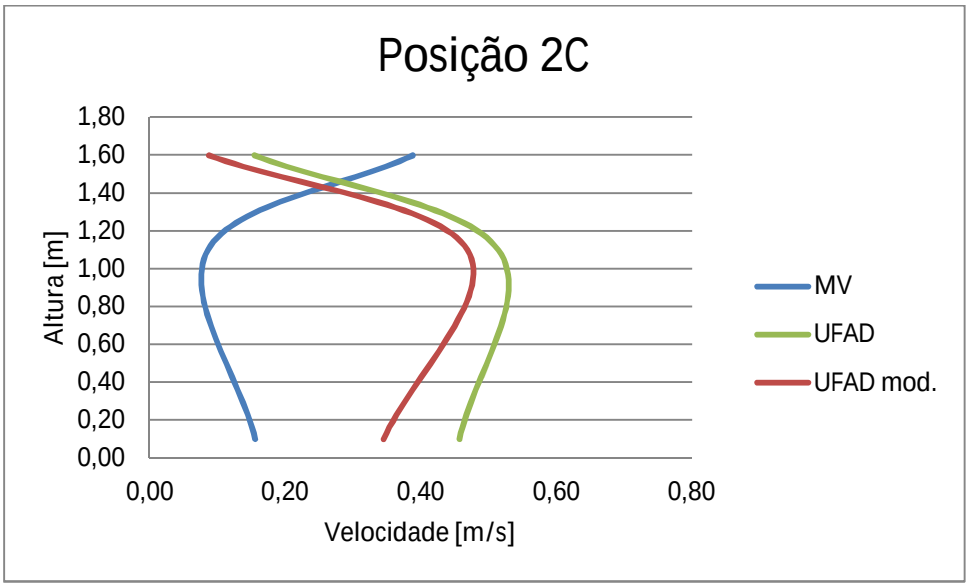


Figura 6.15 – Velocidade do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 18 °C.

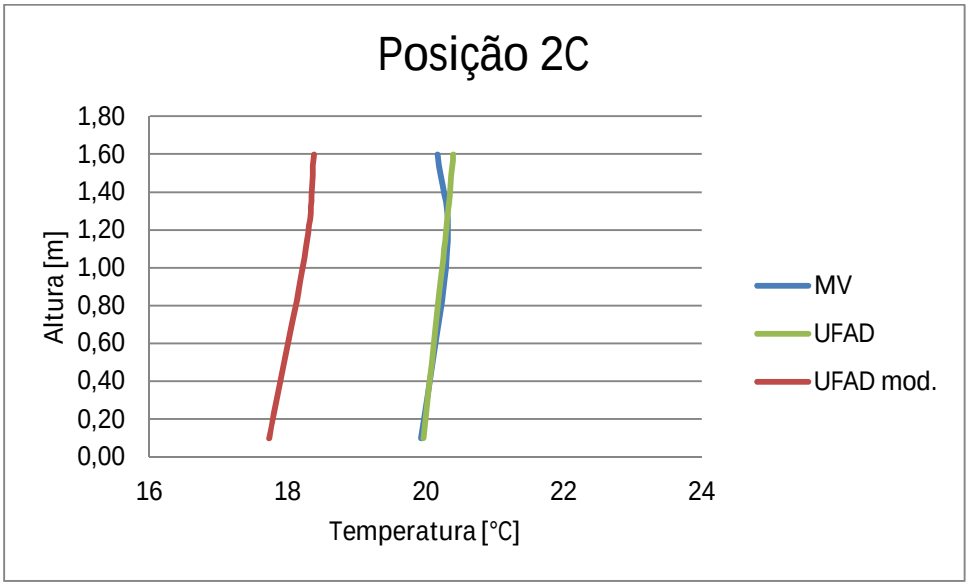


Figura 6.16 – Temperatura do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.15 representa a posição 2C e apresentou um perfil diferente da posição 1C. Embora haja diferença entre os perfis das posições do corredor central, as

características de cada arquitetura se mantiveram. As arquiteturas UFAD e UFAD modificado apresentam valores elevados de velocidade na altura de 0,10 m e 1,10 m e diminuem conforme se aproxima da altura de 1,60 m. Já a arquitetura MV apresentou um comportamento oposto às demais. Esse comportamento está relacionado às características desse tipo de arquitetura, pois a região superior está próxima à área de insuflamento. A Figura 6.16 apresentou a mesma homogeneidade das posições anteriores.

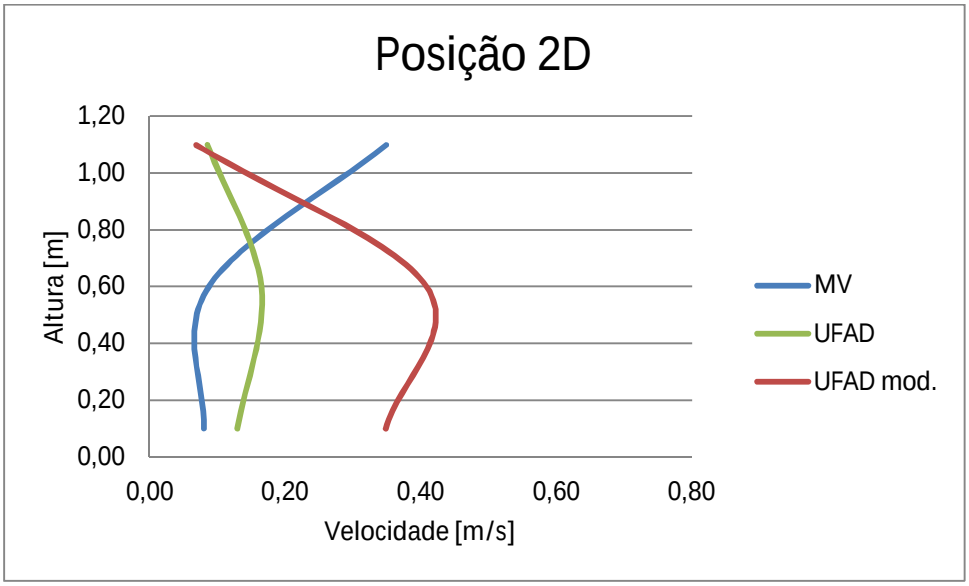


Figura 6.17 – Velocidade do ar na posição 2D para temperatura de insuflamento de 18 °C.

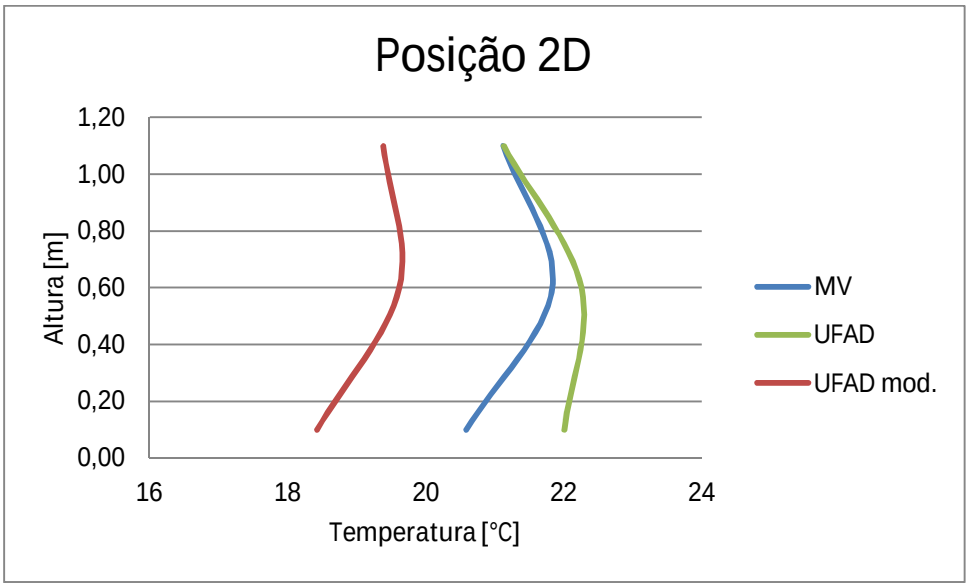


Figura 6.18 – Temperatura do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.17 apresenta um perfil similar ao das outras posições, com uma diferença na arquitetura MV, onde a velocidade do ar na altura de 0,10 m ficou próxima a 0,08 m/s. Para as arquiteturas UFAD e UFAD modificado, observa-se a influência da pluma térmica na altura de 0,60 m. A Figura 6.18 não apresentou a mesma homogeneidade em relação às outras posições. Diferenças de 1 °C e 2 °C foram observadas para as alturas de 0,10 m e 0,60 m nas arquiteturas MV e UFAD modificado. Diferença de 1 °C entre as alturas de 0,60 m e 1,10 m foi observada para a arquitetura UFAD.

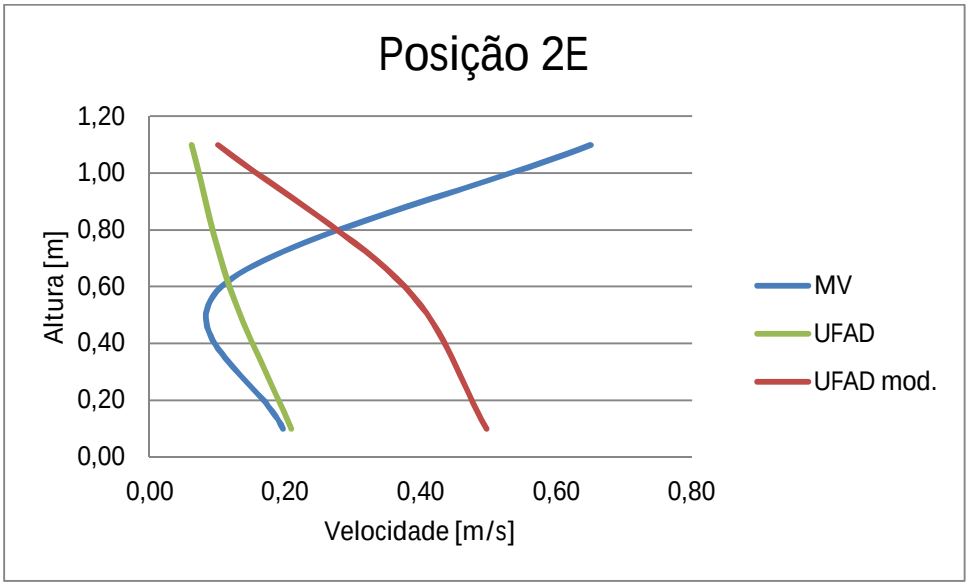


Figura 6.19 – Velocidade do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

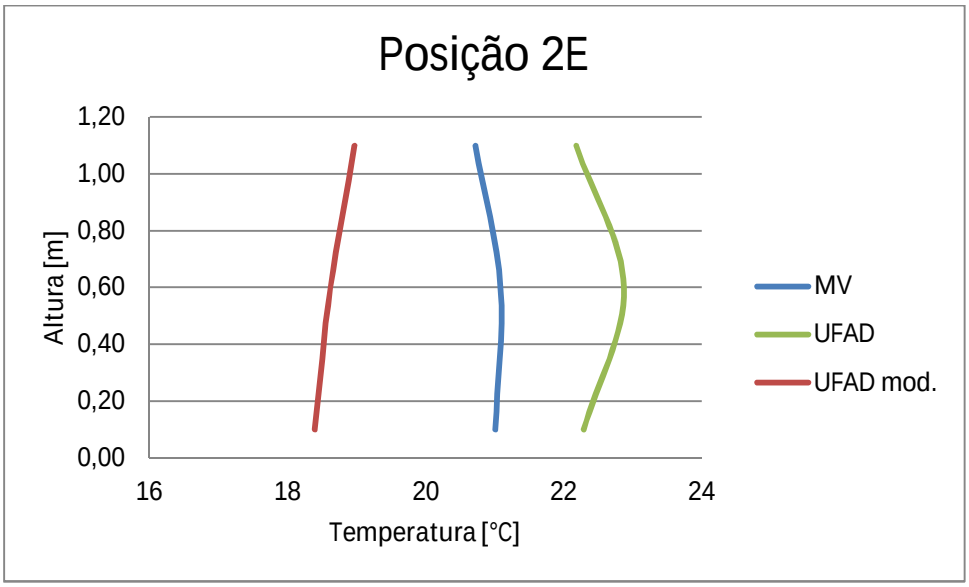


Figura 6.20 – Temperatura do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.19 apresenta um perfil similar ao da posição 1D, porém sem a influência da pluma térmica para as arquiteturas MV e UFAD. Para a arquitetura MV a velocidade do ar apresenta valores superiores a 0,60 m/s na altura de 1,10 m. Nessa posição não há a influência da parede frontal, conforme observado na posição 1E, e a diferença na velocidade do ar na altura de 1,10 m em relação à posição 2A foi superior a 0,20 m/s. A Figura 6.20 mostra a manutenção da homogeneidade da temperatura para as alturas de 0,10 m, 0,60 m e 1,10 m.

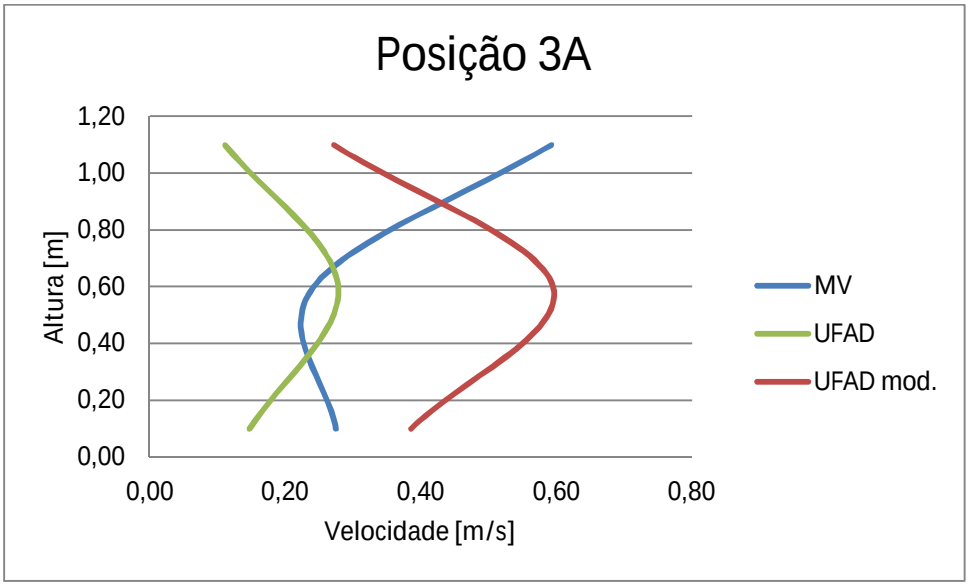


Figura 6.21 – Velocidade do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 18 °C.

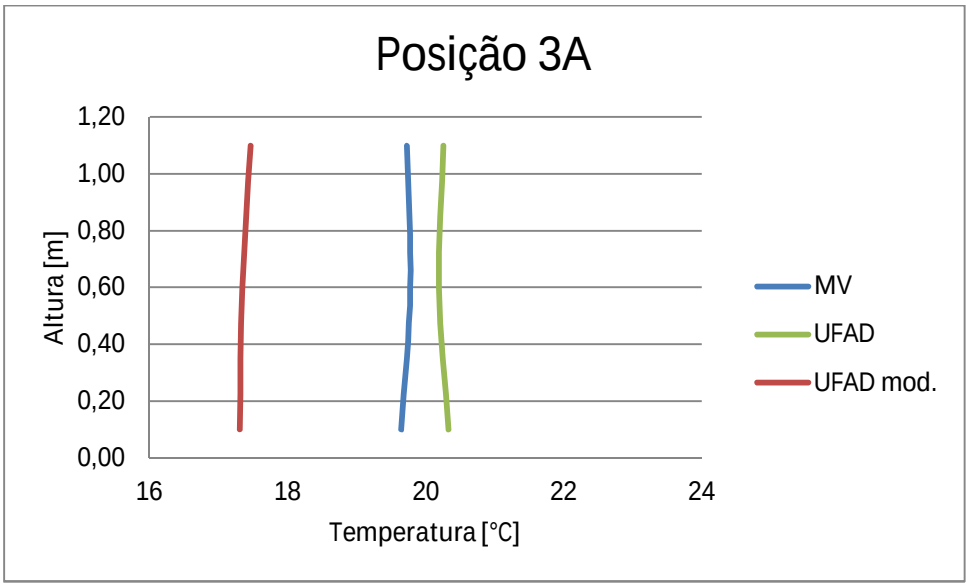


Figura 6.22 – Temperatura do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.21 apresenta a influência da pluma térmica na altura de 0,60 m para as arquiteturas UFAD e UFAD modificado. A Figura 6.21 também permite observar velocidades próximas a 0,60 m/s na região central, altura de 0,60 m da arquitetura UFAD modificado e região superior, altura de 1,10 m da arquitetura MV. Na Figura 6.22 é possível observar uma homogeneidade para as três arquiteturas em estudo. Nessa posição os valores foram quase constantes ao longo das alturas de 0,10 m, 0,60 m e 1,10 m.

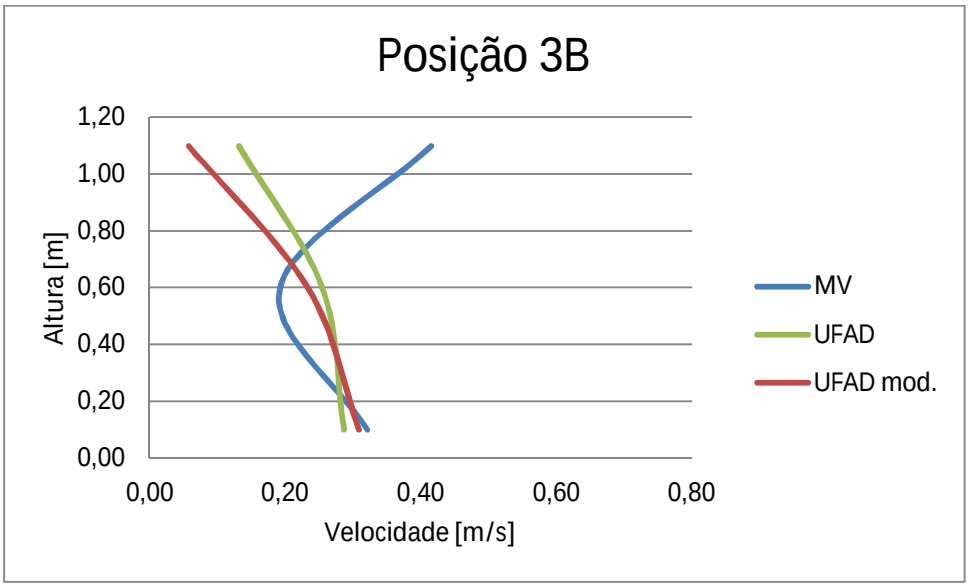


Figura 6.23 – Velocidade do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 18 °C.

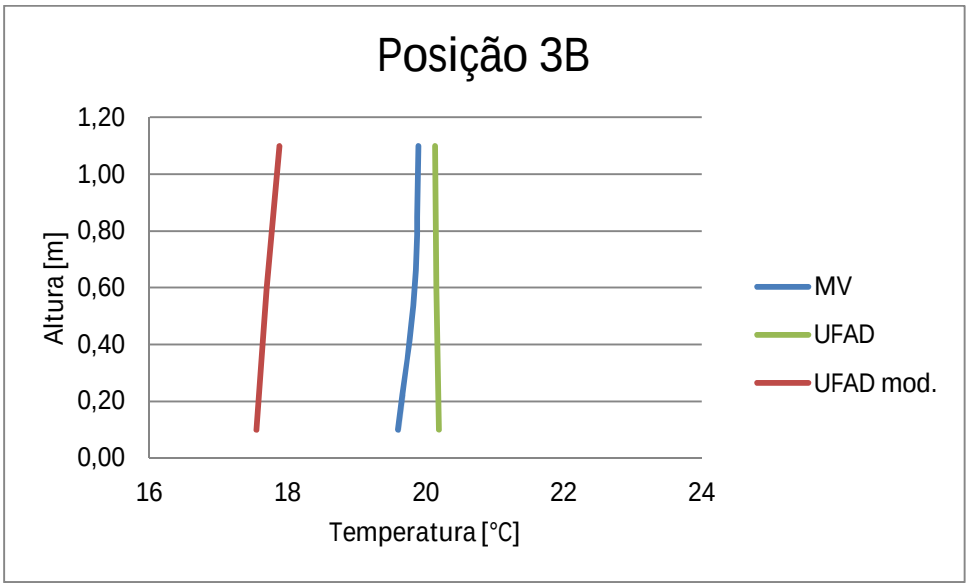


Figura 6.24 – Temperatura do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.23 mostra velocidades superiores a 0,30 m/s para as três arquiteturas na região inferior, altura 0,10 m. Ao comparar com as posições anteriores, observa-se que apenas a arquitetura UFAD apresentou diferença na região dos pés. É possível identificar que há a influência da pluma térmica para a altura de 0,60 m, porém como a região dos pés apresentou velocidade superior a 0,30 m/s, o efeito da pluma térmica é diminuído. A homogeneidade da temperatura do ar para as três arquiteturas pode ser observada pela Figura 6.24, com os valores se mantendo praticamente constante ao longo das alturas.

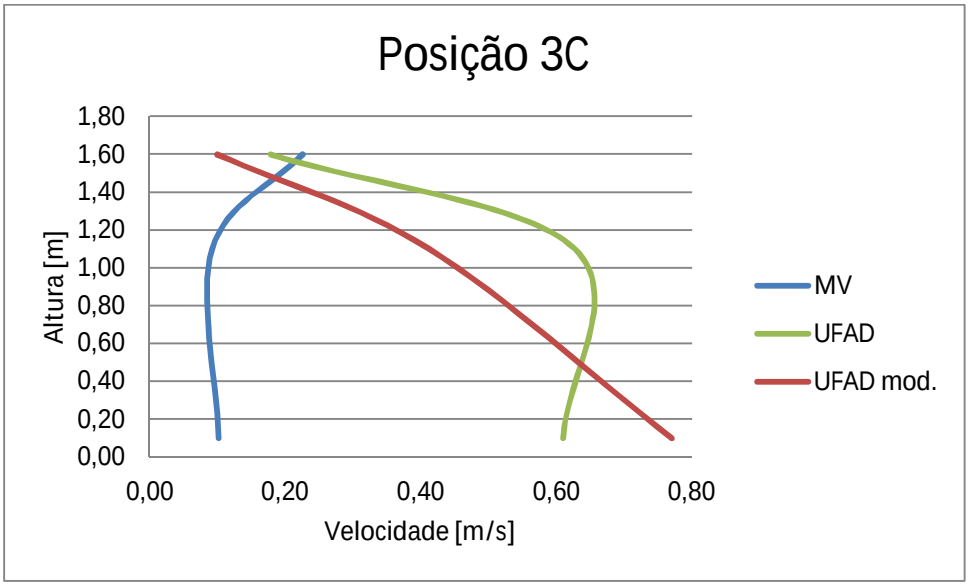


Figura 6.25 – Velocidade do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 18 °C.

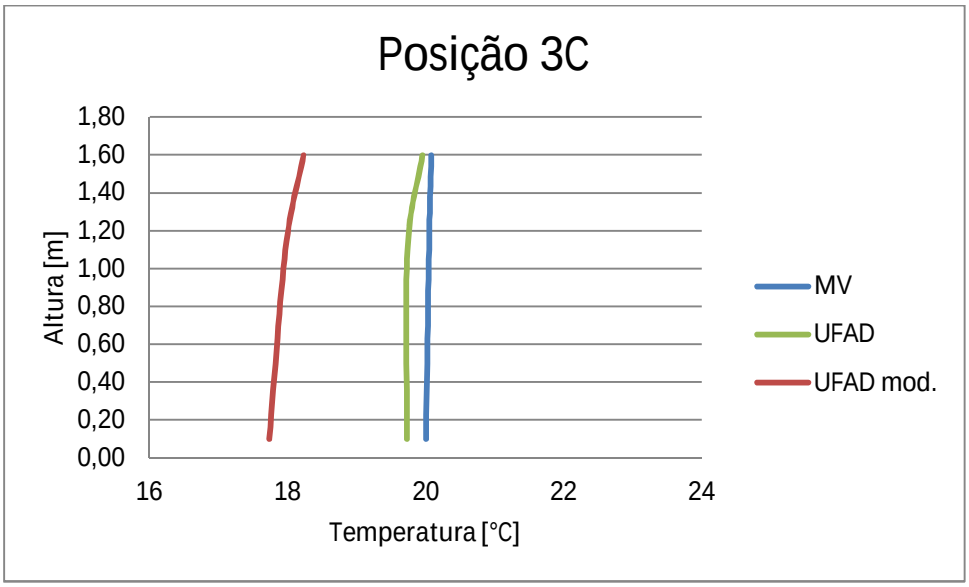


Figura 6.26 – Temperatura do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A Figura 6.25 apresentou velocidade do ar de 0,77 m/s para a arquitetura UFAD modificado, na altura de 0,10 m diminuindo para 0,10 m/s na altura de 1,60 m, ou seja, houve um Δv de 0,67 m/s. A arquitetura UFAD modificado apresentou um perfil similar à arquitetura UFAD, velocidade na região dos pés superior à velocidade na região da cabeça, com diferença na região central, altura de 1,10 m. Entretanto, esse perfil era esperado para as posições do corredor central. A arquitetura MV também apresentou o perfil esperado. A Figura 6.26 permite observar a homogeneidade da temperatura do ar ao longo das alturas.

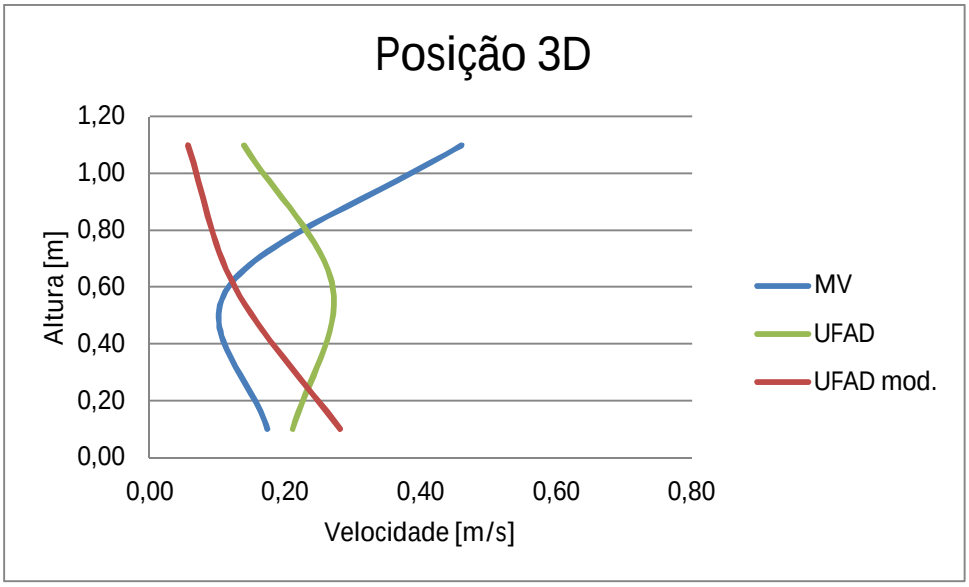


Figura 6.27 – Velocidade do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 18 °C.

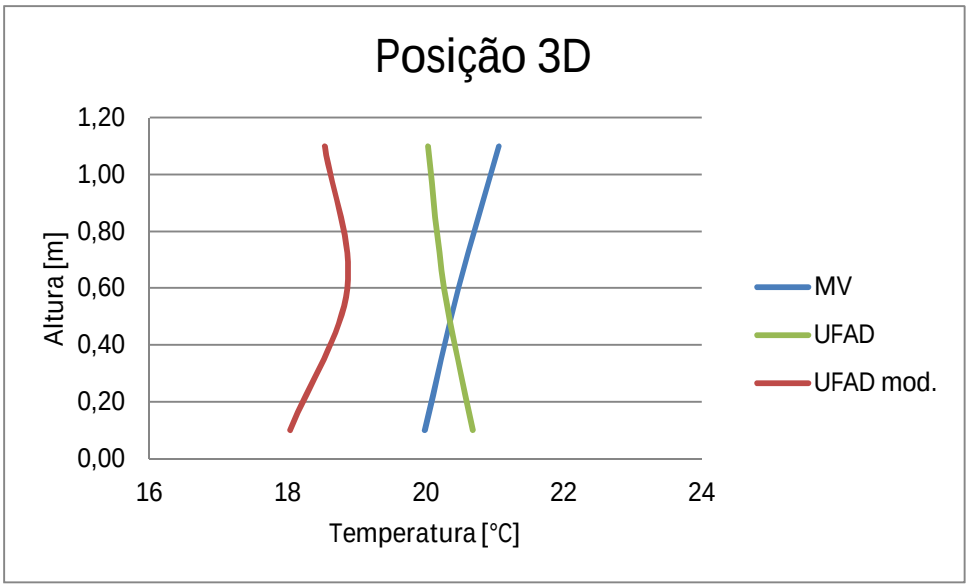


Figura 6.28 – Temperatura do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 18 °C.

A análise da Figura 6.27 permite observar que as arquiteturas UFAD e UFAD modificado apresentam velocidades maiores na região dos pés e diminuem na região da cabeça. Observa-se o efeito da pluma térmica na região central da arquitetura UFAD. A arquitetura MV apresentou maior velocidade do ar na região da cabeça e menor velocidade na região dos pés. A Figura 6.28 mostrou a homogeneidade da temperatura com diferença de aproximadamente 1 °C entre a região dos pés e a região da cabeça para as arquiteturas MV e UFAD. A arquitetura UFAD modificado apresentou uma diferença inferior a 1 °C entre a altura de 0,10 m e 0,60 m, mantendo-se constante entre a altura de 0,60 m e 1,10 m.

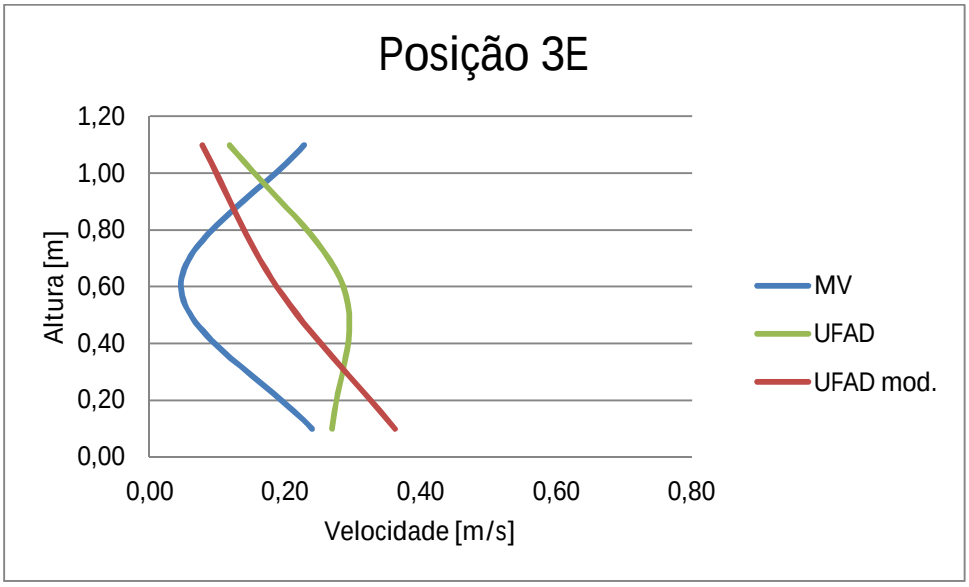


Figura 6.29 – Velocidade do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

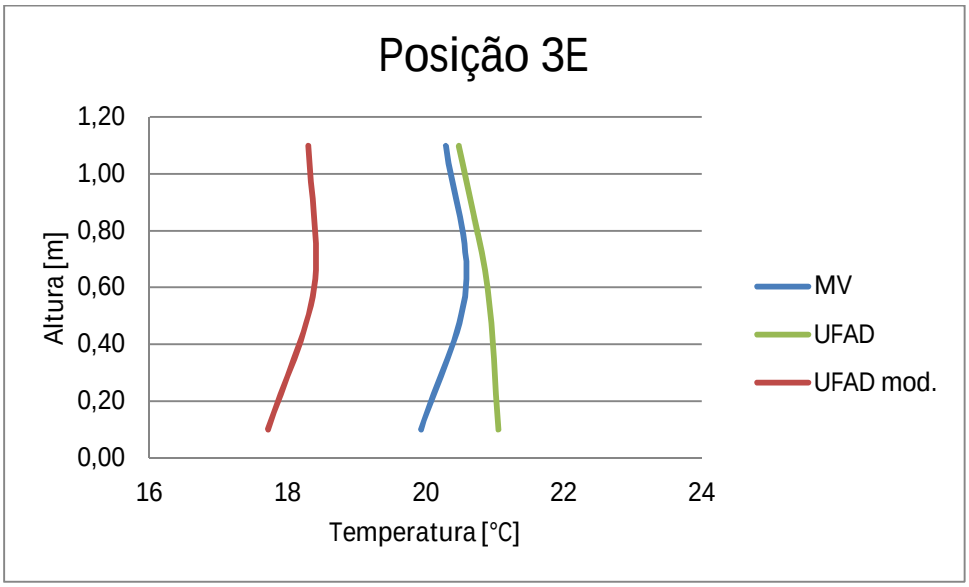


Figura 6.30 – Temperatura do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 18 °C.

As Figuras 6.29 e 6.30 apresentam perfis similares às posições anteriores, tanto para a velocidade do ar quanto para a temperatura do ar.

Nas Figuras 6.31 e 6.32 são apresentados os perfis de velocidade do ar considerando todas as posições na cabine para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C

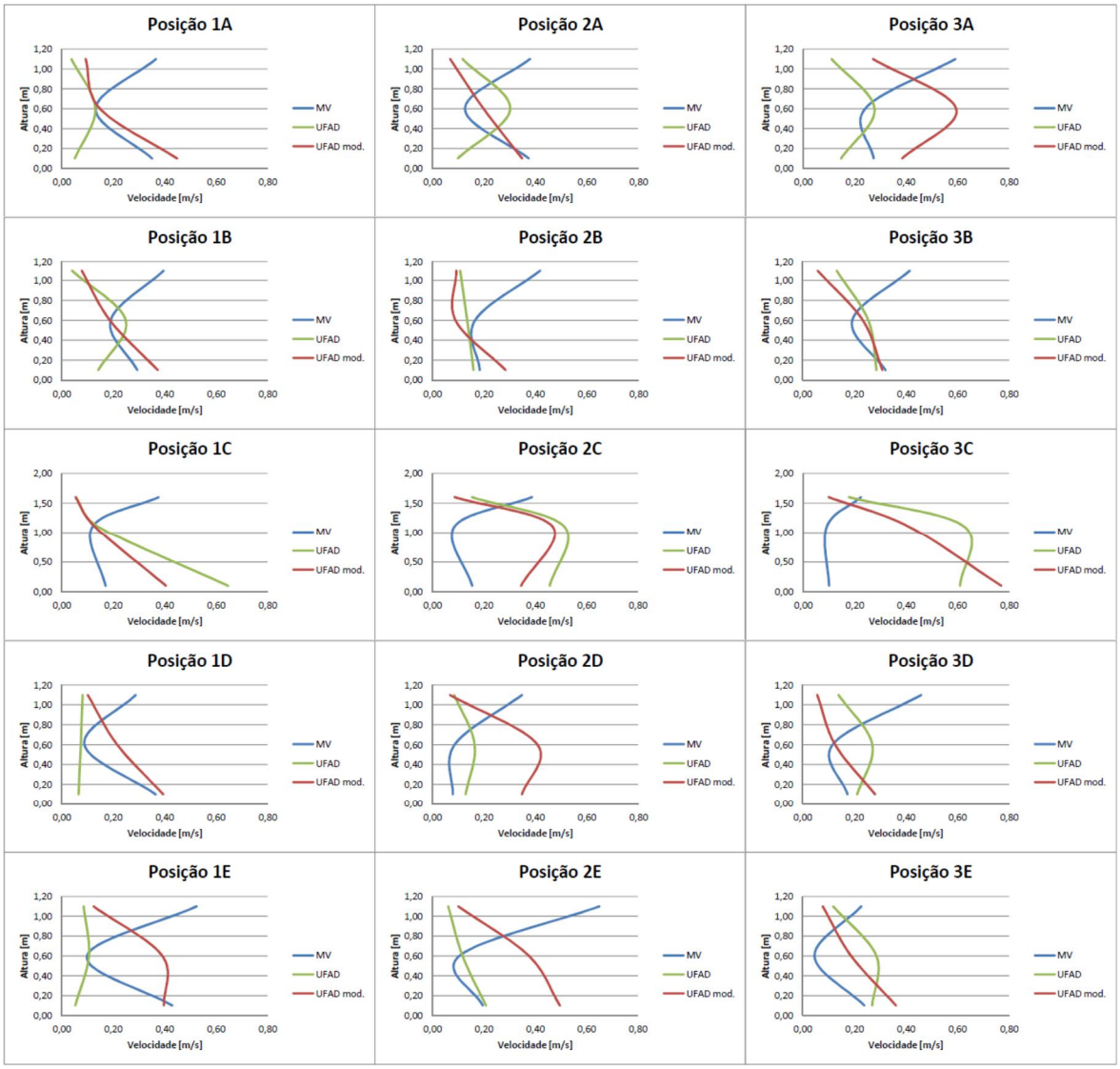


Figura 6.31 – Perfis de velocidade do ar em todas as posições na cabine para temperatura de insuflamento de 18 °C.

Na análise da Figura 6.31 verifica-se a ocorrência de um padrão de simetria dos perfis de velocidade em relação à coluna C. De forma geral, os perfis de velocidade para a arquitetura MV apresentam velocidades maiores na região da cabeça, próxima à área de insuflamento, com redução na região das coxas, mãos e antebraços, aumentando novamente na região dos pés. A arquitetura UFAD apresenta perfis bem definidos de baixa velocidade na região dos pés, aumento da velocidade na região das coxas, mãos e

antebraços, devido à pluma térmica, com redução na região da cabeça. A arquitetura UFAD modificada não apresentou perfis definidos, apresentando perfis similares à arquitetura MV em algumas posições e à arquitetura UFAD em outras.

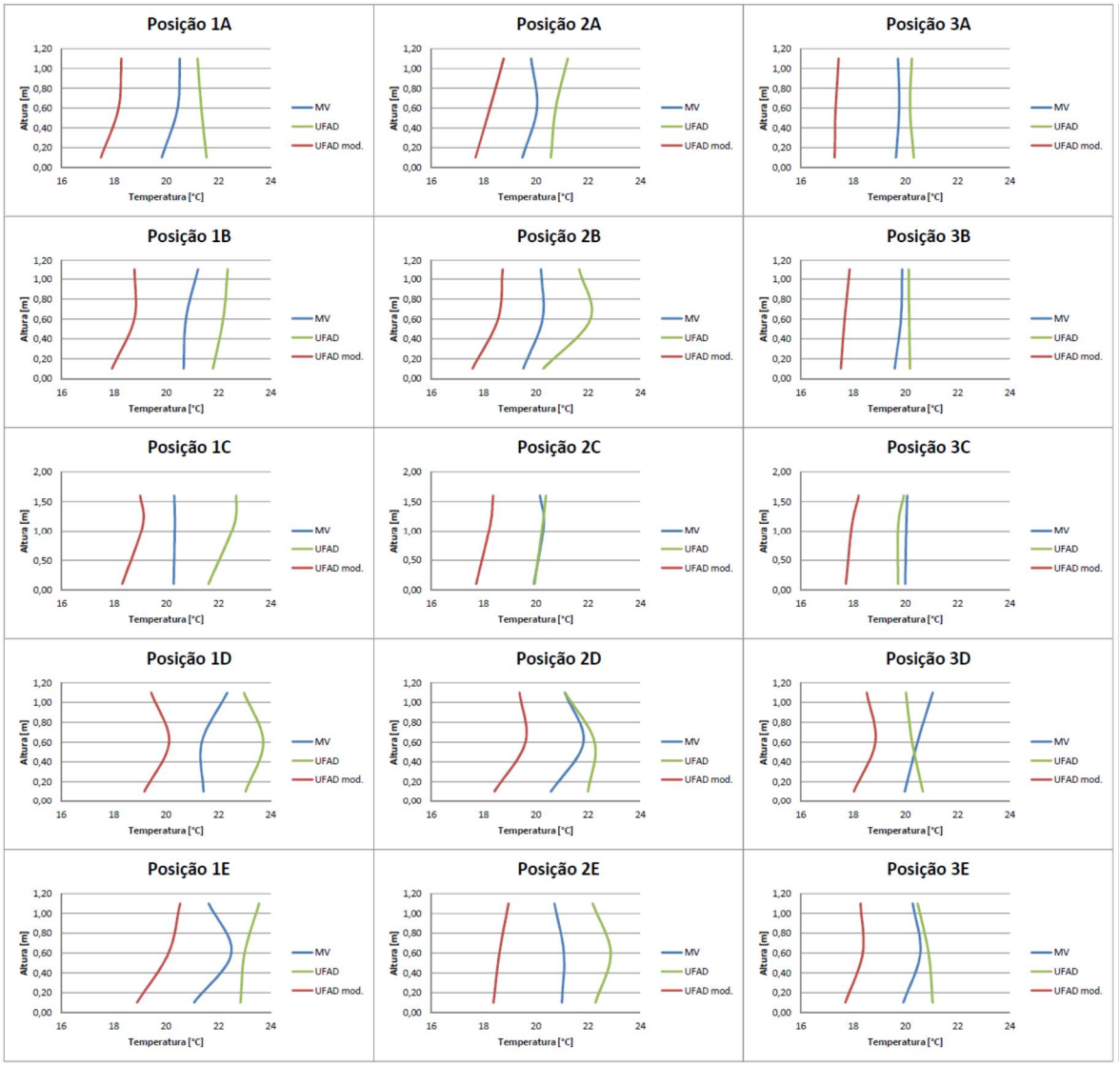


Figura 6.32 – Perfis de temperatura do ar em todas as posições na cabine para temperatura de insuflamento de 18 °C.

Nos resultados da Figura 6.32 verifica-se a ocorrência de homogeneidade da temperatura em todas as posições, para as três arquiteturas estudadas. Em geral, a temperatura do ar nas três arquiteturas foi uniforme entre as colunas.

Uma análise geral das posições 1A a 3E para a temperatura de insuflamento de ar igual a 18 °C, Figuras 6.1 a 6.32, permite verificar que:

a) As condições de desconforto térmico local, ocasionadas por estratificação de temperatura, atendem ao preconizado nas normas ASHRAE 55 (2010) e ISO 7730 (2005), com valores máximos inferiores a 3 °C entre a região dos pés e a região da cabeça nas três arquiteturas analisadas. Embora a estratificação da temperatura seja um fenômeno associado ao insuflamento pelo piso, a sua influência não foi significativa nas três arquiteturas analisadas, com valores máximos de 1,4 °C para a arquitetura MV, de 1,8 °C para a arquitetura UFAD e de 1,6 °C para a arquitetura UFAD modificado.

6.1.2. Resultados para temperatura de insuflamento do ar de 22 °C

Neste item são apresentados os gráficos e as análises das condições térmicas na cabine para a temperatura de insuflamento de ar igual a 22 °C. A análise foi realizada com base nos resultados dos perfis de temperatura e velocidade do ar para cada posição, apresentados nos gráficos das Figuras 6.33 a 6.62.

Para uma visão geral das velocidades e temperaturas do ar em todas as posições, os perfis de velocidade e de temperatura do ar, em todas as posições da cabine, também são apresentados nas Figuras 6.63 e 6.64, respectivamente.

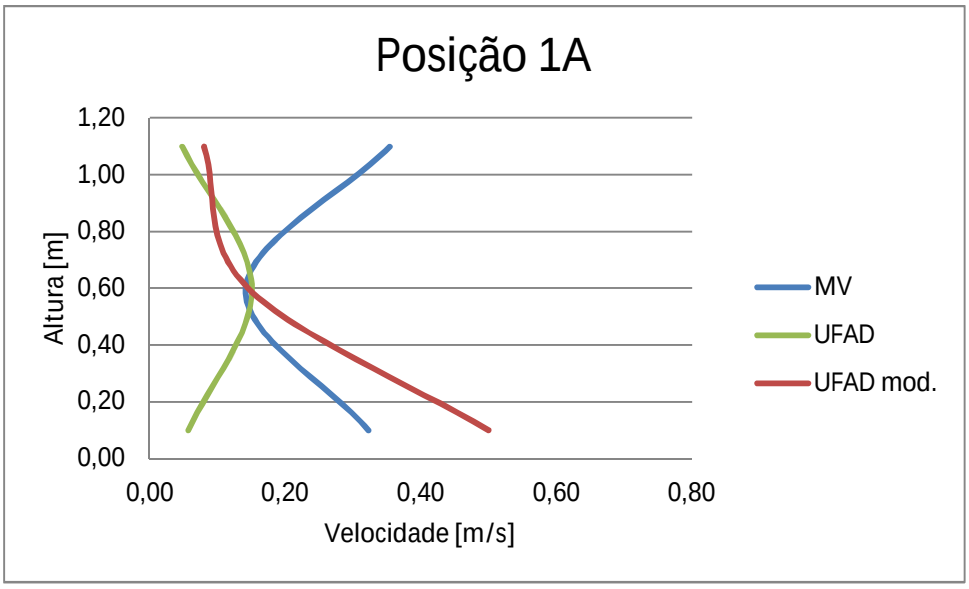


Figura 6.33 – Velocidade do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 22 °C.

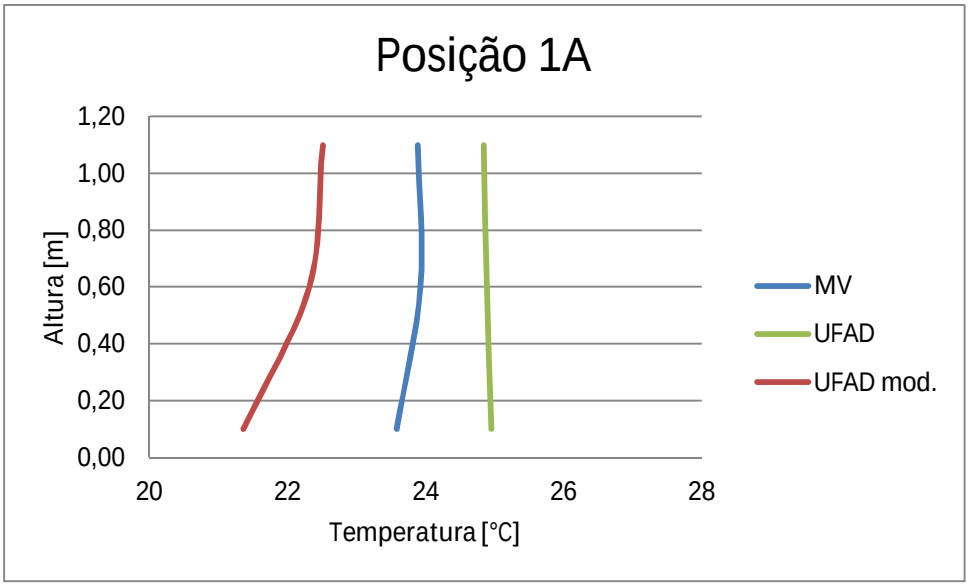


Figura 6.34 – Temperatura do ar na posição 1A para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.33 apresenta velocidades maiores na região dos pés e da cabeça e velocidade menor na altura de 0,60 m para a arquitetura MV. A arquitetura UFAD modificado apresenta velocidade maior na região dos pés e redução nas alturas de 0,60 m e 1,10 m. A arquitetura UFAD apresentou baixa velocidade na região dos pés, um acréscimo na altura de 0,60 m e voltou a apresentar baixa velocidade na região da cabeça. O acréscimo é devido à pluma térmica nessa altura. A Figura 6.34 mostra a homogeneidade das temperaturas do ar ao longo das alturas.

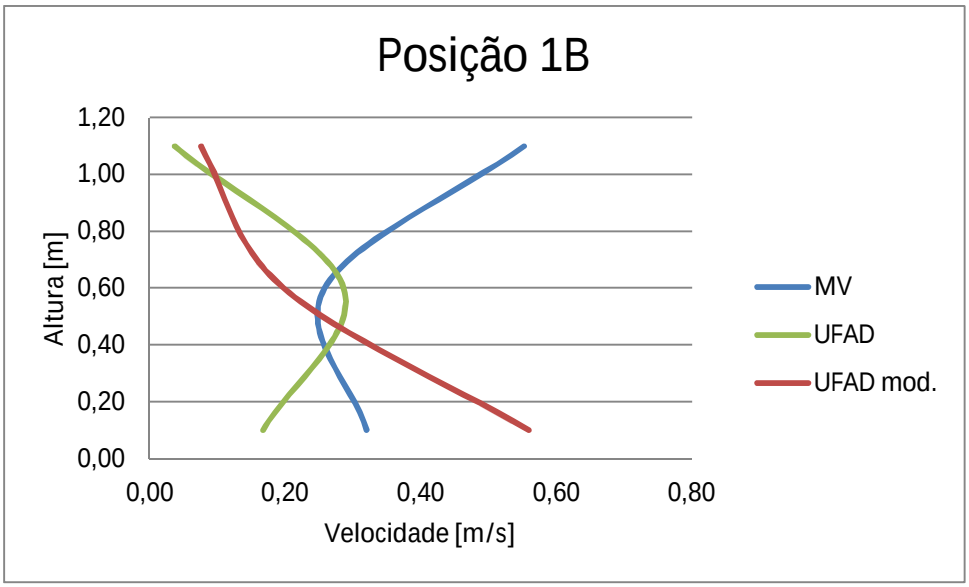


Figura 6.35 – Velocidade do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 22 °C.

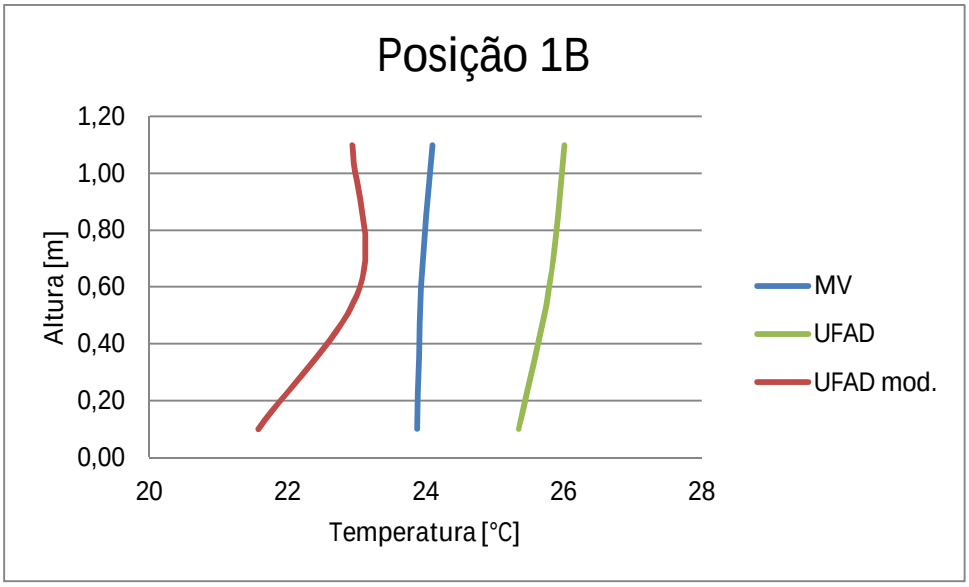


Figura 6.36 – Temperatura do ar na posição 1B para temperatura de insuflamento de 22 °C.

O gráfico da Figura 6.35 mostra perfis similares à posição 1A. Esse fato também foi observado para a temperatura de insuflamento do ar de 18 °C nessas posições. Os perfis da arquitetura MV e UFAD são opostos, enquanto a arquitetura UFAD apresenta baixa velocidade nas regiões dos pés e cabeça e aumenta, devido à pluma térmica, na região das coxas, mãos e antebraços, a arquitetura MV apresenta maiores velocidades nas regiões dos pés e cabeça e menor velocidade na região das coxas, mãos e antebraços. A arquitetura UFAD modificado apresenta um perfil intermediário, velocidade maior na região dos pés e redução constante nas regiões das coxas, mãos e antebraço e, posteriormente, na região da cabeça. Essa posição representa as características esperadas de cada arquitetura. A Figura 6.36 mostra a homogeneidade da temperatura para as arquiteturas MV e UFAD. Para a arquitetura UFAD modificado uma diferença de 1,5 °C foi observada entre as alturas de 0,10 m e 0,60 m.

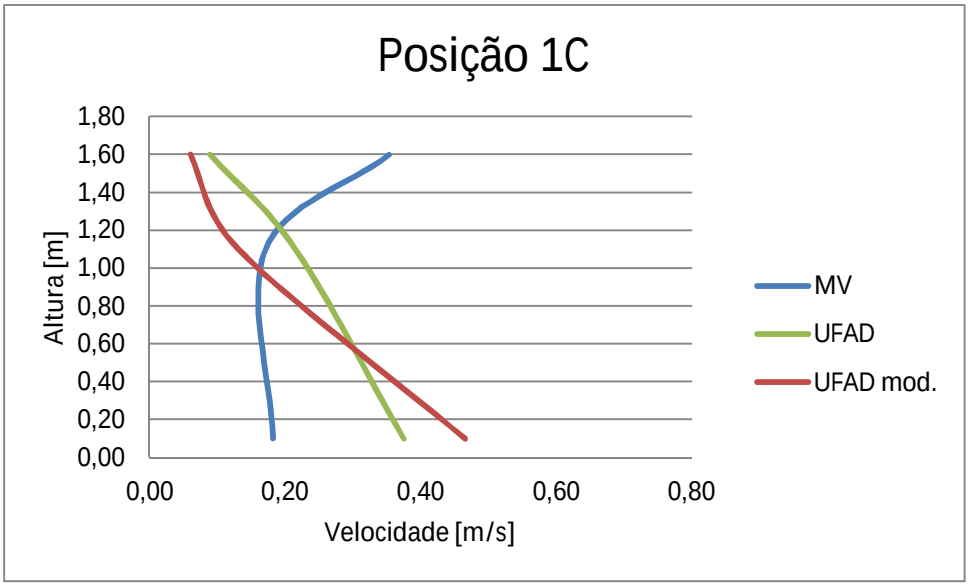


Figura 6.37 – Velocidade do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 22 °C.

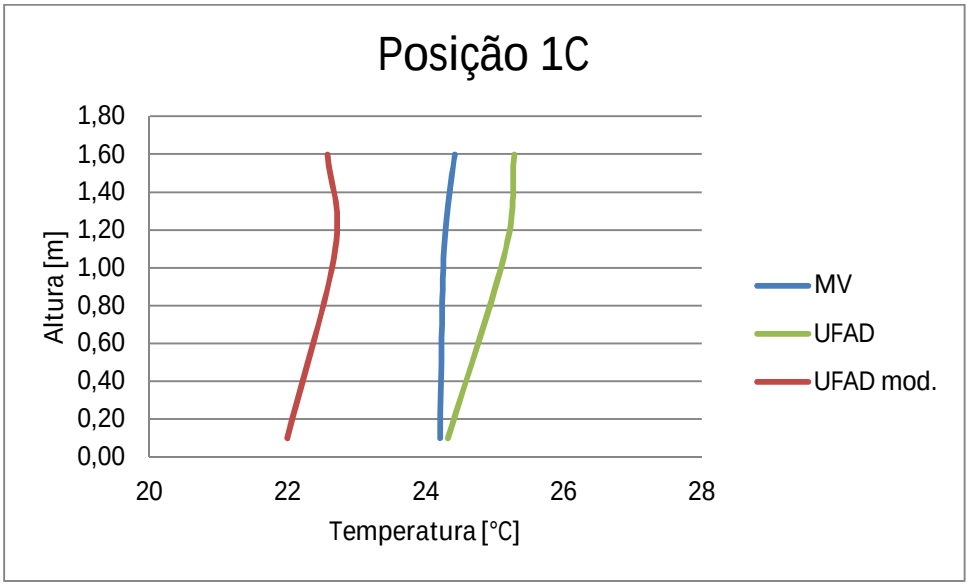


Figura 6.38 – Temperatura do ar na posição 1C para temperatura de insuflamento de 22 °C.

O perfil da Figura 6.37 representa as características esperadas para as posições do corredor. Arquitetura MV com velocidades menores nas alturas de 0,10 m e 1,10 m e maior velocidade na altura de 1,60 m. Arquiteturas UFAD e UFAD modificado velocidade maior na região dos pés e redução ao nível da cabeça. A Figura 6.38 não apresenta diferenças superiores a 1 °C nas temperaturas em relação às alturas.

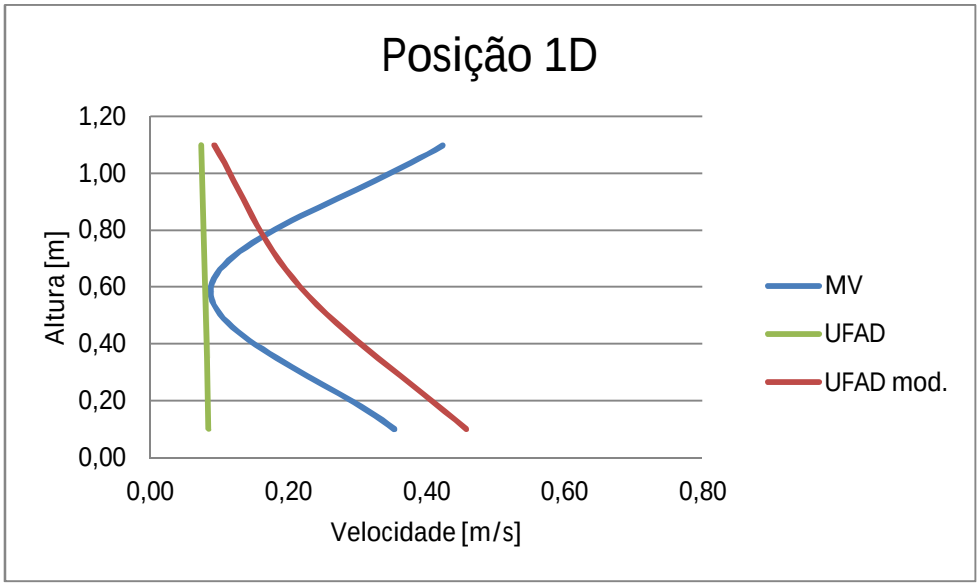


Figura 6.39 – Velocidade do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 22 °C.

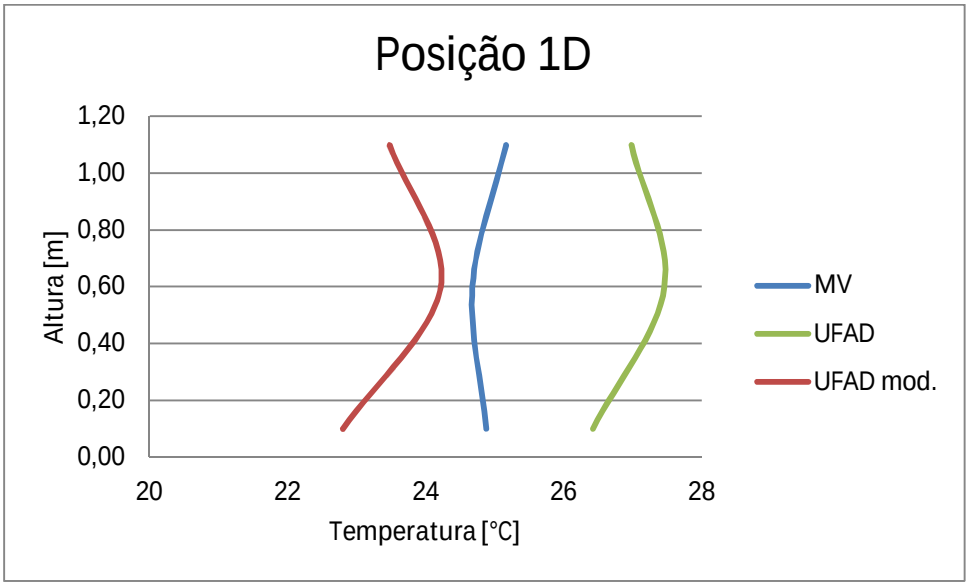


Figura 6.40 – Temperatura do ar na posição 1D para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.39 apresenta perfil de velocidades constante para a arquitetura UFAD, não se observando a influência da pluma térmica nessa arquitetura, principalmente na altura 0,60 m. Entretanto, a análise conjunta da Figura 6.40 mostra que nessa posição há um acréscimo da temperatura do ar ao longo das alturas de medição. Esse aumento da temperatura influenciou a pluma térmica do manequim aquecido nessa posição. Observou-se também que há uma diferença de aproximadamente 1 °C e 2 °C entre a altura de 0,10 m e de 0,60 m para a arquitetura UFAD e UFAD modificado, respectivamente.

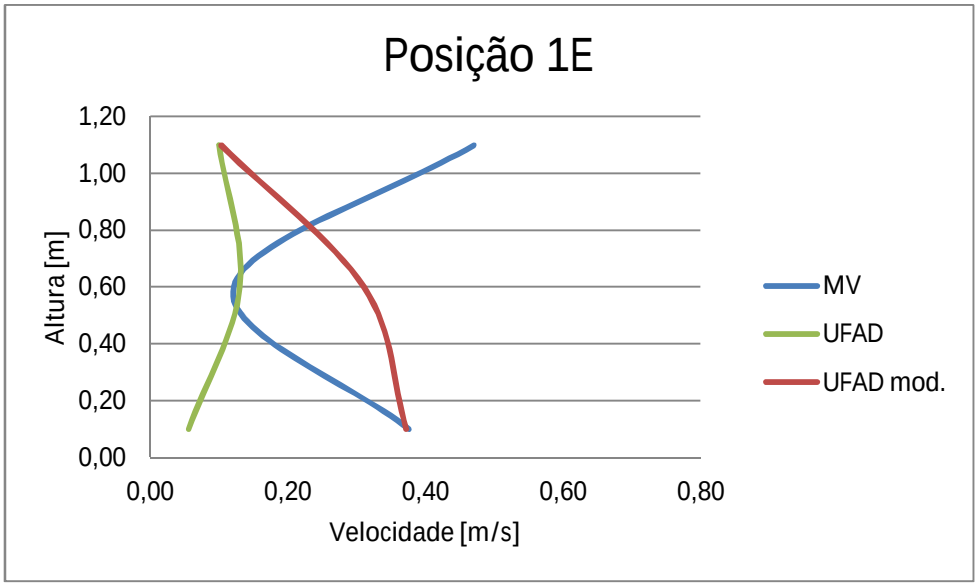


Figura 6.41 – Velocidade do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 22 °C.

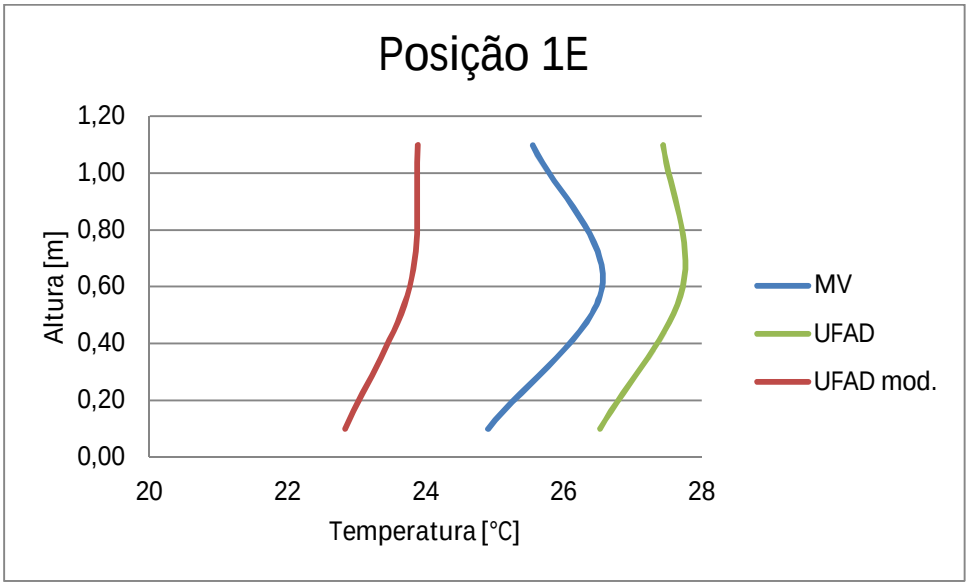


Figura 6.42 – Temperatura do ar na posição 1E para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.41 mostra perfis similares à posição 1D, porém com um acréscimo de velocidade na altura de 0,60 m da arquitetura UFAD, efeito da pluma térmica. A arquitetura UFAD modificado apresenta perfil similar à UFAD, com a diferença de maior velocidade na região dos pés. A arquitetura MV apresenta velocidade próxima a 0,50 m/s na região da cabeça, reduzindo para 0,12 m/s na região das coxas, mãos e antebraços e voltou a aumentar na região dos pés, 0,37 m/s. A Figura 6.42 mostra que há um acréscimo

da temperatura do ar na região das coxas, mãos e antebraços para as três arquiteturas. Na arquitetura MV esse acréscimo é de 1,6 °C.

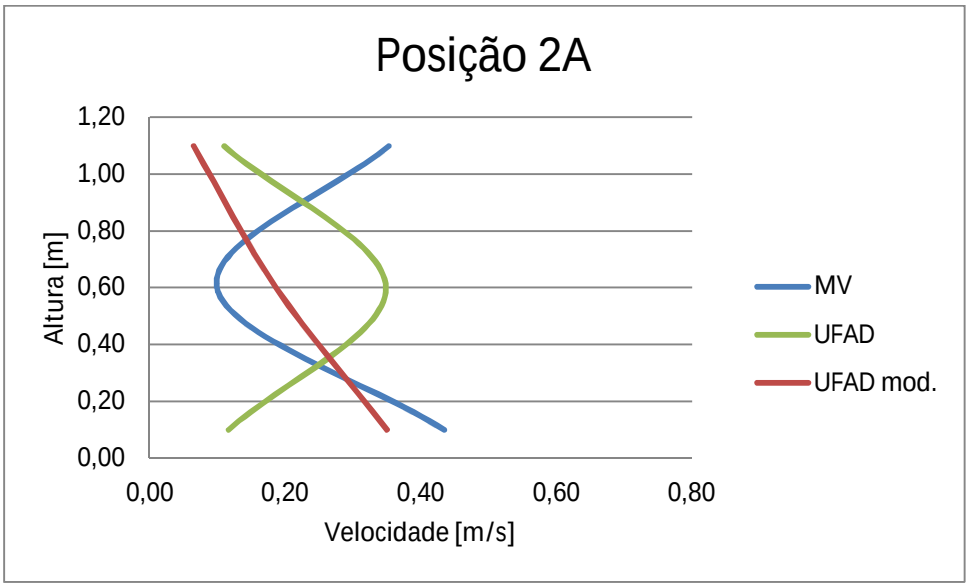


Figura 6.43 – Velocidade do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 22 °C.

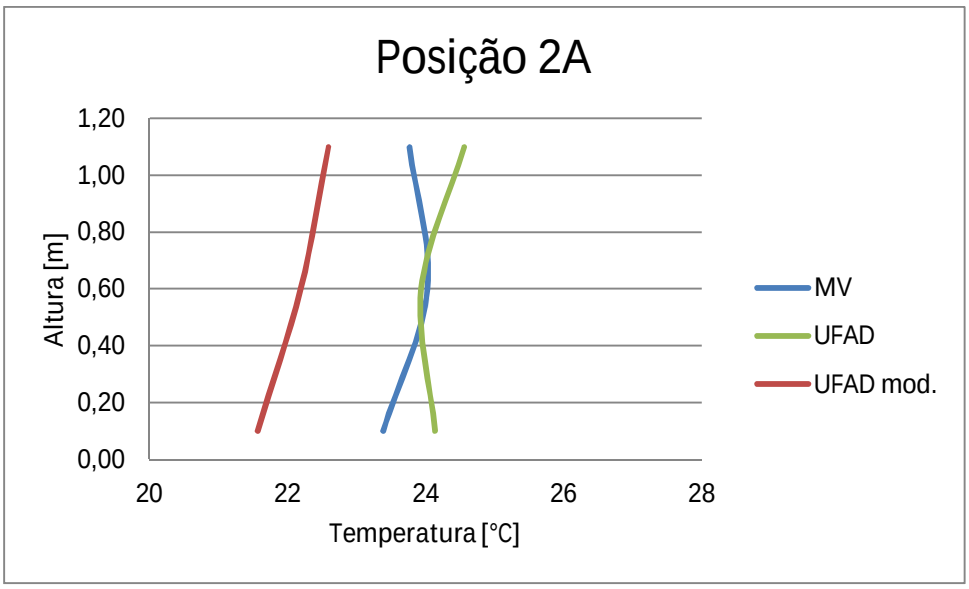


Figura 6.44 – Temperatura do ar na posição 2A para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.43 apresenta perfil oposto para as arquiteturas MV e UFAD. Na arquitetura UFAD, velocidades menores na região dos pés e cabeça e aumento na região das coxas, mãos e antebraço. A arquitetura MV, velocidades maiores nas regiões dos pés e cabeça e menor na região das coxas, mãos e antebraço. A arquitetura UFAD modificado apresenta perfil linear, com velocidade de 0,35 m/s na região dos pés, diminuindo para

0,19 m/s na região das coxas, mãos e antebraços e chegou a 0,06 m/s na região da cabeça. A Figura 6.44 apresenta diferença entre os pés e a cabeça de 1 °C para a arquitetura UFAD modificado e diferença inferior a 0,6 °C para as arquiteturas MV e UFAD.

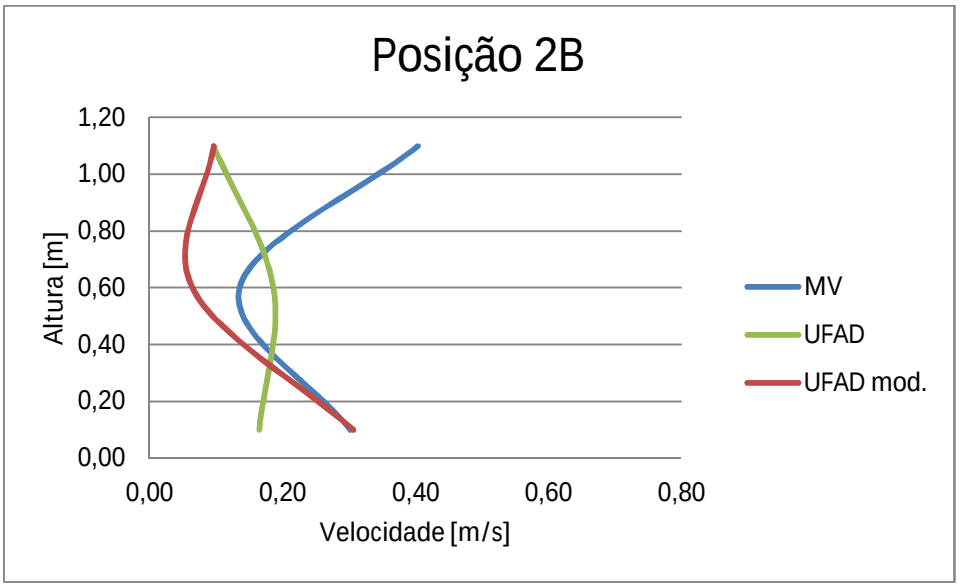


Figura 6.45 – Velocidade do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 22 °C.

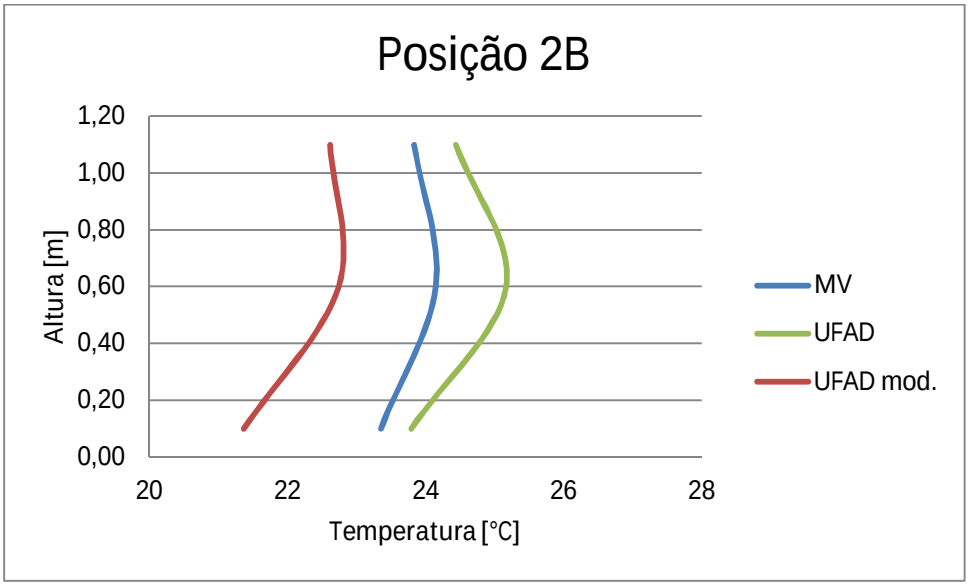


Figura 6.46 – Temperatura do ar na posição 2B para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.45 apresenta perfil com o efeito da pluma térmica para a arquitetura UFAD, com velocidade de 0,16 m/s na região dos pés, 0,19 m/s na região das coxas, mãos e antebraços e 0,10 m/s na região da cabeça. As arquiteturas MV e UFAD modificado

apresentaram perfis semelhantes, entretanto a arquitetura UFAD modificado apresentou velocidade de 0,10 m/s na região da cabeça enquanto a arquitetura MV 0,40 m/s. Os perfis da Figura 6.46 mostram diferença inferior a 1,5 °C para as arquiteturas UFAD e UFAD modificado e inferior a 0,8°C para a arquitetura MV.

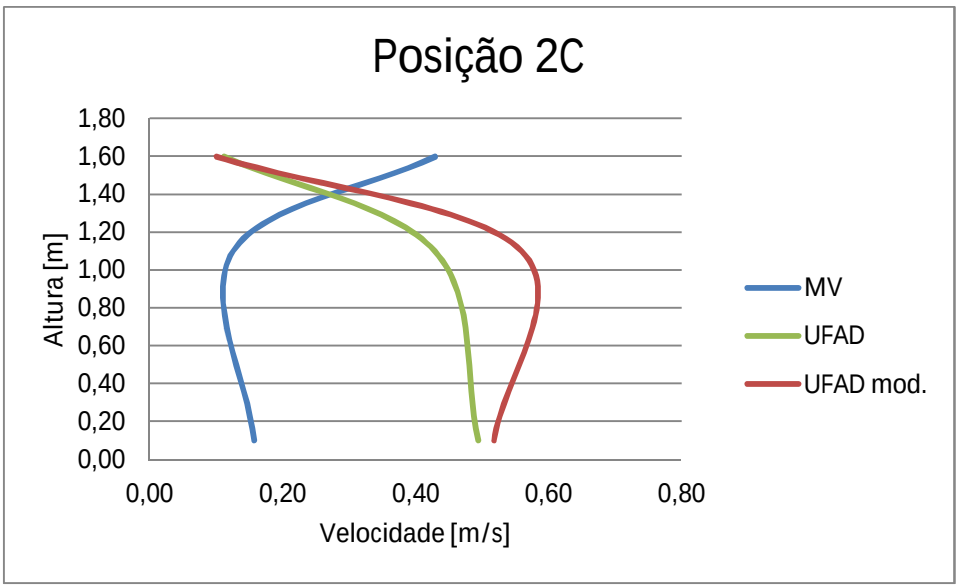


Figura 6.47 – Velocidade do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 22 °C.

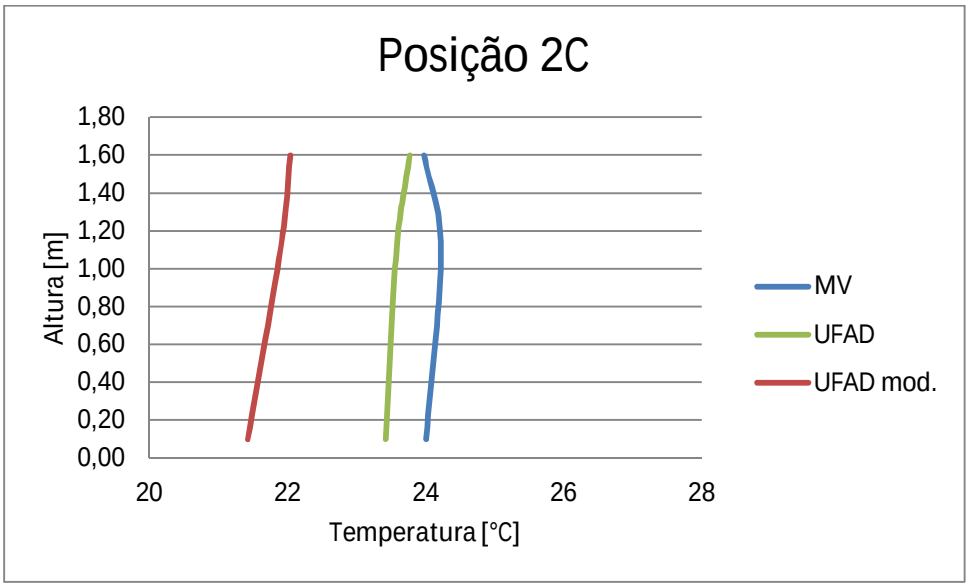


Figura 6.48 – Temperatura do ar na posição 2C para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.47 apresenta alta velocidade para as regiões próximas à área de insuflamento do ar reduzindo para as áreas de exaustão do ar. A Figura 6.48 apresenta homogeneidade para todas as arquiteturas.

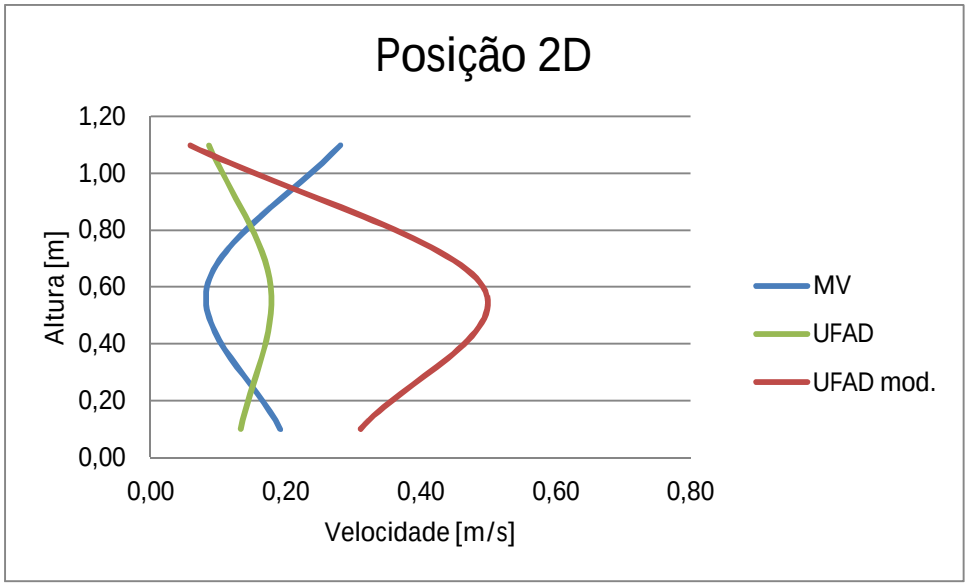


Figura 6.49 – Velocidade do ar na posição 2D para temperatura de insuflamento de 22 °C.

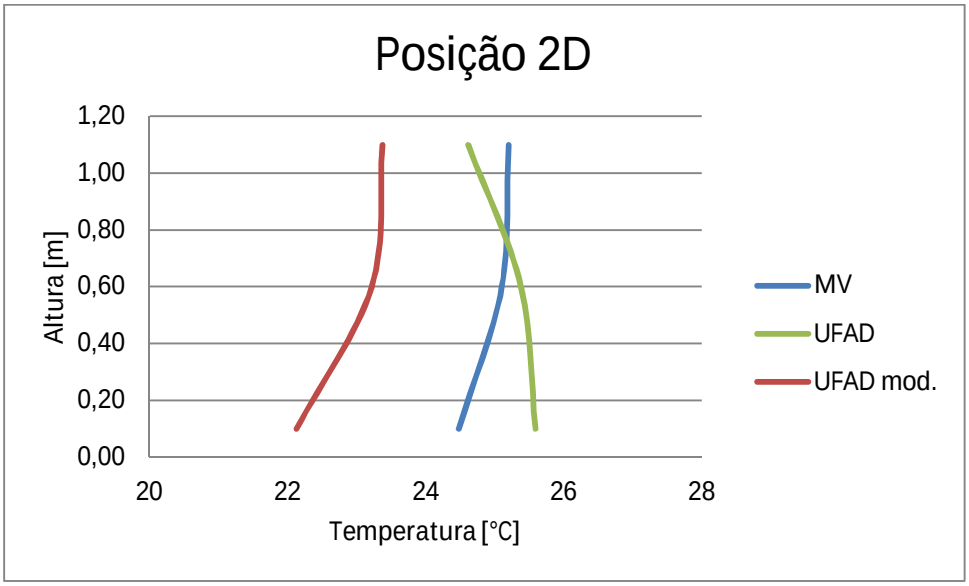


Figura 6.50 – Temperatura do ar na posição 2D para temperatura de insuflamento de 22 °C.

Na Figura 6.49 observa-se que velocidade na altura de 0,60 m da arquitetura UFAD modificado é de 0,49 m/s, enquanto nas regiões dos pés e cabeça foram de 0,31 m/s e 0,06 m/s respectivamente. Observa-se o efeito da pluma térmica na região das coxas, mãos e antebraços para a arquitetura UFAD. A arquitetura MV apresentou velocidade de 0,28 m/s na região da cabeça, reduzindo para 0,08 m/s na altura de 0,60 m e nas regiões dos pés 0,19 m/s. A análise da Figura 6.50 mostra que a maior diferença de temperatura do ar encontrada entre as alturas foi inferior a 1,1 °C para a arquitetura UFAD modificado.

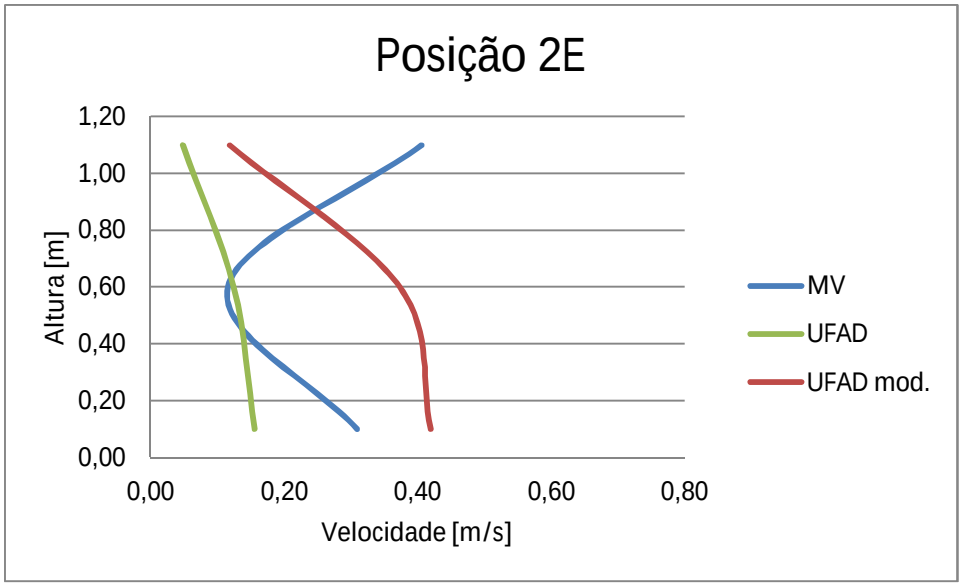


Figura 6.51 – Velocidade do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 22 °C.

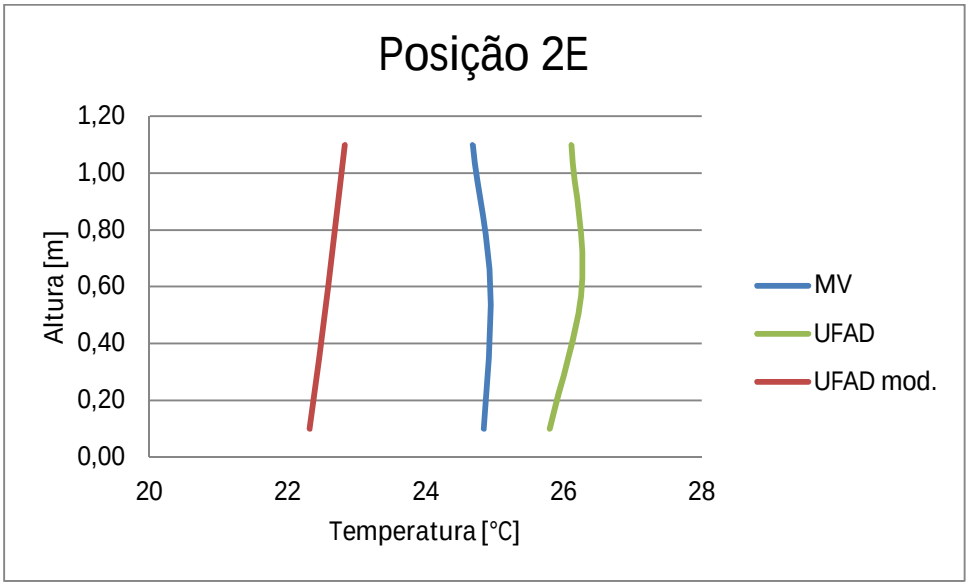


Figura 6.52 – Temperatura do ar na posição 2E para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.51 apresenta velocidades inferiores a 0,20 m/s para a arquitetura UFAD, entre 0,12 m/s e 0,41 m/s para a arquitetura MV e de 0,42 m/s na altura de 0,10 m reduzindo para 0,12 m/s na região da cabeça para a arquitetura UFAD modificado. Na Figura 6.52, as temperaturas do ar foram homogêneas para as três arquiteturas com diferenças inferiores a 0,6 °C entre as alturas.

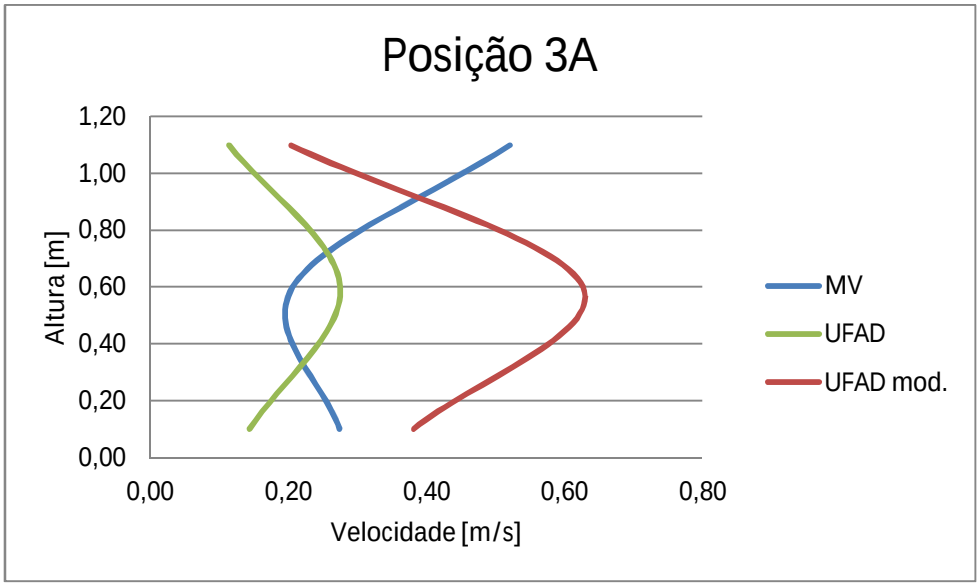


Figura 6.53 – Velocidade do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 22 °C.

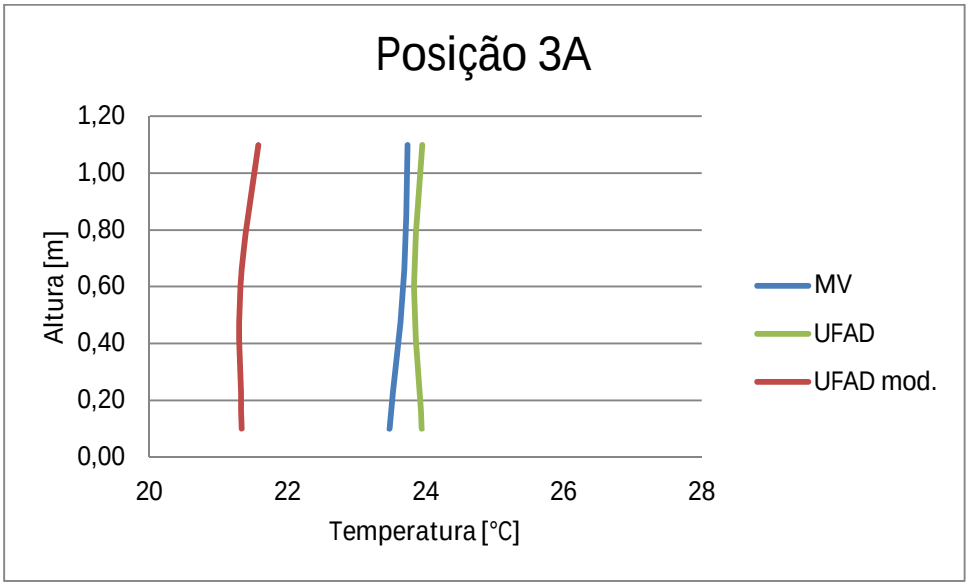


Figura 6.54 – Temperatura do ar na posição 3A para temperatura de insuflamento de 22 °C.

Na Figura 6.53, o perfil da arquitetura UFAD modificado apresenta a velocidade de 0,38 m/s na região dos pés, elevando-se para 0,63 m/s na região das coxas, mãos e antebraços e, posteriormente reduzindo para 0,20 m/s. A arquitetura UFAD apresentou a maior velocidade na região das coxas, mãos e antebraços igual a 0,28 m/s, região da pluma térmica. A arquitetura MV apresentou a maior velocidade na região da cabeça, 0,52 m/s. A Figura 6.54 também apresentou temperatura do ar homogênea para as três arquiteturas.

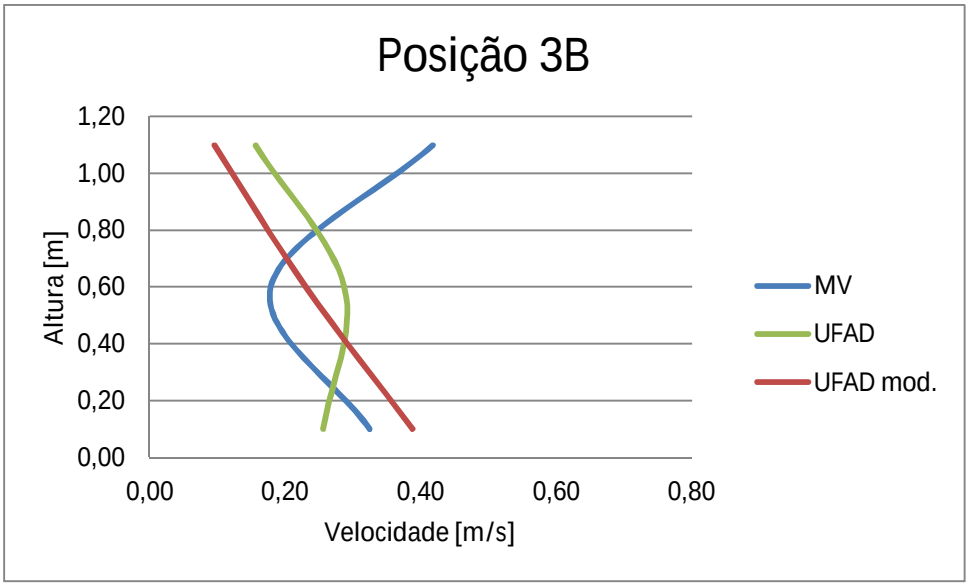


Figura 6.55 – Velocidade do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 22 °C.

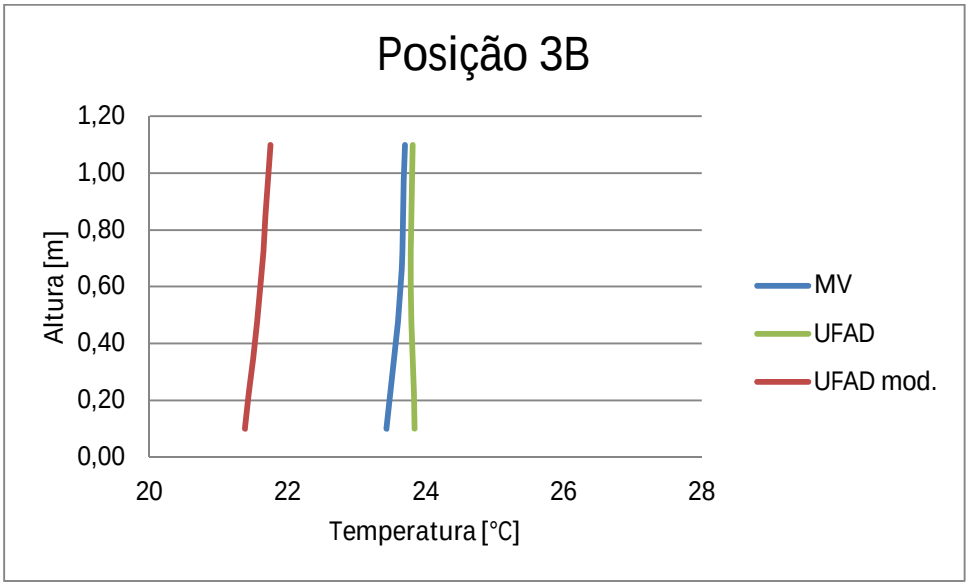


Figura 6.56 – Temperatura do ar na posição 3B para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.55 mostrou velocidade superior a 0,25 m/s para as três arquiteturas na região inferior, altura 0,10 m. A velocidade reduziu na altura de 0,60 m para as arquiteturas MV e UFAD modificado e na altura de 1,10 m a velocidade diminuiu para as arquiteturas UFAD e UFAD modificado e aumentou para a arquitetura MV. A homogeneidade da temperatura do ar para as três arquiteturas pode ser observada pela Figura 6.56, os valores se mantiveram praticamente constantes ao longo das alturas.

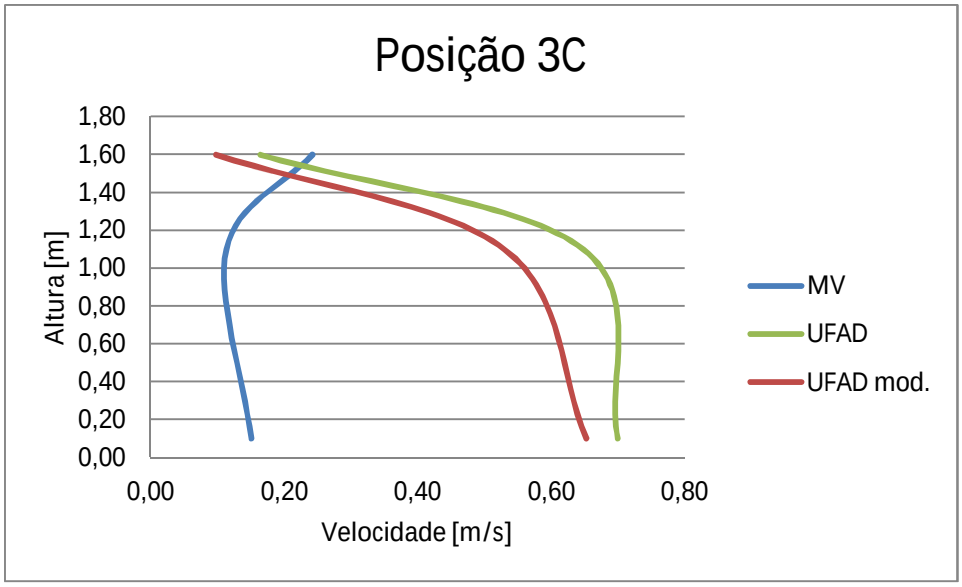


Figura 6.57 – Velocidade do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 22 °C.

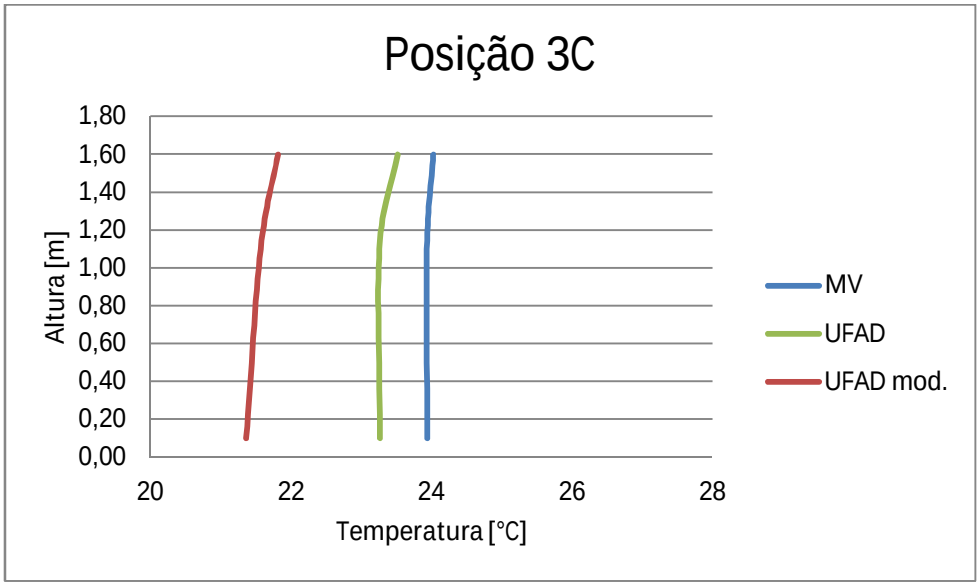


Figura 6.58 – Temperatura do ar na posição 3C para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.57 apresenta perfis com maiores velocidades nas regiões próximas às áreas de insuflamento e redução nas regiões próximas às áreas de exaustão. Observa-se que nas arquiteturas UFAD e UFAD modificado, na região dos pés, área de insuflamento, a velocidade atingiu valores de 0,70 m/s e 0,65 m/s respectivamente. Quanto à Figura 6.58 a temperatura do ar manteve-se homogênea ao longo das alturas.

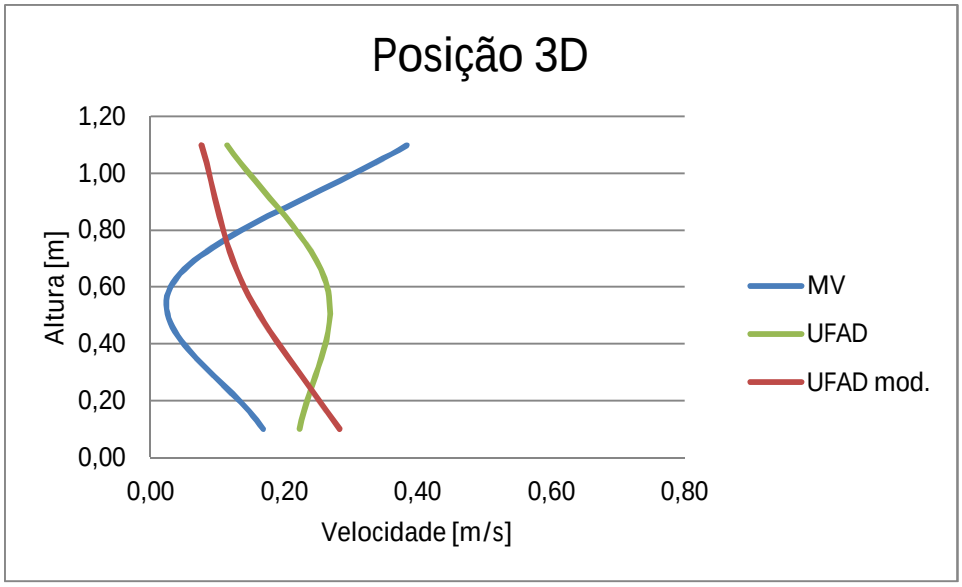


Figura 6.59 – Velocidade do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 22 °C.

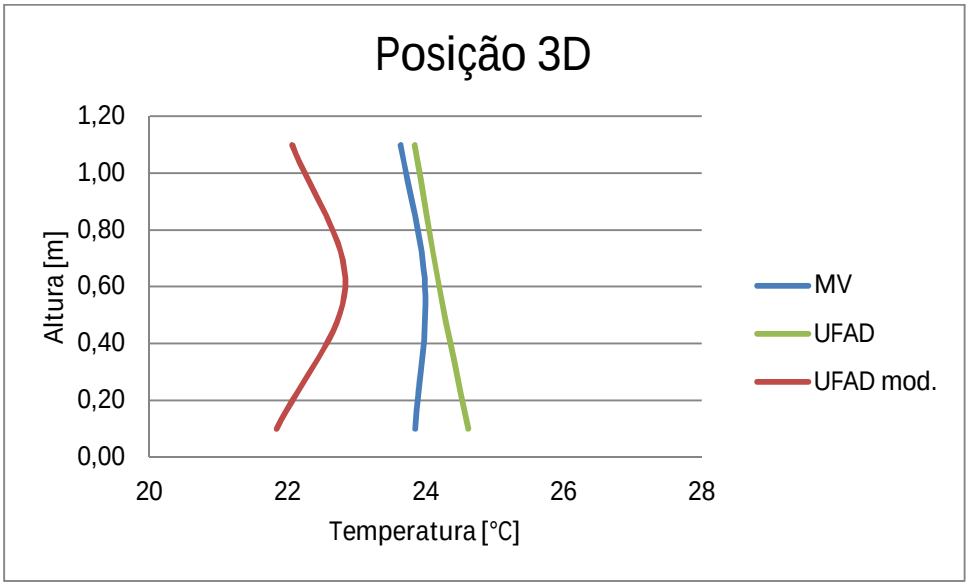


Figura 6.60 – Temperatura do ar na posição 3D para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.59 apresenta perfis com maior velocidade para a arquitetura MV na região da cabeça, 0,38 m/s com redução para 0,03 m/s na altura de 0,60 m e na altura de 0,10 m atingiu o valor de 0,17 m/s. A arquitetura UFAD apresentou velocidade de 0,22 m/s na região dos pés, sofreu o efeito da pluma térmica na altura de 0,60 m e na região da cabeça o valor da velocidade foi 0,11 m/s. A arquitetura UFAD modificado apresentou um perfil linear com velocidade de 0,28 m/s na altura de 0,10 m e na altura de 1,10 m a velocidade era de 0,08 m/s. A Figura 6.60 apresentou perfil homogêneo para as

arquiteturas MV e UFAD com diferença inferior a 0,8 °C. A arquitetura UFAD modificado apresentou diferença de temperatura inferior a 1 °C entre as alturas de 0,10 m e 0,60 m, mantendo essa diferença para a altura de 1,10 m.

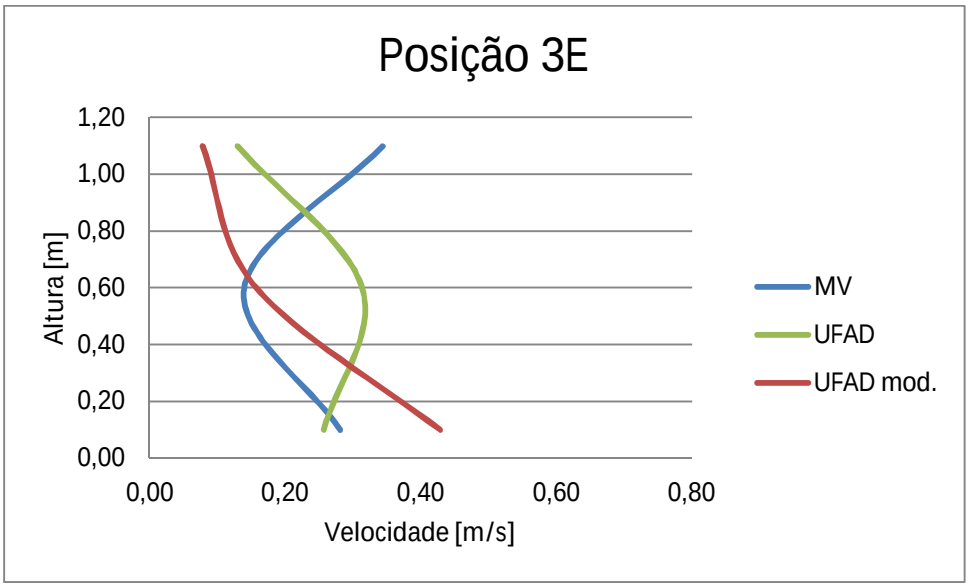


Figura 6.61 – Velocidade do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 22 °C.

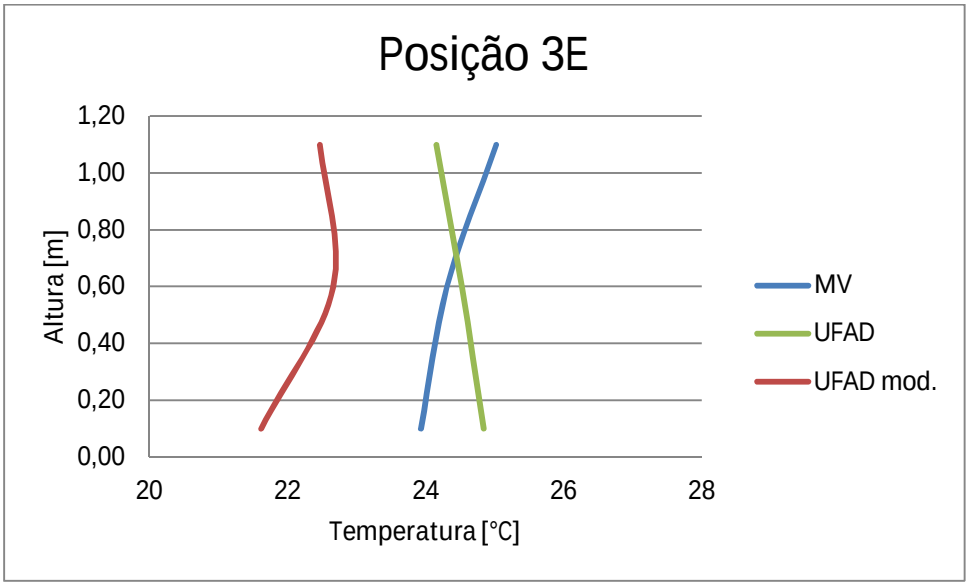


Figura 6.62 – Temperatura do ar na posição 3E para temperatura de insuflamento de 22 °C.

A Figura 6.61 apresenta perfil similar ao da posição 3D, com o efeito da pluma térmica para a arquitetura UFAD. O perfil que apresentou a maior velocidade foi a

arquitetura UFAD modificado na região dos pés, 0,43 m/s. A Figura 6.62 apresentou a diferença de temperatura do ar para a arquitetura MV, inferior a 1,1 °C.

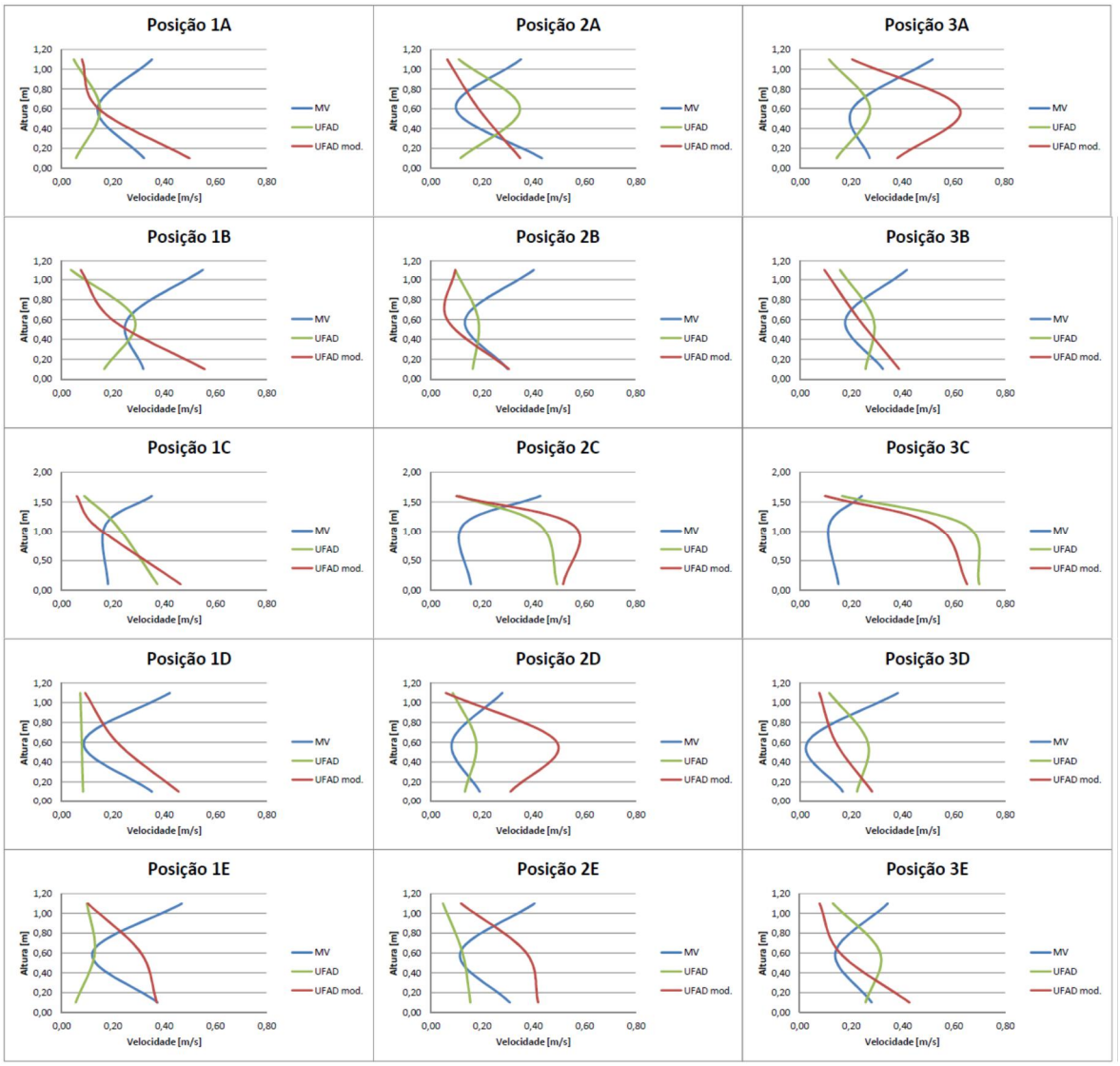


Figura 6.63 – Perfis de velocidade do ar em todas as posições da cabine para temperatura de insuflamento de 22 °C.

Na análise da Figura 6.63 também se verifica padrão de simetria dos perfis de velocidade do ar em relação à coluna C, com perfis similares àqueles obtidos para a temperatura de insuflamento de 18 °C nas diversas posições em todas as arquiteturas analisadas.

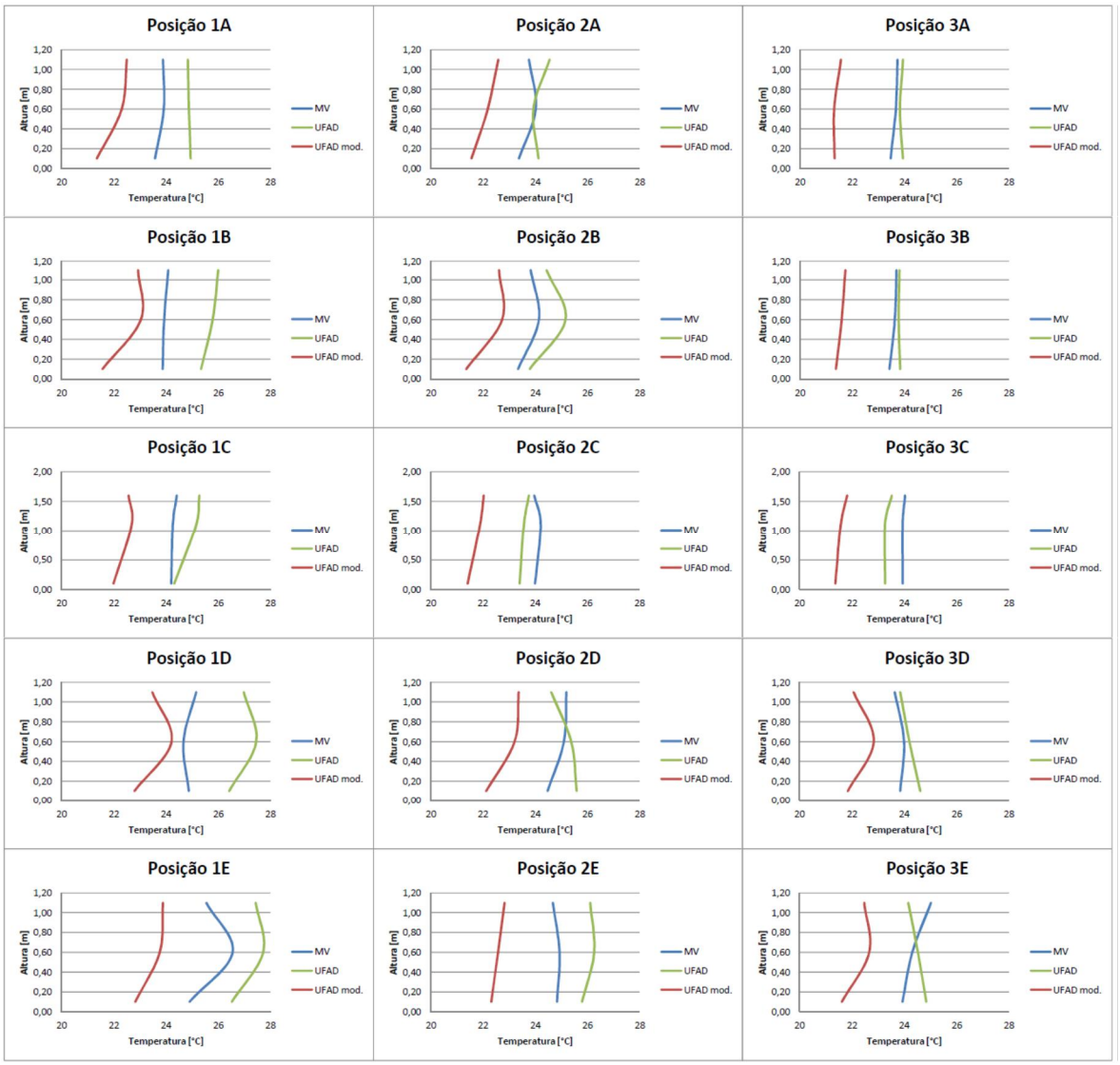


Figura 6.64 – Perfis de temperatura do ar em todas as posições da cabine para temperatura de insuflamento de 22 °C.

Uma análise geral das posições 1A a 3E, Figuras 6.33 a 6.64, para a temperatura de insuflamento de ar igual a 22 °C permite verificar que as condições de desconforto térmico local ocasionado por estratificação de temperatura atendem ao preconizado pelas normas ASHRAE 55 (2010) e ISO 7730 (2005), com valores máximos inferiores a 3 °C entre as regiões dos pés e a região da cabeça nas três arquiteturas analisadas. Embora a estratificação da temperatura seja um fenômeno associado ao insuflamento pelo piso, a sua influência não foi significativa nas três arquiteturas avaliadas, com valores máximos de 1,7 °C para a arquitetura MV, de 1,4 °C para a arquitetura UFAD e de 1,5 °C para a arquitetura UFAD modificado.

6.2. Desconforto térmico local devido às correntes de ar

O percentual de pessoas insatisfeitas devido ao risco de correntes de ar foi calculado para todas as posições nas três regiões, utilizando a Equação 3.10. Para pessoas sentadas, as alturas correspondentes foram 0,10 m, 0,60 m e 1,10 m. Para pessoas em pé, as alturas foram 0,10 m, 1,10 m e 1,60 m.

Para calcular o risco de correntes de ar, foram utilizados os dados coletados dos perfis de velocidade e temperatura do ar para cada posição. Através dos dados de velocidade foi possível determinar a intensidade de turbulência de cada região e posição. A Figura 6.65 apresenta o gráfico da velocidade em função do tempo com a média e desvio padrão, para a posição 2B da arquitetura UFAD, na altura de 0,60 m. Esse mesmo tipo de gráfico foi gerado para todas as posições, porém eles não foram inclusos no trabalho por ser repetitivo e as informações serem melhores visualizadas na forma de tabela. As Tabelas C1 a C6 do Anexo C informam os valores calculados.

O gráfico da Figura 6.65 apresentou uma média da velocidade do ar igual a 0,13 m/s e desvio padrão igual a 0,05 m/s. A partir desses dados foi possível determinar a intensidade de turbulência através da Equação 3.3, resultando em 38 % de intensidade de turbulência.

$$T_u = \frac{\sigma_{v_{ar}}}{\overline{v_{ar}}} \times 100 \qquad 3.3$$

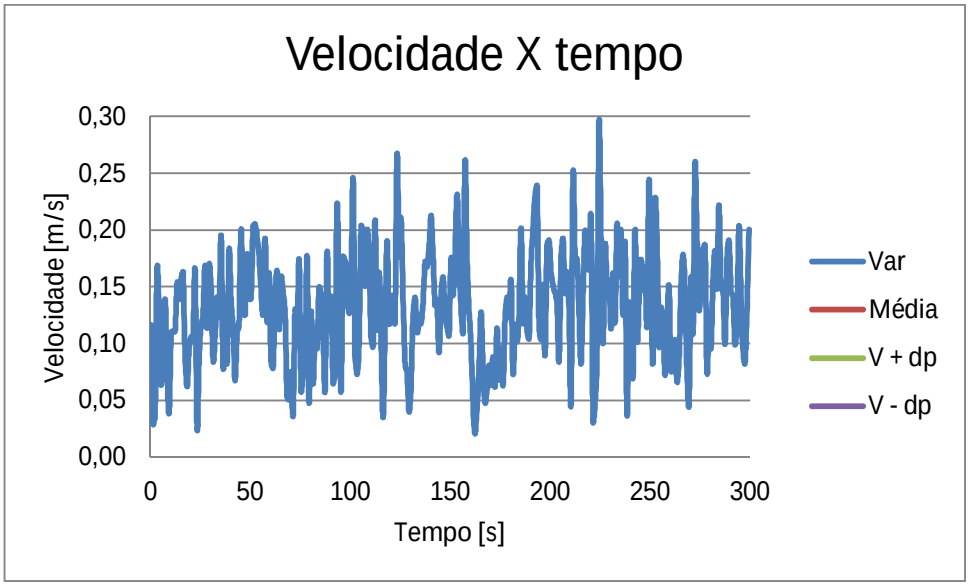


Figura 6.65 – Velocidade em função do tempo.

Com os valores de intensidade de turbulência para cada posição e altura, foi possível calcular o percentual de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar, utilizando a Equação 3.10. Os resultados para cada arquitetura de distribuição de ar foram representados nas Figuras 6.66 a 6.68 para temperatura de insuflamento igual a 18 °C e nas Figuras 6.69 a 6.71 para temperatura de insuflamento igual a 22 °C.

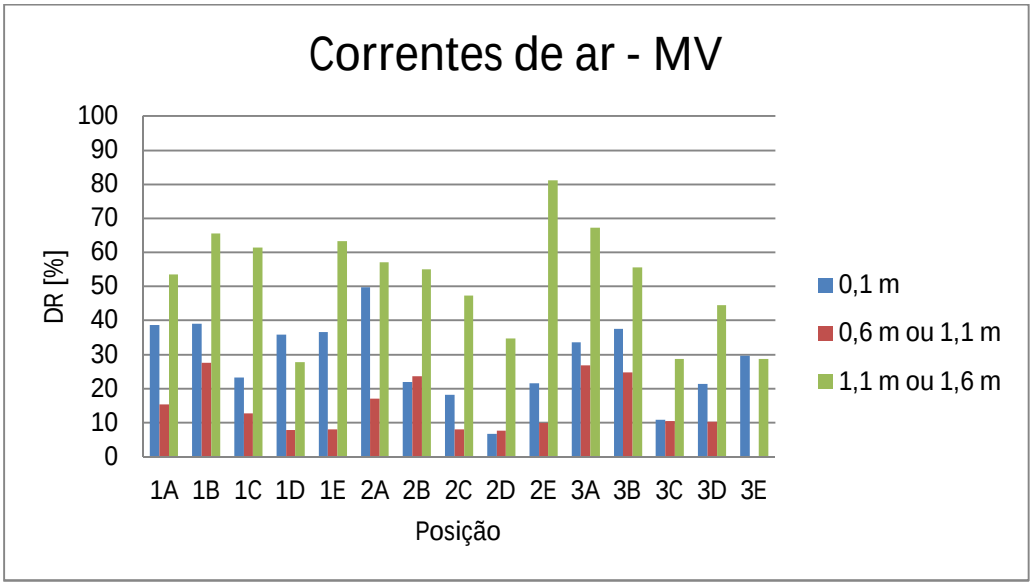


Figura 6.66 – Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura MV, com temperatura de insuflamento do ar de 18 °C.

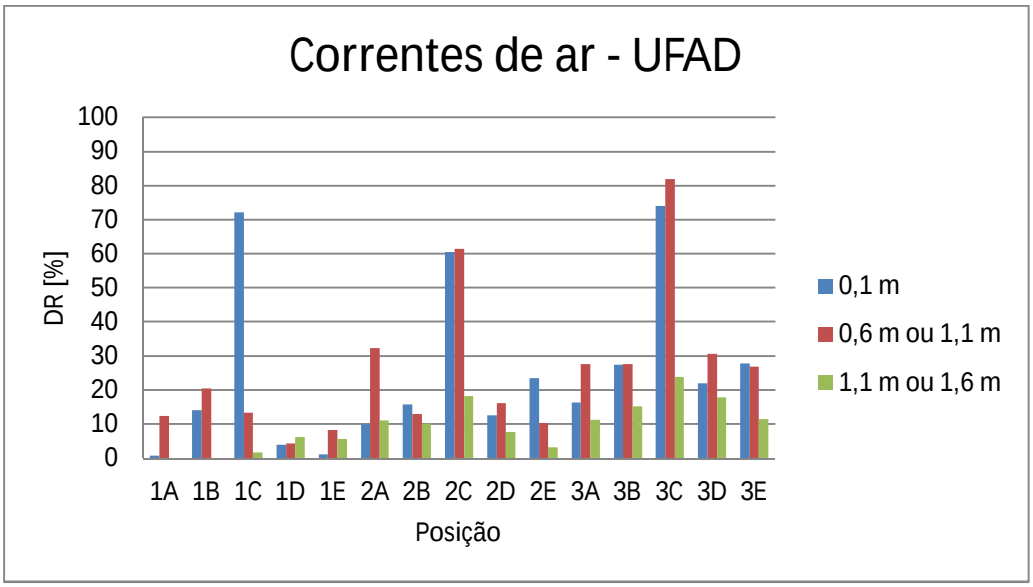


Figura 6.67 – Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD, com temperatura de insuflamento do ar de 18 °C.

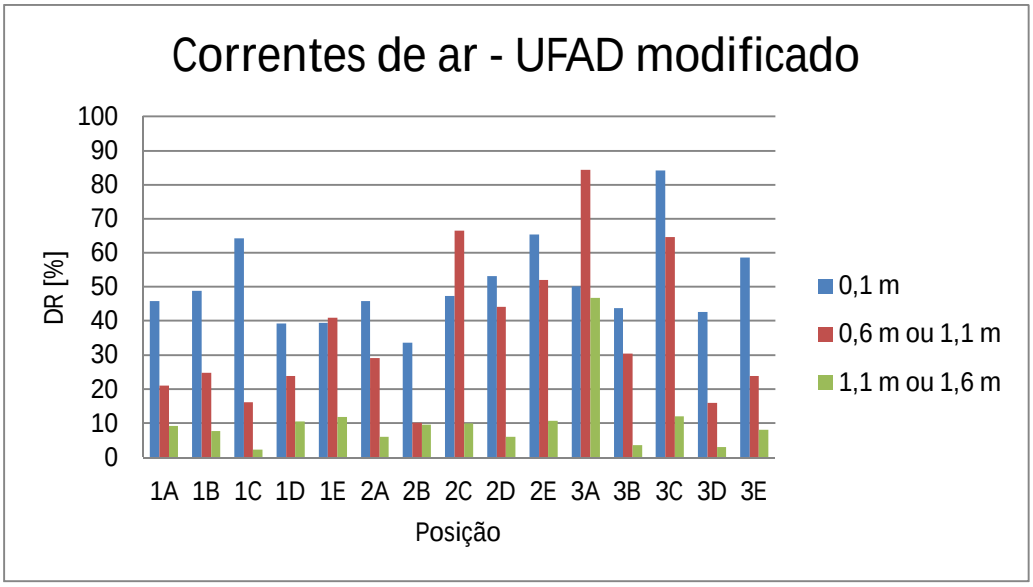


Figura 6.68 – Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD modificado, com temperatura de insuflamento do ar de 18 °C.

De acordo com os resultados das Figuras 6.66 a 6.68 foram feitas as seguintes considerações sobre o risco de correntes de ar:

- A região mais crítica para a arquitetura MV é a região superior, região da cabeça, pescoço e ombros, pois o percentual de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar foi superior a 27 % atingindo valores de até 81 %. Entretanto, para essa região esperava-se que a porcentagem fosse realmente superior às demais regiões, pois é a região próxima a área de insuflamento de ar no ambiente. Para a região inferior, região dos pés, o percentual ficou acima dos 20%, exceto para as posições 2C, 2D e 3C. Na região central, altura de 0,60m, o percentual é aceitável, pois na maioria das posições o valor ficou abaixo dos 20 %. A região central apresentou os menores valores de velocidade do ar. Porém seria interessante fazer uma análise da direção do fluxo de ar para verificar se não houve estagnação do ar ou recirculação.
- O percentual de pessoas de insatisfeitas devido às correntes de ar para arquitetura UFAD era esperado ser crítico na região do corredor, porque é a região de insuflamento de ar. Realmente, a região do corredor apresentou percentual elevado, acima dos 60 %. Entretanto, as demais posições apresentaram um percentual inferior às outras duas arquiteturas. É interessante observar que em sua maioria, com exceção ao corredor, os

valores ficaram abaixo dos 20 %, que atende ao preconizado pelas normas ASHRAE 55 (2010) e ISO 7730 (2005) para ambientes climatizados. A terceira fileira apresentou valores superiores às outras duas fileiras.

- A arquitetura UFAD modificado apresentou um percentual crítico para as regiões inferior e central, atingido valores de 84 % de pessoas insatisfeitas. Na maioria das posições o percentual ficou acima dos 20 %. Na região superior, o percentual é aceitável, pois ficou abaixo dos 20 %, exceto a posição 3A que apresentou um percentual de 47 %.

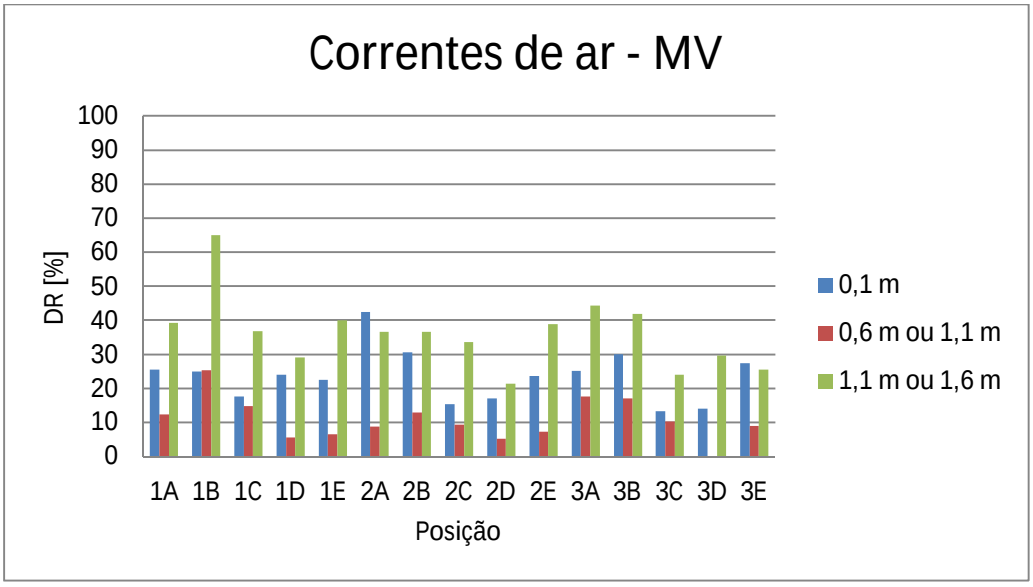


Figura 6.69 - Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura MV, com temperatura de insuflamento do ar de 22 °C.

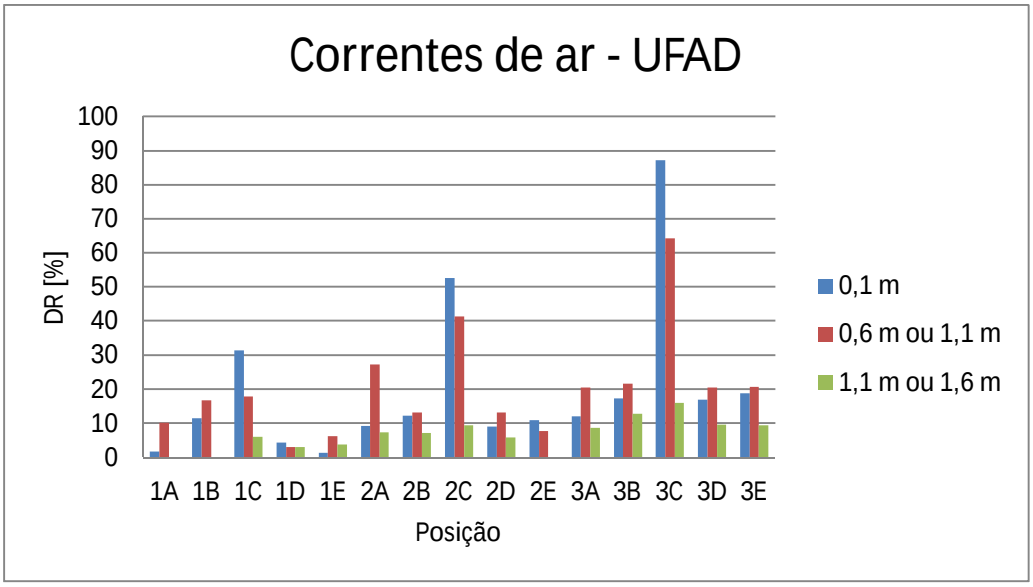


Figura 6.70 - Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD, com temperatura de insuflamento do ar de 22 °C.

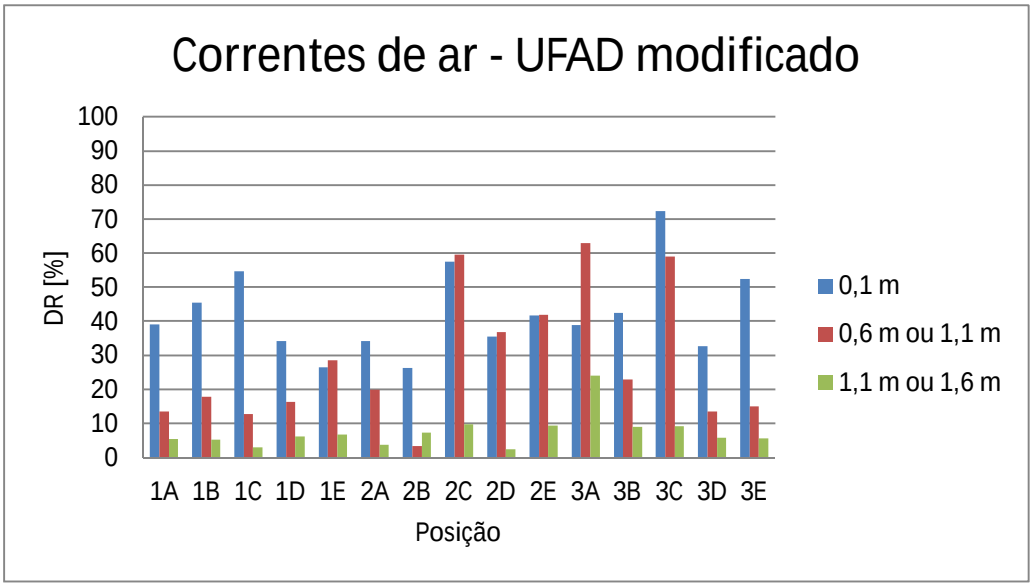


Figura 6.71 - Percentual de insatisfeitos devido às correntes de ar para a arquitetura UFAD modificado, com temperatura de insuflamento do ar de 22 °C.

Da análise das Figuras 6.69 a 6.71 verifica-se que:

- Na arquitetura MV o percentual de pessoas insatisfeitas na região superior, em sua maioria, ficou em torno de 40 %. Essa é a região mais próxima à área de insuflamento de ar e, por consequência, a região mais crítica. A região inferior apresentou valores acima dos 20 %, para a maioria das posições. Nessa arquitetura, a região central apresentou um percentual

aceitável, inferior aos 20 %. Entretanto, ao se comparar as arquiteturas MV com insuflamento de ar a 18 °C e a 22 °C observa-se que a temperatura de insuflamento de ar a 22 °C causa menos desconforto com relação a correntes de ar.

- A arquitetura UFAD com insuflamento de ar a 22 °C apresentou que a região do corredor, posições 1C, 2C e 3C, é realmente crítica, pois o percentual de pessoas insatisfeita é superior a 30 % na região inferior. Contudo, as demais posições apresentaram um percentual aceitável, com valores inferiores a 20 % de pessoas insatisfeitas. Observa-se mais uma vez que a temperatura de insuflamento de ar influenciou consideravelmente nesse percentual, não só na arquitetura UFAD, mas também nas demais arquiteturas.
- A arquitetura UFAD modificado apresentou um percentual superior a 25 % na região inferior. Na região central, o percentual de pessoas insatisfeitas ficou balanceado, ou seja, em sete posições a porcentagem ficou abaixo dos 20 %, em outras sete posições a porcentagem ficou acima dos 20 % e em uma posição o percentual ficou em 20 %. Observa-se que devido ao aumento da temperatura de insuflamento de 18 °C para 22 °C, o percentual de insatisfação devido às correntes de ar foi reduzido.
- Ao se comparar as três arquiteturas e as duas temperaturas de insuflamento de ar, a arquitetura UFAD apresentou os melhores resultados, com menores percentuais de pessoas insatisfeitas devido às correntes de ar.

6.3. Temperaturas equivalentes e análise de desconforto térmico local utilizando o manequim térmico

Nas Figuras 6.72 a 6.74 são apresentados os resultados das temperaturas equivalentes em diagrama de sensação térmica, da norma ISO 14505-2 (2006), para as arquiteturas MV, UFAD e UFAD modificado para temperatura do ar de insuflamento a 18 °C, e nas Figuras 6.75 a 6.77 são apresentados os resultados para temperatura do ar de insuflamento a 22 °C. Os valores das temperaturas equivalentes da mão direita, panturrilha direita e nádegas não são apresentados em virtude de problemas nos sensores.

Os números 1, 2, 3, 4 e 5 nas Figuras 6.72 a 6.77 representam as sensações térmicas, conforme apresentado na Tabela 4.1, reapresentada aqui.

Tabela 4.1 – Escala de sensação térmica conforme a norma (ISO 14505-2, 2006).

Escala de sensação térmica				
1	2	3	4	5
Frio	Levemente frio	Neutro	Levemente quente	Quente

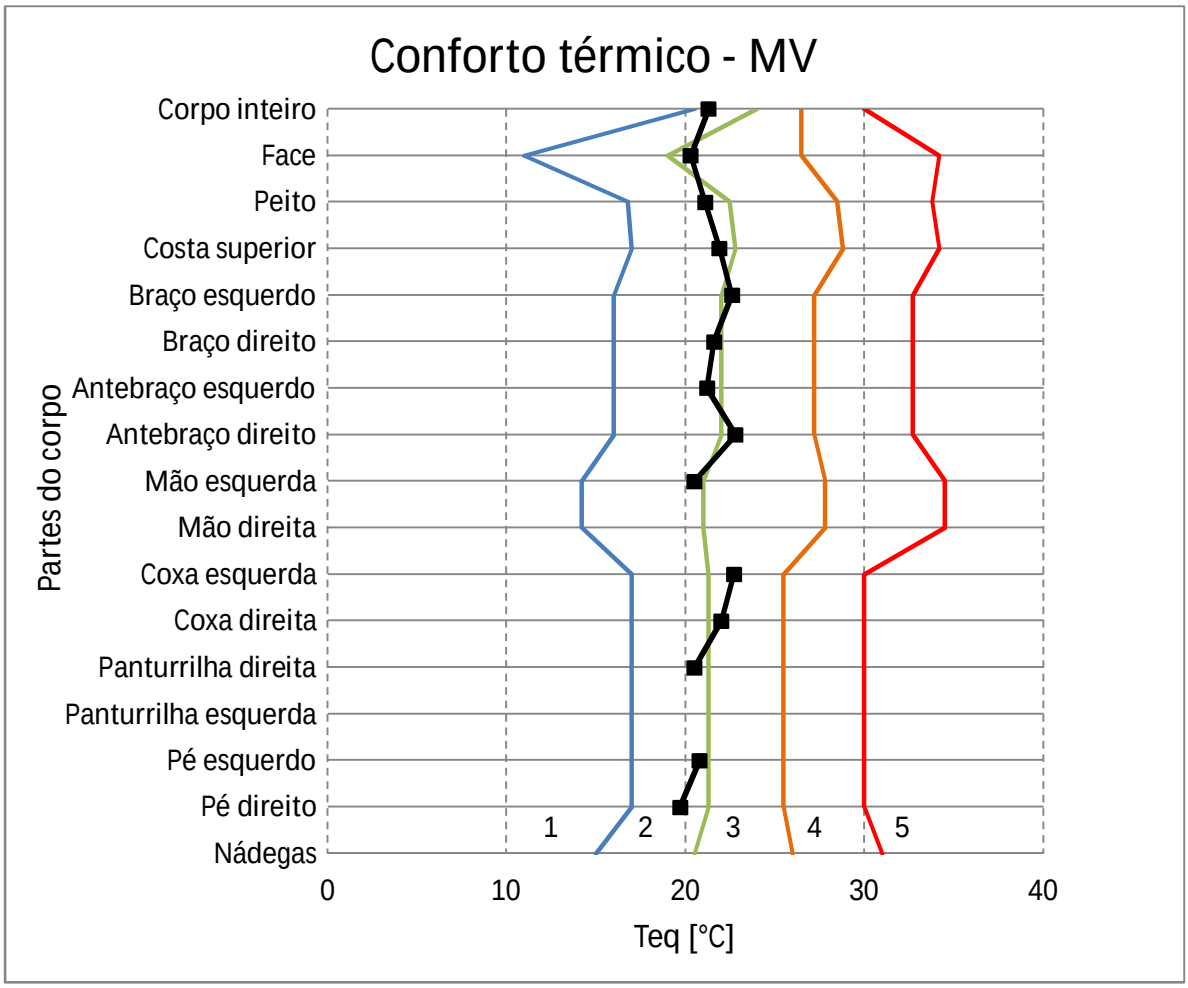


Figura 6.72 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura MV para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C.

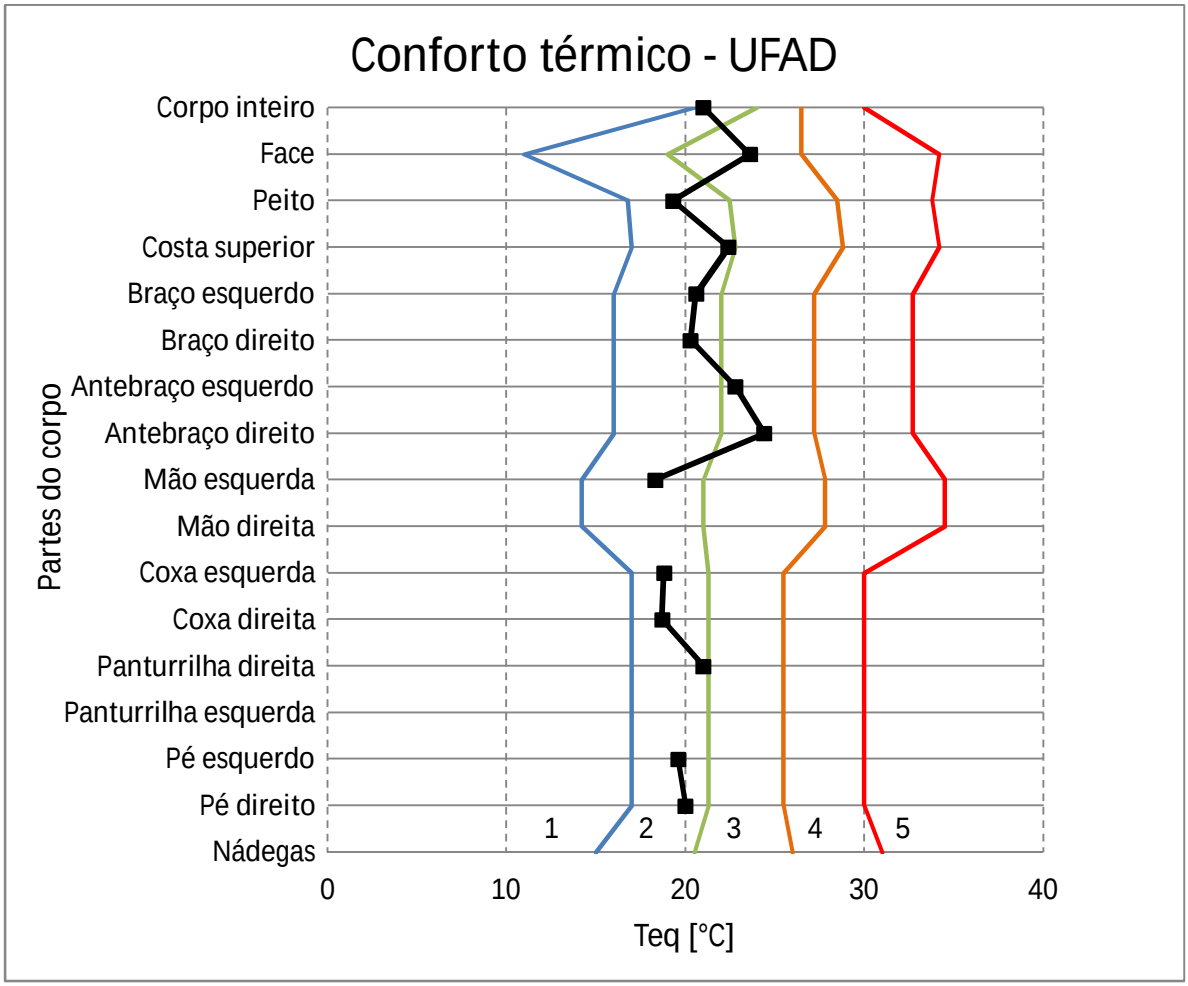


Figura 6.73– Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C.

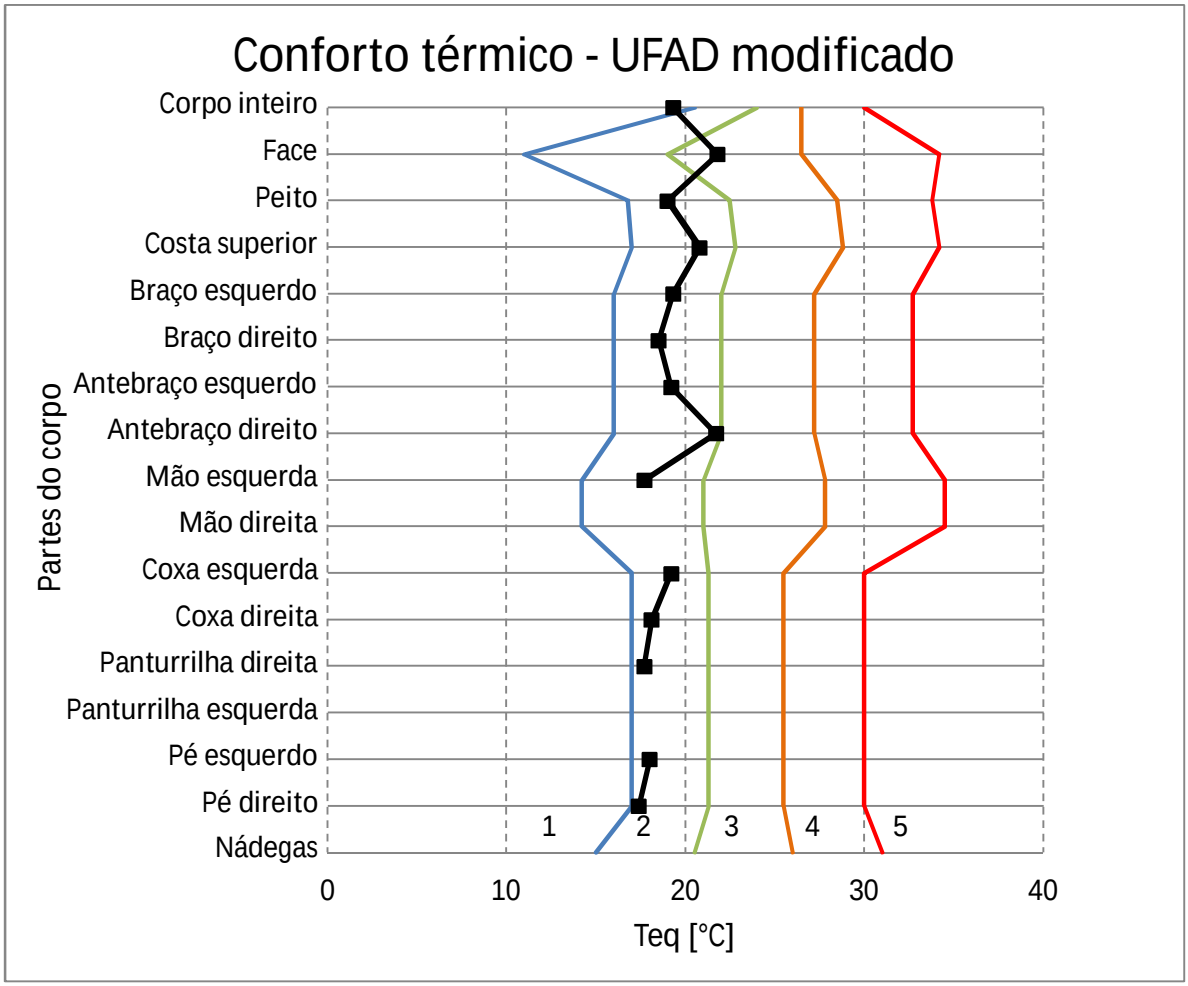


Figura 6.74 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD modificado para temperatura do ar de insuflamento de 18 °C.

As temperaturas equivalentes das Figuras 6.72 a 6.74, para a temperatura de insuflamento de ar igual a 18 °C mostram que, na maioria das partes do corpo, os passageiros estariam mais próximos da neutralidade térmica na arquitetura MV, próximos a uma leve sensação de frio na arquitetura UFAD, e com uma leve sensação de frio na arquitetura UFAD modificado.

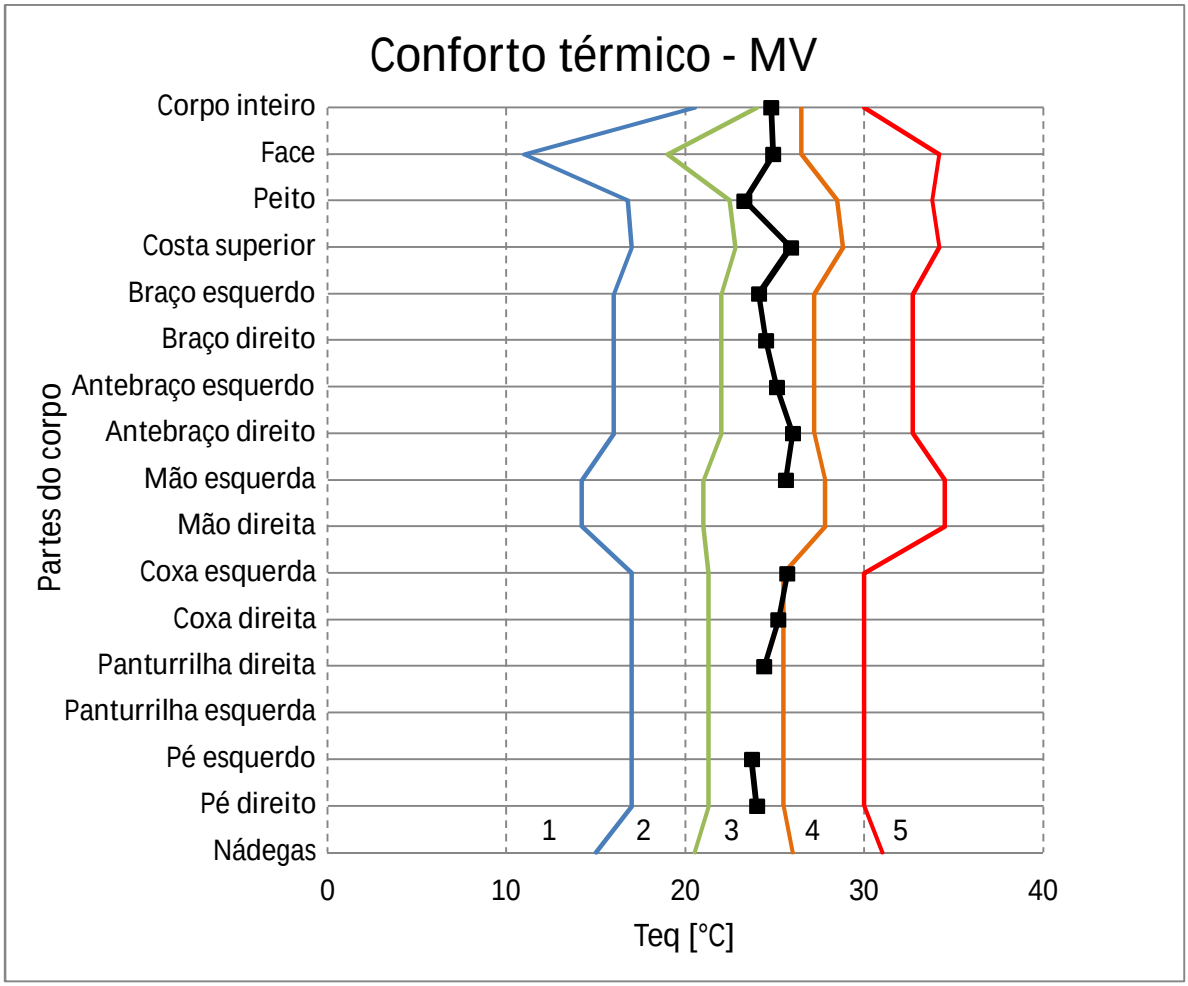


Figura 6.75 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura MV para temperatura do ar de insuflamento de 22 °C.

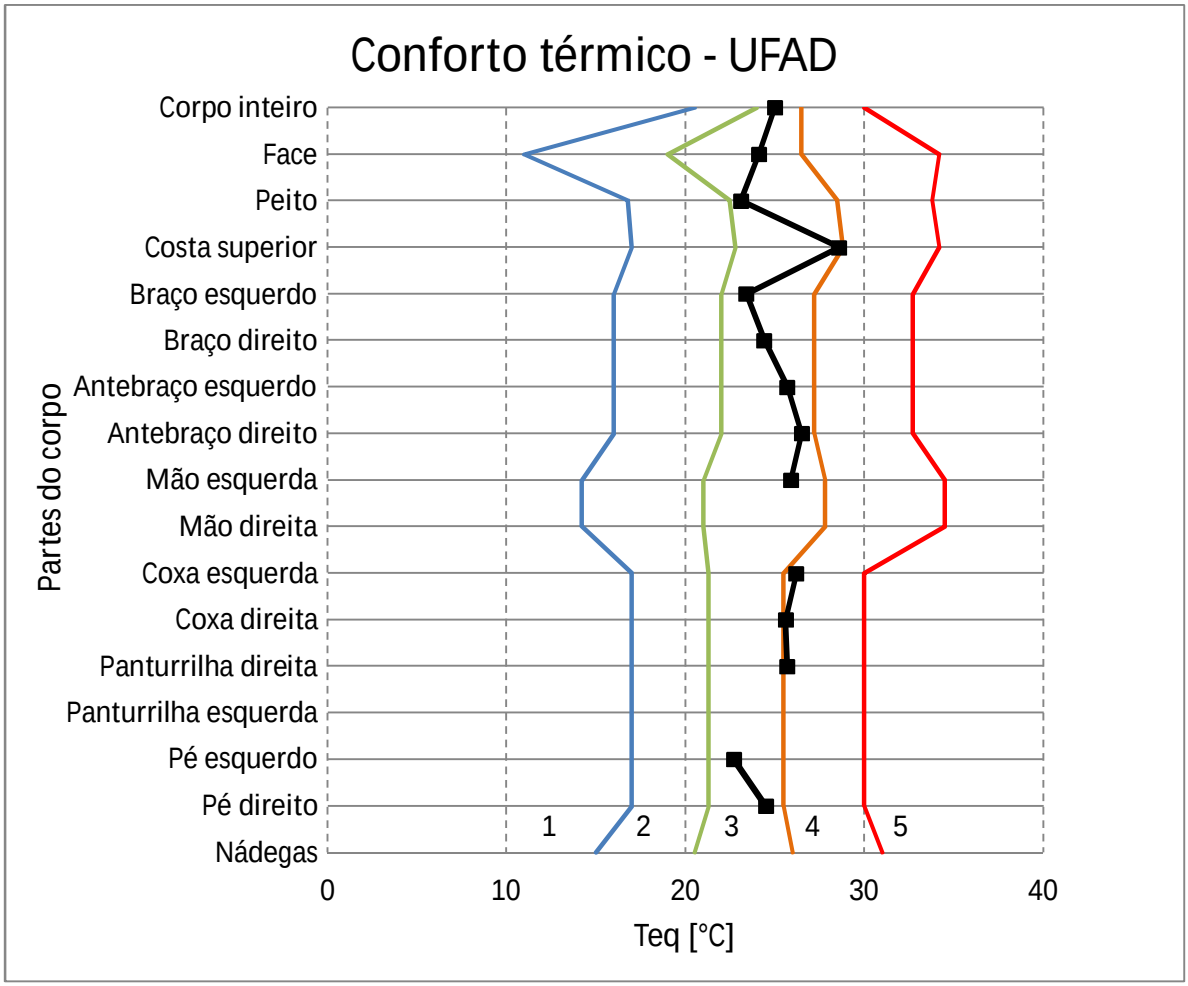


Figura 6.76 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD para temperatura do ar de insuflamento de 22 °C.

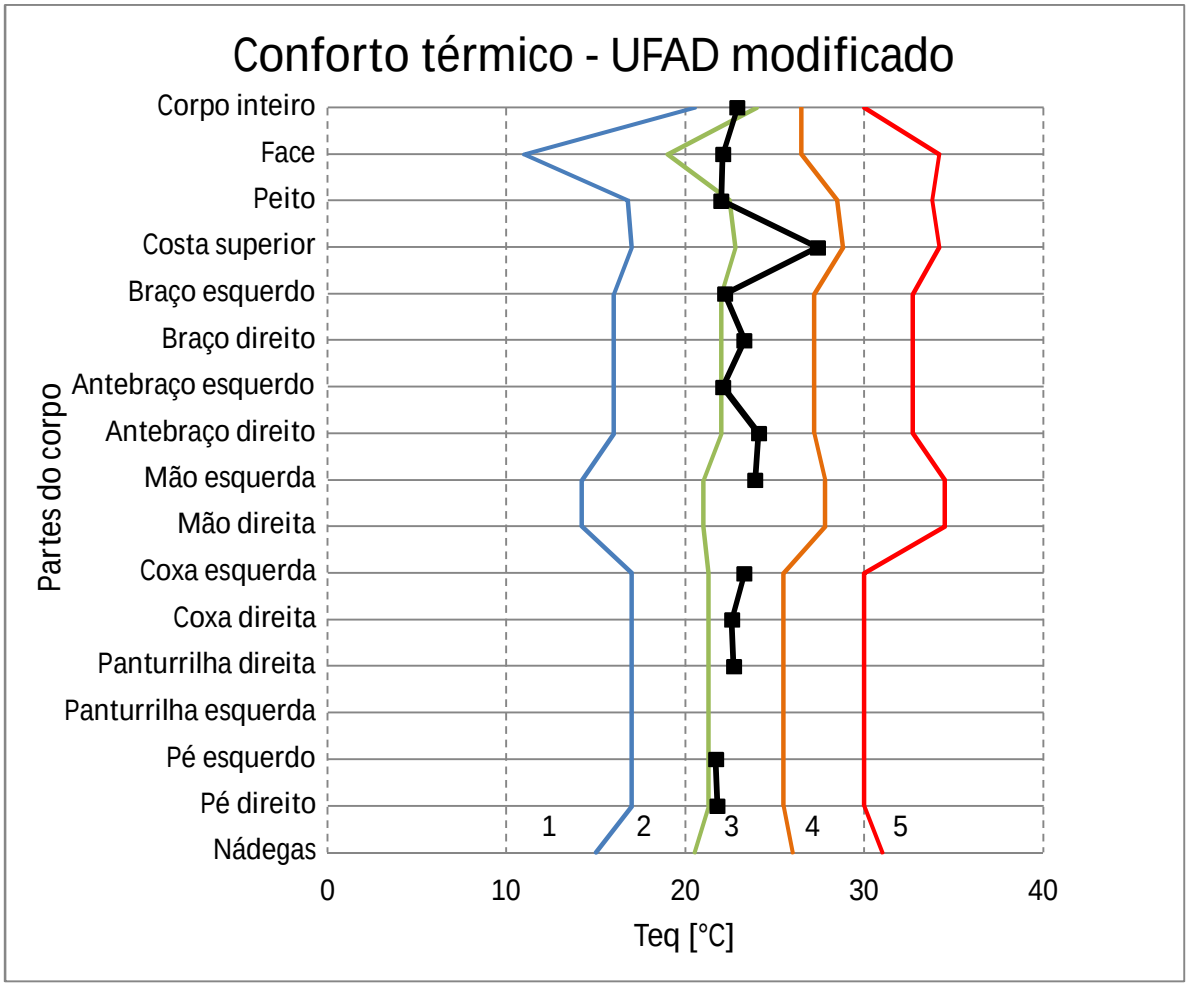


Figura 6.77 – Diagrama de sensação térmica: arquitetura UFAD modificado para temperatura do ar de insuflamento de 22 °C.

As temperaturas equivalentes das Figuras 6.75 a 6.77, para a temperatura de insuflamento de ar igual a 22 °C mostram que os passageiros estariam em situação próxima à neutralidade térmica, praticamente em todos os segmentos, nas três arquiteturas.

Capítulo 7

CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho mostram influência significativa da temperatura de insuflamento do ar nas condições de desconforto térmico local, juntamente com resultados promissores para o sistema UFAD, com percentuais de desconforto devido às correntes de ar menores que 20%, com exceção da região de insuflamento do ar no corredor.

A arquitetura por mistura, MV, temperatura de insuflamento de 18 °C, apresentou condições com um alto nível de desconforto térmico devido às correntes de ar, pois nesse sistema o ar é insuflado a alta velocidade na região superior do *mock up* e exaurido pelas laterais inferiores. Por outro lado, esse sistema apresentou temperaturas praticamente homogêneas, sem estratificação ao longo das alturas avaliadas, 0,10 m, 0,60 m 1,10 m representando pessoas sentadas e 0,10 m, 1,10 m e 1,60 m representando pessoas em pé. O diagrama de conforto térmico, avaliado por meio das temperaturas equivalentes, também mostrou que a temperatura de insuflamento de 22 °C apresenta condições mais confortáveis que a de 18 °C.

As condições térmicas promovidas pela arquitetura UFAD mostraram bons resultados em comparação com as demais e podem ser bem aceitas pelos usuários do transporte aéreo. Embora esse tipo de arquitetura possa promover estratificação da temperatura do ar, constatou-se que essa condição não ofereceu risco de desconforto, porque as diferenças de temperatura entre os níveis avaliados foram pequenas, inferiores a 2 °C, valor menor que aquele de referência, preconizado pelas normas ISO 7730 (2005) e ASHRAE 55 (2010), que é de 3°C. O risco de desconforto devido às correntes de ar foi identificado nesse tipo de arquitetura tanto para insuflamento a 18 °C quanto a 22 °C, principalmente na região do corredor, área de insuflamento do ar. Como esperado, o risco de correntes de ar é menor a 22 °C e ainda pode ser minorado com a instalação de aletas defletoras nos difusores, de tal modo que o ar não seja insuflado diretamente nas pessoas. O diagrama de sensação térmica mostrou que a temperatura de insuflamento de ar de 22 °C é agradável, pois resultou em condições de neutralidade térmica.

O ambiente térmico da arquitetura UFAD modificado, tanto para a temperatura de insuflamento de 18 °C quanto para 22 °C, não apresentou resultados favoráveis em relação às demais arquiteturas. O desconforto devido às correntes de ar foi elevado com valores acima dos 80 % de pessoas insatisfeitas. Em relação à estratificação da temperatura do ar, a maior diferença também foi inferior a 2 °C. O diagrama de sensação térmica mostrou neutralidade térmica para a temperatura de insuflamento de 22 °C, mas devido ao alto risco de correntes de ar, esse sistema é menos favorável.

Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu obter resultados que podem ser utilizados como referência para a proposta e análise de outras arquiteturas de distribuição de ar em aeronaves, bem como da relação entre as vazões de ar insufladas pelas réguas contendo os difusores. Além disto, pode-se sugerir como trabalhos futuros a serem desenvolvidos:

a) Avaliação de modelos numéricos considerando a intensidade de turbulência como um parâmetro para a avaliação do desconforto térmico local devido ao risco de correntes de ar;
b) Realização de testes subjetivos com usuários de transporte aéreo para testar diferentes arquiteturas de distribuição de ar;
c) Construção do diagrama de sensação térmica exclusivo para aeronaves correlacionando os resultados da temperatura equivalente com os resultados da avaliação subjetiva.
d) Estudos de sistemas de ventilação personalizados com insuflamento de ar direto na zona de respiração juntamente com diferentes arquiteturas de distribuição de ar
e) Análise simultânea de condições de conforto térmico e de qualidade do ar para diferentes arquiteturas de distribuição de ar e de sistemas de ventilação.

O desenvolvimento dessas atividades permitirá obter resultados para projetos específicos de arquitetura de distribuição de ar, objetivando o conforto térmico do usuário e a qualidade do ar em aeronaves.

Capítulo 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 16401-2. Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.

Alahmer, A., Mayyas, A., Mayyas, A. A., Omar, M. A., Shan, D. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. Applied Thermal Engineering 31 (2011) 995-1002, 2011.

Arbejdsmiljøgruppen, Arbejdsmiljøundersøgelses rapport No. 2, Copenhagen (in Danish), 1972.

ASHRAE 55. Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 2010.

ASHRAE 161. Air quality within commercial aircraft. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 2007.

ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2009.

Bauman F., Daily A. Underfloor air distribution (UFAD) design guide. ASHRAE. Atlanta, 2003.

Bolinder, E., Magnusson, E., and Nyren, E. Risker I jobbet: LO-enkäten. LO-medlemmarnas uppfattning om arbetsplatsens hälsorisker (Stockholm: PRISMA) (in Swedish), 1970.

Charkoudian, N. Skin blood flow in adult human thermoregulation: how it works, when it does not, and why. Mayo Foundation for Medical Education and Research. Mayo Clin Proc. 2003; 78:603-612, 2003.

Chen Q., Glicksman, L. System performance evaluation and design guidelines for displacement ventilation. ASHRAE. Atlanta, 2003.

Coleman, H. W.; Steele, W. G. Experimentation and uncertainty analysis for engineers. John Wiley & Son. New York, 1989.

Conceição, S. T. Contaminação aérea em cabines climatizadas: Processo de avaliação e análise da influência de sistema de ventilação personalizado. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 218p., 2012.

Fanger P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill Book Company, 244 p., New York, 1972.

Fanger, P. O., Christensen, N. K. Perception of draught in ventilated spaces. Ergonomics, 1986, vol. 29, no. 2, 215-235, 1986.

Fanger, P. O., Melikov, A. K., Hanzawa, H., Ring, J. Air turbulence and sensation of draught. Energy and Buildings, 12 (1988) 21-39, 1988.

Fanger, P. O., Pedersen, C. J. K. Discomfort due to air velocities in spaces, Proc. of Meeting of Commission B1, B2, E.1 of Int. lnstit. Refrig., 4 (1977) 289- 296, 1977.

Ferreira, M. A. O usuário e a percepção de conforto térmico em bancos automotivos ventilados. Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 75 p., 2008.

Fox, R. W., Mcdonald, A. T., Pritchard, P. J. Introdução à Mecânica dos Fluidos. LTC, 6ª. Ed., Rio de Janeiro, 2006.

Furuse, K., Komoriya, T. Study of Passenger's Comfort in Non-uniform Thermal Environments of Vehicle Compartment. Society of Automotive Engineers of Japan, Inc. Technical Notes JSAE Review, 18: 401-421, 1997.

Gameiro da Silva, M. C. Measurements of Comfort in Vehicles. *Meas. Sci. Technol*. 13, R41-R60, 2002.

Gan, G. Numerical Method for a Full Assessment of Indoor Thermal Comfort. Indoor Air 1994, 4:154-168, 1994.

Gao N. P., Niu J. L., Personalized ventilation for commercial aircraft cabins. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Austronautics, Inc., Nevada, 2007.

Guan, Y., Hosni, M. H., Jones, W. J., Gielda, T. P. Investigation of Human Thermal Comfort under Highly Transient Conditions for Automotive Applications – Part 1:

Experimental Design and Human Subject Testing Implementation ASHRAE Trans., 109(2): 885-897, 2003.

Heiselberg. Draught Risk From Cold Vertical Surfaces. Building and Environment, Vol. 29, No. 3, pp. 297-301, 1994.

Hensel, H., Zotterman, Y. The response of mechanoreceptors to thermal stimulation. J. Physiol. (1951) 115, 16-24, 1951.

Hunt, E.H., Space, D.R.The Airplane Cabin Environment - Issues Pertaining to Flight Attendant Comfort, *The Boeing Company, International In-flight Service Management Organization Conference*, Montreal, Canada, 1995.

INMETRO, 1998. Guia para expressão da incerteza de medição, segunda edição brasileira publicada pelo INMETRO e pela ABNT, Agosto, 1998.

Irgens, S., Melikov, A. Assessment of thermal environment in an aircraft cabin. Proceedings of the 9th International Conference on Air Distribution in Rooms. Coimbra, 2004.

ISO 7726. Thermal Environments – Instruments and Methods for Measuring Physical Quantities. International Organization for Standardization, Geneva, 1998.

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. European Committee for Standardization, 2005.

ISO 14505-2. Ergonomics of the Thermal Environment – Evaluation of Thermal Environment in Vehicles – Part 2: Determination of Equivalent Temperature. International Organization for Standardization, Geneva, 2006.

ISO 14505-3. Ergonomics of the Thermal Environment - Evaluation of Thermal Environment in Vehicles – Part 3: Evaluation of Thermal Comfort using Human Subjects. International Organization for Standardization, Geneva, 2006.

Jacobs, P., Gids, W. F. The aircraft seat as indoor air quality and temperature control system. Proceedings of Indoor Air 2005. p.1-10. Beijing, 2005.

Kaczmarczyk, J., Melikov, A., Fanger P. O., Human response to personalized ventilation and mixing ventilation. Indoor Air 14(8):17-29, 2004.

Kaczmarczyk, J., Melikon, A., Bolashikov, Z., Nikolaev, L., Fanger, P. O. Human response to five designs of personalized ventilation. HVAC&R Research. 12(2):367-384, 2006.

Koskela, H., Heikkinen, J., Niemelä, R., Hautalampi, T. Turbulence correction for thermal comfort calculation. Building and Environment, 36 (2001) 247-255, 2001.

Leite, B. C. C. Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: Avaliação de conforto térmico e condições de operação. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 162 p., 2003.

Leite, B. C. C., Tribess, A. Individually controlled office environments – Thermal Comfort Parameters Determination. Proceedings of the 9th International Conference on Air Distribution in Rooms. Coimbra, 2004.

Leite, B. C. C., Tribess, A. Analysis of Thermal Comfort in an Office Environment with Underfloor Air Supply in a Tropical Climate. HVAC&R Research. 12(2):215-229, 2006.

Lima, J. C., Avaliação Experimental da Influência do Revestimento de Assentos Automotivos no Conforto Térmico. Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 66 p., 2006.

Loomans, M., Jacobs, P., Tissot, A., Miles, S. In-flight Measurement and Simulation of Aircraft Environment. Proceedings of the 9th International Conference on Air Distribution in Room. Coimbra, 2004.

Lustbader, J. A. Evaluation of Advanced Automotive Seats to Improve Thermal Comfort and Fuel Economy. Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, Society of Automotive Engineering, Paper 2005-01-2056, Toronto, 2005.

Madsen, T. L., Olesen, B. W., Kristensen, N. K. Comparison Bettween Operative and Equivalent Temperature Under Typical Indoor Conditions. ASHRAE Transactions 90 1077-90, 1984.

Madsen, T. L., Olesen, B.; Reid, K. New methods for evaluation of the thermal environment in automotive vehicles, ASHRAE Transactions 92 part 1B, 38-54, 1986.

Madsen, T. L., Thermal Effects of Ventilated Car Seats. International Journal of Industrial Ergonomics, 13:253-58, 1994.

Mangili A., Gendreau, M.A. Transmission of infectious diseases during commercial air travel. Lancet 365: 989–96, 2005.

Moura, D. Condições do escoamento e de conforto térmico em cabine de aeronave. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 74p., 2009.

Nielsen, P. V., Barszcz, E., Czarnota, T., Dymalski, D. P., Jasienski, M. A., Nowotka, A., Mozer, A., Wiankowska, S. M., e Jensen, R. L. The influence of draught on a seat with integrated personalized ventilation. Indoor Air 2008, 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark - Paper ID: 247, 2008.

Nilsson, H. O., Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. Master Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Department of Technology and Built Environment, University of Gävle, Sweden, 152 p., 2004.

Nilsson, H. O. Thermal Comfort Evaluation with Virtual Manikin Methods. Building and Environment, 42: 4000-4005, 2007.

Pennecot, J., Bosbach, J., Wagner, C., Rafael, M., Lerche, T., Repp, S. Mixed Convection in Idealized Airplane-Cabins: A Comparation Between Numerical Simulations and Particle Image Velocimetry Measurements. Proceedings of the 9th International Conference on Air Distribution in Rooms. Roomvent 2004. Coimbra, 2004.

Park, S., Hellwig, R. T., Grün, G., Holm, A. Local and overall thermal comfort in an aircraft cabin and their interrelations. Building and Environment 46 (2011) 1056-1064, 2011.

Pereira, M. L., Graudenz, G., Tribess, A., Morawska, L. Determination of particle concentration in the breathing zone for four different types of office ventilation systems. Building and Environment, 1-8, 2008.

Pope, S. B. Turbulent Flows. Cambridge University Press. 771 p. New York, 2005.

PT-TECNIK, http://pt-teknik.dk - acessado em 07/09/13, 2013.

Roy, D.; Petitjean, P.; Clodic, D. Influence of Various Heat Transfers on Passenger Thermal Comfort. *SAE World Congress*, Paper 2003-01-1075, Detroit, 2003.

Schlichting, H. Boundary Layer Theory. McGraw Hill Book Company. Seventh Edition. 817 p. New York, 1979.

Silva, E. S., Fabichak Jr. D., Tribess, A. Análise experimental do desconforto térmico local em aeronave com insuflamento de ar pelo psio. Anais do XII Encopntro Nacional de Conforto no ambiente Construído, ENCAC 2013, Brasília, 10 p., 2013a.

Silva, E. S., Fabichak Jr. D., Tribess, A. Avaliação do desconforto térmico local em cabine de aeronave com insuflamento pelo teto e pelo piso, Anais do XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, SIMEA 2013, São Paulo, 13 p., 2013b.

Stancato, F. Análise de Ambiente Térmico de Cabine de Aeronave. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 154 p., São Paulo, 2009.

Strøm-Tejsen, P., Wyon, D. P., Zukowska, D., Jama, A., Fang, L. Occupant Evaluation of 7-hour Exposures in a Simulated Aircraft Cabin. Part2: Thermal Effects. Proceedings of Indoor Air 2005. Beijing, 2005.

Strøm-Tejsen, P., Zukowska, D., Jama, A., Wyon, D. P. Assessment of the thermal environment in a simulated aircraft cabin using thermal manikin exposure. Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007. Helsinki, 2007.

Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y.,Konishi, M. Evaluation of Thermal Comfort Using Combined Multi-Node Thermoregulation (65MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6): 637- 646, 2002.

Tennekes, H., Lumley, J. L. A First Course in Turbulence. MIT Press. 300 p. Massachusetts, 1972.

Tribess, A.. Análise do Conforto Térmico em Ambientes Climatizados. Tese de Livre Docência. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 146 p., São Paulo, 2008.

Vuolo, J. H. Fundamentos da teoria de erros, 2º ed., Edgard Blücher Ltda, 1996.

Wang A, Zhang Y., Sun Y, Wang X. Experimental study of ventilation effectiveness and air velocity distribution in an aircraft cabin mockup. Building and Environment 43: 337–343, 2008.

Yan W, Zhang Y, Sun Y, Li D. Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up. Building and Environment. 44: 34-43, 2009.

Zhang T, Chen Q. Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins. Building and Environment (42):1675-1684, 2007.

Zhang Z, Chen X, Mazundar S, Zhang, T. Chen, Q. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mock-up. Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007. Helsinki. 2007a.

Zhang, T., Li, P., Wang, S. A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes. Building and Environment, 2011.

Zhang, T., Yin, S., Wang, S. An under-aisle air distribution system facilitating humidification of commercial aircraft cabins. Building and Environment, 45 (2010) 907-915, 2010.

Zukowski, M. A new formula for determining a minimum recommended value of inlet air velocity from UFAD system to prevent occupants from draught risk. Building and Environment, 42 (2007) 171-179, 2007.

ANEXO A

Determinação da temperatura operativa

A temperatura operativa é função da temperatura do ar e da temperatura radiante média. Em ambientes climatizados, onde a velocidade relativa do ar deve ser pequena $(< 0{,}2\ m/s)$ ou onde a diferença entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar é pequena $(< 4\ °C)$, a temperatura operativa pode ser calculada com suficiente aproximação como o valor médio da temperatura do ar e temperatura radiante média (ASHRAE 55, 2010).

Para maior precisão e outros ambientes, a seguinte equação pode ser utilizada:

$$T_o = a \cdot T_{ar} + (1 - a) \cdot \overline{T_r}$$

em que:

T_o é a temperatura operativa [°C];

T_{ar} é a temperatura do ar [°C];

$\overline{T_r}$ é a temperatura radiante média [°C];

a é o coeficiente de aproximação em função da velocidade [admensional].

O coeficiente de aproximação pode ser determinado dos valores listado abaixo como função da velocidade relativa do ar.

$V_{ar}[m/s]$	0,0-0,2	0,2 – 0,6	0,6 – 1,0
a	0,5	0,6	0,7

Determinação da temperatura operativa através do balanço de energia pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$T_o = \frac{h_c\, T_{ar} + h_r \overline{T_r}}{h_c + h_r}$$

$$h_c = \begin{cases} 2{,}38\left(T_{Roupa} - T_{ar}\right)^{0{,}25} & para\ \ 2{,}38\left(T_{Roupa} - T_{ar}\right)^{0{,}25} \geq 12{,}1\sqrt{V_{ar}} \\ 12{,}1\sqrt{V_{ar}} & para\ \ 2{,}38\left(T_{Roupa} - T_{ar}\right)^{0{,}25} < 12{,}1\sqrt{V_{ar}} \end{cases}$$

$$h_r = 4\,\varepsilon\,\sigma\,\frac{A_r}{A_D}\left[273{,}2 + \left(\frac{T_{Roupa} + \overline{T_r}}{2}\right)\right]^3$$

Para pessoas sentadas

$$\frac{A_r}{A_D} = 0{,}70$$

Para pessoas em pé

$$\frac{A_r}{A_D} = 0{,}73$$

$$A_D = 0{,}202\, m^{0{,}425}\, l^{0{,}725}$$

em que

h_c é o coeficiente de troca de calor por convecção [W/m² °C];

h_r é o coeficiente de troca de calor por radiação [W/m² °C];

T_{ar} é a temperatura do ar [°C];

$\overline{T_r}$ é a temperatura radiante média [°C];

T_{Roupa} é a temperatura da roupa [°C];

V_{ar} é a velocidade relativa do ar [m/s];

ε é a emissividade da roupa ou do corpo nu [admensional];

σ é a constante de Stefan-Boltzmann [W/m² K^4];

A_r é a área de radiação efetiva do corpo [m²];

A_D é a área de Du Bois [m²];

m é a massa do corpo [kg];

l é a altura do corpo [m].

A temperatura radiante média pode ser determinada pelas seguintes equações

Para convecção natural

$$\overline{T_r} = \left[\left(T_g + 273\right)^4 + 0{,}4 \times 10^8 \left(T_g - T_{ar}\right)^{0{,}25} \left(T_g - T_{ar}\right)\right]^{0{,}25} - 273$$

Para convecção forçada

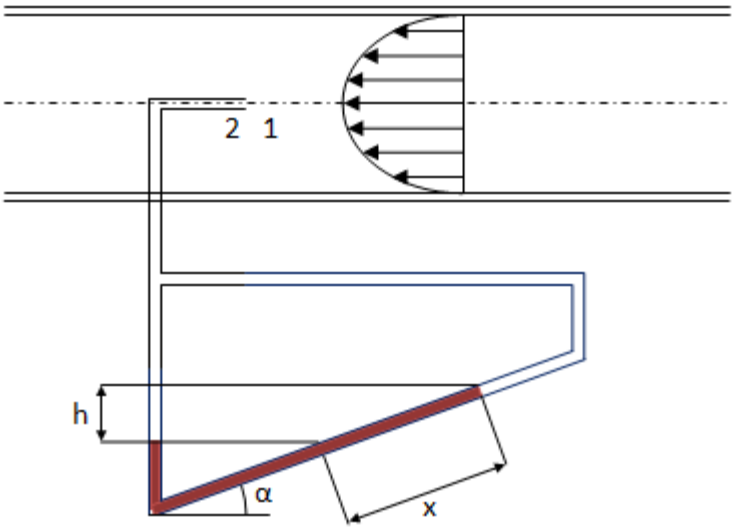
$$\overline{T_r} = \left[\left(T_g + 273\right)^4 + 2{,}5 \times 10^8 V_{ar}^{0{,}6} \left(T_g - T_{ar}\right)\right]^{0{,}25} - 273$$

em que

$\overline{T_r}$ é a temperatura radiante média	[°C];
T_g é a temperatura de globo	[°C];
T_{ar} é a temperatura do ar	[°C];
V_{ar} é a velocidade relativa do ar	[m/s].

ANEXO B

Memorial de cálculo do manômetro diferencial



Cálculo:

Utilizando a equação de conservação de energia

$$H_1 = H_2$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$

Adotando-se o ponto 1 muito próximo do ponto 2 tem-se:

$$v_1 = \sqrt[2]{2g\left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_{ar}}\right)} \qquad (1)$$

Pois,

$z_1 = z_2 = 0$

$v_2 = 0$ (ponto de estagnação)

Aplicando-se a equação manométrica entre os pontos 1 e 2 tem-se:

$$P_2 + \gamma_{ar} \cdot h - \gamma_f \cdot h = P_1$$

Em que:

$$h = x \cdot sen\, \alpha$$

Portanto, tem-se:

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma_{ar}} = h\left(\frac{\gamma_f}{\gamma_{ar}} - 1\right) \tag{2}$$

Substituindo (2) em (1) tem-se:

$$v_1 = \sqrt[2]{2g\left[h\left(\frac{\gamma_f}{\gamma_{ar}} - 1\right)\right]} \tag{3}$$

Em que:

$$v_1 = v_{máx}$$

Para o escoamento turbulento, Re > 2400

$$v_{méd} = \frac{49}{60} v_{máx}$$

A vazão é dada por:

$$Q = A \cdot v_{méd} \tag{4}$$

Em que:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Dados para o cálculo do manômetro

$$g_{local} = 9{,}7856\ \frac{m}{s}$$

$$\rho_{ar\ @20\ °C} = 1{,}204\ \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{fluido} = 0{,}8260\ @\ 20\ °C$$

$$\rho_{H_2O\ @\ 20\ °C} = 998{,}2071\ \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu_{ar} = 1{,}74 \times 10^{-5}\ Pa \cdot s$$

$$d_{duto} = 100\ mm$$

Substituindo os valores, tem-se:

$v_1 = 115{,}685\ \sqrt[2]{h}$ (h é dado em metros)

ou

$v_1 = 3{,}658\ \sqrt[2]{h}$ (h é dado em milímetros)

ANEXO C

Incertezas de medição

Os valores das variáveis são a média dos valores nos três ensaios em cada posição e em cada condição estudada. As incertezas são o resultado da combinação das incertezas dos equipamentos e dos desvios padrão em cada posição e em cada condição de ensaio. (COLEMAN e STEELE, 1989; VUOLO, 1996; INMETRO, 1998).

A média das variáveis foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Em que:

x representa o valor da variável e n o número de amostras.

O desvio padrão das variáveis foi calculado utilizando a seguinte equação:

$$\sigma_x = \sqrt[2]{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$$

O desvio padrão para o valor médio foi calculado utilizando a equação:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

E por fim, a incerteza padrão ε que é a combinação da incerteza sistemática residual (incerteza do instrumento) e o desvio padrão para o valor médio foi calculada utilizando a equação:

$$\varepsilon = \sqrt[2]{\sigma_m^2 + \sigma_r^2}$$

Em que:

σ_r é a incerteza sistemática residual (incerteza do instrumento).

Os resultados das variáveis ambientais, juntamente com as incertezas de medição, são apresentados nas Tabelas C.1 a C.6.

Tabela C.1 – **Dados das variáveis ambientes para temperatura de insuflamento igual a 18 °C, região inferior.**

MV																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,35	0,07	0,36	0,08	0,35	0,08	0,35	0,04	19,8	0,2	19,8	0,2	19,9	0,2	19,8	0,1	21	39
1B	0,30	0,08	0,29	0,16	0,29	0,08	0,30	0,05	20,6	0,2	20,7	0,2	20,7	0,2	20,7	0,1	36	40
1C	0,17	0,09	0,16	0,09	0,18	0,09	0,17	0,05	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,1	52	24
1D	0,37	0,08	0,36	0,07	0,38	0,08	0,37	0,04	21,3	0,2	21,4	0,2	21,5	0,2	21,4	0,1	21	36
1E	0,43	0,06	0,43	0,06	0,43	0,06	0,43	0,03	21,2	0,2	21,1	0,2	21,0	0,2	21,1	0,1	14	38
2A	0,37	0,11	0,36	0,10	0,40	0,10	0,37	0,06	19,5	0,2	19,5	0,2	19,4	0,2	19,5	0,1	28	50
2B	0,18	0,06	0,19	0,06	0,19	0,06	0,18	0,03	19,5	0,2	19,5	0,2	19,5	0,2	19,5	0,1	33	22
2C	0,14	0,06	0,16	0,06	0,16	0,06	0,16	0,03	20,0	0,2	19,9	0,2	19,9	0,2	19,9	0,1	38	19
2D	0,08	0,04	0,08	0,04	0,08	0,04	0,08	0,02	20,5	0,2	20,6	0,2	20,6	0,2	20,6	0,1	54	7
2E	0,20	0,06	0,20	0,07	0,19	0,06	0,20	0,04	21,0	0,2	21,0	0,2	21,0	0,2	21,0	0,1	34	22
3A	0,27	0,08	0,28	0,08	0,27	0,08	0,27	0,04	19,7	0,2	19,6	0,2	19,6	0,2	19,6	0,1	28	34
3B	0,31	0,08	0,33	0,08	0,32	0,07	0,32	0,04	19,6	0,2	19,6	0,2	19,6	0,2	19,6	0,1	24	38
3C	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,03	20,0	0,2	20,0	0,2	20,0	0,2	20,0	0,1	52	11
3D	0,17	0,07	0,17	0,07	0,18	0,07	0,17	0,04	20,0	0,2	20,0	0,2	20,0	0,2	20,0	0,1	40	22
3E	0,24	0,08	0,24	0,08	0,24	0,08	0,24	0,05	20,0	0,2	19,9	0,2	19,9	0,2	19,9	0,1	33	30
UFAD modificado																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,45	0,06	0,45	0,05	0,45	0,05	0,45	0,03	17,5	0,2	17,5	0,2	17,5	0,2	17,5	0,1	12	47
1B	0,37	0,08	0,38	0,08	0,37	0,08	0,37	0,05	18,0	0,2	17,9	0,2	17,9	0,2	17,9	0,1	22	50
1C	0,40	0,12	0,41	0,13	0,41	0,14	0,41	0,07	18,1	0,2	18,4	0,2	18,4	0,2	18,3	0,1	31	65
1D	0,39	0,05	0,40	0,06	0,39	0,06	0,40	0,03	19,2	0,2	19,2	0,2	19,2	0,2	19,2	0,1	15	40
1E	0,40	0,05	0,39	0,06	0,40	0,06	0,40	0,03	18,9	0,2	18,9	0,2	18,9	0,2	18,9	0,1	14	41
2A	0,35	0,08	0,34	0,07	0,36	0,08	0,35	0,05	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,1	22	47
2B	0,28	0,05	0,29	0,05	0,29	0,06	0,29	0,03	17,6	0,2	17,6	0,2	17,6	0,2	17,6	0,1	19	35
2C	0,34	0,08	0,34	0,08	0,36	0,09	0,34	0,05	17,8	0,2	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,1	25	48
2D	0,35	0,11	0,35	0,10	0,34	0,12	0,35	0,06	18,4	0,2	18,5	0,2	18,4	0,2	18,4	0,1	32	54
2E	0,49	0,11	0,49	0,11	0,52	0,10	0,50	0,06	18,4	0,2	18,3	0,2	18,4	0,2	18,4	0,1	21	66
3A	0,39	0,08	0,38	0,08	0,38	0,08	0,39	0,04	17,3	0,2	17,3	0,2	17,3	0,2	17,3	0,1	20	51
3B	0,30	0,08	0,30	0,08	0,32	0,09	0,31	0,05	17,6	0,2	17,5	0,2	17,6	0,2	17,5	0,1	27	44
3C	0,76	0,09	0,78	0,09	0,77	0,09	0,77	0,05	17,7	0,2	17,8	0,2	17,7	0,2	17,7	0,1	12	85
3D	0,27	0,09	0,29	0,10	0,28	0,10	0,28	0,06	18,1	0,2	18,0	0,2	18,0	0,2	18,0	0,1	34	43
3E	0,37	0,12	0,36	0,12	0,36	0,11	0,36	0,07	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,1	32	59
UFAD																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,02	21,6	0,2	21,5	0,2	21,5	0,2	21,6	0,1	75	1
1B	0,15	0,06	0,14	0,05	0,14	0,06	0,14	0,03	21,7	0,2	21,8	0,2	21,9	0,2	21,8	0,1	39	15
1C	0,66	0,13	0,64	0,14	0,64	0,13	0,65	0,08	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,1	21	73
1D	0,06	0,04	0,07	0,05	0,07	0,04	0,07	0,03	23,0	0,2	23,0	0,2	23,1	0,2	23,0	0,1	69	4
1E	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05	0,02	22,8	0,2	22,8	0,2	22,9	0,2	22,8	0,1	57	1
2A	0,10	0,05	0,09	0,05	0,11	0,05	0,10	0,03	20,6	0,2	20,6	0,2	20,5	0,2	20,6	0,1	50	10
2B	0,16	0,04	0,16	0,04	0,16	0,04	0,16	0,02	20,3	0,2	20,3	0,2	20,2	0,2	20,3	0,1	26	16
2C	0,46	0,11	0,45	0,13	0,46	0,12	0,46	0,07	20,0	0,2	20,0	0,2	19,9	0,2	20,0	0,1	26	61
2D	0,13	0,06	0,13	0,06	0,13	0,06	0,13	0,03	22,0	0,2	22,0	0,2	22,1	0,2	22,0	0,1	44	13
2E	0,21	0,09	0,22	0,09	0,20	0,09	0,21	0,05	22,3	0,2	22,3	0,2	22,3	0,2	22,3	0,1	42	24
3A	0,15	0,05	0,15	0,06	0,14	0,06	0,15	0,03	20,4	0,2	20,3	0,2	20,2	0,2	20,3	0,1	38	17
3B	0,27	0,05	0,28	0,05	0,30	0,05	0,29	0,03	20,2	0,2	20,2	0,2	20,2	0,2	20,2	0,1	18	29
3C	0,62	0,13	0,61	0,11	0,60	0,11	0,61	0,07	19,7	0,2	19,7	0,2	19,7	0,2	19,7	0,1	19	75
3D	0,21	0,06	0,22	0,06	0,21	0,06	0,21	0,03	20,7	0,2	20,7	0,2	20,6	0,2	20,7	0,1	27	23
3E	0,27	0,07	0,28	0,06	0,27	0,07	0,27	0,04	21,1	0,3	21,1	0,3	21,0	0,3	21,1	0,1	25	29

Tabela C.2 – Dados das variáveis ambientes para temperatura de insuflamento igual a 18 °C, região central.

MV																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,13	0,06	0,13	0,07	0,13	0,06	0,13	0,04	20,4	0,2	20,4	0,2	20,5	0,2	20,4	0,1	47	16
1B	0,19	0,10	0,22	0,14	0,17	0,09	0,18	0,06	20,7	0,2	20,8	0,3	20,8	0,2	20,8	0,1	57	27
1C	0,13	0,05	0,12	0,05	0,11	0,05	0,12	0,03	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,1	42	13
1D	0,08	0,05	0,09	0,05	0,10	0,05	0,09	0,03	21,3	0,2	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,1	53	8
1E	0,10	0,04	0,10	0,04	0,10	0,05	0,10	0,03	22,5	0,3	22,5	0,3	22,4	0,3	22,5	0,2	45	8
2A	0,13	0,08	0,14	0,08	0,11	0,08	0,13	0,05	20,1	0,2	20,0	0,2	20,1	0,2	20,1	0,1	63	17
2B	0,17	0,10	0,16	0,09	0,17	0,10	0,17	0,05	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,1	57	24
2C	0,09	0,05	0,08	0,05	0,09	0,05	0,09	0,03	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,1	54	8
2D	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,03	21,8	0,3	21,9	0,3	21,9	0,3	21,8	0,2	60	8
2E	0,11	0,04	0,10	0,05	0,10	0,05	0,11	0,03	21,1	0,2	21,1	0,2	21,1	0,2	21,1	0,1	43	10
3A	0,24	0,06	0,25	0,06	0,24	0,06	0,24	0,04	19,8	0,2	19,7	0,2	19,7	0,2	19,8	0,1	25	28
3B	0,19	0,07	0,19	0,08	0,19	0,08	0,19	0,04	19,8	0,2	19,8	0,2	19,8	0,2	19,8	0,1	40	25
3C	0,08	0,06	0,09	0,06	0,10	0,06	0,09	0,04	20,1	0,2	20,1	0,2	20,0	0,2	20,0	0,1	69	11
3D	0,12	0,03	0,12	0,03	0,11	0,04	0,12	0,02	20,5	0,2	20,5	0,2	20,5	0,2	20,5	0,1	29	11
3E	0,04	0,03	0,05	0,03	0,05	0,03	0,05	0,02	20,6	0,2	20,6	0,2	20,6	0,2	20,6	0,1	71	0
UFAD modificado																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,14	0,07	0,15	0,07	0,15	0,06	0,15	0,04	18,5	0,2	17,5	0,2	18,6	0,2	18,2	0,1	46	22
1B	0,19	0,07	0,20	0,07	0,18	0,07	0,19	0,04	19,2	0,2	17,9	0,2	19,3	0,2	18,7	0,1	36	25
1C	0,14	0,06	0,13	0,06	0,12	0,06	0,13	0,03	19,0	0,2	19,2	0,2	19,2	0,2	19,1	0,1	46	16
1D	0,23	0,06	0,23	0,06	0,19	0,06	0,22	0,03	20,1	0,2	20,1	0,2	20,2	0,2	20,1	0,1	28	25
1E	0,39	0,07	0,39	0,08	0,39	0,07	0,39	0,04	20,1	0,2	20,1	0,2	20,1	0,2	20,1	0,1	19	42
2A	0,20	0,08	0,21	0,08	0,19	0,08	0,20	0,05	18,2	0,2	18,3	0,2	18,3	0,2	18,3	0,1	40	30
2B	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,03	18,5	0,2	18,6	0,2	18,6	0,2	18,6	0,1	54	10
2C	0,47	0,11	0,47	0,11	0,46	0,12	0,47	0,06	18,3	0,2	18,3	0,2	18,3	0,2	18,3	0,1	24	67
2D	0,41	0,08	0,41	0,08	0,40	0,07	0,41	0,04	19,5	0,3	19,7	0,3	19,6	0,2	19,6	0,1	18	45
2E	0,37	0,10	0,37	0,10	0,39	0,10	0,38	0,06	18,7	0,2	18,6	0,2	18,6	0,2	18,6	0,1	27	53
3A	0,60	0,12	0,59	0,12	0,60	0,12	0,60	0,07	17,3	0,2	17,4	0,2	17,3	0,2	17,3	0,1	20	85
3B	0,24	0,06	0,23	0,07	0,23	0,06	0,23	0,04	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,2	17,7	0,1	27	31
3C	0,43	0,12	0,41	0,12	0,40	0,12	0,41	0,07	18,0	0,2	18,0	0,2	17,9	0,2	18,0	0,1	29	65
3D	0,13	0,06	0,12	0,06	0,12	0,06	0,13	0,03	18,8	0,3	18,8	0,2	18,9	0,2	18,9	0,1	47	16
3E	0,19	0,06	0,19	0,06	0,18	0,06	0,19	0,03	18,4	0,2	18,4	0,2	18,4	0,2	18,4	0,1	32	24
UFAD																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,13	0,05	0,13	0,05	0,13	0,05	0,13	0,03	21,3	0,2	21,3	0,2	21,4	0,2	21,3	0,1	35	13
1B	0,25	0,05	0,25	0,05	0,25	0,05	0,25	0,03	22,1	0,3	22,2	0,3	22,3	0,3	22,2	0,2	19	21
1C	0,15	0,06	0,14	0,06	0,14	0,05	0,14	0,03	22,7	0,2	22,6	0,2	22,5	0,2	22,6	0,1	41	14
1D	0,07	0,04	0,08	0,04	0,07	0,04	0,07	0,02	23,6	0,2	23,7	0,2	23,8	0,2	23,7	0,1	49	5
1E	0,11	0,04	0,10	0,04	0,10	0,04	0,11	0,02	22,9	0,2	23,0	0,2	23,1	0,2	23,0	0,1	40	9
2A	0,30	0,07	0,30	0,08	0,30	0,07	0,30	0,04	20,8	0,2	20,8	0,2	20,7	0,2	20,8	0,1	24	33
2B	0,14	0,06	0,13	0,05	0,13	0,05	0,14	0,03	22,0	0,3	22,2	0,3	22,2	0,3	22,1	0,2	40	13
2C	0,52	0,11	0,51	0,11	0,51	0,11	0,51	0,06	20,3	0,2	20,3	0,2	20,2	0,2	20,3	0,1	22	62
2D	0,16	0,07	0,17	0,06	0,16	0,06	0,16	0,04	22,1	0,4	22,2	0,4	22,5	0,5	22,2	0,2	37	17
2E	0,12	0,05	0,11	0,05	0,13	0,05	0,12	0,03	22,9	0,2	22,9	0,2	22,8	0,2	22,9	0,1	44	11
3A	0,28	0,05	0,28	0,06	0,27	0,05	0,28	0,03	20,3	0,2	20,2	0,2	20,1	0,2	20,2	0,1	20	29
3B	0,25	0,06	0,26	0,07	0,26	0,06	0,25	0,04	20,1	0,2	20,1	0,2	20,2	0,2	20,2	0,1	25	28
3C	0,63	0,13	0,62	0,15	0,63	0,13	0,63	0,08	19,7	0,2	19,7	0,2	19,7	0,2	19,7	0,1	22	83
3D	0,28	0,07	0,27	0,07	0,27	0,07	0,27	0,04	20,3	0,2	20,3	0,2	20,2	0,2	20,3	0,1	27	31
3E	0,28	0,05	0,29	0,05	0,28	0,06	0,29	0,03	20,9	0,2	20,9	0,2	20,9	0,2	20,9	0,1	19	28

Tabela C.3 – Dados das variáveis ambientes para temperatura de insuflamento igual a 18 °C, região superior.

MV																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,36	0,13	0,36	0,14	0,39	0,14	0,37	0,08	20,4	0,2	20,5	0,2	20,6	0,2	20,5	0,1	37	54
1B	0,51	0,14	0,20	0,17	0,48	0,14	0,42	0,08	21,2	0,3	21,2	0,3	21,2	0,3	21,2	0,1	46	71
1C	0,37	0,15	0,39	0,16	0,37	0,17	0,38	0,09	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,2	20,3	0,1	42	62
1D	0,28	0,07	0,29	0,07	0,30	0,08	0,29	0,04	22,3	0,2	22,4	0,2	22,4	0,2	22,3	0,1	26	28
1E	0,53	0,15	0,52	0,13	0,52	0,14	0,53	0,08	21,7	0,2	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,1	26	64
2A	0,37	0,13	0,38	0,13	0,39	0,14	0,38	0,08	19,9	0,2	19,8	0,2	19,8	0,2	19,8	0,1	35	58
2B	0,42	0,12	0,43	0,12	0,41	0,11	0,42	0,07	20,2	0,3	20,2	0,3	20,3	0,3	20,2	0,2	28	56
2C	0,39	0,11	0,39	0,09	0,38	0,10	0,39	0,06	20,2	0,2	20,2	0,2	20,2	0,2	20,2	0,1	25	48
2D	0,34	0,07	0,36	0,07	0,35	0,07	0,35	0,04	21,1	0,2	21,1	0,2	21,1	0,2	21,1	0,1	21	35
2E	0,65	0,15	0,65	0,14	0,65	0,14	0,65	0,08	20,7	0,2	20,7	0,2	20,7	0,2	20,7	0,1	22	82
3A	0,59	0,10	0,60	0,10	0,59	0,11	0,59	0,06	19,8	0,2	19,7	0,2	19,7	0,2	19,7	0,1	17	68
3B	0,41	0,12	0,41	0,12	0,42	0,11	0,42	0,07	19,9	0,2	19,9	0,2	19,9	0,2	19,9	0,1	28	56
3C	0,22	0,08	0,23	0,08	0,23	0,09	0,22	0,05	20,1	0,2	20,1	0,2	20,0	0,2	20,1	0,1	36	29
3D	0,46	0,08	0,46	0,08	0,46	0,08	0,46	0,05	21,0	0,2	21,1	0,2	21,1	0,2	21,1	0,1	17	45
3E	0,23	0,08	0,23	0,08	0,23	0,08	0,23	0,05	20,4	0,2	20,3	0,2	20,2	0,2	20,3	0,1	37	29
UFAD modificado																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,10	0,03	0,09	0,03	0,09	0,03	0,09	0,02	18,7	0,2	17,5	0,2	18,7	0,2	18,3	0,1	35	10
1B	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,04	0,08	0,03	19,2	0,2	17,9	0,2	19,2	0,2	18,8	0,1	58	8
1C	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,04	0,05	0,02	18,9	0,2	19,1	0,2	19,1	0,2	19,0	0,1	74	2
1D	0,10	0,04	0,09	0,04	0,12	0,04	0,10	0,02	19,4	0,2	19,4	0,2	19,5	0,2	19,4	0,1	42	11
1E	0,12	0,04	0,12	0,04	0,13	0,04	0,12	0,02	20,5	0,3	20,5	0,3	20,6	0,3	20,5	0,2	33	12
2A	0,07	0,04	0,07	0,04	0,07	0,04	0,07	0,03	18,7	0,2	18,8	0,2	18,8	0,2	18,8	0,1	63	6
2B	0,09	0,04	0,10	0,04	0,09	0,04	0,09	0,02	18,8	0,2	18,7	0,2	18,8	0,2	18,7	0,1	42	10
2C	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,03	18,4	0,2	18,4	0,2	18,4	0,2	18,4	0,1	59	10
2D	0,07	0,05	0,06	0,05	0,07	0,05	0,07	0,03	19,4	0,3	19,4	0,3	19,4	0,3	19,4	0,2	73	6
2E	0,10	0,04	0,10	0,04	0,09	0,04	0,10	0,02	19,0	0,2	18,9	0,2	19,0	0,2	19,0	0,1	42	11
3A	0,27	0,11	0,28	0,11	0,27	0,11	0,27	0,06	17,4	0,2	17,5	0,2	17,5	0,2	17,5	0,1	41	47
3B	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05	0,04	0,06	0,03	17,9	0,2	17,8	0,2	17,9	0,2	17,9	0,1	77	4
3C	0,09	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,03	18,3	0,2	18,2	0,2	18,2	0,2	18,2	0,1	52	12
3D	0,05	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,03	18,5	0,2	18,5	0,2	18,5	0,2	18,5	0,1	77	3
3E	0,08	0,05	0,08	0,05	0,07	0,05	0,08	0,03	18,3	0,2	18,3	0,2	18,3	0,2	18,3	0,1	62	8
UFAD																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	21,2	0,2	21,2	0,2	21,2	0,3	21,2	0,1	93	0
1B	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	22,2	0,2	22,4	0,2	22,5	0,2	22,4	0,1	85	0
1C	0,06	0,04	0,06	0,04	0,05	0,04	0,06	0,02	22,8	0,3	22,7	0,3	22,6	0,3	22,7	0,2	69	2
1D	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,03	22,8	0,2	23,0	0,2	23,1	0,2	23,0	0,1	59	6
1E	0,08	0,04	0,09	0,04	0,09	0,04	0,09	0,02	23,4	0,2	23,6	0,3	23,6	0,3	23,6	0,1	44	6
2A	0,12	0,04	0,11	0,04	0,12	0,05	0,12	0,03	21,3	0,3	21,2	0,3	21,1	0,2	21,2	0,1	39	12
2B	0,11	0,05	0,11	0,05	0,10	0,05	0,11	0,03	21,7	0,4	21,6	0,4	21,7	0,5	21,7	0,3	46	11
2C	0,16	0,06	0,15	0,06	0,15	0,07	0,15	0,04	20,5	0,2	20,4	0,2	20,3	0,2	20,4	0,1	42	19
2D	0,08	0,05	0,08	0,05	0,09	0,06	0,08	0,03	21,1	0,3	21,1	0,3	21,2	0,2	21,1	0,1	59	8
2E	0,06	0,04	0,06	0,04	0,07	0,04	0,06	0,02	22,2	0,3	22,2	0,3	22,1	0,4	22,2	0,2	62	3
3A	0,11	0,04	0,11	0,05	0,11	0,04	0,11	0,03	20,4	0,2	20,2	0,2	20,2	0,2	20,3	0,1	40	12
3B	0,13	0,06	0,14	0,06	0,13	0,06	0,13	0,03	20,1	0,2	20,1	0,2	20,2	0,2	20,1	0,1	45	16
3C	0,17	0,07	0,19	0,09	0,18	0,09	0,18	0,05	20,0	0,2	19,9	0,2	19,9	0,2	20,0	0,1	46	24
3D	0,14	0,07	0,13	0,07	0,15	0,08	0,14	0,04	20,0	0,2	20,0	0,2	20,0	0,2	20,0	0,1	53	18
3E	0,11	0,04	0,12	0,04	0,12	0,04	0,12	0,02	20,5	0,2	20,5	0,2	20,4	0,2	20,5	0,1	35	12

Tabela C.4 – Dados das variáveis ambientes para temperatura de insuflamento igual a 22 °C, região inferior.

MV																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,32	0,06	0,33	0,07	0,32	0,07	0,32	0,04	23,6	0,2	23,6	0,2	23,6	0,2	23,6	0,1	21	26
1B	0,32	0,07	0,32	0,07	0,32	0,06	0,32	0,04	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	21	26
1C	0,18	0,09	0,18	0,09	0,19	0,09	0,18	0,05	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,1	49	18
1D	0,36	0,07	0,35	0,06	0,36	0,07	0,35	0,04	24,9	0,2	24,9	0,2	24,9	0,2	24,9	0,1	19	25
1E	0,38	0,05	0,37	0,05	0,38	0,05	0,38	0,03	24,9	0,2	24,9	0,2	24,9	0,2	24,9	0,1	14	23
2A	0,45	0,11	0,43	0,11	0,43	0,11	0,43	0,06	23,4	0,2	23,4	0,2	23,4	0,2	23,4	0,1	26	43
2B	0,31	0,10	0,29	0,10	0,31	0,10	0,30	0,06	23,4	0,2	23,3	0,2	23,3	0,2	23,3	0,1	33	31
2C	0,15	0,08	0,15	0,09	0,17	0,08	0,16	0,05	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,1	54	16
2D	0,39	0,06	0,09	0,06	0,09	0,05	0,17	0,03	25,0	0,2	24,2	0,2	24,3	0,2	24,5	0,1	44	15
2E	0,31	0,08	0,31	0,08	0,30	0,08	0,31	0,05	24,8	0,2	24,8	0,2	24,8	0,2	24,8	0,1	26	24
3A	0,28	0,08	0,27	0,08	0,28	0,08	0,27	0,05	23,6	0,2	23,5	0,2	23,4	0,2	23,5	0,1	29	26
3B	0,32	0,09	0,32	0,09	0,33	0,09	0,32	0,05	23,5	0,2	23,4	0,2	23,4	0,2	23,4	0,1	27	30
3C	0,15	0,07	0,15	0,07	0,15	0,07	0,15	0,04	23,9	0,2	23,9	0,2	24,0	0,2	23,9	0,1	45	14
3D	0,17	0,06	0,17	0,06	0,17	0,06	0,17	0,03	23,8	0,2	23,8	0,2	23,9	0,2	23,8	0,1	35	14
3E	0,28	0,10	0,28	0,10	0,28	0,10	0,28	0,06	23,9	0,2	23,9	0,2	24,0	0,2	23,9	0,1	36	28
UFAD modificado																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,50	0,06	0,50	0,06	0,50	0,06	0,50	0,03	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,1	11	40
1B	0,56	0,07	0,56	0,07	0,56	0,07	0,56	0,04	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,1	12	47
1C	0,46	0,13	0,46	0,13	0,47	0,13	0,46	0,07	22,1	0,2	22,0	0,2	21,9	0,2	22,0	0,1	28	55
1D	0,46	0,06	0,45	0,06	0,46	0,06	0,46	0,04	22,8	0,2	22,8	0,2	22,8	0,2	22,8	0,1	14	35
1E	0,37	0,05	0,38	0,05	0,37	0,05	0,37	0,03	22,8	0,2	22,8	0,2	22,8	0,2	22,8	0,1	13	27
2A	0,35	0,07	0,35	0,08	0,35	0,08	0,35	0,04	21,6	0,2	21,6	0,2	21,5	0,2	21,6	0,1	21	35
2B	0,31	0,05	0,31	0,05	0,31	0,05	0,31	0,03	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,1	17	27
2C	0,52	0,11	0,51	0,12	0,52	0,11	0,52	0,07	21,4	0,2	21,4	0,2	21,5	0,2	21,4	0,1	22	58
2D	0,31	0,10	0,31	0,11	0,31	0,10	0,31	0,06	22,1	0,2	22,1	0,2	22,1	0,2	22,1	0,1	33	36
2E	0,41	0,09	0,43	0,10	0,42	0,10	0,42	0,06	22,3	0,2	22,3	0,2	22,3	0,2	22,3	0,1	23	42
3A	0,39	0,08	0,38	0,08	0,38	0,08	0,38	0,05	21,4	0,2	21,3	0,2	21,3	0,2	21,3	0,1	21	39
3B	0,39	0,10	0,39	0,09	0,38	0,10	0,39	0,06	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,1	25	43
3C	0,64	0,13	0,65	0,13	0,67	0,13	0,65	0,07	21,3	0,2	21,4	0,2	21,4	0,2	21,4	0,1	20	73
3D	0,28	0,09	0,29	0,10	0,28	0,10	0,28	0,06	21,9	0,2	21,8	0,2	21,8	0,2	21,8	0,1	34	33
3E	0,42	0,13	0,43	0,13	0,43	0,12	0,43	0,07	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,1	29	53
UFAD																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,02	24,9	0,2	24,9	0,2	25,0	0,2	25,0	0,1	69	2
1B	0,17	0,06	0,16	0,06	0,17	0,05	0,17	0,03	25,3	0,2	25,3	0,2	25,4	0,2	25,3	0,1	33	12
1C	0,37	0,09	0,37	0,10	0,38	0,10	0,37	0,05	24,2	0,2	24,3	0,2	24,4	0,2	24,3	0,1	25	32
1D	0,09	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,03	26,4	0,2	26,5	0,2	26,3	0,2	26,4	0,1	56	5
1E	0,06	0,03	0,06	0,03	0,05	0,03	0,06	0,02	26,5	0,2	26,5	0,2	26,5	0,2	26,5	0,1	60	1
2A	0,12	0,05	0,12	0,06	0,11	0,05	0,12	0,03	24,3	0,2	24,1	0,2	24,0	0,2	24,1	0,1	47	9
2B	0,17	0,04	0,16	0,04	0,17	0,04	0,16	0,03	23,8	0,2	23,8	0,2	23,7	0,2	23,8	0,1	27	13
2C	0,52	0,15	0,48	0,13	0,48	0,14	0,49	0,08	23,4	0,2	23,4	0,2	23,4	0,2	23,4	0,1	28	53
2D	0,13	0,06	0,14	0,06	0,13	0,05	0,13	0,03	25,6	0,2	25,6	0,2	25,6	0,2	25,6	0,1	42	9
2E	0,15	0,06	0,16	0,06	0,16	0,06	0,16	0,04	25,8	0,2	25,8	0,2	25,8	0,2	25,8	0,1	41	11
3A	0,15	0,05	0,14	0,06	0,14	0,06	0,14	0,03	24,1	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	41	12
3B	0,26	0,04	0,25	0,04	0,26	0,04	0,26	0,02	23,9	0,2	23,8	0,2	23,8	0,2	23,8	0,1	17	18
3C	0,74	0,21	0,68	0,21	0,68	0,20	0,70	0,12	23,3	0,2	23,3	0,2	23,3	0,2	23,3	0,1	29	88
3D	0,22	0,06	0,22	0,07	0,23	0,06	0,22	0,04	24,6	0,2	24,6	0,2	24,6	0,2	24,6	0,1	28	17
3E	0,26	0,07	0,26	0,07	0,26	0,06	0,26	0,04	24,8	0,2	24,9	0,2	24,9	0,2	24,8	0,1	26	19

Tabela C.5 – Dados das variáveis ambientes para temperatura de insuflamento igual a 22 °C, região central.

MV																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,14	0,07	0,14	0,06	0,15	0,07	0,14	0,04	24,0	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	47	13
1B	0,27	0,10	0,25	0,10	0,26	0,10	0,26	0,06	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	38	26
1C	0,17	0,07	0,17	0,07	0,18	0,07	0,17	0,04	24,3	0,2	24,3	0,2	24,2	0,2	24,3	0,1	41	15
1D	0,08	0,05	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,03	24,7	0,2	24,7	0,2	24,7	0,2	24,7	0,1	53	6
1E	0,13	0,04	0,12	0,04	0,12	0,04	0,12	0,03	26,5	0,3	26,6	0,3	26,6	0,3	26,6	0,2	36	7
2A	0,08	0,07	0,11	0,07	0,11	0,08	0,10	0,04	24,1	0,2	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,1	76	9
2B	0,12	0,07	0,15	0,09	0,13	0,08	0,13	0,05	24,2	0,2	24,1	0,2	24,1	0,2	24,1	0,1	60	13
2C	0,13	0,05	0,13	0,05	0,12	0,04	0,13	0,03	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,1	38	10
2D	0,09	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08	0,03	24,1	0,2	25,6	0,3	25,6	0,3	24,9	0,1	61	6
2E	0,12	0,04	0,11	0,04	0,12	0,04	0,12	0,02	25,0	0,2	24,9	0,2	24,9	0,2	24,9	0,1	33	8
3A	0,21	0,07	0,20	0,06	0,21	0,06	0,21	0,04	23,8	0,2	23,6	0,2	23,6	0,2	23,7	0,1	31	18
3B	0,18	0,08	0,19	0,08	0,17	0,08	0,18	0,05	23,7	0,2	23,6	0,2	23,6	0,2	23,6	0,1	44	17
3C	0,11	0,07	0,12	0,07	0,11	0,07	0,11	0,04	24,0	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	63	11
3D	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,1	104	0
3E	0,14	0,04	0,14	0,03	0,14	0,03	0,14	0,02	24,3	0,2	24,3	0,2	24,4	0,2	24,3	0,1	25	10
UFAD modificado																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,13	0,05	0,15	0,06	0,16	0,05	0,15	0,03	22,3	0,2	22,3	0,2	22,3	0,2	22,3	0,1	37	14
1B	0,20	0,06	0,19	0,06	0,20	0,06	0,20	0,04	23,1	0,3	23,0	0,3	23,0	0,3	23,0	0,2	32	18
1C	0,13	0,07	0,13	0,06	0,14	0,06	0,13	0,04	22,7	0,2	22,7	0,2	22,6	0,2	22,7	0,1	50	13
1D	0,22	0,06	0,22	0,05	0,21	0,06	0,22	0,03	24,1	0,2	24,2	0,2	24,3	0,2	24,2	0,1	26	17
1E	0,35	0,09	0,29	0,09	0,30	0,09	0,31	0,05	23,7	0,2	23,8	0,2	23,8	0,2	23,8	0,1	29	29
2A	0,18	0,07	0,19	0,07	0,19	0,08	0,19	0,04	22,3	0,2	22,2	0,2	22,1	0,2	22,2	0,1	40	20
2B	0,06	0,04	0,07	0,03	0,07	0,04	0,06	0,02	22,7	0,2	22,8	0,2	22,8	0,2	22,7	0,1	55	4
2C	0,57	0,12	0,55	0,13	0,56	0,11	0,56	0,07	21,9	0,2	21,9	0,2	21,9	0,2	21,9	0,1	21	60
2D	0,49	0,07	0,50	0,07	0,49	0,07	0,49	0,04	23,2	0,2	23,2	0,2	23,2	0,2	23,2	0,1	14	38
2E	0,37	0,11	0,38	0,11	0,36	0,13	0,37	0,07	22,6	0,2	22,6	0,2	22,6	0,2	22,6	0,1	31	43
3A	0,62	0,11	0,63	0,11	0,63	0,10	0,63	0,06	21,3	0,2	21,3	0,2	21,3	0,2	21,3	0,1	17	64
3B	0,23	0,06	0,23	0,06	0,23	0,07	0,23	0,04	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,1	27	23
3C	0,53	0,12	0,53	0,12	0,53	0,12	0,53	0,07	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,2	21,6	0,1	23	60
3D	0,13	0,06	0,14	0,06	0,14	0,07	0,14	0,04	22,9	0,3	22,8	0,3	22,8	0,3	22,8	0,2	47	14
3E	0,16	0,07	0,16	0,06	0,15	0,06	0,16	0,04	22,7	0,2	22,6	0,2	22,7	0,2	22,7	0,1	39	15
UFAD																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,15	0,05	0,16	0,04	0,15	0,05	0,15	0,03	24,8	0,2	24,9	0,2	24,9	0,2	24,9	0,1	30	11
1B	0,28	0,06	0,29	0,05	0,29	0,05	0,29	0,03	25,8	0,3	25,8	0,3	25,8	0,3	25,8	0,1	19	17
1C	0,21	0,08	0,22	0,09	0,22	0,08	0,21	0,05	25,0	0,2	25,2	0,2	25,3	0,2	25,2	0,1	39	18
1D	0,08	0,04	0,08	0,03	0,08	0,04	0,08	0,02	27,5	0,2	27,5	0,2	27,3	0,2	27,5	0,1	45	3
1E	0,13	0,05	0,13	0,05	0,13	0,04	0,13	0,03	27,7	0,2	27,7	0,2	27,7	0,2	27,7	0,1	36	6
2A	0,35	0,07	0,35	0,08	0,35	0,07	0,35	0,04	24,0	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	21	28
2B	0,18	0,06	0,19	0,06	0,18	0,06	0,19	0,03	25,2	0,2	25,2	0,3	25,1	0,2	25,2	0,1	31	14
2C	0,44	0,11	0,43	0,11	0,42	0,12	0,43	0,06	23,6	0,2	23,6	0,2	23,5	0,2	23,6	0,1	26	42
2D	0,17	0,06	0,18	0,07	0,18	0,07	0,18	0,04	25,4	0,3	25,4	0,3	25,3	0,3	25,4	0,2	37	13
2E	0,12	0,05	0,12	0,06	0,13	0,06	0,12	0,03	26,2	0,3	26,3	0,2	26,3	0,3	26,3	0,1	44	8
3A	0,28	0,06	0,28	0,06	0,27	0,06	0,28	0,03	23,9	0,2	23,8	0,2	23,8	0,2	23,8	0,1	21	21
3B	0,28	0,06	0,29	0,06	0,29	0,06	0,29	0,03	23,8	0,2	23,8	0,2	23,8	0,2	23,8	0,1	20	22
3C	0,64	0,14	0,66	0,13	0,64	0,14	0,65	0,08	23,3	0,2	23,3	0,2	23,2	0,2	23,3	0,1	21	65
3D	0,26	0,06	0,27	0,06	0,27	0,07	0,26	0,04	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,1	25	21
3E	0,31	0,05	0,31	0,06	0,31	0,05	0,31	0,03	24,5	0,2	24,5	0,2	24,5	0,2	24,5	0,1	17	21

Tabela C.6 – Dados das variáveis ambientes para temperatura de insuflamento igual a 22 °C, região superior.

MV																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,36	0,13	0,36	0,14	0,35	0,13	0,35	0,08	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	38	40
1B	0,55	0,18	0,57	0,20	0,54	0,18	0,55	0,11	24,1	0,2	24,1	0,2	24,1	0,2	24,1	0,1	34	65
1C	0,36	0,14	0,36	0,14	0,34	0,13	0,35	0,08	24,5	0,2	24,4	0,2	24,4	0,2	24,4	0,1	38	37
1D	0,42	0,08	0,43	0,08	0,42	0,08	0,42	0,05	25,2	0,2	25,1	0,2	25,2	0,2	25,2	0,1	19	30
1E	0,48	0,14	0,46	0,14	0,47	0,13	0,47	0,08	25,6	0,2	25,5	0,2	25,5	0,2	25,5	0,1	29	40
2A	0,36	0,12	0,36	0,12	0,33	0,12	0,35	0,07	23,8	0,2	23,7	0,2	23,7	0,2	23,8	0,1	34	37
2B	0,40	0,10	0,41	0,11	0,41	0,10	0,40	0,06	23,8	0,2	23,9	0,2	23,8	0,2	23,8	0,1	25	37
2C	0,43	0,09	0,43	0,08	0,43	0,08	0,43	0,05	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,1	19	34
2D	0,08	0,04	0,39	0,07	0,38	0,07	0,22	0,03	25,7	0,3	25,0	0,2	24,9	0,2	25,1	0,1	31	17
2E	0,41	0,13	0,40	0,13	0,41	0,13	0,41	0,08	24,7	0,2	24,7	0,2	24,7	0,2	24,7	0,1	32	39
3A	0,52	0,10	0,52	0,11	0,52	0,10	0,52	0,06	24,0	0,2	23,7	0,2	23,5	0,2	23,7	0,1	20	45
3B	0,41	0,12	0,43	0,12	0,41	0,12	0,42	0,07	23,7	0,2	23,7	0,2	23,7	0,2	23,7	0,1	29	42
3C	0,25	0,10	0,24	0,09	0,24	0,11	0,24	0,06	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,2	24,0	0,1	41	24
3D	0,38	0,07	0,38	0,07	0,39	0,07	0,38	0,04	23,7	0,2	23,6	0,2	23,6	0,2	23,6	0,1	19	30
3E	0,36	0,08	0,33	0,08	0,34	0,08	0,34	0,05	25,0	0,2	25,0	0,2	25,0	0,2	25,0	0,1	24	26
UFAD modificado																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,08	0,04	0,08	0,04	0,08	0,03	0,08	0,02	22,5	0,2	22,5	0,2	22,5	0,2	22,5	0,1	44	6
1B	0,07	0,04	0,08	0,05	0,08	0,04	0,08	0,03	22,9	0,2	22,9	0,2	22,9	0,2	22,9	0,1	60	5
1C	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,02	22,6	0,2	22,6	0,2	22,5	0,2	22,6	0,1	68	3
1D	0,09	0,03	0,09	0,04	0,09	0,03	0,09	0,02	23,5	0,2	23,4	0,2	23,5	0,2	23,5	0,1	37	7
1E	0,11	0,04	0,10	0,03	0,10	0,03	0,10	0,02	24,0	0,3	23,8	0,3	23,8	0,3	23,9	0,2	34	7
2A	0,06	0,04	0,07	0,04	0,07	0,05	0,06	0,03	22,7	0,2	22,6	0,2	22,5	0,2	22,6	0,1	68	4
2B	0,09	0,04	0,09	0,04	0,10	0,04	0,10	0,02	22,6	0,2	22,6	0,2	22,6	0,2	22,6	0,1	39	8
2C	0,10	0,06	0,10	0,06	0,10	0,06	0,10	0,03	22,0	0,2	22,0	0,2	22,1	0,2	22,0	0,1	60	10
2D	0,05	0,04	0,05	0,04	0,07	0,05	0,06	0,02	23,4	0,3	23,4	0,3	23,3	0,3	23,4	0,2	72	2
2E	0,12	0,04	0,11	0,04	0,12	0,04	0,12	0,02	22,9	0,2	22,8	0,2	22,8	0,2	22,8	0,1	35	10
3A	0,21	0,09	0,20	0,08	0,20	0,08	0,20	0,05	21,6	0,2	21,6	0,2	21,5	0,2	21,6	0,1	41	24
3B	0,09	0,05	0,10	0,06	0,09	0,05	0,10	0,03	21,8	0,2	21,7	0,2	21,7	0,2	21,7	0,1	56	9
3C	0,10	0,05	0,10	0,06	0,10	0,06	0,10	0,03	21,8	0,2	21,8	0,2	21,8	0,2	21,8	0,1	56	10
3D	0,07	0,05	0,08	0,04	0,08	0,05	0,08	0,03	22,1	0,2	22,1	0,2	22,0	0,2	22,1	0,1	62	6
3E	0,08	0,04	0,07	0,04	0,08	0,04	0,08	0,02	22,5	0,3	22,5	0,3	22,5	0,3	22,5	0,2	54	6
UFAD																		
	Dia 1		Dia 2		Dia 3				Dia 1		Dia 2		Dia 3					
Posição	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\sigma_{v_{ar}}$	$\overline{v_{ar}}$	$\varepsilon_{v_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\sigma_{T_{ar}}$	$\overline{T_{ar}}$	$\varepsilon_{T_{ar}}$	$\boldsymbol{T_u}$	$\boldsymbol{DR}$
1A	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,05	0,02	24,8	0,3	24,9	0,3	24,9	0,3	24,8	0,2	83	0
1B	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	26,0	0,2	26,1	0,2	26,0	0,2	26,0	0,1	95	0
1C	0,09	0,06	0,09	0,06	0,09	0,06	0,09	0,04	25,2	0,2	25,3	0,2	25,4	0,2	25,3	0,1	68	6
1D	0,07	0,04	0,07	0,04	0,07	0,04	0,07	0,02	27,0	0,2	27,0	0,2	26,9	0,2	27,0	0,1	57	3
1E	0,10	0,04	0,10	0,04	0,10	0,04	0,10	0,02	27,4	0,2	27,5	0,3	27,4	0,3	27,4	0,1	37	5
2A	0,12	0,04	0,10	0,04	0,12	0,04	0,11	0,02	24,7	0,2	24,5	0,2	24,5	0,2	24,5	0,1	38	8
2B	0,09	0,06	0,10	0,05	0,10	0,06	0,10	0,03	24,5	0,2	24,4	0,2	24,4	0,2	24,4	0,1	57	7
2C	0,12	0,06	0,11	0,06	0,11	0,06	0,11	0,03	23,8	0,2	23,8	0,2	23,7	0,2	23,8	0,1	52	10
2D	0,08	0,05	0,09	0,05	0,09	0,05	0,09	0,03	24,7	0,2	24,6	0,3	24,6	0,3	24,6	0,1	57	6
2E	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,02	26,0	0,3	26,2	0,3	26,1	0,3	26,1	0,2	80	0
3A	0,11	0,05	0,12	0,05	0,11	0,05	0,11	0,03	24,1	0,2	23,9	0,2	23,9	0,2	23,9	0,1	42	9
3B	0,15	0,06	0,16	0,06	0,16	0,06	0,16	0,03	23,9	0,2	23,8	0,2	23,8	0,2	23,8	0,1	36	13
3C	0,16	0,08	0,16	0,07	0,17	0,07	0,16	0,04	23,6	0,2	23,5	0,2	23,5	0,2	23,5	0,1	46	16
3D	0,12	0,06	0,12	0,06	0,11	0,06	0,11	0,03	23,8	0,2	23,8	0,2	23,9	0,2	23,8	0,1	51	10
3E	0,13	0,04	0,13	0,04	0,13	0,04	0,13	0,03	24,1	0,2	24,2	0,2	24,2	0,2	24,2	0,1	34	10

ANEXO D

Na Tabela D.1 são apresentados os valores dos coeficientes de calibração, $\boldsymbol{h_{cal}}$, obtidos conforme procedimento descrito no item 4.4.3.

Tabela D.1 – Coeficientes de troca de calor de calibração, $\boldsymbol{h_{cal}}$

Segmento	Descrição	$\boldsymbol{h_{cal}}$ [W/m² °C]
1	Corpo inteiro	21,52
2	Couro cabeludo	13,74
3	Peito	17,13
4	Costa superior	4,44
5	Braço esquerdo	13,22
6	Braço direito	4,31
7	Antebraço esquerdo	5,44
8	Antebraço direito	6,23
9	Mão esquerda	11,40
10	Mão direita	-
11	Coxa esquerda	52,49
12	Coxa direita	95,75
13	Panturrilha esquerda	-
14	Panturrilha direita	-
15	Pé esquerdo	34,06
16	Pé direito	-
17	Nádegas	-