



Universidade do Algarve
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Eco Ventilação:

Desenvolvimento de uma ventilação mais ecológica

Cristina Isabel Martins Santiago

Orientador: Prof. Dr. Eusébio Conceição

Dissertação em Engenharia do Ambiente

Elaborado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

2013

Universidade do Algarve
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Eco Ventilação:

Desenvolvimento de uma ventilação mais ecológica

Cristina Isabel Martins Santiago

Orientador: Prof. Dr. Eusébio Conceição

Dissertação em Engenharia do Ambiente

Elaborado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Faro

2013

Eco Ventilação:

Desenvolvimento de uma ventilação mais ecológica

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser a autora deste trabalho, que é original e inédito.

Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Cristina Isabel Martins Santiago

Copyright

A universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O espaço limitado desta secção de agradecimentos, não permite agradecer a todas as pessoas que, no decorrer do meu percurso académico, deram directa ou indirectamente, o seu contributo para realizar esta etapa com orgulho e sucesso. Assim, deixo desde já o meu sincero agradecimento a todas as pessoas que cruzaram comigo ao longo destes anos, no entanto, há pessoas às quais não posso deixar de escrever mais algumas palavras.

O meu muito obrigado ao professor Doutor Eusébio Z. E. Conceição, pelo entusiasmo contagiante pelo tema, total disponibilidade, acompanhamento em todas as etapas deste trabalho, críticas construtivas e transmissão de conhecimentos;

Um especial agradecimento à minha família, nomeadamente aos meus pais, irmã e querido sobrinho, pelo carinho, presença e apoio constante nos bons e maus momentos;

Agradeço a todas as amigadas que fiz e mantive durante este período, nomeadamente às amigas, Carlotta Gradissimo, Cláudia Moura da Silva, Filipa Baltazar, Margarida Leite Martins, Sara Luz, Soraia Romão Santos, Vilma Rosário, Cátia Francisco, Cláudia Nunes, Tatiana Silva, Maria Silva, Melanie Sousa, pela amizade incondicional, pelos bons (e apoio nos menos bons) momentos, pela partilha de valores e pelo apoio fulcral durante o percurso académico.

Agradeço ao Gil Grencho, pela amizade, companheirismo, incentivo, ajuda preciosa em muitos momentos, palavras de apoio e de amor, pelo afecto e partilha a todos os níveis, essenciais para que o término deste percurso académico se realizasse da melhor forma possível.

Resumo

Neste trabalho é desenvolvido um estudo comparativo de vários sistemas de ventilação, baseados em jactos localizados. Foram avaliados, para cada um deles, o nível da qualidade do ar interior, conforto térmico, desconforto térmico local (risco de resfriamento) a que os ocupantes estão sujeitos e o índice ADI (Air Distribution Index). O estudo foi efectuado numericamente, a partir de dois softwares acoplados, e experimentalmente, a partir de uma sala de aula desenvolvida a escala real.

Nesta sala de aulas, equipada com 6 ou 12 ocupantes e com 6 secretárias, foram analisados sistemas de ventilação com jactos verticais descendentes, localizados em cima (mais afastado e mais próximo do nível da cabeça dos ocupantes) e à frente dos ocupantes, e com jactos horizontais, localizados em frente dos ocupantes, em cima e em baixo da secretária.

O estudo numérico, da interacção do escoamento com os ocupantes, foi efectuado a partir do acoplamento de um software que simula a resposta térmica dos ocupantes (Human Thermal Comfort) e um que simula o escoamento tridimensional em espaços ocupados (Virtual Air Flow - 3D), utilizando o modelo de turbulência RNG. Foi utilizada uma malha não uniforme, com um maior refinamento junto dos obstáculos e nas entradas e saídas de ar. No estudo do projecto do sistema de ventilação baseado em jactos verticais descendentes localizados em cima e mais afastado do nível da cabeça dos ocupantes, foram efectuadas medições experimentais de forma a validar os softwares acoplados e um modelo desenvolvido para calcular o escoamento unidireccional no interior de condutas. Neste estudo foi ainda utilizado um modelo de cálculo das temperaturas das superfícies.

Por fim foi realizada uma simulação num contexto mais real, com 6 ocupantes sentados e um ocupante em pé, simulando 6 alunos e um professor, onde foi utilizado o acoplamento dos modelos Human Thermal Comfort e Virtual Air Flow - 3D, o modelo numérico de escoamentos unidireccionais no interior de condutas e o modelo de cálculo das temperaturas das superfícies. São ainda feitas sugestões para a partir deste trabalho, se efectuarem estudos em geometrias mais complexas.

Palavras chave: Conforto térmico, Desconforto térmico local, Qualidade do ar, Virtual Air Flow, Cálculo das temperaturas das superfícies e Cálculo do escoamento unidireccional no interior das condutas.

Abstract

In this work was developed a comparative study of several ventilation systems based in localized jets. Were evaluated for each of them the level of indoor air quality, thermal comfort, local thermal discomfort (draught risk) that the occupants are subject and the ADI index (Air Distribution Index). The study was performed numerically, from two coupled softwares and experimentally from a classroom developed at real scale.

In this classroom, equipped with 6 or 12 occupants and six desks, were analyzed different ventilation systems with vertical descendants jets, located in top (furthest and nearest of the level of the head of occupants) and the front of occupants and horizontal jets, located in front of the occupants, upon and below the level of the top of the desk.

The numerical study of the interaction of the flow with the occupants, was made from the coupling of a software that simulates the thermal response of occupants (Human Thermal Comfort 3D) and a software that simulates tridimensionally the air flow in occupied spaces, (Virtual Air Flow 3D) using the RNG turbulent model. In the numerical experiments it was used a non-uniform grid, with a further refinement in the obstacles and the entrances and exits of air. In the experimental study, developed in the classroom to real scale, it was used the ventilation system based on vertical descendants jets located on top and furthest from occupants head, experiment measurements were made to validate the coupled software and a numerical model developed to calculate the unidirectional flow inside the ducts. It was also used a model developed to calculate the surfaces temperature.

Finally it was performed a simulation in a more realistic context, with 6 seated occupants and a standing occupant, simulating 6 students and a teacher, using the Human Thermal Comfort copulated to the Virtual Air Flow - 3D and the developed models. Suggestions in studies in more complex geometries are made.

Keywords: Thermal comfort, Local thermal discomfort, Air quality, Virtual Air Flow, Calculation of surface temperature and calculation of unidirectional flow inside the ducts.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objectivos	3
1.3	Estrutura do trabalho	4
2	Revisão bibliográfica	5
2.1	Sistemas de Ventilação ecológicos	5
2.1.1	Sistema de ventilação com jactos verticais descendentes	5
2.1.2	Sistema de ventilação com jactos horizontais	6
2.2	Modelos numéricos e Métodos	8
2.2.1	Modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	8
2.2.2	Modelo numérico da resposta térmica do corpo humano	9
2.2.3	Método do ADI	10
2.2.4	Modelo de cálculo das temperaturas das superfícies	11
2.3	Conforto térmico e desconforto térmico local	11
2.4	Qualidade do ar interior	12
3	Metodologia	14

3.1	Modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	14
3.2	Modelo de cálculo das temperaturas das superfícies envolventes	15
3.3	Modelo do escoamento unidireccional dentro de condutas	20
3.4	Modelo numérico de resposta térmica do corpo humano	23
3.5	ADI – Índice de distribuição do ar	25
3.6	Conforto Térmico e Desconforto térmico local	28
3.7	Qualidade do Ar Interior	31
3.8	Precisão	32
4	Casos de estudo	33
4.1	Simulação numérica	33
4.1.1	Simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	33
4.1.2	Simulação da resposta térmica dos ocupantes	37
4.2	Validação experimental	38
5	Estudo comparativo	41
5.1	Simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	41
5.1.1	Jactos verticais descendentes - Situação I	41
5.1.2	Jactos verticais descendentes - Situação II	45
5.1.3	Jactos verticais descendentes - Situação III	50
5.1.4	Jactos verticais descendentes - Situação IV	55
5.1.5	Jactos horizontais	60

5.2	Resultados da Simulação da resposta térmica dos ocupantes	64
5.2.1	Jactos Verticais descendentes - Situação I	64
5.2.2	Jactos verticais descendentes - Situação II	66
5.2.3	Jactos verticais descendentes - Situação III	69
5.2.4	Jactos verticais descendentes - Situação IV	71
5.2.5	Ventilação com jactos horizontais	73
5.3	ADI – Índice de Distribuição do Ar	75
5.3.1	Jactos Verticais descendentes – Situação I	75
5.3.2	Jactos Verticais descendentes – Situação II	77
5.3.3	Jactos Verticais descendentes – Situação III	78
5.3.4	Jactos Verticais descendentes – Situação IV	80
5.3.5	Jactos horizontais	81
6	Validação	88
6.1	Modelo do escoamento unidireccional no interior das condutas	88
6.2	Modelo de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	89
6.3	Modelo “Human Thermal Comfort” acoplado ao modelo “Virtual Flow”	90
7	Aplicação Prática	93
8	Sugestão de Aplicação Futura	96
9	Conclusões	97
10	Bibliografia	99

Índice de Figuras

Figura 3.1 - a) Esquema do sistema de condutas na câmara experimental e numeração das entradas de ar e b) Esquema geral e numeração das secções do sistema de condutas.	23
Figura 3.2 - Esquema do corpo humano, dividido em 25 elementos.....	25
Figura 4.1 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação I com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	34
Figura 4.2 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação I com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	34
Figura 4.3 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação II com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	34
Figura 4.4 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação II com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	34
Figura 4.5 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação III com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	35
Figura 4.6 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação III com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.	35
Figura 4.7 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação IV com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	35
Figura 4.8 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação IV com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.	36
Figura 4.9 – Numeração geral para a) 6 ocupantes e b) 12 ocupantes, na sala piloto (adaptado de Santiago, 2013).	36

Figura 4.10 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação com jactos horizontais com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.....	37
Figura 4.11 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação com jactos horizontais com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados..	37
Figura 4.12 - Câmara experimental "Sala piloto".....	38
Figura 4.13 - Representação da situação de validação, com a numeração dos 2 ocupantes e das entradas de ar.....	39
Figura 4.14 – Representação dos 15 pontos para a validação experimental.....	40
Figura 5.1 - Velocidade do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	41
Figura 5.2 - Velocidade do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	42
Figura 5.3 - Velocidade do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	42
Figura 5.4 - Velocidade do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	42
Figura 5.5 – Temperatura do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	43
Figura 5.6 – Temperatura do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	43
Figura 5.7 – Temperatura do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	43
Figura 5.8 – Temperatura do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	43
Figura 5.9 – Concentração de CO ₂ , na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	44
Figura 5.10 – Concentração de CO ₂ , na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	44

Figura 5.11 - Concentração de CO ₂ , na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	45
Figura 5.12 - Concentração de CO ₂ , na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	45
Figura 5.13 - Velocidade do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	46
Figura 5.14 - Velocidade do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	46
Figura 5.15 - Velocidade do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	46
Figura 5.16 - Velocidade do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	47
Figura 5.17 - Temperatura do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	47
Figura 5.18 - Temperatura do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	48
Figura 5.19 - Temperatura do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	48
Figura 5.20 - Temperatura do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	48
Figura 5.21 - Concentração de CO ₂ , na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	49
Figura 5.22 - Concentração de CO ₂ , na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	49
Figura 5.23 - Concentração de CO ₂ , na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	49
Figura 5.24 - Concentração de CO ₂ , na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	50
Figura 5.25 - Velocidade do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	50

Figura 5.26 - Velocidade do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	51
Figura 5.27 - Velocidade do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	51
Figura 5.28 - Velocidade do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	51
Figura 5.29 - Temperatura do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	52
Figura 5.30 - Temperatura do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	52
Figura 5.31 - Temperatura do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	53
Figura 5.32 - Temperatura do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	53
Figura 5.33 - Concentração de CO ₂ , na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	53
Figura 5.34 - Concentração de CO ₂ , na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	54
Figura 5.35 - Concentração de CO ₂ , na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	54
Figura 5.36 - Concentração de CO ₂ , na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	54
Figura 5.37 - Velocidade do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	55
Figura 5.38 - Velocidade do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	55
Figura 5.39 - Velocidade do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.	56
Figura 5.40 - Velocidade do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.	56

Figura 5.41 - Temperatura do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	57
Figura 5.42 - Temperatura do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	57
Figura 5.43 - Temperatura do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	57
Figura 5.44 - Temperatura do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	58
Figura 5.45 - Concentração de CO ₂ , na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	58
Figura 5.46 - Concentração de CO ₂ , na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	59
Figura 5.47 - Concentração de CO ₂ , na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	59
Figura 5.48 - Concentração de CO ₂ , na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	59
Figura 5.49 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	60
Figura 5.50 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	60
Figura 5.51 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	61
Figura 5.52 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	61
Figura 5.53 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	62
Figura 5.54 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	62
Figura 5.55 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	62

Figura 5.56 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	63
Figura 5.57 - Concentração de CO ₂ , na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	63
Figura 5.58 - Concentração de CO ₂ , na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	63
Figura 5.59 - Concentração de CO ₂ , na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	64
Figura 5.60 - Concentração de CO ₂ , na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.....	64
Figura 5.61 - Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	65
Figura 5.62 - Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	65
Figura 5.63 - Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação I com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	66
Figura 5.64 - Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação I com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	66
Figura 5.65 - Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	67
Figura 5.66 - Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	67
Figura 5.67 - Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação II com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	68
Figura 5.68 - Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação II com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	68
Figura 5.69 - Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	69
Figura 5.70 - Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	70

Figura 5.71 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação III com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	70
Figura 5.72 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação III com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	71
Figura 5.73 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	72
Figura 5.74 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	72
Figura 5.75 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação IV com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	73
Figura 5.76 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação IV com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	73
Figura 5.77 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação com jactos horizontais, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	74
Figura 5.78 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação com jactos horizontais, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.....	74
Figura 5.79 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação com jactos horizontais, com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	75
Figura 5.80 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação com jactos horizontais, com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.....	75
Figura 6.1 – a) Comparação dos resultados numéricos e experimentais (I e II, correspondentes às secções do lado direito e esquerdo do compartimento) na situação de validação do modelo do escoamento unidireccional dentro das condutas; b) esquema geral e numeração das condutas.....	88
Figura 6.2 – Campo de velocidade do ar sem ocupantes, nos planos a) 0,65 m (entradas 1, 3 e 5) e b) 1,953 m (entradas 2, 4 e 6).....	89
Figura 6.3 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais do campo de velocidades do ar na validação, nas entradas número a) 1, b) 2	89
Figura 6.4– Comparação entre os resultados da simulação numérica e experimental do campo de velocidades do ar na validação, nas entradas número a) 3 e b) 4.....	90

Figura 6.5- Comparação entre os resultados da simulação numérica e experimental do campo de velocidades do ar na validação, nas entradas número a) 5 e b) 6.....	90
Figura 6.6 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da velocidade do ar na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.....	91
Figura 6.7 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da temperatura do ar na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.....	91
Figura 6.8- Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da Intensidade de Turbulência na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.....	92
Figura 6.9- Comparação entre os resultados numéricos e experimentais do Risco de Resfriamento (DR) na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.....	92
Figura 7.1- Velocidade do ar, na situação de aplicação prática, com 7 ocupantes, nos planos: a) Y=0,63099, b) Y=1,275m e c) Y=1,8929m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	93
Figura 7.2- Temperatura do ar, na situação de aplicação prática, com 7 ocupantes, nos planos: a) Y=0,63099, b) Y=1,275m e c) Y=1,8929m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	93
Figura 7.3 - Concentração de CO ₂ , na situação de aplicação prática, com 7 ocupantes, nos planos: a) Y=0,63099, b) Y=1,275m e c) Y=1,8929m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	94
Figura 7.4- Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 7 ocupantes, na situação de aplicação, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.....	95
Figura 8.1 - Domínio do auditório, com 202 ocupantes, em perspectiva isométrica.....	96

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Categorias da sensação térmica, propostas pela ISO 7730 (2005).....	29
Tabela 3.2 – Categorias do desconforto local, propostas pela ISO 7730 (2005).....	30
Tabela 5.1 - ADI na situação I, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	76
Tabela 5.2 - ADI na situação I, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	76
Tabela 5.3 - ADI na situação I, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	76
Tabela 5.4 - ADI na situação I, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	77
Tabela 5.5 - ADI na situação II, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	77
Tabela 5.6 - ADI na situação II, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	77
Tabela 5.7 - ADI na situação II, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	78
Tabela 5.8 - ADI na situação II, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	78
Tabela 5.9 - ADI na situação III, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	79
Tabela 5.10 - ADI na situação III, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	79
Tabela 5.11 - ADI na situação III, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	79
Tabela 5.12 - ADI na situação III, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	80
Tabela 5.13 – ADI na situação IV, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	80
Tabela 5.14 - ADI na situação IV, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	80
Tabela 5.15 - ADI na situação IV, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	81
Tabela 5.16 - ADI na situação IV, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	81
Tabela 5.17 - ADI na ventilação com jactos horizontais, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	82
Tabela 5.18 - ADI na ventilação com jactos horizontais, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	82
Tabela 5.19 – ADI na ventilação com jactos horizontais, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.....	82
Tabela 5.20 – ADI na ventilação com jactos horizontais, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.....	83

Tabela 7.1 - Concentração de CO₂ na área de respiração em cada um dos 7 ocupantes..... 94

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

Nos dias de hoje a sociedade passa cada vez mais tempo em ambientes fechados e densamente populosos, o que normalmente se traduz numa diminuição da qualidade do ar interior e no aumento da exposição das pessoas a contaminantes e agentes patogénicos.

A má qualidade do ar interior tem influência na saúde humana, está frequentemente ligada a sintomas muitas vezes designados como síndrome do edifício doente, e também relacionada com o aumento drástico do número de pessoas com alergias e asma, assim como com o aumento do risco de infecção cruzada (Bolashikov e Melikov, 2009).

O termo de síndrome do edifício doente refere-se a uma série de queixas, incluindo sintomas irritativos do trato respiratório superior, dor de cabeça, fadiga e erupções cutâneas, que são geralmente associados a um edifício em particular, pelo seu padrão temporal e pelo agrupamento entre os habitantes ou colegas (Thorn, 1998).

Está também comprovado que a qualidade do ar interior tem impacto na produtividade dos ocupantes. Fanger (2001), descreve um estudo desenvolvido em escritório, sob condições controladas, comparando os resultados obtidos em duas qualidades do ar diferentes, em que a produtividade dos indivíduos que trabalharam sob condições de boa qualidade do ar foi 6,5% superior, cometendo menos erros, que os indivíduos que trabalharam num ambiente poluído (Fanger, 2001).

Por outro lado tem-se o conforto térmico, que representa “o estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico que o rodeia” (ISO 7730, 2005). Se estiverem instaladas as condições ótimas de conforto térmico, existe uma maior probabilidade de uma pessoa se sentir termicamente confortável, mas quando tal não acontece, os indivíduos requerem, normalmente, níveis de temperatura excessivos para anular este efeito, o que irá influenciar o aumento do consumo energético por parte dos sistemas de climatização.

A qualidade do ar encontra-se legislada em Portugal pelo D.L. nº 79/2006 de 4 de Abril, e juntamente com o conforto térmico, normalizada pela ISO 7730 (2005).

Com o objectivo de criar um conjunto de condições que proporcionem um ambiente térmico confortável, que assegurem uma boa qualidade do ar, controlando o caudal de renovação de ar, removendo ou diluindo os contaminantes, são muitas vezes implementados nos edifícios sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) (Perez -Lombard, 2011).

No entanto, os sistemas AVAC são, normalmente, grandes consumidores de energia, o que representa um factor agravante para a crise mundial do ambiente e da energia. A poupança de energia, a melhoria da eficiência energética, e o uso da energia renovável são instrumentos chave para aliviar estas crises (Perez-Lombard, 2011) e pode ser alcançado através da implementação de sistemas de ventilação ecológicos.

Entende-se por sistema de ventilação ecológico, um sistema de ventilação que proporcione uma boa qualidade do ar e um bom nível de conforto aos ocupantes, onde o único consumo energético está relacionado com a ventilação. O arrefecimento/aquecimento pode existir, sendo efectuado através de um sistema de energia renovável, por exemplo, com um sistema de condutas enterradas ou através da captação de ar de estufas.

A tecnologia de condutas enterradas pode ser utilizada no verão para arrefecimento, consistindo na passagem do ar exterior por tubos instalados no subsolo, de forma a tirar partido do facto de aí se verificarem temperaturas mais baixas que a do ar exterior no verão. Este fenómeno deve-se à elevada inércia térmica do solo que garante uma protecção relativamente às flutuações de temperatura sentidas no exterior, para além da existência de um atraso temporal entre as flutuações de temperatura à superfície e as que se verificam nas camadas mais profundas do solo, o que se traduz em temperaturas mais constantes quanto maior a profundidade do solo (Florides e Kalogirou, 2007).

Florides e Kalogirou (2007) apresentam um artigo de revisão sobre sistemas, modelos e aplicações de condutas de enterradas.

Este trabalho, de carácter numérico e experimental, foi efectuado numa sala de aula piloto desenvolvida na faculdade de Ciências e tecnologias da Universidade do Algarve,

no âmbito de um projecto financiado pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers).

1.2 Objectivos

Este trabalho, que se debruça sobre o desenvolvimento e avaliação de uma ventilação mais ecológica, pretende:

- Avaliar o desempenho ao nível da qualidade do ar interior, conforto térmico e desconforto térmico local (risco de resfriamento) dos ocupantes, de vários sistemas de ventilação ecológicos simulados numa câmara virtual. Nesta câmara, com 6 ou 12 ocupantes, foram simuladas situações com sistemas de ventilação ecológicos baseados em jactos localizados (verticais e horizontais), para situações em que a temperatura do ar de entrada no compartimento é de 20 ou 24°C. Através destas simulações foi efectuado um estudo comparativo das situações estudadas de forma a optar pela melhor situação a aplicar na câmara experimental;
- Desenvolver um modelo que permita calcular o escoamento unidireccional dentro de condutas;
- Validar os modelos utilizados no estudo comparativo e o modelo desenvolvido (que calcula o escoamento unidireccional dentro de condutas) através da realização de diversos ensaios experimentais numa câmara experimental.
- Simular uma aplicação prática em que o sistema de condutas tem as mesmas características que o sistema de condutas da situação escolhida através do estudo comparativo. A aplicação prática inclui os modelos utilizados no estudo comparativo e foi também implementado o modelo que calcula o escoamento unidireccional no interior de condutas. Nesta aplicação prática pretende-se avaliar o nível da qualidade do ar e desconforto térmico local (risco de resfriamento) dos 7 ocupantes (6 estudantes e um professor) sujeitos a esta situação.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho apresenta-se estruturado em nove capítulos, onde o primeiro capítulo apresenta as considerações gerais e motivação para o desenvolvimento deste estudo, assim como os objectivos gerais do estudo do presente trabalho. Neste capítulo é também descrita a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica relativamente aos sistemas de ventilação estudados e métodos e modelos numéricos utilizados no decorrer deste trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada na avaliação do nível de conforto térmico, desconforto térmico local e qualidade do ar.

No quarto capítulo é feita uma descrição dos casos de estudo e da montagem experimental, utilizada, quer nas simulações numéricas, quer nos ensaios experimentais.

No quinto capítulo é apresentado o estudo comparativo das várias situações simuladas. Neste capítulo são apresentados os resultados, a análise e a discussão dos resultados das diferentes situações em estudo.

O sexto capítulo debruça-se sobre a validação das simulações efectuadas no capítulo cinco. Neste capítulo são comparados os resultados numéricos e experimentais de uma situação sem ocupantes e outra em que a ocupação da câmara virtual e experimental é de dois ocupantes.

No capítulo sete é apresentada a análise e discussão dos resultados de uma situação de aplicação prática, ou seja, uma aplicação mais real do estudo em curso.

O capítulo oito apresenta uma proposta de aplicação deste estudo num caso real mais complexo.

E por fim, no capítulo nove encontra-se as conclusões gerais deste trabalho.

São também apresentados vários anexos, com informações complementares do trabalho.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica efectuada relativamente aos sistemas de ventilação ecológicos analisados, nomeadamente, sistemas de ventilação localizados, e aos métodos e modelos aplicados, nomeadamente, para a avaliação do conforto térmico, desconforto térmico local e qualidade do ar.

2.1 Sistemas de Ventilação ecológicos

Como já foi referido anteriormente, um sistema de ventilação ecológico tem por objectivo proporcionar aos ocupantes uma boa qualidade do ar e um bom nível de conforto térmico, com um reduzido consumo de energia, estando esta apenas relacionada com a introdução de ar forçado.

Neste trabalho são estudados os sistemas de ventilação ecológicos baseados em jactos localizados. Estes são sistemas de ventilação em que as entradas de ar encontram-se implementadas em “pontos-chave” do compartimento ventilado, determinando o tipo de ventilação, o escoamento dos contaminantes e o conforto térmico dos ocupantes. São exemplos de sistemas de ventilação baseados em jactos localizados: os sistemas de ventilação com jactos verticais descendentes e sistemas de jactos horizontais (por exemplo, ventilação personalizada), que serão estudados com maior pormenor.

2.1.1 *Sistema de ventilação com jactos verticais descendentes*

O sistema de ventilação com jactos verticais descendentes pode ser considerado como um sistema pontual de arrefecimento e fornecer condições aceitáveis de conforto térmico (Yang et al, 2009).

O sistema com jactos verticais descendentes é comparável ao sistema de ventilação personalizado montado no tecto, no entanto, dependendo da sua posição, nem sempre conseguem introduzir ar “limpo” na zona de respiração. O sistema com jactos verticais descendentes também nem sempre possui um sistema que permita regular parâmetros como a temperatura e a velocidade do ar.

Para que um sistema de ventilação montado no tecto seja eficiente, o ar fresco fornecido pelos jactos devem chegar à zona de respiração dos ocupantes, com o mínimo

arrastamento de contaminantes contidos no ar do compartimento, e deve ter velocidade suficiente para penetrar as plumas convectivas dos ocupantes (Makhoul et al. 2013).

O diâmetro da entrada de ar e as condições iniciais do fluxo de ar na saída determinam a área de contacto entre o fluxo de ar e o corpo humano. O corpo humano vai afectar o fluxo de ar como um obstáculo, assim como a pluma gerada pelo corpo humano (Yang et al. 2009).

A interacção entre o fluxo de ar, com a entrada montada no tecto, com a pluma térmica do corpo humano e o efeito de arrefecimento total e local, foi estudado sob diferentes condições em Yang et al. (2009).

Yang et al. 2010 avaliou o potencial de redução de energia do sistema de ventilação personalizado montado no tecto acoplado a um sistema de ventilação de mistura. Foram comparados os resultados desta situação, com o sistema de ventilação de mistura a funcionar sozinho e com o sistema de ventilação de mistura a funcionar juntamente com ventoinhas instaladas nas secretárias. Foi possível concluir que comparando com o sistema de ventilação de mistura mais os ventiladores das secretárias, o sistema de ventilação montado no tecto pode realizar um melhor efeito de arrefecimento, assim como diminuir o consumo total de energia.

Makhoul et al. (2013) teve como objectivo estudar numericamente e experimentalmente a melhoria da performance do sistema de ventilação personalizado montado no tecto, quando assistido por pequenos ventiladores implementados nas secretarias, para reduzir o efeito da pluma térmica gerada pelos ocupantes. Foi possível concluir que ao instalar um ventilador nas secretárias juntamente com o sistema de ventilação montado no tecto, para controlar a pluma convectiva gerada pelo corpo humano, ocorre uma potencial melhoria da performance. Este método permite mitigar o efeito da subida da pluma térmica e reduz a resistência oposta ao jacto vertical permitindo uma maior passagem de ar fresco. É também observado um aumento da eficiência deste sistema de ventilação.

2.1.2 Sistema de ventilação com jactos horizontais

Um exemplo de um sistema de ventilação com jactos horizontais é o sistema de ventilação personalizada implementado em secretárias.

O conceito da ventilação personalizada está associado à introdução de ar “limpo” na zona de respiração, aumentando a qualidade do ar, assim como ao aumento do nível de conforto térmico global, a que os ocupantes estão sujeitos. Este conceito inclui a possibilidade dos ocupantes controlarem a temperatura e velocidade do ar a que vão estar sujeitos. Este tipo de ventilação, que utiliza um conceito de ventilação localizada em vez de em todo o compartimento, permite a redução do consumo de energia.

Em Melikov et al. (2002) foi efectuada a avaliação de diferentes saídas de ar de ventilação personalizada, e onde se concluiu, que no geral, este tipo de ventilação reduz significativamente o número de ocupantes insatisfeitos com a qualidade do ar.

Em Melikov et al. (2012) foi estudado o conforto térmico e a qualidade do ar com a aplicação de um sistema de ventilação personalizado incorporado no encosto de cabeça de uma cadeira. Os resultados sugerem uma melhoria significativa da qualidade do ar e os valores relativos ao conforto térmico foram considerados aceitáveis.

Diferentes filosofias deste sistema de ventilação têm sido estudadas, no entanto, neste trabalho vamos-nos debruçar sobre a implementação da ventilação personalizada em secretárias.

Esta filosofia foi estudada em Pan et al. (2005), em que ao comparar este sistema de ventilação personalizada com um sistema de arrefecimento central, concluiu que os índices de conforto térmico são mais baixos para este sistema, consumindo cerca de 45% menos energia. Em Muhic e Butala (2006), através de medições e simulações, verificou-se que este sistema é bastante eficiente.

Segundo Conceição et al. (2007), onde foram estudadas duas possíveis configurações deste sistema de ventilação em secretárias, uma apresentando apenas uma entrada de ar localizada acima da zona de apoio da secretária, e a segunda configuração que consistia em duas entradas de ar (uma a incidir na zona superior do tronco do ocupante e a outra a incidir na zona dos joelhos), a configuração com duas entradas de ar garante uma velocidade do ar mais uniforme em redor do ocupante.

A avaliação do nível de conforto térmico em secretárias com dois sistemas de ventilação personalizados implementados foi efectuada em Conceição et al. (2010). Com a implementação deste tipo de ventilação a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas reduz de 27,77% (sem ventilação personalizada) para 16,1% (com o sistema de ventilação personalizada), e a qualidade na zona de respiração encontra-se dentro das normas impostas.

2.2 Modelos numéricos e Métodos

Os modelos numéricos tornaram-se uma importante ferramenta para a previsão de parâmetros em estudo, em fase de projecto. Através da simulação numérica é possível analisar várias situações de um projecto, o que permite a posterior escolha da situação mais indicada para aplicar na prática.

2.2.1 Modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados

O modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados – “Virtual Air Flow 3D” – é utilizado como ferramenta para simular tridimensionalmente e em coordenadas cartesianas o escoamento em regime estacionário e em condições não isotérmicas dentro de um espaço ocupado.

Este software foi validado em Conceição et al. (2008) em condições isotérmicas e em condições não isotérmicas, em regime estacionário. Nas primeiras condições, foram comparados os dados experimentais obtidos na câmara experimental e os valores numéricos de velocidade do ar e de taxa de renovação do ar. Nas condições não isotérmicas foram comparados os dados experimentais obtidos em redor do manequim sentado no interior da câmara experimental, para diferentes condições ambientais, e os valores numéricos de velocidade do ar e de temperatura.

Este modelo é utilizado em vários estudos na avaliação da qualidade do ar e conforto térmico. Muhic e Butala (2006) utilizaram este modelo para efectuar simulações de um sistema localizado de ar condicionado, designado por sistema personalizado microclimático, e avaliar sua eficiência.

Cho et al. (2008) utiliza este modelo e resultados experimentais para prever as características dos jactos confluentes numa sala. Os resultados sob condições não isotérmicas são utilizadas para apresentar os perfis de velocidade e temperatura ao longo do chão de uma sala com um sistema de ventilação de impulsão e um sistema de jactos confluentes.

Makhoul et al. (2013) utilizou este modelo para efectuar simulações com o objectivo de estudar o campo de fluxo de ar, térmico e de concentrações de CO₂, em redor dos

ocupantes, utilizando um sistema de ventilação personalizada montado no tecto. Este modelo foi validado experimentalmente e foi encontrada uma boa concordância entre os resultados da simulação e os experimentais.

Conceição et al. (2010) utilizou este modelo para avaliar o nível da qualidade do ar e os fluxos de ar em redor dos ocupantes, numa sala com secretárias equipadas com dois sistemas de ventilação personalizada, em ambientes ligeiramente quentes.

Conceição et al. (2012) utilizou este modelo para avaliar, entre outros, os campos de temperatura e velocidade do ar e de concentração de contaminantes.

2.2.2 Modelo numérico da resposta térmica do corpo humano

O modelo numérico da resposta térmica do corpo humano - "Human Thermal Comfort – 3D" - foi utilizado como um software que simula a resposta térmica do corpo humano, e avalia o nível de conforto térmico e desconforto local a que os ocupantes estão sujeitos em ambientes interiores não uniformes.

Giovani e Goldman (1971) desenvolveram um modelo em que o corpo humano inteiro era representado por um nodo. O modelo era apenas empírico e aplicável em ambientes quentes. Posteriormente foi desenvolvido por Pierce, um modelo com dois nodos, originalmente desenvolvido por Gagge et al (1971), em que o corpo humano foi dividido em camadas representando uma camada central e outra de pele e compreendia em dois subsistemas, o sistema de controlo e o sistema controlado. Este modelo era aplicável para níveis de actividades moderados e em condições ambientais uniformes, mas era limitado para um tempo de exposição humana de menos de uma hora e não pode ter em conta espaços não uniformes (Smith, 1991).

Outro modelo de dois nodos foi publicado em 1977, designado por modelo KSU de dois-nodos, este modelo difere do modelo de Pierce, principalmente por usar equações de controlo do fluxo de suor e fluxo de sangue diferentes (Azer e Hsu, 1977).

Em 1971 Stolwijk desenvolveu um modelo multi-nodal, com o objectivo de o utilizar em aplicações aeroespaciais. Neste modelo o corpo era basicamente dividido em seis segmentos e cada um deles é dividido em quatro camadas na direcção radial. Devido aos

fenómenos fisiológicos de cada secção poderem ser controlados este modelo tem maior precisão e flexibilidade que os anteriores.

Guan et al. (2003) descreve que um modelo de conforto térmico com um balanço de calor completo, normalmente inclui três partes: um modelo multi-segmentado detalhado com multi-camadas físicas de trocas de calor e um modelo de roupa com detalhes da interacção entre o corpo humano e o seu ambiente; um modelo termo regulatório fisiológico multi-segmentado, que simula o corpo humano em termos passivos e dos sistemas activos térmicos; e um modelo psicológico da sensação térmica, que prevê as sensações térmicas localizadas e do corpo inteiro.

Conceição et al. (2010) utiliza um modelo multi-nodal de conforto térmico humano utilizado em regime transitório ou em regime estacionário, em condições não isotérmicas. O corpo tridimensional é dividido em 24 elementos cilíndricos, um elemento esférico e em quatro camadas (osso, músculo, gordura e pele), e pode ser protegido do ambiente externo por camadas de roupa. O modelo numérico é dividido em quatro partes: sistema térmico humano, sistema térmico de roupa, sistema termo regulatório (que controla a temperatura do corpo) e o conforto térmico. O modelo numérico foi utilizado em: Conceição et al. (2010) para avaliar o conforto térmico de um estudante sentado numa secretária com ventilação personalizada; Conceição e Lúcio (2011) onde foi avaliada numericamente a resposta térmica humana de 24 estudantes e um professor, numa sala de aula equipada com sistemas de arrefecimento radiante sujeitos a ambientes convectivos uniformes, em condições ligeiramente quentes; Conceição et al. (2012) para avaliar o conforto térmico em ocupantes de um espaço equipado com ventilação de mistura e com chão radiante frio; entre outros.

2.2.3 Método do ADI

O método do Índice de distribuição do ar (ADI) é baseado no nível de conforto térmico, no nível de qualidade do ar interior e na eficiência da ventilação (remoção de calor e contaminantes) e oferece informações úteis sobre o desempenho do sistema de ventilação e permite a comparação entre diferentes sistemas de ventilação.

Este método foi utilizado em Cho et al. (2002) para comparar a performance de quatro sistemas de ventilação diferentes, em Cho et al. (2003) para avaliar o desempenho de

um sistema de ventilação de mistura em diferentes condições ambientais e Karimipannah et al. (2007) utiliza este método para avaliar o sistema de ventilação com jactos confluentes.

Originalmente, o conceito do índice de distribuição do ar (ADI - Air Distribution Index) foi desenvolvido para ambientes uniformes, no entanto, Conceição et al. (2012) adaptou a utilização deste método para ambientes térmicos não uniformes.

2.2.4 Modelo de cálculo das temperaturas das superfícies

Awbi (1998) apresenta resultados para o coeficiente de transferência de calor, em relação a uma parede aquecida, chão aquecido e um tecto aquecido, por convecção natural, utilizando o Computational Fluid Dynamics. A transferência de calor por convecção, das superfícies internas, têm um impacto significativo no conforto térmico, no movimento e na capacidade de aquecimento e arrefecimento da sala (Awbi, 1998).

2.3 Conforto térmico e desconforto térmico local

A noção de conforto térmico é muito subjectiva, depende de pessoa para pessoa, e está associada a um conjunto de grandezas, que fisicamente caracterizam um ambiente.

Para avaliar as condições de conforto térmico é utilizado o índice PMV (Predicted Mean Vote) que corresponde à votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto de um dado ambiente térmico moderado, e o PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) que exprime a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas quando expostas a um dado ambiente térmico (Conceição, 1996).

O modelo PMV foi validado recentemente pela ASHRAE com estudos em edifícios com sistemas HVAC, em climas frios, temperados e quentes. Este modelo prevê bem a sensação térmica em edifícios com sistemas HVAC, no entanto, em climas quentes, em edifícios sem ar-condicionado demonstraram que prevê uma sensação térmica mais quente do que os ocupantes realmente sentem. É então proposto um modelo adaptativo para edifícios sem ar condicionado (Fanger e Toftum, 2002).

Estes índices foram utilizados, por exemplo, em Conceição et al. (2010) onde foi avaliado o conforto térmico de um estudante sentado numa secretária com ventilação

personalizada; e em Conceição et al. (2012) onde foi avaliado o conforto térmico em espaços equipados com sistema de ventilação de mistura e chão radiante frio. Conceição et al. (2012) utilizou ainda o índice PMV para prever a troca de calor entre o corpo humano e o ambiente, em espaços ocupados em ambientes não uniformes.

Um indivíduo pode estar termicamente confortável mas expressar insatisfação proveniente de desconforto local. Este desconforto pode ocorrer devido a resfriamentos, a diferenças de temperatura vertical, à temperatura do chão ser desconfortável e à existência de assimetrias de temperaturas radiantes (Conceição, 1996).

O risco de resfriamento foi avaliado em, por exemplo, Conceição et al. (2010) para avaliar o nível de desconforto térmico local, numa sala com secretárias equipadas com dois sistemas de avaliação, em ambientes ligeiramente quentes; Causone et al. (2010) para analisar as possibilidades e limitações de combinar chão radiante com sistema de ventilação de Impulsão; e em Tian et al. (2010) com o objectivo de analisar a influência de um sistema de ventilação no conforto térmico de um painel de arrefecimento em modo de aquecimento.

2.4 Qualidade do ar interior

Uma vez que as pessoas passam a maior parte do seu tempo em espaços fechados, o tema da qualidade do ar interior tem-se mostrado de grande importância nos dias que correm.

Em Melikov et al. (2002) foi analisada a qualidade do ar na avaliação de diferentes entradas de ar de ventilação personalizada, utilizando um manequim para simular um ocupante durante as medições experimentais. O gás traçador foi utilizado para identificar a quantidade de ar personalizado utilizado na respiração pelo manequim, assim como a quantidade de ar expirado que é novamente inspirado. Em Karimipannah et al. (2007) foram efectuadas medições da concentração do gás traçador para diferentes condições térmicas, com o objectivo de estudar o ambiente interior de uma sala de aula utilizando um sistema de ventilação de jactos confluentes. Melikov e Kaczmarczyk (2012) estudaram o impacto do movimento do ar na percepção da qualidade do ar e os sintomas da síndrome do edifício doente, através de resultados

recolhidos com recurso a inquéritos, com a participação de um total de 124 indivíduos em quatro séries de experiências. Melikov et al. (2012) avaliou a qualidade do ar num sistema de ventilação personalizado montado num assento de uma cadeira, para tal, foram realizadas medições experimentais com o auxílio de um manequim, com o objectivo de identificar a sua capacidade de fornecer ar limpo na zona de respiração, dependendo do design, forma, tamanho e posição da entrada de ar, caudal, temperatura do ar personalizado, temperatura do compartimento, entre outros. Foi utilizado o método do gás traçador.

Em Conceição et al. (2012) é avaliada a qualidade do ar interior para estudar o índice de distribuição do ar (ADI).

3 Metodologia

3.1 Modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados

Para simular tridimensionalmente e em coordenadas cartesianas o escoamento em regime estacionário e em condições não isotérmicas dentro de um espaço ocupado, foi utilizado o modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em compartimentos – “Virtual Air Flow - 3D”.

O software desenvolvido através deste modelo simula escoamentos incompressíveis, com termo de impulsão, em condições de regime permanente e tem como objectivo calcular os campos de velocidade, da pressão, da temperatura, da energia cinética turbulenta, da taxa de dissipação de energia turbulenta e da concentração de dióxido de carbono em espaços ocupados (Conceição et al, 2010).

Para tal, o modelo numérico desenvolvido considera as seguintes equações diferenciais parciais (Conceição et al, 2010):

- Equação de continuidade de massa
- Equações de conservação da quantidade de movimento, para x, y e z.
- Equação de energia.
- Equação de energia cinética turbulenta.
- Equação de dissipação da energia turbulenta.
- Equação da concentração de CO₂.

Na discretização das equações diferenciais parciais foi utilizado o método dos volumes finitos com recurso ao esquema híbrido de discretização para os fluxos difusivos e convectivos. Na ligação entre as equações de conservação de momento e de massa é utilizado o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) (Conceição et al, 2010).

A resolução do sistema de equações foi efectuada através do método iterativo TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) (Conceição et al, 2010).

Na modelação turbulenta foi usado o modelo de turbulência RNG para números de Reynolds elevados e na proximidade de superfícies foram usadas as condições fronteira das paredes.

Na criação de grelhas foi utilizada uma metodologia não uniforme.

Mais pormenores sobre este modelo e um esquema da utilização deste software podem ser consultados no anexo 1.

3.2 Modelo de cálculo das temperaturas das superfícies envolventes

No modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados é necessário a implementação de várias informações, como, por exemplo, o valor da temperatura das superfícies envolventes.

Neste sentido, com o objectivo de inserir valores mais próximos, foi desenvolvido um modelo de cálculo das temperaturas das superfícies envolventes.

O calor está associado à energia transmitida de um ponto para outro, devido à diferença de temperatura existente entre pontos. A transmissão de calor pode ocorrer através de fenómenos de condução, convecção, radiação ou por transferência associada ao transporte de massa. Estes fenómenos podem ocorrer isoladamente ou simultaneamente. A transferência de calor por condução é conseguida de duas maneiras. O primeiro mecanismo é a interacção molecular, em que uma molécula num nível elevado de energia (temperatura) transmite energia a moléculas adjacentes de menor nível energético. Por fim, a transferência de calor por convecção envolve troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente (Bird, 2006).

A convecção pode ser natural, forçada e mista.

A convecção forçada ocorre quando um fluido é forçado, por um agente externo como um ventilador, a passar numa superfície sólida, a convecção natural ocorre quando um fluido mais quente (ou mais frio) situado perto de um limite sólido, causa circulação devido à diferença de densidades, resultado da variação de temperatura dentro da região do fluido.

A transferência de calor por radiação entre superfícies, difere da condução e convecção porque não requer nenhum intermediário para a sua propagação. A transferência de

energia por radiação é máxima quando as duas superfícies que trocam energia estão separadas por vacuum perfeito.

A transferência de calor por convecção, que ocorre entre uma superfície e um fluido, dada pela lei de Newton, é expressa pela equação 3.1. (Welty, 2007)

$$\dot{Q} = hA(T_{sup} - T_{ar}) \quad 3.1$$

A- Área de transmissão de calor (m²);

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h, pode ser determinado por métodos numéricos complexos ou por expressões empíricas.

A equação geral de balanço energético de um volume de controlo é dada pela equação 3.2:

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_e + \dot{Q}_s + \dot{Q}_g \quad 3.2$$

Onde:

\dot{Q}_a - Acumulação de calor no volume de controlo (w/m°C);

\dot{Q}_e - Calor que entra no volume de controlo (w/m°C);

\dot{Q}_s - Calor que sai do volume de controlo (w/m°C);

\dot{Q}_g - Geração de calor no volume de controlo (w/m°C).

A parcela de acumulação de calor é dada pela expressão 3.3:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}C_p \frac{dT}{dt} \quad 3.3$$

Admitindo que não há acumulação de calor ($\dot{Q}_a = 0$), o calor que sai é igual ao calor gerado mais o calor que entra. Em regime permanente o fluxo de calor que entra por convecção é igual ao que passa através da parede e que sai por convecção, onde a resistência é a soma de todas as resistências condutivas e convectivas.

A equação de balanço no interior da câmara é apresentada na equação 3.4.

$$\dot{m}C_p \frac{dT}{dt} = Q_p + \dot{m}C_p(T_0 - T_i) + \left(\frac{T_0-T_i}{R_{tecto}}\right) + \left(\frac{T_0-T_i}{R_{paredes}}\right) + \left(\frac{T_0-T_i}{R_{chão}}\right) = 0 \quad 3.4$$

As resistências são calculadas através das equações 3.5-3.7:

$$R_{tecto} = \left(\frac{1}{(h_{ti} \times \text{área})}\right) + \left(\frac{\Delta x}{(h_{t0} \times \text{área})}\right) + \left(\frac{1}{(h_{t0} + \text{área})}\right) \quad 3.5$$

$$R_{parede} = \left(\frac{1}{(h_{pi} \times \text{área})}\right) + \left(\frac{\Delta x}{(k_p \times \text{área})}\right) + \left(\frac{1}{h_{po} \times \text{área}}\right) \quad 3.6$$

$$R_{chão} = \left(\frac{1}{(h_{chi} \times \text{área})}\right) + \left(\frac{\Delta x}{(k_{ch} \times \text{área})}\right) + \left(\frac{1}{(h_{cho} + \text{área})}\right) \quad 3.7$$

Onde:

\dot{m} – Caudal mássico (m³/s);

Q_p – Calor produzido pelas pessoas (w/m°C);

c_p – Calor específico (J/kgK);

T_0 - Temperatura exterior (k);

T_i - Temperatura interior (K);

h - Coeficiente de transferência de calor (w/m²°C);

área – área da superfície envolvente(m²);

Δx – Espessura da superfície envolvente (cm).

Os parâmetros adimensionais são uma importante ferramenta para estudar fenómenos físicos em engenharia. Dos grupos adimensionais, mais importantes, relacionados com a temática de transferência de calor em convecção, podem salientar-se os números de Nusselt, Prandtl e Grashof para a transferência de calor.

O número de Prandtl (equação 3.8) é dado pelo rácio da difusão molecular momentânea do calor e da difusão molecular do calor. Este traduz uma combinação de propriedades do fluido (Welty, 2007).

$$Pr \equiv \frac{\mu c_p}{k} \quad 3.8$$

Onde:

Pr – Número de Prandtl (adimensional);

μ – Viscosidade dinâmica do ar (Ns/m²);

c_p – Calor específico (J/kgK);

K – Condutividade térmica (W/m°C).

O número de Nusselt (equação 3.9) representa o rácio da resistência térmica por condução e da resistência térmica por convecção do fluido (Welty, 2007).

$$Nu \equiv \frac{hL}{k} \quad 3.9$$

Onde:

Nu – Número de Nusselt (adimensional);

h – Coeficiente de transmissão de calor (w/m²°C);

L – Comprimento (m);

K – Condutividade térmica (w/m°C).

O número de Grashof (equação 3.10) é utilizado na correlação de dados na convecção natural (Welty, 2007).

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta (\Delta T) L^3}{\mu^2} \quad 3.10$$

Onde:

Gr – Número de Grashof (adimensional);

ρ – Massa específica do ar (kg/m³);

g – Aceleração da gravidade (m/s²);

β – 1/Temperatura média (K⁻¹);

ΔT – Variação da temperatura (°C);

μ – Viscosidade dinâmica do ar (Ns/m²).

O mecanismo de transferência de energia por convecção natural envolve o movimento de um fluido passando um limite sólido, devido à diferença de densidades resultantes da

troca de energia. Assim, é natural que os coeficientes de transferência de energia e as suas equações variem com a geometria de um dado sistema (Welty, 2007).

De acordo com Incropera e Dewitt (1990) o valor de Nusselt (Nu) é dado por:

Para planos verticais (paredes):

$$\text{Nu} = 0,59 \text{ Ra}^{1/4} \text{ para } 10^4 < \text{Ra} < 10^9 \quad 3.11$$

$$\text{Nu} = 0,1 \text{ Ra}^{1/3} \text{ para } \text{Ra} > 10^9 \quad 3.12$$

Para paredes horizontais, para a superfície inferior (chão):

$$\text{Nu} = 0,27(\text{Ra}_L)^{1/4} \text{ para } 3 \times 10^5 < \text{Ra}_L < 10^{10} \quad 3.13$$

Para paredes horizontais, para a superfície superior (tecto):

$$\text{Nu} = 0,14(\text{Ra}_L)^{1/3} \text{ para } 2 \times 10^7 < \text{Ra}_L < 3 \times 10^{10} \quad 3.14$$

$$\text{Nu} = 0,54 (\text{Ra}_L)^{1/4} \text{ para } 10^5 < \text{Ra}_L < 2 \times 10^7 \quad 3.15$$

Onde o número de Rayleigh pode calculado pela equação 3.16:

$$\text{Ra}_L = \text{Gr} \times \text{Pr} \quad 3.16$$

Onde:

Ra_L – Número de Rayleigh médio (adimensional);

Gr – Número de Grashof (adimensional);

Pr – Número de Prandtl (adimensional).

No cálculo destes parâmetros deve ser avaliada a temperatura média (equação 3.17), utilizada na avaliação das propriedades do fluido.

$$T_m = 270 + \frac{T_{\text{interior}} + T_{\text{ar}}}{2} \quad 3.17$$

Onde:

T_m – Temperatura média (K);

$T_{interior}$ – Temperatura interior do compartimento (°C);

T_{ar} - Temperatura do ar exterior (°C).

As equações utilizadas para o cálculo das temperaturas das superfícies, aplicado à sala piloto, podem ser consultadas no Anexo 2.

3.3 Modelo do escoamento unidireccional dentro de condutas

Outra informação que é necessária implementar no modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados é a velocidade do ar nas entradas de ar no compartimento em estudo.

De forma a encontrar um valor para a velocidade do ar, em cada uma das entradas, que se aproxime o mais possível do valor real, foi desenvolvido um modelo que calcula a velocidade do ar dentro das condutas, designado por modelo unidireccional dentro de condutas.

Equação de Bernoulli (equação 3.18) (Quintela, 2009):

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_B}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B + h_f - h_B \quad 3.18$$

Onde:

P_A : Pressão em A (N/m²);

P_B : Pressão em B (N/m²);

V_A : Velocidade em A (m/s);

V_B : Velocidade em B (m/s);

Z_A : Altura em A (m);

Z_B : Altura em B (m);

ρ : Densidade do ar (kg/m³);

g : Aceleração da gravidade (m/s²);

h_F : Perda de carga total (local e contínua) (m);

h_B : Altura manométrica da bomba (m);

A perda de energia desde o ventilador até à entrada de ar no compartimento deve-se às perdas de carga localizadas (k) e às perdas de carga contínuas (f) e podem ser expressas na forma geral, pela equação 3.19:

$$h_f = \sum h_l + \sum h_j \quad 3.19$$

Onde a perda de energia contínua é dada pela equação 3.20 (Quintela, 2009):

$$h_l = f_i \frac{\Delta L_i \cdot v_i^2}{d \cdot 2g} \quad 3.20$$

Onde:

f_j : Factor de fricção;

ΔL : Comprimento do segmento (m);

v_j : Velocidade no segmento (m/s);

d : diâmetro do segmento (m);

g : aceleração da gravidade (m/s²);

E a perda de carga localizada é dada pela equação 3.21 (Quintela, 2009):

$$h_j = \sum_i k_i \frac{v_i^2}{2g} \quad 3.21$$

Onde:

k_i : Coeficiente de perda de carga;

v_i : velocidade no segmento (m/s);

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

Os coeficientes de perda de carga, localizada e contínua, utilizados, k e f , foram determinados através de equações e abacos presentes em Idel'cik (1969) e Miller (1971).

Os termos da equação representam respectivamente as perdas de energia por unidade de volume que o fluido sofre nas seguintes posições:

- Nas entradas das condutas;
- Ao longo das paredes das condutas;
- Nas condutas com junção em forma de "T";
- Nas condutas curvas;
- Nas saídas das condutas.

Equação da conservação de massa (equação 3.22):

$$\sum \dot{m}_{entrada} = \sum \dot{m}_{saída} \quad 3.22$$

Em que:

$$\dot{m}_i = A_{i \times} v_i \times \rho \quad 3.23$$

Onde:

\dot{m}_i – Caudal mássico (m^3/s);

A_i – Área da saída da conduta (m^2);

v_i - Velocidade do ar na saída (m^2/s);

ρ : Densidade do ar (kg/m^3).

Tendo em conta o esquema e numeração do sistema de condutas (figura 3.1) é possível observar as posições onde ocorrem as perdas de energia.

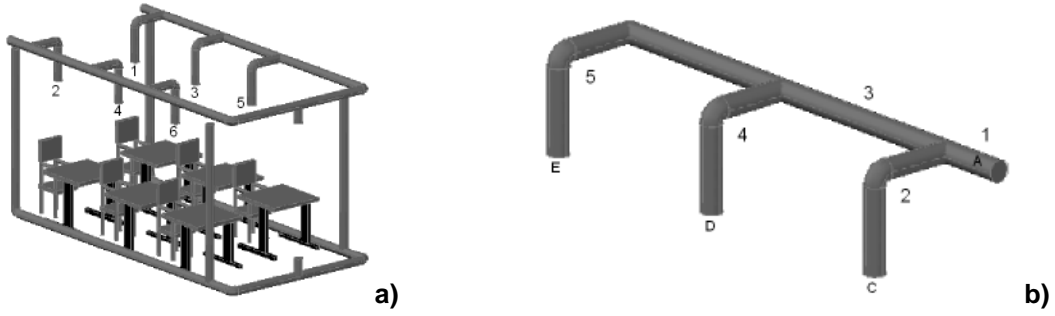


Figura 3.1 - a) Esquema do sistema de condutas na câmara experimental e numeração das entradas de ar e b) Esquema geral e numeração das secções do sistema de condutas.

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_C}{\rho g} + \frac{v_C^2}{2g} + Z_C + h_f - h_B \quad 3.24$$

$$h_f = k \frac{v^2_1}{2g} + f_1 \frac{\Delta L_1 \cdot v^2_1}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_2}{2g} + f_2 \frac{\Delta L_2 \cdot v^2_2}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_2}{2g} + k \frac{v^2_2}{2g} \quad 3.25$$

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_C = \frac{P_D}{\rho g} + \frac{V_D^2}{2g} + Z_D + h_f - h_B \quad 3.26$$

$$h_f = k \frac{v^2_1}{2g} + f_1 \frac{\Delta L_1 \cdot v^2_1}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_3}{2g} + f_3 \frac{\Delta L_3 \cdot v^2_3}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_4}{2g} + f_4 \frac{\Delta L_4 \cdot v^2_4}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_4}{2g} + k \frac{v^2_4}{2g} \quad 3.27$$

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{V_E^2}{2g} + Z_E + h_f - h_B \quad 3.28$$

$$h_f = k \frac{v^2_1}{2g} + f_1 \frac{\Delta L_1 \cdot v^2_1}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_3}{2g} + f_3 \frac{\Delta L_3 \cdot v^2_3}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_5}{2g} + f_5 \frac{\Delta L_5 \cdot v^2_5}{d \cdot 2g} + k \frac{v^2_5}{2g} + k \frac{v^2_5}{2g} + k \frac{v^2_5}{2g} \quad 3.29$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad 3.30$$

O sistema de equações não lineares desenvolvido (equações 3.24-3.30), tendo em conta as perdas de carga contínuas e localizadas, foi resolvido a partir do método de Newton e Gauss-Jordan.

3.4 Modelo numérico de resposta térmica do corpo humano

O modelo numérico da resposta térmica do corpo humano - "Human Thermal Comfort - 3D" - foi utilizado como um software que simula a resposta térmica do corpo humano, e avalia o nível de conforto térmico e desconforto térmico local a que os ocupantes estão

sujeitos em ambientes interiores uniformes. Este software para além de calcular o campo de temperatura no tecido do corpo, no sangue e no vestuário, calcula também a massa de sangue no corpo e do vapor de água à superfície da pele e no vestuário (Conceição e Lúcio, 2006).

Um indivíduo no interior de um compartimento, para além das perdas de calor por evaporação e respiração e das trocas de calor com o ambiente por condução e convecção, está também sujeito a fenómenos radioactivos. Estes fenómenos dependem não só da radiação solar, como também das trocas de calor por radiação verificadas entre a superfície do corpo e as superfícies envolventes. Para avaliar as trocas radiativas é necessário conhecer a temperatura radiante, que cada elemento do corpo está sujeito, que por sua vez depende dos factores de forma, entre cada secção do corpo e as superfícies envolventes, e da temperatura das mesmas superfícies (Conceição e Lúcio, 2006).

No cálculo dos factores de forma e neste modelo numérico o corpo humano é dividido em 24 elementos cilíndricos e 1 elemento esférico (figura 3.2). Cada elemento está dividido em 4 partes (centro, músculo, gordura e pele), subdividido em várias camadas, e pode ainda ser protegido do ambiente externo através de camadas de roupa. Este modelo numérico é dividido em quatro modelos principais: sistema térmico do corpo humano, sistema térmico de vestuário; sistema termo-regulatório e conforto térmico (Conceição et al, 2010).

Este modelo é baseado em equações integrais de balanço energético para o tecido humano, sangue arterial e venoso e vestuário, como em equações integrais de balanço mássico para o sangue, vapor de água na superfície da pele e no vestuário. São considerados fenómenos condutivos, convectivos, radioactivos, evaporativos e mássicos. Para controlar a temperatura do corpo está implantado um modelo que simula o sistema termo-regulatório do corpo humano. O sistema de equações final é resolvido através do método de Gauss-Jordan, em condições de regime permanente, e de Runge-Kutta-Fehlberg, em condições de regime transitório (Conceição e Lúcio, 2006).

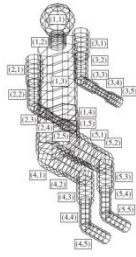


Figura 3.2 - Esquema do corpo humano, dividido em 25 elementos

3.5 ADI – Índice de distribuição do ar

O ADI (Air distribution Index) tem como objectivo obter a avaliação simultânea da influência do conforto térmico, qualidade do ar e conceito da eficiência de ventilação (remoção de calor e contaminantes) (Conceição, 2012).

No nível de avaliação do conforto térmico é utilizado o conceito de percentagem previsível de pessoas insatisfeitas (PPD), no nível de qualidade do ar interior é utilizado o conceito de percentagem de pessoas insatisfeitas (PD) e no conceito de eficiência de ventilação é utilizado a remoção de calor e de contaminantes (Conceição, 2012).

O ADI, em ambientes não uniformes, é calculado pela equação 3.31 (Conceição, 2012):

$$ADI = \sqrt[2]{N_{TC} \times N_{AQ}} \quad 3.31$$

Onde:

ADI – Índice de distribuição de ar (Air Distribution Index);

N_{TC} – Número de conforto térmico;

N_{AQ} – Número de qualidade de ar;

O número de conforto térmico é avaliado pela equação 3.32 (Conceição, 2012):

$$N_{TC} = \frac{\epsilon_{TC}}{PPD} = \frac{T_0 - T_i}{T_{corpo} - T_i} \quad 3.32$$

Onde:

ϵ_{TC} - Eficiência de remoção de calor;

PPD – Percentagem previsível de pessoas insatisfeitas;

T_0 – Temperatura do ar na exaustão;

T_i – temperatura do ar nas entradas;

T_{corpo} – temperatura média do ar em redor do corpo humano;

O número de qualidade do ar é calculado através da equação 3.33 (Conceição, 2012):

$$N_{AQ} = \frac{\varepsilon_{AQ}}{PD} = \frac{\frac{C_0 - C_i}{C_R - C_i}}{395e^{(-1.83V^{0.25})}} \quad 3.33$$

Onde:

ε_{AQ} – Eficiência de remoção de contaminante;

PD – Percentagem de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar;

V - Caudal de ar renovado por ocupante;

C_0 – Concentração de contaminante na saída de ar;

C_i – Concentração de contaminante na entrada de ar;

C_R - Concentração de contaminante na zona de respiração;

De acordo com este modelo, obtêm-se valores mais elevados de ADI, para:

- Os valores mais elevados de eficiência de remoção de calor;
- Os valores mais elevados de eficiência de remoção de contaminantes;
- Os valores mais baixos de PPD, relacionado com o nível de conforto térmico;
- Os valores mais baixos de PD, relacionado com a qualidade do ar.

Neste trabalho, ao cálculo do índice de distribuição do ar foi acrescentado o conceito de risco de resfriamento.

Na comparação entre situações, é frequente ocorrerem situações onde se obtêm bons resultados de ADI, o que traduz uma boa relação entre a qualidade do ar e o conforto térmico, mas que no entanto têm valores elevados de desconforto térmico local (risco de resfriamento), ou vice-versa. Quando o objectivo é a tomada de decisão entre uma situação ou outra, ter que optar a qual destes conceitos dar mais peso, não é uma decisão fácil. Como resposta a este problema evidenciou-se a necessidade de, para além

do conforto térmico, qualidade do ar e conceito da eficiência de ventilação, o ADI ter ainda acoplado o risco de resfriamento.

Assim sendo, surge o ADTI (equação 3.34):

$$ADIT = \sqrt[3]{N_{TC} \times N_{AQ} \times N_{DR}} \quad 3.34$$

Onde:

ADTI – Índice de distribuição de ar turbulento (Air Distribution Turbulent Index);

N_{TC} – Número de conforto térmico;

N_{AQ} – Número de qualidade de ar;

N_{DR} – Número de Risco de Resfriamento (Draught Risk);

Onde o número de Risco de Resfriamento pode ser calculado pela equação 3.35:

$$N_{DR} = \frac{\varepsilon_{\text{ventilação}}}{DR_{\text{máx}}} = \frac{\frac{V_{\text{entrada}} \times A_{\text{entrada}}}{V_{\text{ocupante}} \times A_{\text{ocupante}}}}{DR_{\text{máx}}} \quad 3.35$$

Onde:

$\varepsilon_{\text{ventilação}}$ - Eficiência da ventilação;

$DR_{\text{máx}}$ - Risco de resfriamento máximo verificado nas secções do corpo humano sem roupa;

V_{entrada} - Velocidade média de entrada;

A_{entrada} - Área de entrada média;

V_{ocupante} - Velocidade média em redor do corpo humano;

A_{ocupante} - Área em redor do corpo humano;

Um sistema que promova uma boa distribuição do ar irá apresentar um número de risco de resfriamento elevado. Da mesma forma, um sistema que não promova uma boa distribuição do ar irá apresentar um número de risco de resfriamento reduzido.

3.6 Conforto Térmico e Desconforto térmico local

O conceito de conforto térmico é definido na norma ISO 7730 (2005) como sendo “o estado de espírito em que o indivíduo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico” (Conceição, 1996).

Para avaliar as condições de conforto térmico é utilizado o índice PMV (Predicted Mean Vote) e o PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) (Conceição, 1996). O PMV prevê o valor médio de votos térmicos de um grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente. No entanto, os votos individuais de cada pessoa são dispersos em redor de um valor médio, é então útil prever o número provável de pessoas que se sentem desconfortáveis devido ao calor ou frio, isto é, o PPD (ISO 7730, 2005).

O conforto térmico está relacionado com o equilíbrio térmico. Um indivíduo encontra-se em equilíbrio térmico com o exterior, ou seja, não tem sensação de frio ou calor, quando a energia produzida no interior do organismo é idêntica à perda pelo mesmo para o exterior. A energia pode ser trocada com o exterior sob forma de calor sensível ou latente. A perda de calor sensível está associada a processos de transmissão de calor por condução, por convecção e por radiação: a condução realiza-se entre o corpo (ou vestuário) e o ar circundante e depende da temperatura e da velocidade do ar, enquanto as trocas radiactivas dependem, para além de outros factores, da temperatura média do corpo e das superfícies envolventes. A perda de calor latente está associada à respiração pulmonar e cutânea e à transpiração e depende da temperatura, da humidade relativa e da velocidade do ar, entre outras variáveis de menos importância (Conceição, 1996).

Os índices de conforto térmico representam um papel fundamental na sustentabilidade de um edifício. O consumo de energia de um sistema de ventilação vai ser o consumo necessário para alcançar os índices de conforto dentro de um compartimento, logo estes determinam o consumo de energia dos sistemas de ventilação de um edifício (Djongyang et al, 2010).

Estes índices são influenciados por valores de quatro variáveis ambientais, humidade relativa, temperatura média do ar, velocidade média do ar e temperatura média radiante, na envolvente das várias secções do corpo, e da temperatura média radiante, a que cada secção do corpo está sujeita, e depende de dois parâmetros pessoais, resistência térmica do vestuário e índice de actividade física (Fanger e Toftum, 2002).

A humidade relativa influencia os processos de perda de calor por evaporação, no entanto, em ambientes térmicos moderados a influência da humidade relativa é muito pequena. A temperatura do ar circundante ao corpo de um indivíduo e a velocidade média do ar influenciam os processos de transmissão de calor por convecção natural, ou mista, e por evaporação. A temperatura média radiante, por sua vez, influencia a troca de calor sob a forma de radiação entre uma pessoa e as superfícies que se encontram em seu redor. A radiação depende, entre outros parâmetros, da geometria do habitáculo e da localização do indivíduo no compartimento.

Relativamente aos parâmetros pessoais, o nível de vestuário normalmente funciona como uma resistência de calor sensível e o nível de actividade representa uma medida da produção interna de calor por parte do organismo de um ser humano. A unidade de medida do nível de vestuário é definida por clo (clothing) sendo $1\text{clo}=0,155\text{ m}^2\text{C}/\text{W}$ e o seu valor pode ser determinado pela combinação das diversas peças de roupa, ou seja, a partir do somatório das respectivas resistências térmicas. Durante o Verão o vestuário típico é de sensivelmente 0,5 clo, enquanto que, no inverno pode variar entre 1 e 3 clo. O nível de actividade é definido como met (metabolismo) e 1met corresponde a 70 Watts/m² de área de superfície do corpo humano (Conceição, 1996).

A ISO 7730 classifica os ambientes térmicos segundo três categorias de qualidade apresentadas na tabela 3.1. A classificação segundo categorias tem a vantagem de, à partida, seleccionar o tipo de ambiente térmico de acordo com as exigências impostas.

Tabela 3.1 – Categorias da sensação térmica, propostas pela ISO 7730 (2005).

Categoria	Sensação térmica	
	PPD	PMV
A	< 6%	-0,2<PMV>0,2
B	<10%	-0,5<PMV>0,5
C	<15%	-0,7<PMV>0,7

Um indivíduo pode estar termicamente confortável e expressar insatisfação proveniente de desconforto local. O desconforto local, como o próprio nome indica, está

relacionado com uma insatisfação que o indivíduo sente numa zona limitada do seu corpo, provocada por valores dos parâmetros ambientais não admissíveis para o conforto. Normalmente, as pessoas com uma actividade moderada são mais susceptíveis a estes problemas do que aquelas com níveis de actividade mais elevados (Conceição, 1996).

O escoamento induzido por um sistema de ventilação, devido à movimentação do ar, provoca por vezes o arrefecimento local do corpo humano, designado por resfriamento. O resfriamento é causado por um elevado arrefecimento por convecção na superfície do corpo humano, que estimula os Termos receptores de frio. Este problema é mais frequente nos espaços ventilados pelo homem, e, para o controlar, os ocupantes frequentemente aumentam a temperatura do ar, aumentando assim o consumo energético. As zonas do corpo desprotegidas pelo vestuário são mais sensíveis a resfriamentos, sendo a cabeça a parte do corpo mais sensível. A quantificação do risco de resfriamento (em Inglês: Draught risk) em espaços ventilados é fornecida a partir do número de pessoas que se sentem insatisfeitas devido a resfriamentos locais (Conceição, 1996). O índice de risco de resfriamento encontra-se definido em três categorias pela normalização ISO 7730, representadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Categorias do desconforto local, propostas pela ISO 7730 (2005).

Categoria	Risco de resfriamento
A	<15%
B	<20%
C	<25%

Segundo a normalização ISO 7730, o Risco de resfriamento pode ser calculado pela equação 3.36.

$$DR = 3.143(34 - T_{ar})(V_{ar} - 0.05)^{0.6223} + 0.3696V_{ar}IT(34 - T_{ar})(V_{ar} - 0.05)^{0.6223} \quad 3.36$$

Por sua vez, a intensidade de turbulência (IT) do ar pode ser calculada através da equação 3.37.

$$IT = \left(\frac{RMS}{v_{ar \text{ de entrada}}} \right) \times 100 \quad 3.37$$

3.7 Qualidade do Ar Interior

Uma vez que as pessoas passam a maior parte do seu tempo em espaços fechados, o tema da qualidade do ar interior tem-se mostrado de grande importância nos dias que correm.

A avaliação da qualidade do ar interior é determinada principalmente por dois factores. O primeiro é a sua composição química e a concentração dos seus componentes. A segunda está relacionada com a percepção subjectiva do ar, que pode ser expressa pela aceitabilidade do ar, frescura do ar, intensidade de odores, irritação, etc. (Melikov e Kaczmarczk, 2012).

Para avaliar a qualidade do ar interior determina-se a taxa de renovação do ar, os caudais volúmicos de renovação do ar, a concentração de vários contaminantes, etc.

O dióxido de carbono, CO₂, produzido no metabolismo humano, é o bio efluente que um indivíduo liberta em maior quantidade, sendo a sua emissão proporcional ao nível metabólico. Para baixas concentrações, este bio efluente é inofensivo, mas para concentrações mais elevadas é prejudicial à saúde. A avaliação da qualidade do ar, em compartimentos ocupados por seres humanos, é muitas vezes feita através da medição da concentração de CO₂ porque a evolução da concentração deste gás fornece uma boa indicação do caudal volúmico de renovação do ar (Conceição, 1996).

Segundo o D.L. nº 79/2006 de 4 de Abril o caudal de renovação do ar para salas de aula é definido, no anexo VI, por 30 m³/h, por ocupante, e no anexo VII, define-se que o limite recomendado para a concentração de CO₂ em ambientes interiores é de 1800 mg/m³.

3.8 Precisão

A precisão (accuracy) descreve a exactidão de uma medição e reflecte o grau para o qual o valor medido se aproxima do verdadeiro valor (Rabinovich, 2010). O valor da precisão encontra-se entre 0 e 1, e pode ser calculada através da equação 3.38.

$$Precisão = \frac{\Sigma \text{valores experimentais}}{\Sigma \text{valores experimentais} + \text{erro}} \quad 3.38$$

O cálculo do nível de precisão será bastante útil na fase de validação.

4 Casos de estudo

Neste trabalho são avaliadas quatro situações diferentes do sistema de ventilação com jactos verticais descendentes, e avaliado um sistema de ventilação com jactos horizontais com quatro entradas de ar, numa câmara equipada com seis secretárias e com uma ocupação de 6 ou 12 ocupantes. A avaliação é efectuada em relação à qualidade do ar interior, ao conforto e desconforto térmico e eficiência dos sistemas de ventilação. De forma a fazer esta avaliação são efectuadas simulações numéricas com recurso ao acoplamento do modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados com o modelo da resposta térmica do corpo humano e da aplicação do método do Índice de distribuição do ar (ADI).

4.1 Simulação numérica

4.1.1 *Simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados*

Foram simuladas numericamente cinco situações. Nas simulações numéricas de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, que tiveram lugar numa câmara virtual de dimensão 4,5x2,55x2,5 m³, é utilizada uma malha quadrada, com espaçamentos iguais a 5 cm, de 90 espaçamentos segundo X (4,5 m), 51 espaçamentos segundo Y (2,55 m) e 50 espaçamentos segundo Z (2,5 m). Foi utilizada uma malha não uniforme, com um maior refinamento junto dos obstáculos e nas entradas e saídas de ar, para a obtenção de resultados mais precisos.

4.1.1.1 *Jactos verticais descendentes*

Relativamente ao sistema de ventilação com jactos verticais descendentes, foram analisadas 4 situações, com 6 e 12 ocupantes, a 20 e 24°C.

Na situação I os jactos verticais localizam-se 0,45 m à frente dos 6 ocupantes, com uma distância de 1,50 m do nível do chão (figuras 4.1 e 4.2).

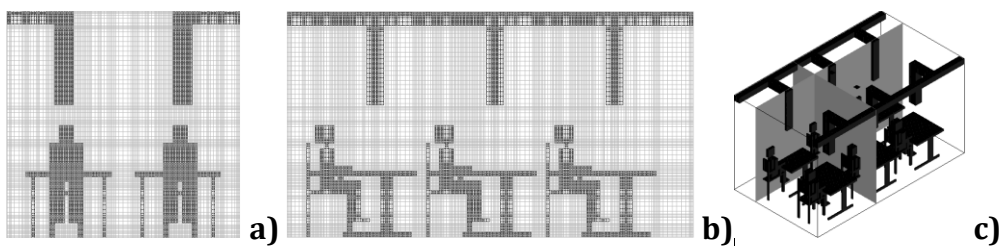


Figura 4.1 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação I com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

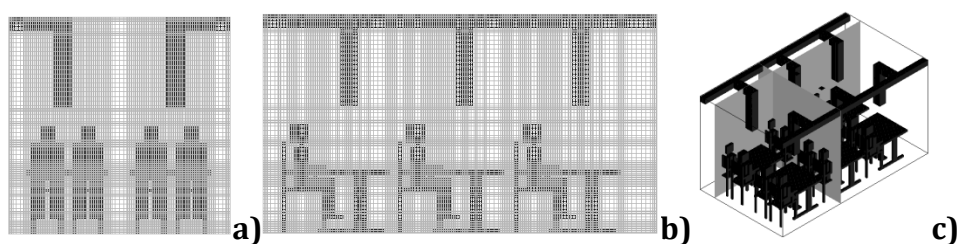


Figura 4.2 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação I com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

A situação II, idêntica à situação I, difere por apresentar os jactos verticais posicionados directamente em cima dos 6 ocupantes (figura 4.3 e 4.4).

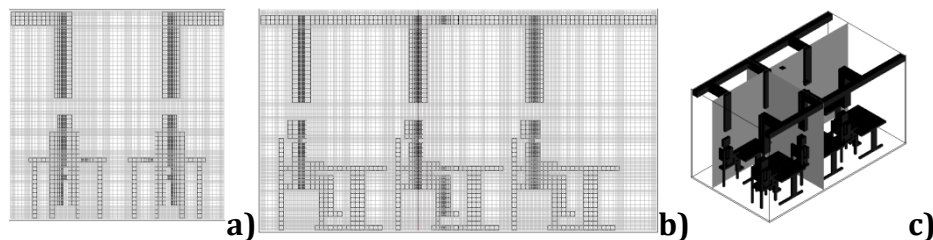


Figura 4.3 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação II com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

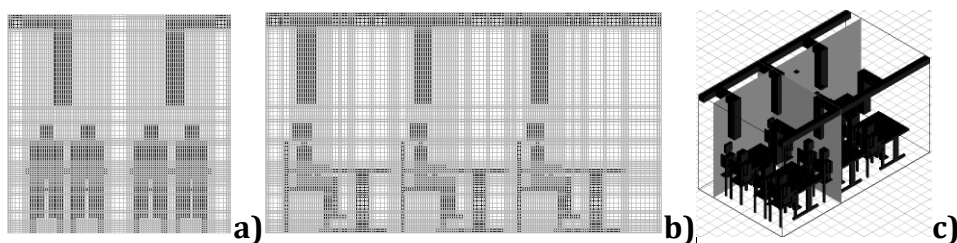


Figura 4.4 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação II com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

A situação III também apresenta os jactos verticais posicionados directamente em cima dos ocupantes, no entanto, estes apresentam uma distância do chão de 1,80 m (figuras 4.5 e 4.6).

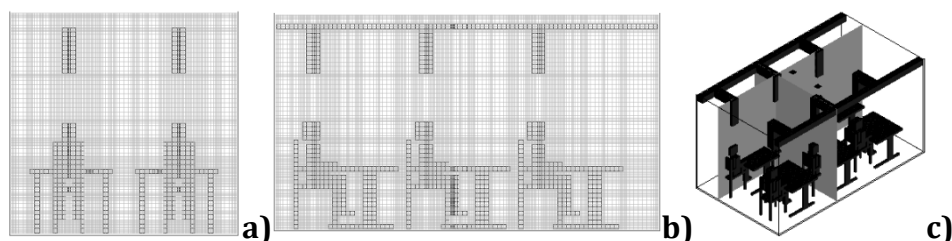


Figura 4.5 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação III com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

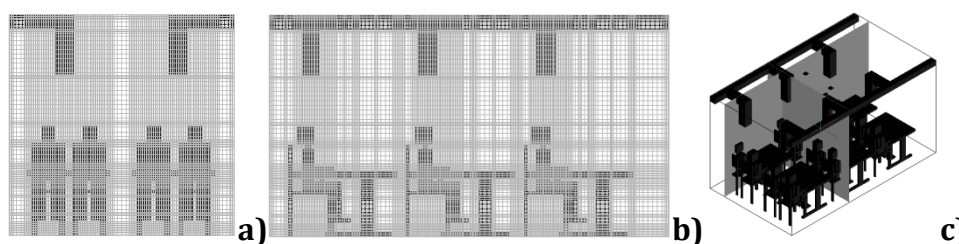


Figura 4.6 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação III com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

Por sua vez, na situação IV, os jactos verticais apresentam uma dimensão mais pequena que as anteriores. Enquanto a dimensão das entradas de ar nas situações anteriores é $0,01 \text{ m}^2$, na situação IV é avaliada uma situação idêntica com a situação III mas com uma entrada de ar de apenas $0,0025 \text{ m}^2$ (figura 4.7 e 4.8).

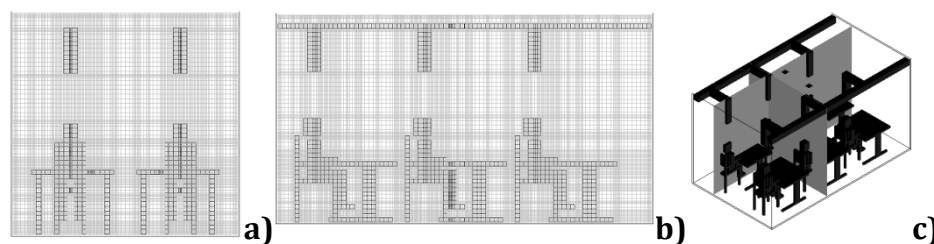


Figura 4.7 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação IV com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

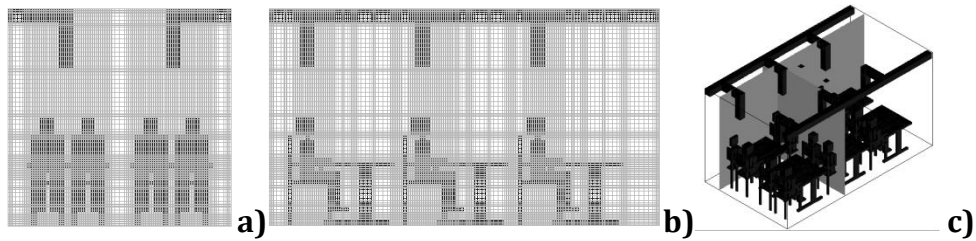


Figura 4.8 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação IV com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

Para análise e comparação dos resultados das diferentes situações, para 6 e 12 ocupantes, foram escolhidos dois planos verticais, um que corta os ocupantes transversalmente e outro que corta os ocupantes longitudinalmente na zona de respiração. Para 6 ocupantes foram escolhidos os planos $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m e para 12 ocupantes foram escolhidos os planos $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m (figuras 4.1-4.8).

Neste estudo, foi considerado que as temperaturas das superfícies envolventes são os valores encontrados através do modelo do cálculo da temperatura das superfícies envolventes (Anexo3). Considerou-se que a velocidade do ar nas entradas é de 3 m/s, excepto na situação IV onde é de 12 m/s, e a intensidade de turbulência do ar considerou-se cerca de 10 %. (Anexo 3).

A numeração geral dos ocupantes, para uma ocupação de 6 e 12 pessoas, encontra-se apresentada na figura 4.9.

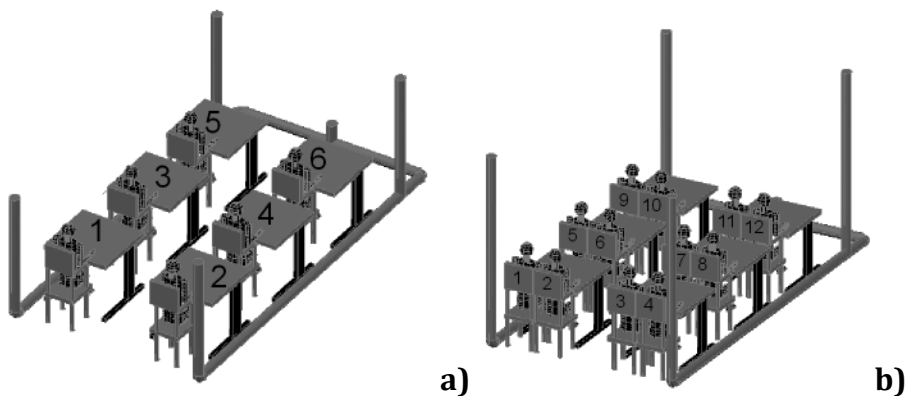


Figura 4.9 – Numeração geral para a) 6 ocupantes e b) 12 ocupantes, na sala piloto (adaptado de Santiago, 2013).

4.1.1.2 Jactos horizontais

No estudo dos jactos horizontais foi simulada uma situação numa câmara virtual equipada com seis secretárias acopladas com quatro entradas de ar horizontais.

Para análise e comparação dos resultados das diferentes situações, para 6 e 12 ocupantes, a 20 e 24°C, foram escolhidos dois planos verticais, um que corta os ocupantes transversalmente e outro que corta os ocupantes longitudinalmente na zona de respiração. Para 6 ocupantes foram escolhidos os planos $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m e para 12 ocupantes foram escolhidos os planos $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m (figuras 4.10 e 4.11).

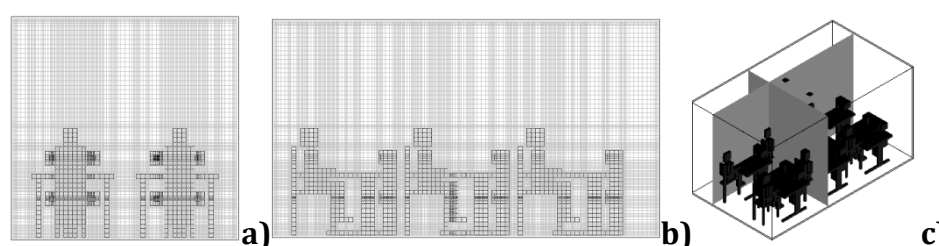


Figura 4.10 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação com jactos horizontais com 6 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

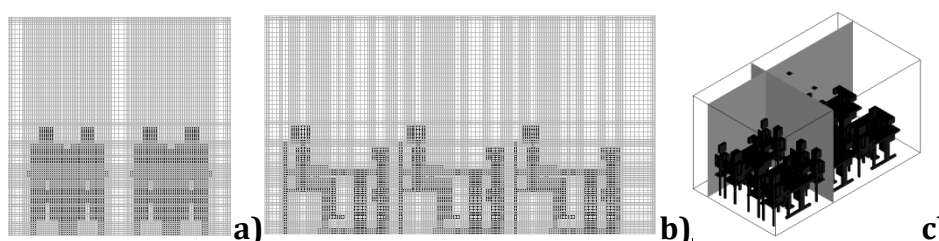


Figura 4.11 – Malha utilizada na simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados, na situação com jactos horizontais com 12 ocupantes, a 20 e 24°C. a) Plano transversal, b) plano longitudinal e c) perspectiva isométrica dos planos utilizados na análise dos resultados.

4.1.2 Simulação da resposta térmica dos ocupantes

Na simulação da resposta térmica dos ocupantes nas várias situações, para 6 e 12 ocupantes, foi utilizado o método do “Human Thermal Comfort – 3D”. Para tal, em cada uma das 25 secções foi utilizada uma malha de 5x8, enquanto que nas superfícies envolventes foram utilizadas malhas de 10x10 (Anexo 4). Estas malhas foram utilizadas no cálculo das temperaturas médias radiantes (MRT).

Neste estudo, em condições de Verão, foi simulado um vestuário típico de Verão (calções, camisa de manga curta, sapatos leves e roupa interior normal, Clo=0,5). A humidade relativa foi de 50 %.

Este modelo foi utilizado acoplado ao modelo de escoamentos tridimensional em espaços ocupados.

4.2 Validação experimental

A câmara experimental “sala piloto”, situada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve (figura 4.12), com 4,50x2,55x2,50 m³ de dimensão, foi desenvolvida a partir de uma filosofia de construção versátil, construída a partir de painéis de 0,6x0,6 m², sendo que as suas dimensões são facilmente alteráveis, e adaptáveis aos mais diversos tipos de estudos.

Esta câmara encontra-se equipada com 6 secretárias, com uma ocupação que pode variar entre 6 ou 12 pessoas e com vários sistemas de ventilação ecológicos instalados, nomeadamente, sistemas de ventilação baseados em jactos localizados (verticais e horizontais) e sistemas de ventilação baseados em cortinas de ar (jactos confluentes).

Em fase de projecto da câmara, foi efectuado o estudo comparativo de várias situações do sistema de ventilação baseado em jactos localizados, de forma a obter dados que permitissem a escolha da melhor situação para aplicar na “sala piloto”.

Após a escolha da melhor situação, a câmara experimental foi construída durante o período de desenvolvimento desta dissertação, sendo acompanhada a sua fase de construção (Anexo 5).

A validação experimental foi efectuada através da simulação da situação de jactos verticais descendentes – situação III, a 20°C, sem e com 2 ocupantes (figura 4.13), e da medição experimental, de vários parâmetros, efectuada na câmara experimental "Sala piloto" (figura 4.12), com recurso a dois manequins.



Figura 4.12 - Câmara experimental "Sala piloto".

Na simulação numérica é utilizada a mesma filosofia das simulações anteriores, é utilizada uma malha quadrada com espaçamentos de 5 cm, a câmara é dividida em 90 espaçamentos segundo X, 51 espaçamentos segundo Y e 50 espaçamentos segundo Z. Foi também utilizada uma malha não uniforme, com um maior refinamento junto dos obstáculos e nas entradas e saídas de ar, para a obtenção de resultados mais precisos.

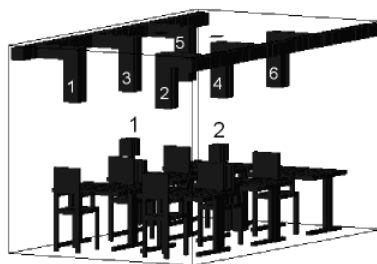


Figura 4.13 - Representação da situação de validação, com a numeração dos 2 ocupantes e das entradas de ar.

Neste estudo, foi considerado que as temperaturas das superfícies envolventes são os valores encontrados através do modelo de cálculo das temperaturas das superfícies envolventes (Anexo 2) e que os valores da velocidade do ar nas entradas correspondem aos valores calculados através do modelo do escoamento unidireccional dentro das condutas (Anexo 3). A intensidade de turbulência do ar considerou-se cerca de 10 %.

Nas medições experimentais foi utilizado o equipamento Babuc-A, para a medição da velocidade do ar foi acoplado o sensor de anemometria de fio quente, e para a medição da temperatura do ar foi acoplado o sensor de temperatura da LSI.

A primeira validação experimental incidiu sobre os resultados do modelo do escoamento unidireccional dentro das condutas. Para tal, foram efectuadas medições, nas entradas de ar da câmara experimental, relativamente à velocidade do ar, sem ocupantes.

Os resultados do modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional dentro de um espaço ocupado (Virtual Air Flow- 3D) foram validados através de medições experimentais da velocidade do ar, ao longo de vários pontos, de 10 em 10 cm, medidos

na vertical a partir de cada uma das entradas de ar da câmara experimental, sem ocupantes.

Relativamente à validação dos resultados do acoplamento dos softwares foram efectuadas medições dos campos de velocidade e temperaturas do ar em torno de um termo-manequim. Estas medições experimentais foram efectuadas com recurso a dois termo-manequins localizados nas secretárias centrais da câmara experimental.

Estes termo-manequins desenvolvidos pela Universidade do Algarve representam duas mulheres e estão divididos em oito secções (cabeça, tronco, braços, coxas e pernas). Os manequins foram cheios com água e equipados com quatro sistemas (aquecimento, circulação, controlo e transpiração). Os três primeiros sistemas consistem numa resistência eléctrica, uma bomba de água, um grupo de condutas e controladores de temperatura digitais, que promovem um campo de temperatura na superfície exterior, similar ao da pele humana em ambientes moderados, enquanto o quarto permite utilizar o termo-manequim em ambientes não moderados, permitindo o uso uniforme de água no corpo humano (Conceição et al, 2007).

Os valores numéricos e medições experimentais são efectuados em 15 pontos representados na figura 4.14. Os 15 pontos são: Frente: à cabeça, peito, ombro direito, ombro esquerdo, abdómen; perna direita, coxa direita, perna esquerda e coxa esquerda; em cima: do braço direito, mão direita, braço esquerdo, mão esquerda, pé direito e pé esquerdo.

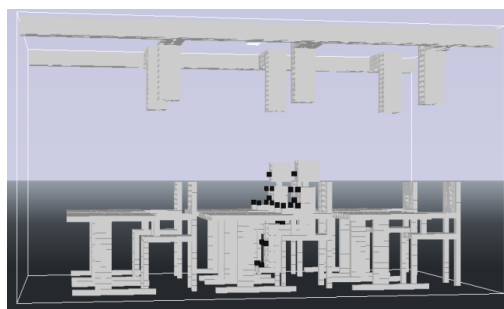


Figura 4.14 – Representação dos 15 pontos para a validação experimental.

Para avaliar a situação de validação foi calculado o nível de precisão (accuracy) de cada um dos resultados numéricos relativamente aos resultados experimentais.

5 Estudo comparativo

5.1 Simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados

Foram efectuadas simulações numéricas de escoamentos tridimensional em espaços ocupados para as quatro situações do sistema de ventilação de jactos verticais descendentes e para uma situação do sistema de jactos horizontais, com 6 e 12 ocupantes e com o ar de entrada no compartimento a 20° e 24°C.

5.1.1 Jactos verticais descendentes - Situação I

Na situação I os jactos verticais localizam-se 0,45 m à frente dos ocupantes, a uma distância de 1,50 m do nível do chão. Nesta situação, é possível verificar que se forma um microclima em redor dos ocupantes, para uma ocupação de 6 e 12, e para 20° e 24°C.

As figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 demonstram que, para ambas as ocupações e temperaturas do ar, as velocidades do ar apresentam valores mais elevados em frente aos ocupantes, em cima da zona da secretária, que corresponde à localização dos jactos verticais descendentes nesta situação.

É possível constatar a ocorrência de algumas recirculações de ar na ordem dos 0,3 m/s.

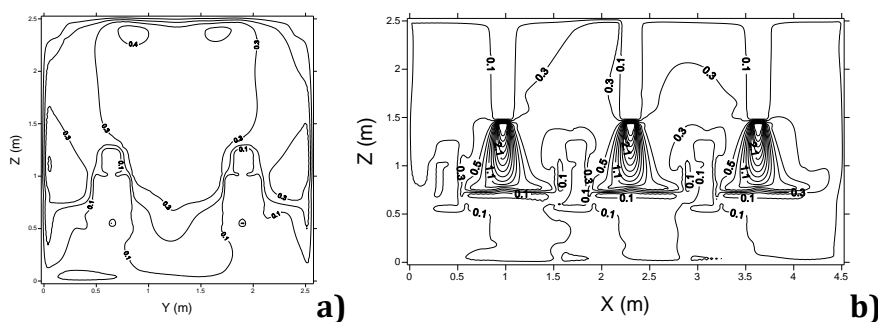


Figura 5.1 - Velocidade do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

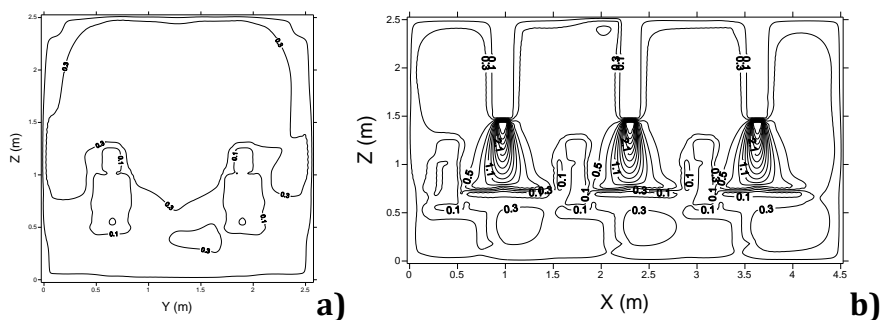


Figura 5.2 - Velocidade do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

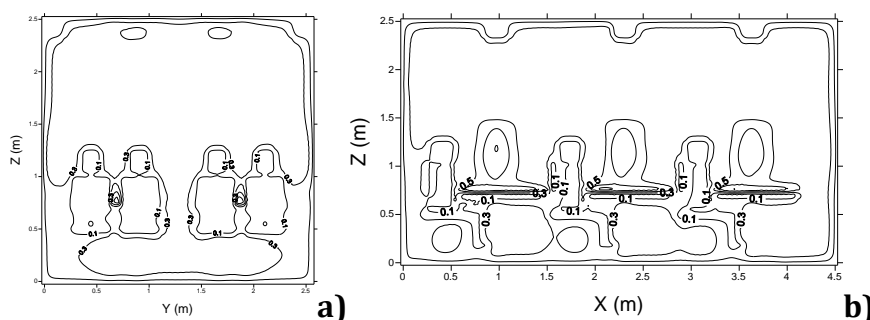


Figura 5.3 - Velocidade do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

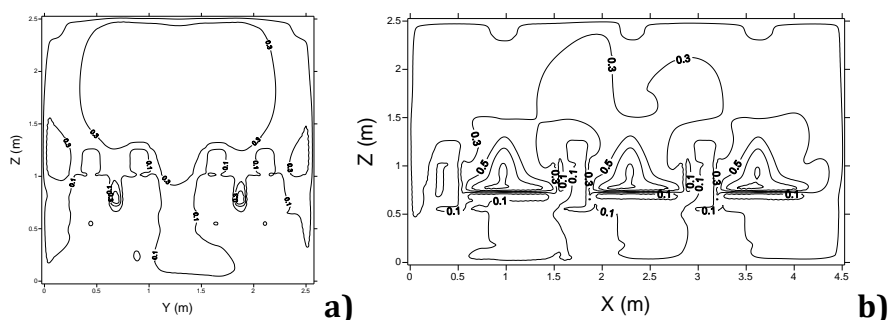


Figura 5.4 - Velocidade do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Relativamente à temperatura do ar, é possível constatar pelas figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 a formação de um microclima em redor dos ocupantes.

Comparando as figuras 5.5 e 5.6 (6 ocupantes) é possível verificar que a 20°C (figura 5.5), as temperaturas rondam os 23°C , e a 24°C (figura 5.6), as temperaturas no compartimento rondam os $25, 26^{\circ}\text{C}$. Nas situações com 12 ocupantes, para 20°C , as temperaturas estão entre os 24 e os 26°C (figura 5.7), e rondam os $27, 28^{\circ}\text{C}$ quando a temperatura do ar de entrada é 24°C (figura 5.8).

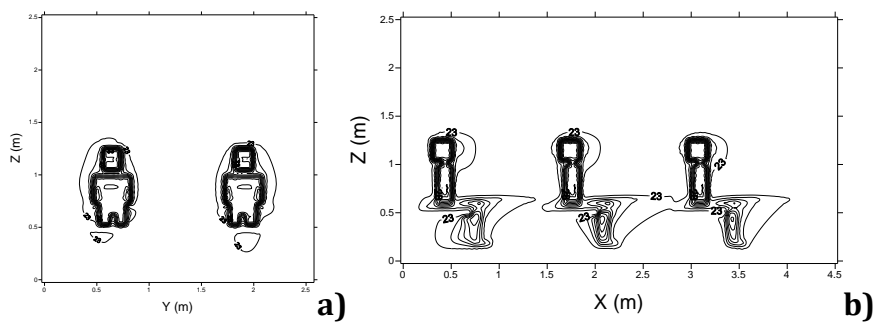


Figura 5.5 – Temperatura do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

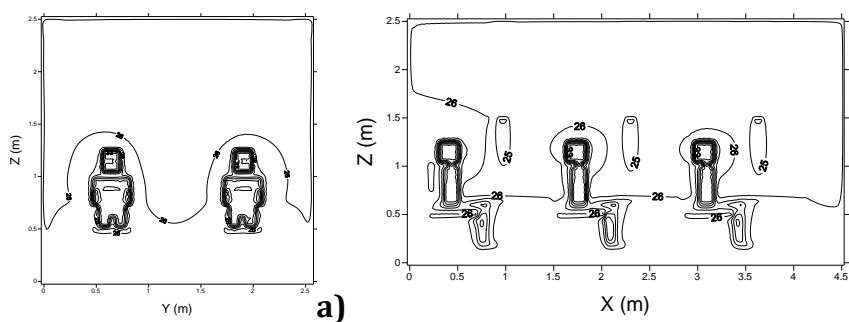


Figura 5.6 – Temperatura do ar, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

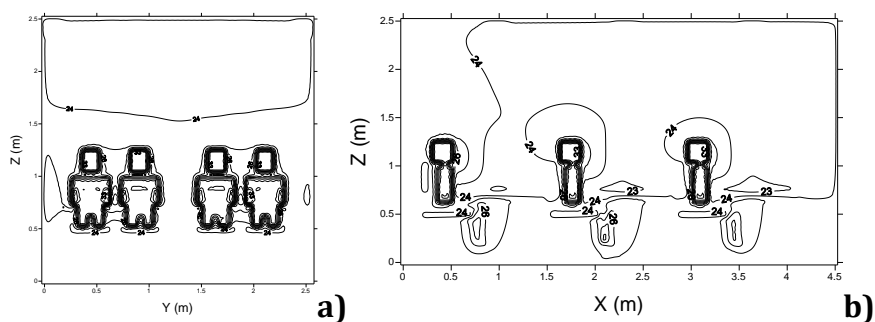


Figura 5.7 – Temperatura do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

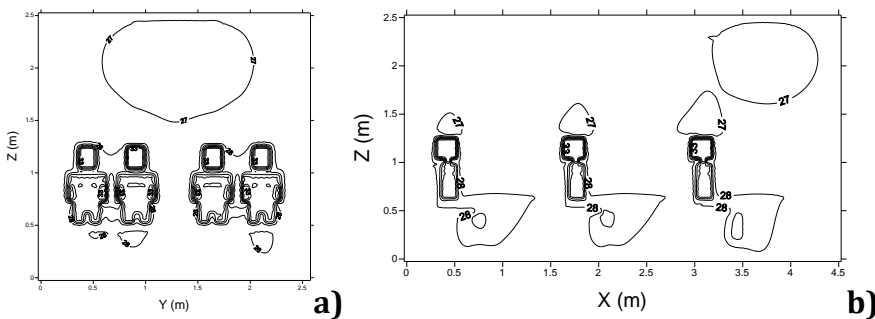


Figura 5.8 – Temperatura do ar, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Analisando a qualidade do ar na situação I é possível verificar, pelas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, que a concentração de CO₂ é relativamente elevada na zona de respiração. No entanto, na zona do jacto vertical descendente a concentração deste bio efluente é “arrastado” no sentido descendente, principalmente nas situações com 6 ocupantes. É possível verificar também um arrastamento no sentido lateral.

Com 12 ocupantes o nível de CO₂ sofre um pequeno aumento relativamente às situações I com 6 ocupantes. Uma vez que o jacto vertical de ar, nesta situação com 12 ocupantes, figuras 5.11 e 5.12, não actua directamente na zona de respiração, é possível verificar que o arrastamento no sentido descendente da concentração de CO₂ não é tão dramático. Por sua vez, o arrastamento lateral é mais acentuado na situação I com 6 ocupantes.

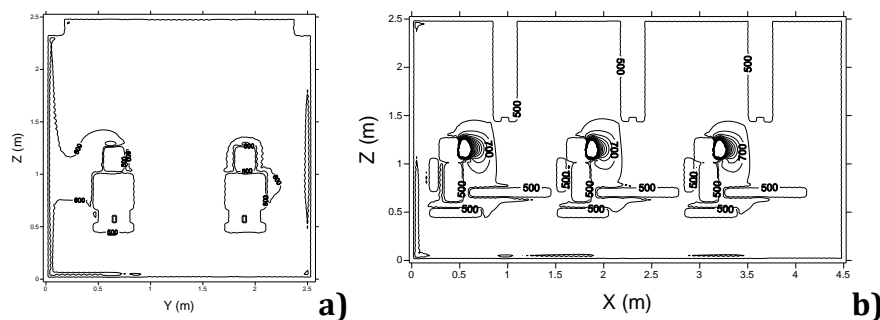


Figura 5.9 – Concentração de CO₂, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

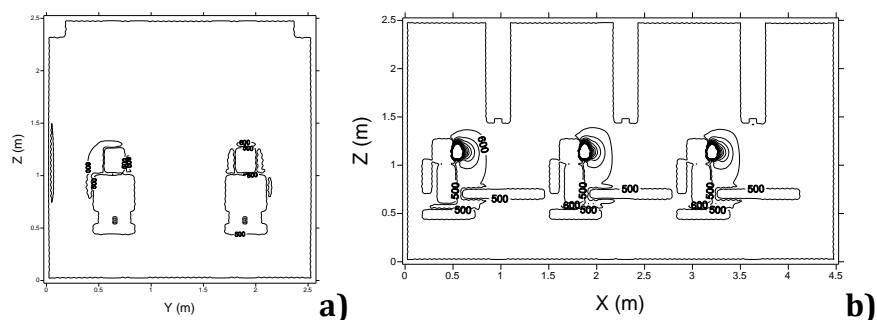


Figura 5.10 – Concentração de CO₂, na situação I, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

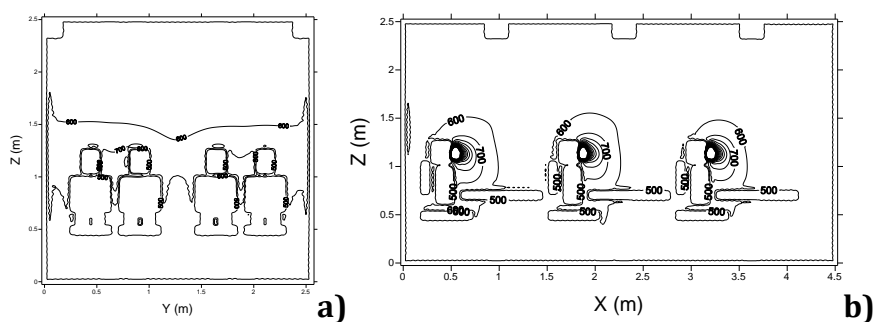


Figura 5.11 – Concentração de CO₂, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

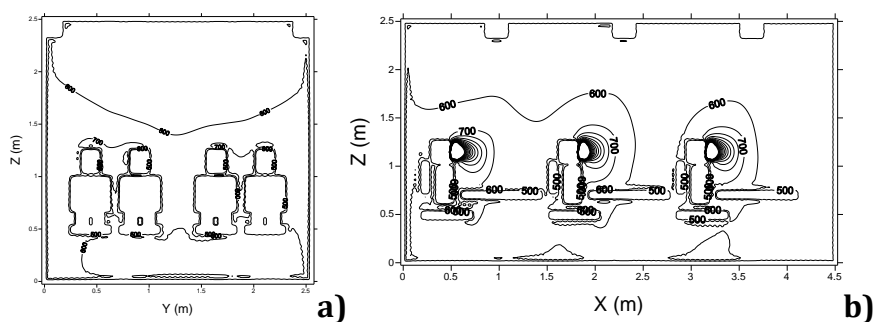


Figura 5.12 – Concentração de CO₂, na situação I, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

5.1.2 *Jactos verticais descendentes - Situação II*

Na situação II os jactos verticais descendentes encontram-se posicionados directamente em cima dos ocupantes, com uma distância de 1,50 m do nível do chão. Nesta situação, é possível verificar novamente a formação de um microclima em redor dos ocupantes, para uma ocupação de 6 e 12 e para 20° e 24°C.

Nesta situação, pelas figuras 5.13 e 5.14, é possível verificar que, com 6 ocupantes, estes encontram-se sujeitos a velocidades do ar mais elevadas na zona da cabeça e ombros. É também possível verificar que o ocupante funciona como um obstáculo relativamente ao jacto de ar, e que ocorrem várias recirculações de ar no compartimento.

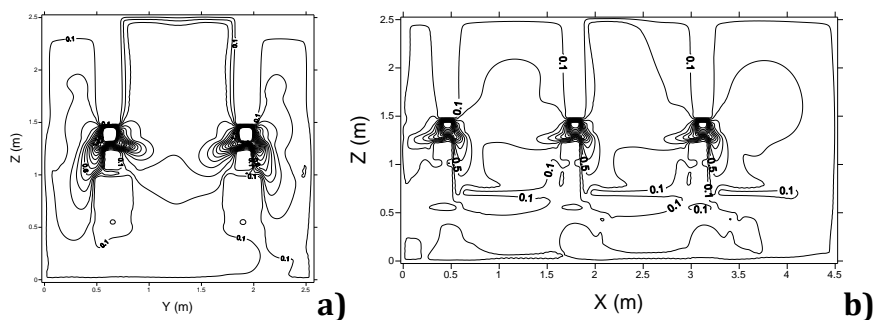


Figura 5.13 - Velocidade do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

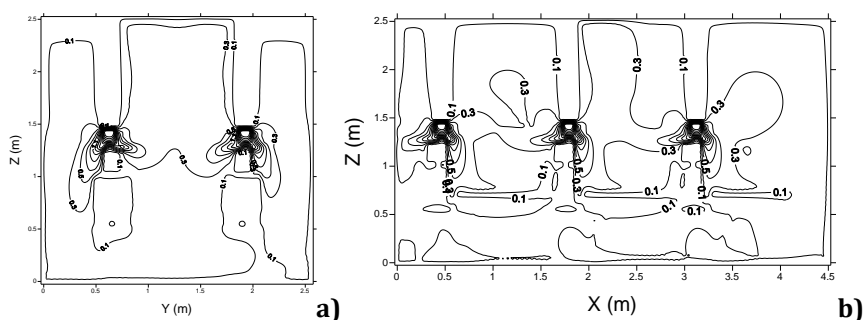


Figura 5.14 - Velocidade do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Nas figuras 5.15 e 5.16 é possível constatar que, nas situações II com 12 ocupantes, o jacto de ar “infiltra-se” no espaço existente entre os dois ocupantes da mesma secretária, desta forma os ocupantes ficam sujeitos a velocidades superiores nas secções do corpo que se encontram no espaço existente entre si e o colega de secretária. No restante compartimento existem menos recirculações de ar comparativamente à situação II com 6 ocupantes.

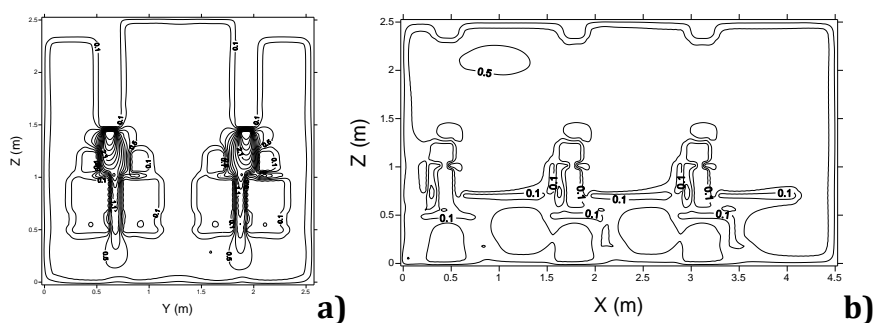


Figura 5.15 - Velocidade do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

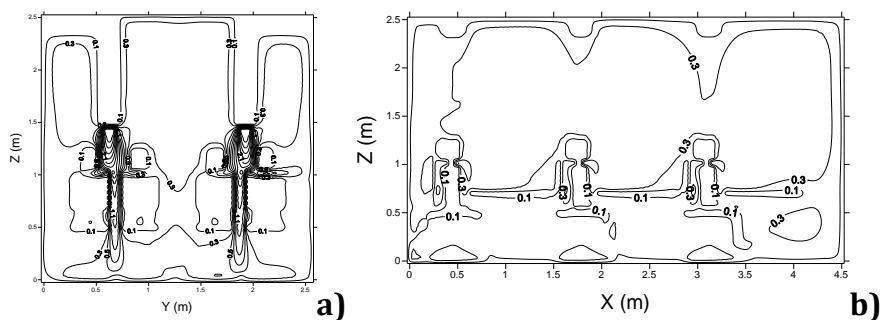


Figura 5.16 - Velocidade do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Ao analisar a temperatura do ar nesta situação, é possível verificar novamente a formação de um microclima em redor dos ocupantes. Na situação com 6 ocupantes, figuras 5.17 e 5.18, é possível verificar que, para 24°C , as temperaturas no compartimento é ligeiramente superior, na ordem dos $25, 26^{\circ}\text{C}$, do que no caso em que a temperatura do ar de entrada é de 20°C , na ordem dos 23°C .

O mesmo acontece quando se compara os resultados da situação com 12 ocupantes, havendo um aumento de 24° para $27, 28^{\circ}\text{C}$. Comparando as figuras (5.17 e 5.18) para 6 ocupantes com as figuras (5.19 e 5.20) para 12 ocupantes, é possível constatar que ocorre um aumento da temperatura do ar entre as diferentes ocupações, devido ao aumento da temperatura média radiante (Anexo 6).

Como seria de esperar, as temperaturas mais elevadas ocorrem para a situação a 24°C com 12 ocupantes.

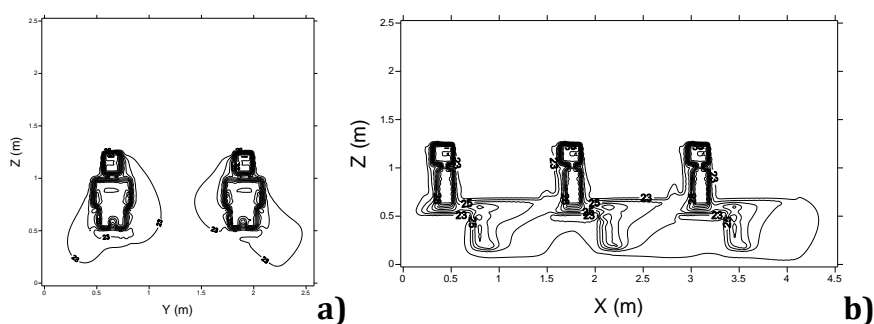


Figura 5.17 - Temperatura do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

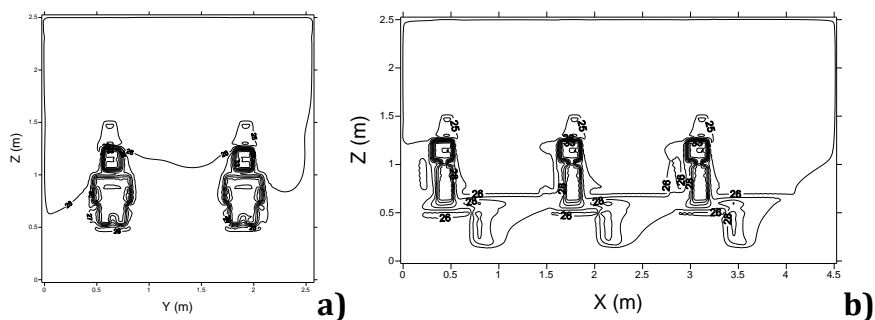


Figura 5.18 - Temperatura do ar, na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

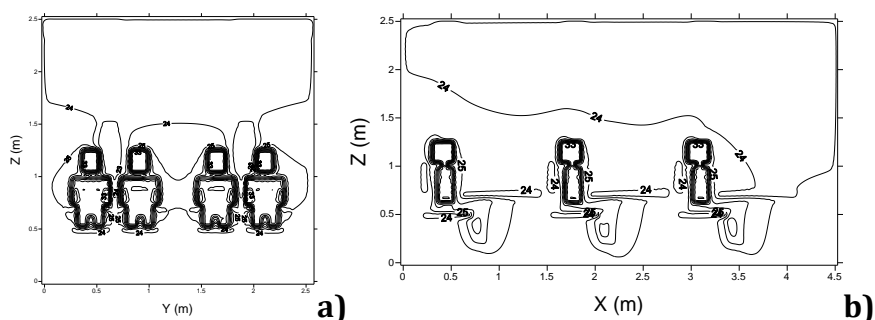


Figura 5.19 - Temperatura do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

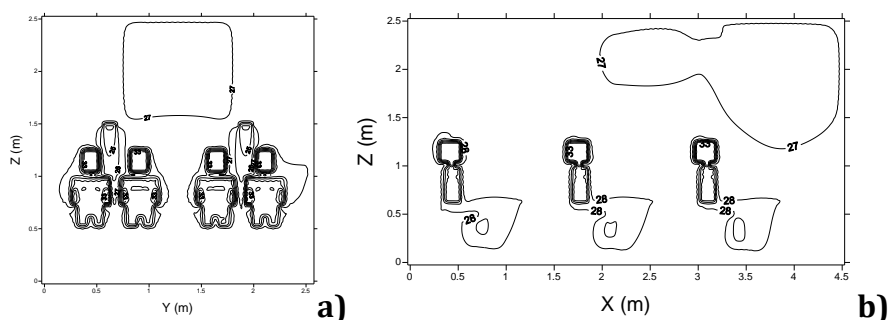


Figura 5.20 - Temperatura do ar, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Na situação II com 6 ocupantes é possível verificar que os jactos verticais descendentes actuam na zona da respiração, uma vez que pelas figuras 5.21 e 5.22 é possível constatar um claro “arrastamento” do CO_2 no sentido descendente, na zona da respiração. No entanto este fenómeno ocorre de forma mais visível na figura 5.21 onde a temperatura do ar na entrada é de 20°C . Nesta situação é possível também verificar uma dispersão lateral dos contaminantes.

Na situação II com 12 ocupantes (figuras 5.23 e 5.24) o jacto já não actua de forma tão evidente na zona da respiração dos ocupantes. Nesta situação, os jactos verticais

descendentes localizam-se no meio dos dois ocupantes de uma secretária onde é visível que o nível de CO_2 não sofre um efeito de “arrastamento” descendente tão visível como quando são 6 ocupantes, no entanto ocorre um arrastamento lateral.

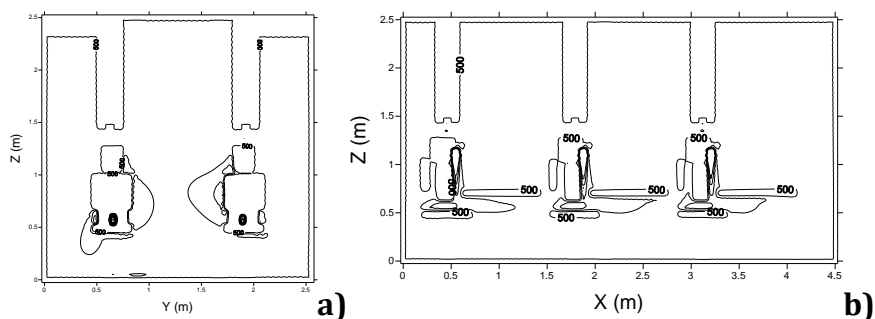


Figura 5.21 – Concentração de CO_2 , na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

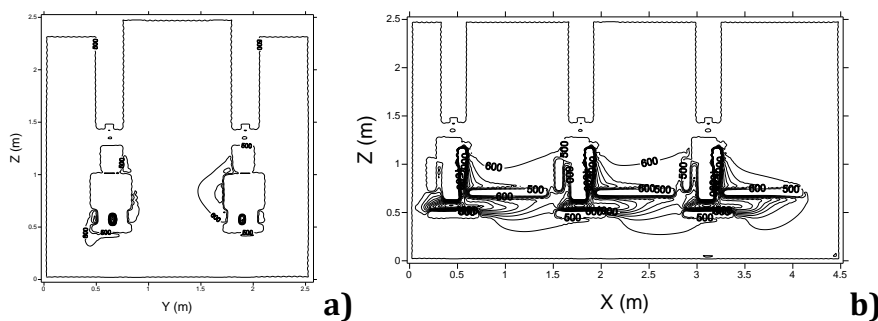


Figura 5.22 – Concentração de CO_2 , na situação II, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

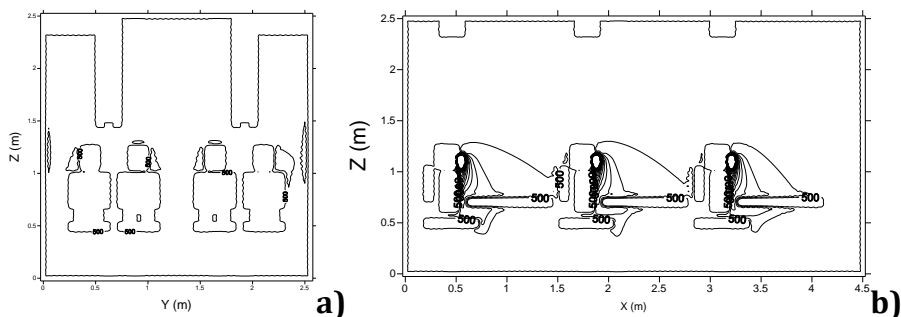


Figura 5.23 – Concentração de CO_2 , na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

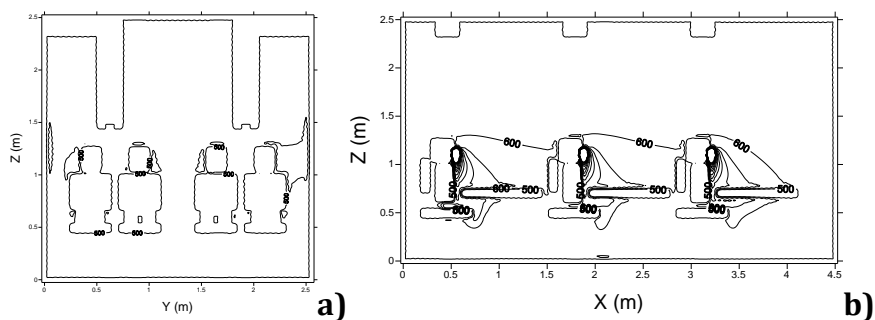


Figura 5.24 – Concentração de CO₂, na situação II, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

5.1.3 Jactos verticais descendentes - Situação III

A situação III apresenta os jactos verticais posicionados directamente em cima dos ocupantes, a uma distância do chão de 1,80 m.

Ao analisarmos as figuras 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 é possível verificar que a velocidade do ar nesta situação, em redor dos ocupantes, com excepção na zona da cabeça, encontra-se na ordem dos 0,1m/s. Na situação III com 6 ocupantes (figuras 5.25 e 5.26), na zona da cabeça até à altura dos ombros, há a influência dos jactos de ar apresentando velocidades mais elevadas.

É também possível verificar algumas recirculações de ar, principalmente em baixo das secretárias.

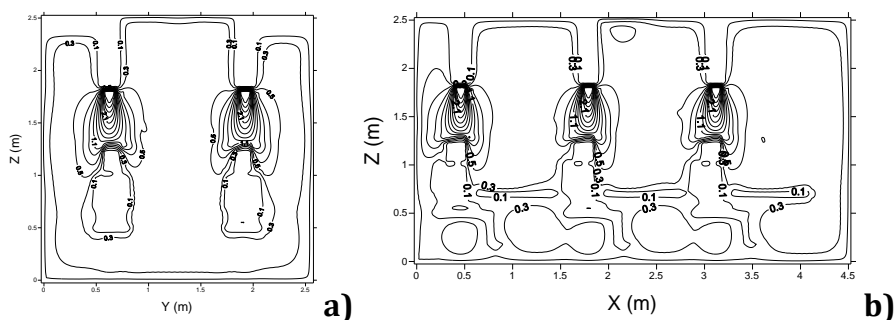


Figura 5.25 - Velocidade do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

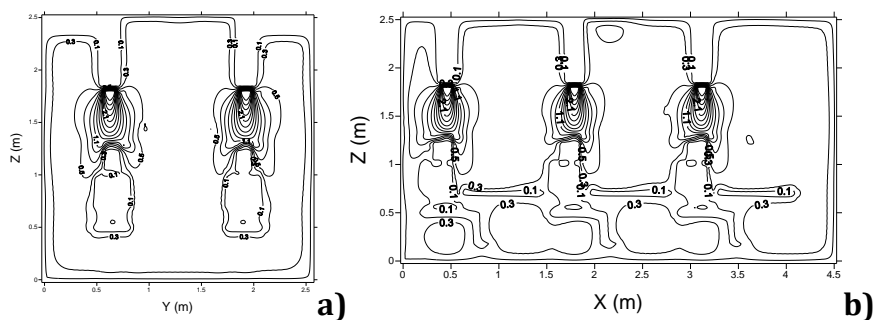


Figura 5.26 - Velocidade do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Nas figuras 5.27 e 5.28 é possível verificar que, na situação III com 12 ocupantes, o jacto de ar infiltra-se entre os dois ocupantes da mesma secretária, desta forma os ocupantes ficam sujeitos a velocidades superiores no espaço existente entre si e o colega de secretária, e no restante compartimento as velocidades do ar são semelhantes à situação com 6 ocupantes.

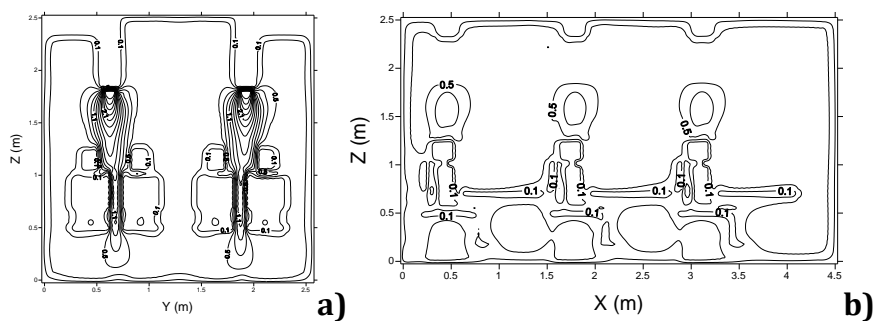


Figura 5.27 - Velocidade do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

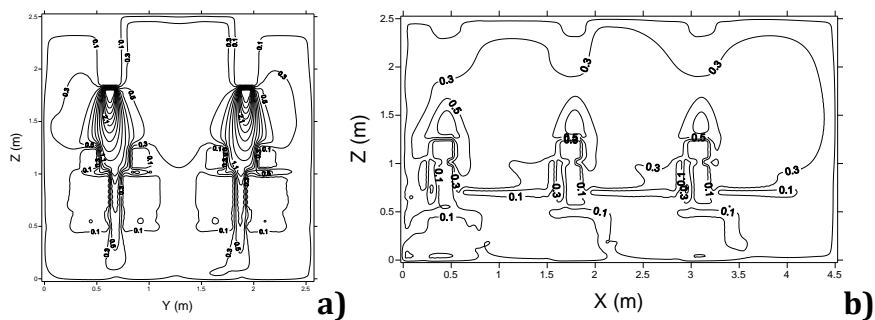


Figura 5.28 - Velocidade do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Ao analisar a temperatura do ar na situação III é facilmente verificada, tal como nas anteriores, a formação de um microclima em redor dos ocupantes.

Na situação III com 6 ocupantes com a temperatura do ar de entrada a 20°C, figura 5.29, a temperatura no compartimento ronda os 23°C, aumentando para os 25, 26°C quando a temperatura do ar de entrada é 24°C, com a mesma ocupação (figura 5.30).

O mesmo acontece na situação com 12 ocupantes (figuras 5.31 e 5.32), ou seja, quando a temperatura do ar de entrada é superior, a temperatura do ar em redor dos ocupantes também é superior.

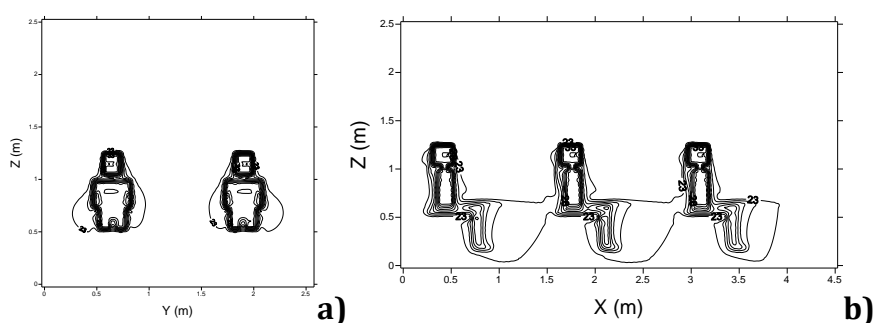


Figura 5.29 - Temperatura do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

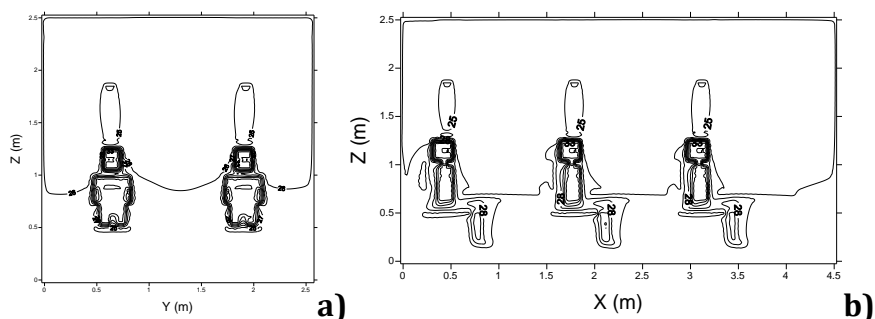


Figura 5.30 - Temperatura do ar, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

Na situação com 12 ocupantes com a temperatura do ar de entrada a 20°C (figura 5.31), a temperatura do ar em redor dos ocupantes sofre uma ligeira subida, de 24° para 28°C, devido ao aumento da temperatura média radiante (Anexo 6), comparando com a situação com 6 ocupantes, com o ar de entrada à mesma temperatura (20°C).

O mesmo acontece comparando a situação III com a temperatura do ar de entrada a 24°C, com diferentes ocupações.

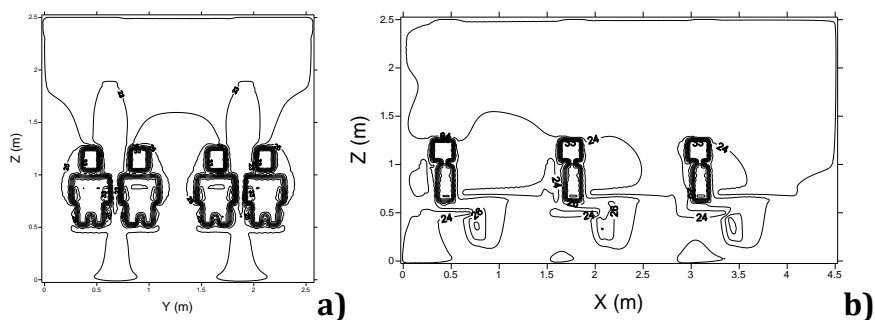


Figura 5.31 - Temperatura do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

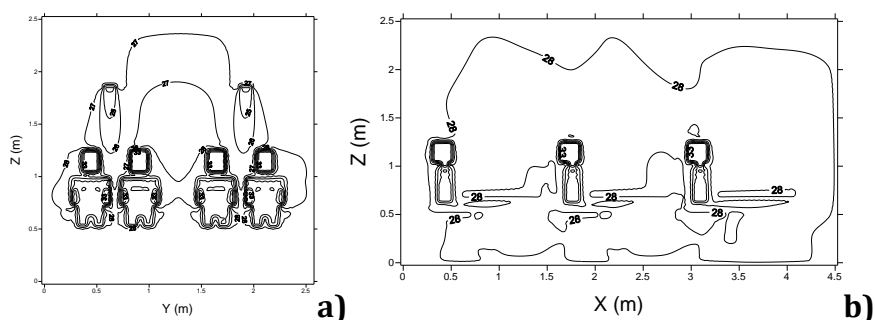


Figura 5.32 - Temperatura do ar, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Através das figuras 5.33 e 5.34, situação III com 6 ocupantes, é possível verificar o arrastamento dos contaminantes no sentido descendente, o que se deve à posição do jacto directamente em cima da cabeça dos ocupantes, quando se trata desta ocupação.

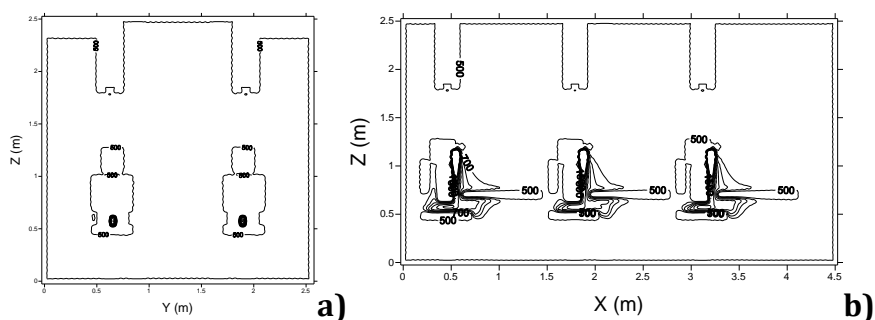


Figura 5.33 – Concentração de CO_2 , na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

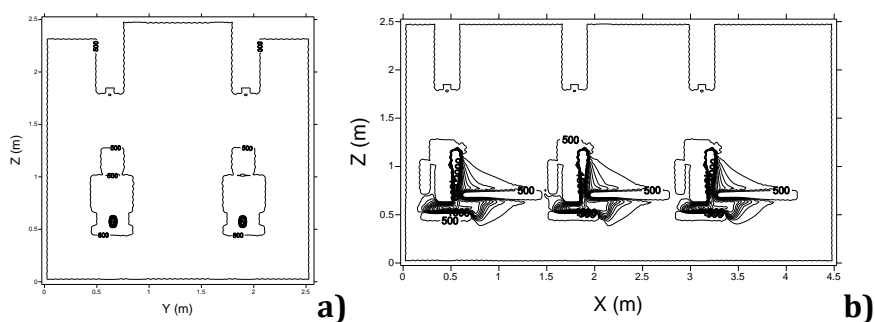


Figura 5.34 – Concentração de CO₂, na situação III, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

Relativamente à situação com diferentes temperaturas do ar de entrada, com o mesmo número de ocupantes, não são visíveis alterações consideráveis, como é possível confirmar comparando a figura 5.33 com a 5.34 e a figura 5.35 com a 5.36.

Na situação III com 12 ocupantes, figuras 5.35 e 5.36, uma vez que o jacto fica posicionado no meio dos dois ocupantes de uma secretária, o fenómeno de arrastamento dos contaminantes é mais significativo no sentido lateral, como é possível verificar nas figuras 5.35 a) e 5.36 a).

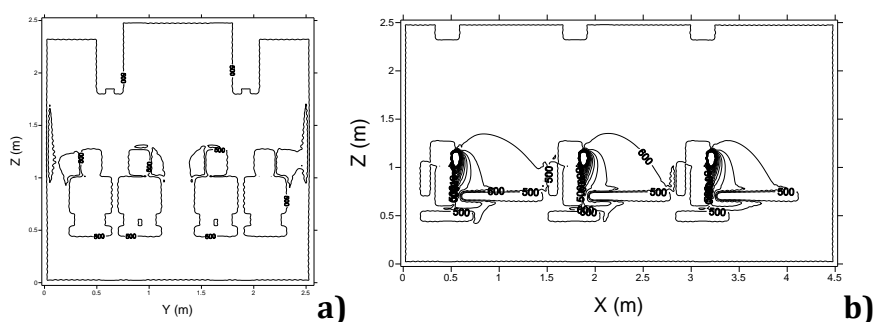


Figura 5.35 – Concentração de CO₂, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

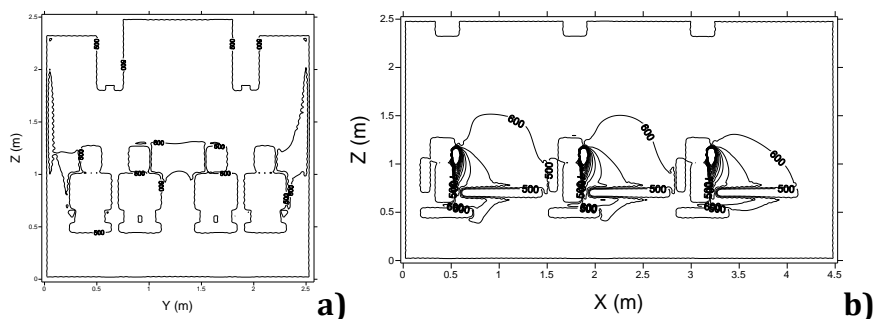


Figura 5.36 – Concentração de CO₂, na situação III, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

5.1.4 Jactos verticais descendentes - Situação IV

Na situação IV, os jactos verticais encontram-se posicionados directamente em cima dos ocupantes, a uma distância do chão de 1,80 m. No entanto esta situação difere da anterior por apresentar uma dimensão mais pequena. Enquanto que a área das entradas de ar nas situações anteriores é 0,01 m², na situação IV a área é de 0,0025 m².

Por outro lado, nesta situação, a velocidade do ar nas entradas é de 12 m/s, o que se vai traduzir em velocidades do ar mais elevadas em todo o compartimento (figuras 5.37, 5.38, 5.39 e 5.40), comparativamente às situações anteriores.

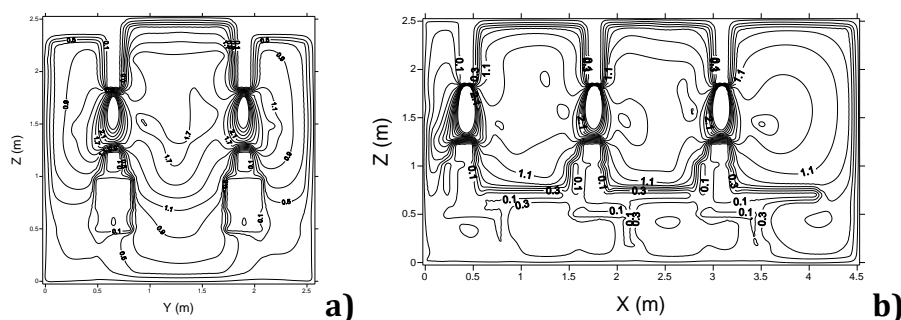


Figura 5.37 - Velocidade do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

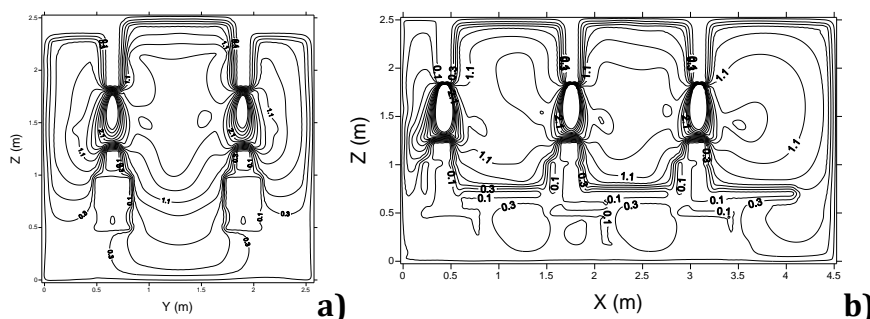


Figura 5.38 - Velocidade do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

Na situação IV com 12 ocupantes, figuras 5.39 e 5.40, é possível verificar recirculações de ar com velocidades do ar mais baixas, comparando com a situação IV com 6 ocupantes, figuras 5.37 e 5.38. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto, de na situação com 6 ocupantes, o ocupante actuar como um obstáculo, ocorrendo a divergência do ar para todo o compartimento, a velocidades elevadas, quando este atinge a cabeça do ocupante.

Na situação IV com 12 ocupantes, o ar flui livremente entre o espaço existente entre os dois ocupantes da mesma secretária, assim as velocidades do ar mais elevadas ficam confinadas entre este mesmo espaço e não se fazem sentir no restante compartimento da mesma forma que na situação com 6 ocupantes.

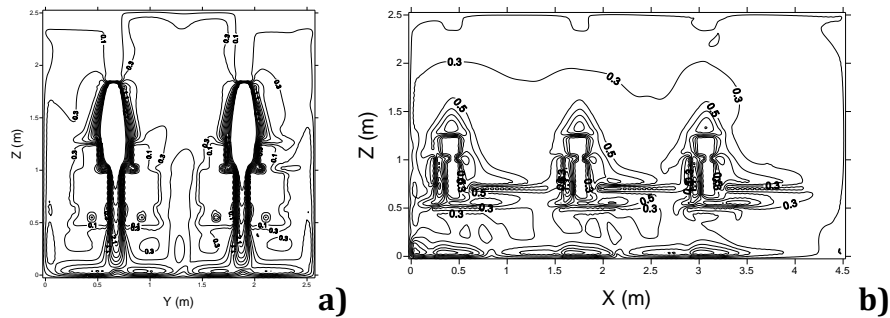


Figura 5.39 - Velocidade do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

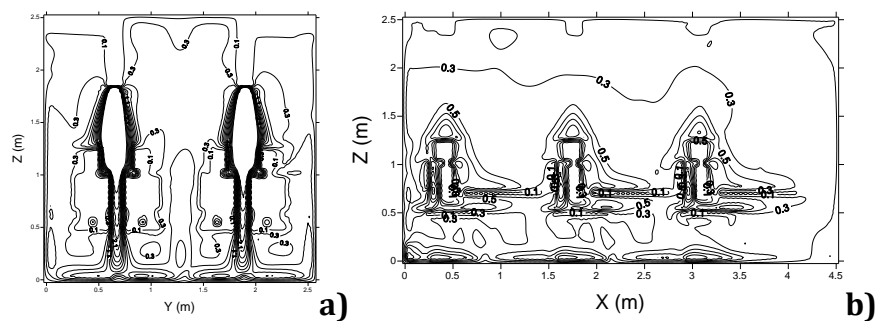


Figura 5.40 - Velocidade do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

Na situação IV, figuras 5.41, 5.42, 5.43 e 5.44, é possível verificar a existência de um microclima gerado em redor dos ocupantes, tanto para 6 como para 12 ocupantes.

Na situação IV em que o ar entra a 20°C, a temperatura no compartimento com 6 ocupantes (figura 5.41), encontra-se entre os 22 e os 24°C, e na ordem dos 25°C com 12 ocupantes (figura 5.43).

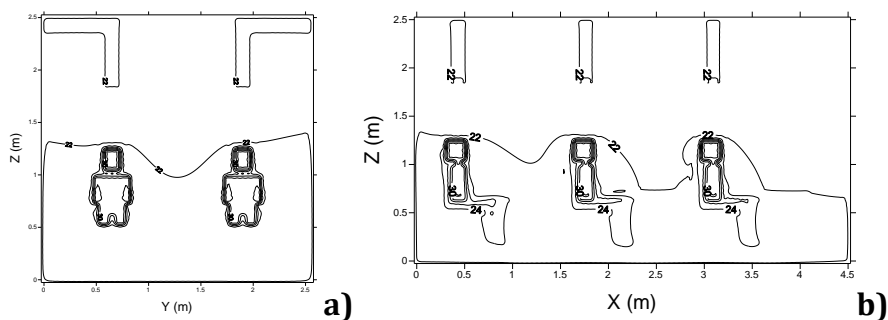


Figura 5.41 - Temperatura do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

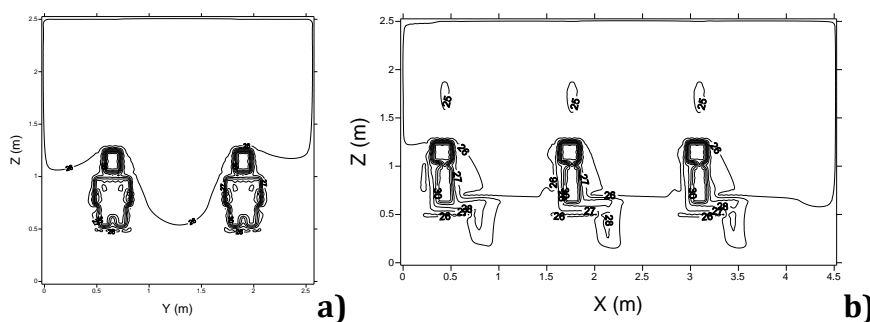


Figura 5.42 - Temperatura do ar, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Na situação IV em que o ar entra a 24°C , a temperatura no compartimento, com 6 ocupantes (figura 5.42), é de 26°C , e de 28°C com 12 ocupantes (figura 5.44).

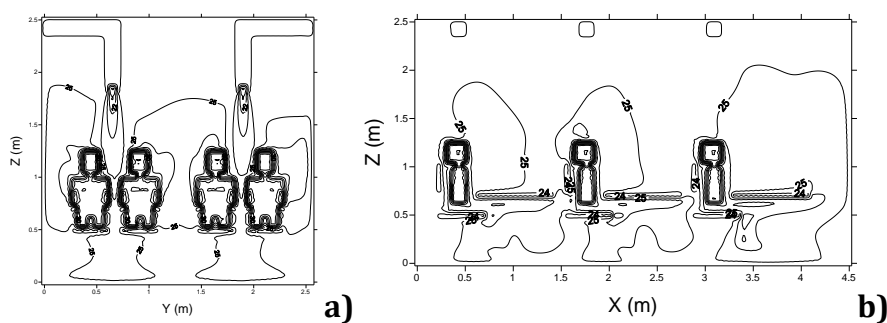


Figura 5.43 - Temperatura do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

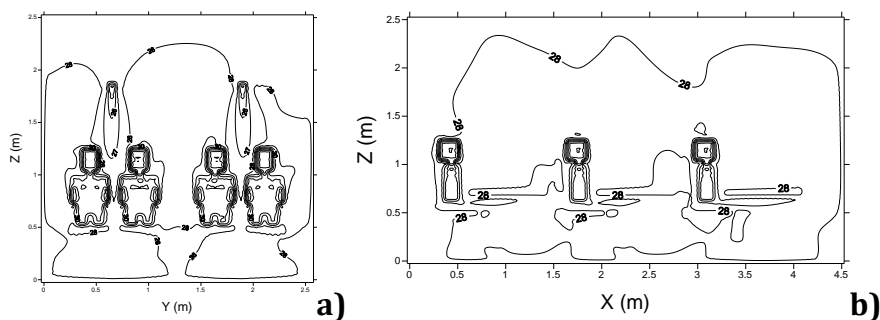


Figura 5.44 - Temperatura do ar, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Nas situações IV com a mesma temperatura de ar de entrada, 20 ou 24°C , verifica-se que com a maior ocupação as temperaturas em redor dos ocupantes são superiores, o que se deve ao aumento da temperatura média radiante (Anexo 6), que aumenta com o aumento do número de ocupantes.

Procedendo à análise das figuras 5.45, 5.46, 5.47 e 5.48 é possível fazer uma avaliação da qualidade do ar na situação IV.

Na situação IV com 6 ocupantes (figuras 5.45 e 5.46) é possível verificar uma rápida dispersão dos contaminantes, não ocorrendo arrastamento e onde a área contaminada é mínima, localizada apenas na zona de respiração.

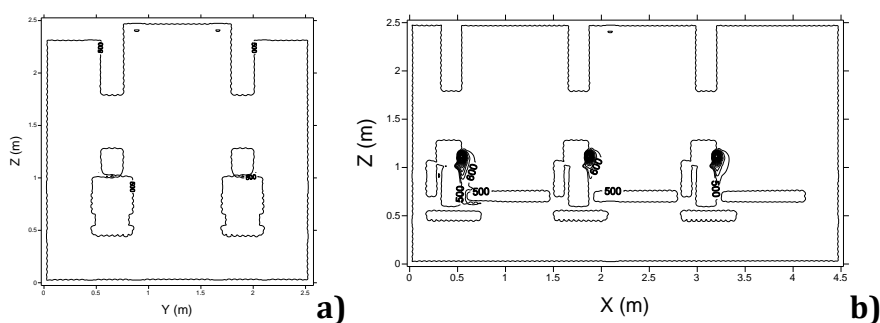


Figura 5.45 - Concentração de CO_2 , na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

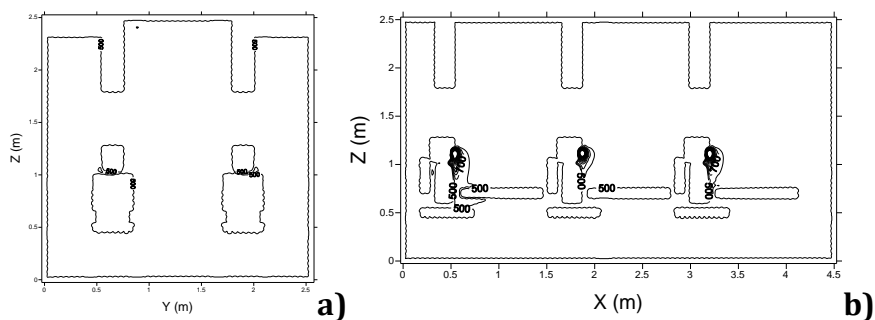


Figura 5.46 – Concentração de CO₂, na situação IV, com 6 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,6309 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

Na situação IV com 12 ocupantes (figuras 5.47 e 5.48), devido ao maior número de ocupantes, e à posição dos jactos descendentes em relação a esta ocupação, já é visível uma área maior de concentração de CO₂. É também visível um arrastamento lateral da concentração de CO₂.

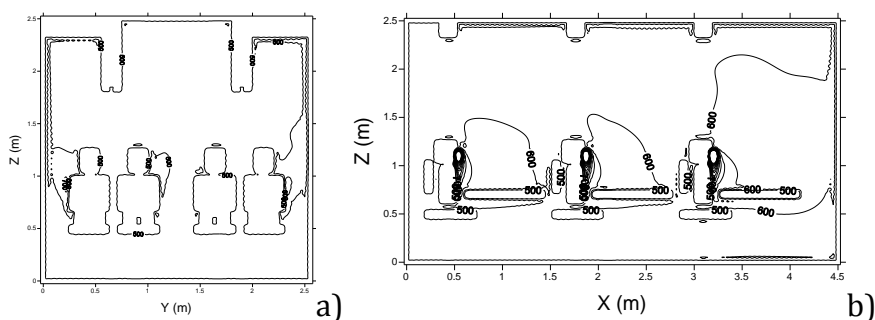


Figura 5.47 – Concentração de CO₂, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

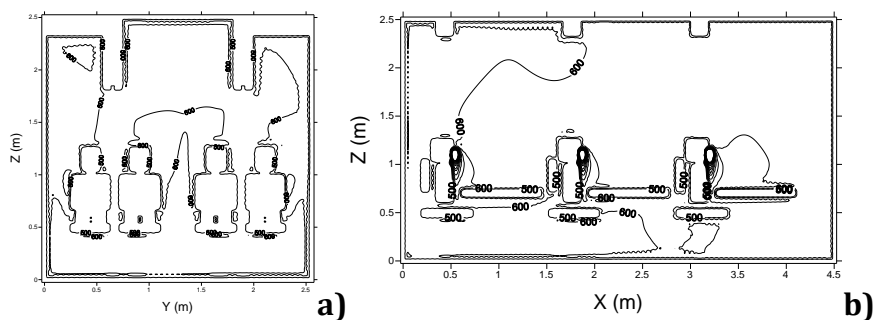


Figura 5.48 – Concentração de CO₂, na situação IV, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

5.1.5 Jactos horizontais

Na situação de ventilação com jactos horizontais, foi simulada numa câmara virtual equipada com seis secretárias acopladas com quatro entradas de ar, duas a incidir na zona superior do tronco do ocupante e as outras duas a incidir na zona dos joelhos.

O estudo desta situação está também disponível em Conceição et al (2013).

Através da análise das figuras 5.49, 5.50, é possível observar que na situação com jactos horizontais com 6 ocupantes, os quatro jactos de ar encontram-se posicionados em redor do ocupante de uma secretária, fazendo com que o ar passe quase tangencialmente em relação ao ocupante, no entanto este fica ainda sujeito a velocidades do ar elevadas.

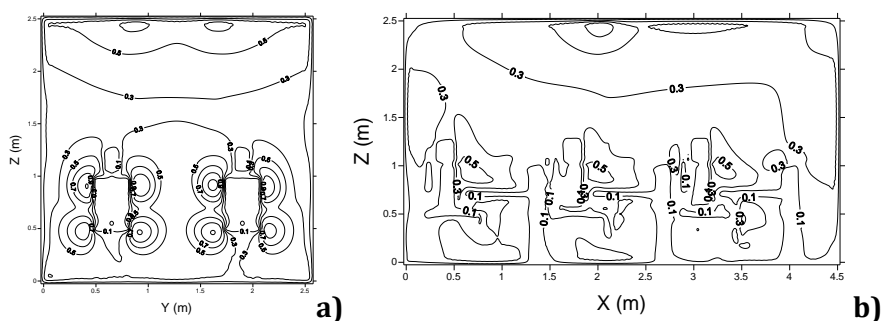


Figura 5.49 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

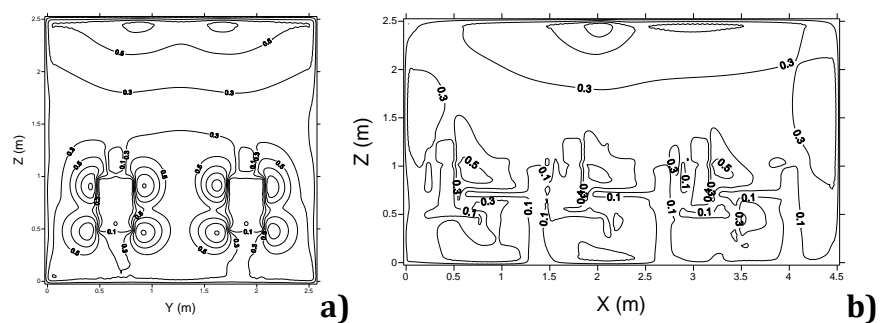


Figura 5.50 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Através das figuras 5.51 e 5.52 é possível observar que na situação com jactos horizontais com 12 ocupantes, estes estão posicionados em frente das entradas de ar, representando um obstáculo para os jactos de ar. É também possível verificar,

nomeadamente nas figuras 5.51b) e 5.52b), que o jacto de ar sofre uma divisão devido à existência da cadeira do ocupante em frente às entradas de ar.

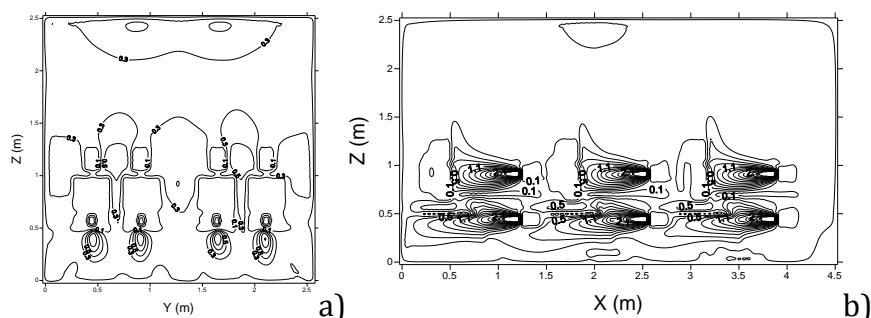


Figura 5.51 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

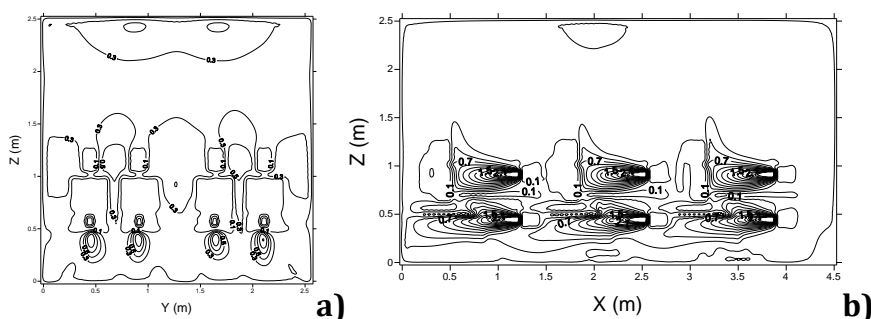


Figura 5.52 - Velocidade do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Na situação com jactos horizontais, figuras 5.53, 5.54, 5.55 e 5.56, verifica-se a existência de um microclima gerado em redor dos ocupantes, tanto para 6 como para 12 ocupantes.

Na situação de ventilação com jactos horizontais, em que o ar entra a 24°C , a temperatura no compartimento, com 6 ocupantes (figura 5.53), ronda os 26°C , e com 12 ocupantes (figura 5.55), a temperatura ronda os 28°C . Quando o ar entra a 20°C , a temperatura no compartimento, com 6 ocupantes (figura 5.54), é de 23°C e de 25°C , quando se tem 12 ocupantes (figura 5.56).

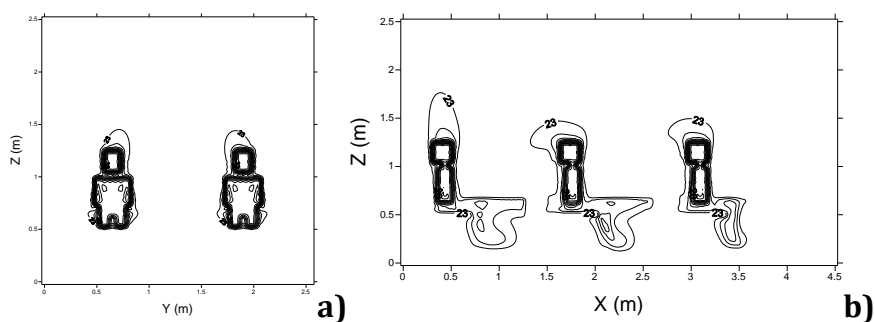


Figura 5.53 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

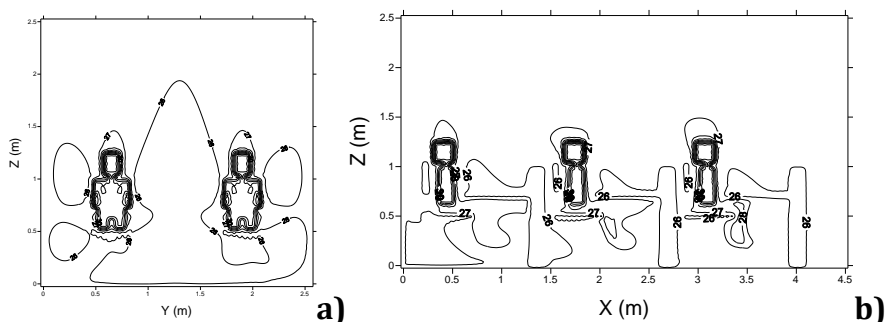


Figura 5.54 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Para a situação de ventilação com jactos horizontais em que o ar entra à mesma temperatura, 20 ou 24°C , é possível verificar que com 12 ocupantes a temperatura em redor dos ocupantes é superior comparativamente à situação de ventilação com jactos horizontais com 6 ocupantes. Estes resultados devem-se ao aumento da temperatura média radiante (Anexo 6) devido ao aumento do número de ocupantes dentro do compartimento.

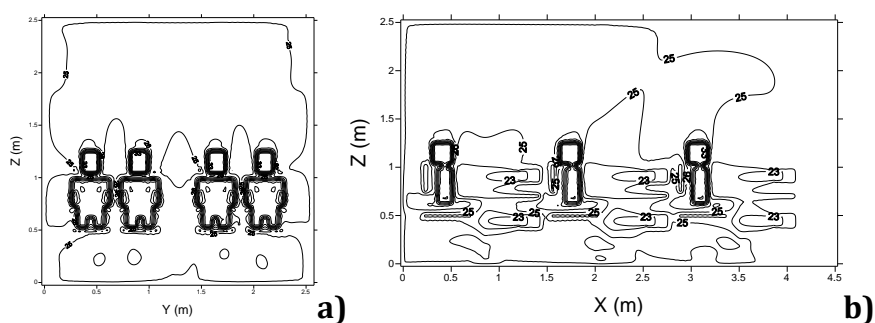


Figura 5.55 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

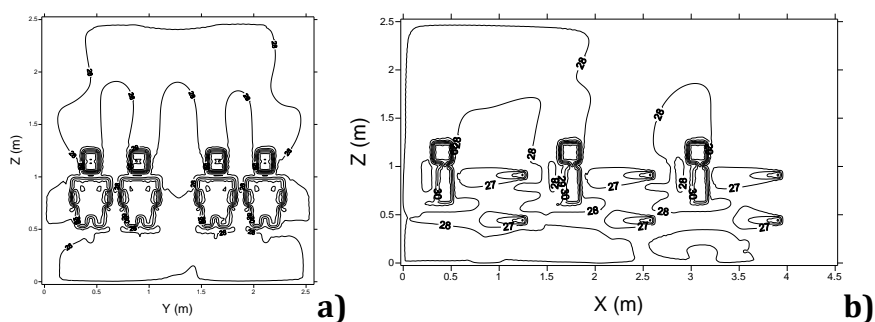


Figura 5.56 - Temperatura do ar, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,4423$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Analisando as figuras 5.57, 5.58, 5.59 e 5.60 relativas à qualidade do ar, verifica-se que na ventilação com jactos horizontais há um arrastamento no sentido ascendente da concentração de CO_2 .

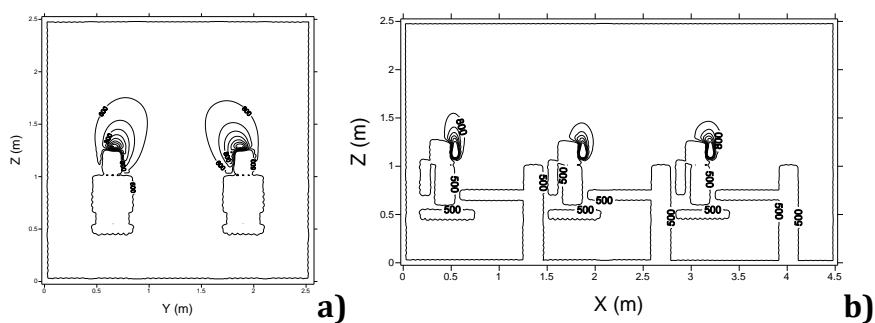


Figura 5.57 - Concentração de CO_2 , na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C .

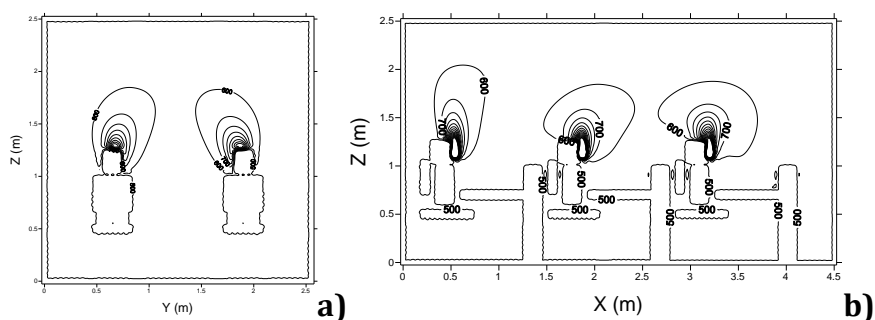


Figura 5.58 - Concentração de CO_2 , na ventilação com jactos horizontais, com 6 ocupantes, nos planos: a) $X=1,7919$ m e $Y=0,6309$ m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C .

Comparando a situação de ventilação com jactos horizontais com 6 ocupantes, figuras 5.57 e 5.58, com a mesma situação com 12 ocupantes, figuras 5.59 e 5.60, nota-se um aumento da concentração de CO_2 para as maiores ocupações.

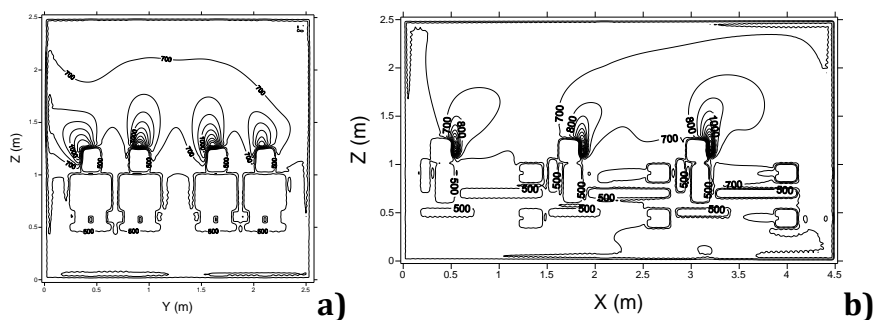


Figura 5.59 – Concentração de CO₂, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

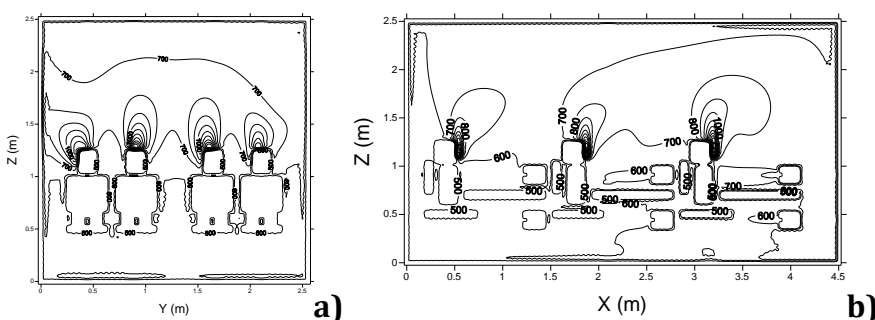


Figura 5.60 – Concentração de CO₂, na ventilação com jactos horizontais, com 12 ocupantes, nos planos: a) X=1,7919 m e Y=0,4423 m, com uma temperatura do ar de entrada de 24°C.

5.2 Resultados da Simulação da resposta térmica dos ocupantes

5.2.1 Jactos Verticais descendentes - Situação I

Segundo os resultados da simulação da resposta térmica dos ocupantes relativamente ao risco de resfriamento na situação I (jactos verticais descendentes localizados 0,45 m à frente dos ocupantes e 1,50 m acima do nível do chão), é possível verificar (figuras 5.61, 5.62, 5.63 e 5.64) que os valores encontram-se, no geral, dentro da classe C da ISO 7730 (2005), com a excepção da zona das mãos e braço inferior. Os resultados mais elevados nos braços e mãos podem ser explicados pela posição dos ocupantes, que têm os braços apoiados na secretária, ou seja, na direcção dos jactos descendentes.

Por outro lado, os valores de risco de resfriamento mais baixos encontram-se nas secções inferiores do corpo humano, fenómeno que pode ser explicado por estas secções do corpo encontrarem-se protegidas dos jactos de ar descendentes, pela secretária.

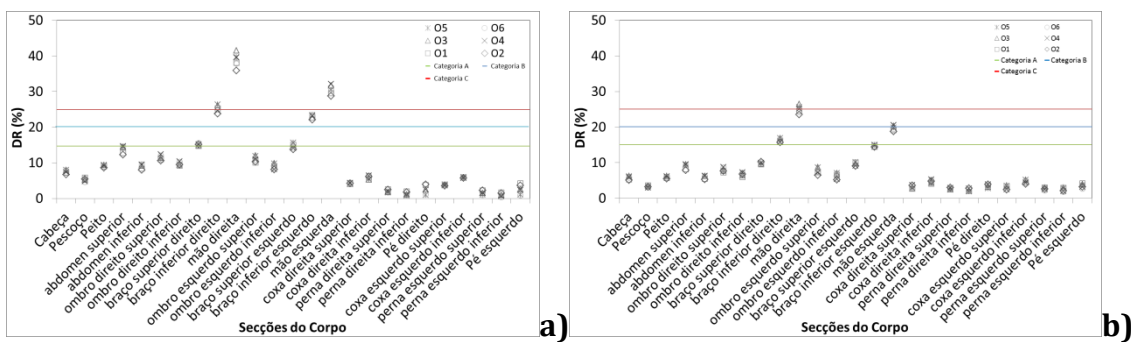


Figura 5.61 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Comparando as figuras 5.61 a) e b), e as figuras 5.62 a) e b), é possível constatar, que na situação a 24°C, o risco de resfriamento é inferior do que na situação a 20°C.

Na situação I com o ar de entrada a 24°C, com 6 ocupantes, os valores de risco de resfriamento encontram-se dentro da categoria C da ISO 7730 (2005), com excepção da mão direita.

Na situação com a mesma temperatura do ar de entrada, 20 e 24°C, é possível constatar que quando se tem maior ocupação, o risco de resfriamento é menor, devido à posição dos jactos de ar em relação aos ocupantes (figuras 4.1 e 4.2).

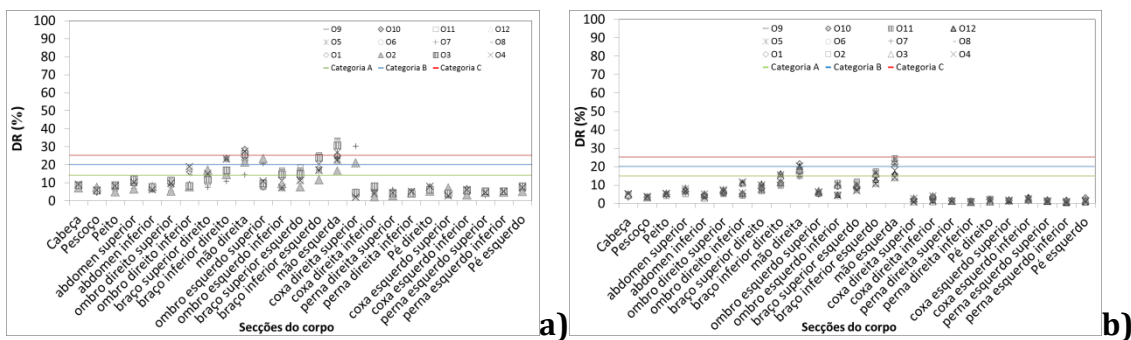


Figura 5.62 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Na situação I a 24°C com 12 ocupantes, os valores de risco de resfriamento encontram-se dentro da classe C da ISO 7730 (2005).

Relativamente ao Índice PMV, é possível constatar pela figura 5.63 que na situação I com temperatura do ar de entrada a 20°C, com 6 e 12 ocupantes, os valores encontram-se dentro da categoria B imposta pela ISO 7730 (2005) (linha azul).

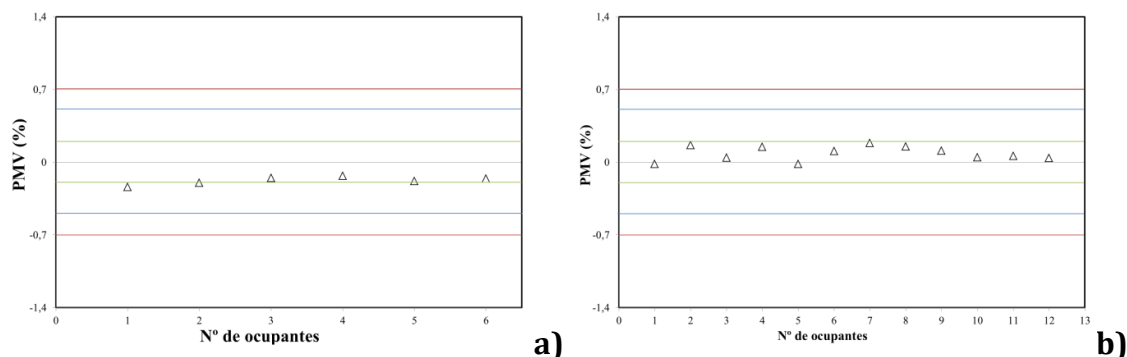


Figura 5.63 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação I com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

Quando se trata da situação I a 24°C, figura 5.64, é possível verificar que os valores de PMV, com 6 ocupantes mantêm-se dentro da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005) (linha vermelha). No entanto, quando se tem 12 ocupantes, o PMV é ligeiramente superior a 0,7. No geral, o índice PMV é superior na situação a 24°C comparativamente à situação a 20°C.

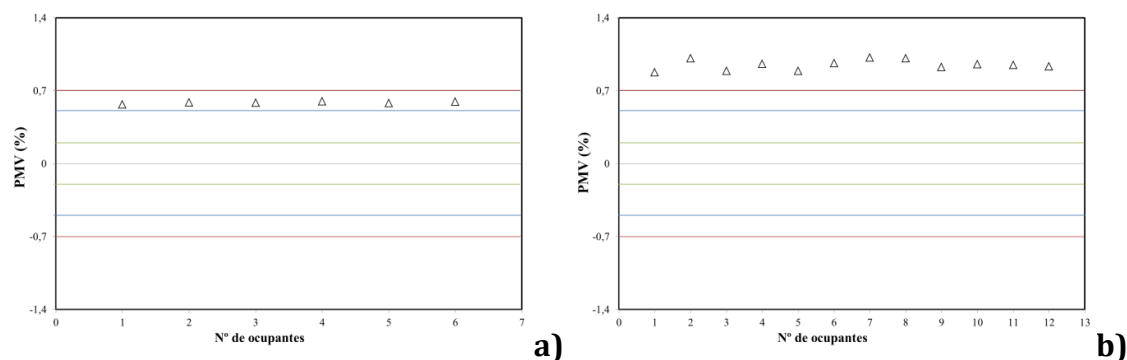


Figura 5.64 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação I com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

5.2.2 Jactos verticais descendentes - Situação II

Analisando os resultados da simulação da resposta térmica dos ocupantes relativamente ao risco de resfriamento na situação II, é possível verificar que na

situação com 6 ocupantes (figuras 5.65 a) e b)) os valores encontram-se abaixo dos 15% (categoria A, da ISO 7730), com excepção da zona da cabeça, para 20°C.

Esta situação caracteriza-se pelos jactos verticais descendentes encontrarem-se posicionados directamente em cima dos ocupantes, com uma distância de 1,50 m do nível do chão, o que explica os valores mais elevados na cabeça e nos ombros.

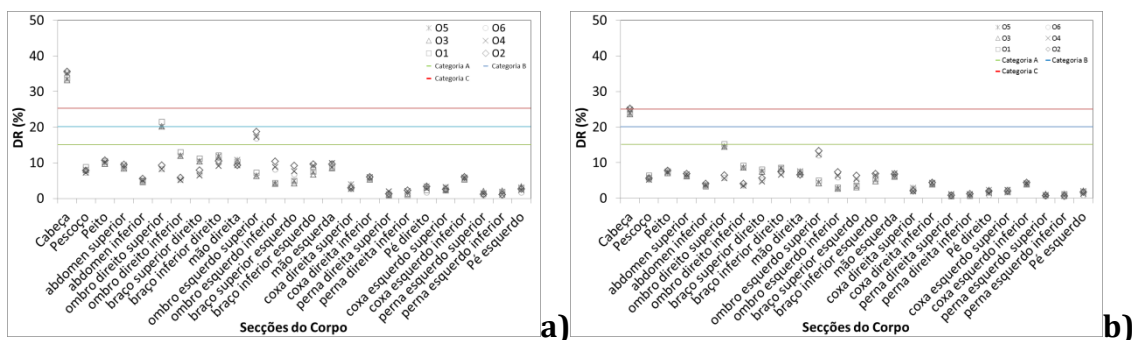


Figura 5.65 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Na situação II com 12 ocupantes, figuras 5.67 a) e b), é possível constatar que as secções do corpo com valores de risco de resfriamento mais elevados são os ombros e parte superior dos braços. Dos 12 ocupantes, é possível verificar uma diferenciação, o risco de resfriamento é superior nas secções do ombro direito, nos ocupantes 2, 4, 6, 8 10 e 12, e nas secções do ombro esquerdo, nos ocupantes, 1, 3, 5, 7, 9 e 11. Este fenómeno pode ser explicado devido à posição dos 2 ocupantes de uma secretária, em relação à localização dos jactos verticais descendentes na situação II (figura 4.4).

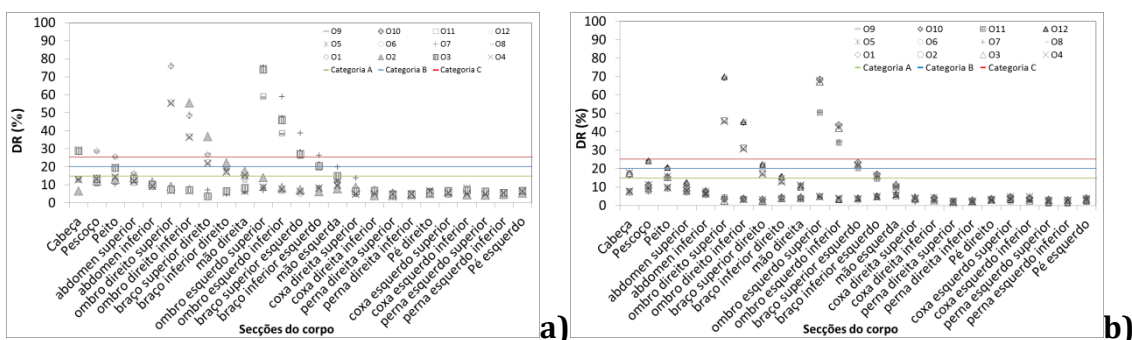


Figura 5.66 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Devido à posição dos ocupantes, relativamente às secretárias, os valores mais baixos do risco de resfriamento encontram-se nas secções mais inferiores do corpo humano, fenómeno que pode ser explicado por estas secções do corpo encontrarem-se protegidas pela secretária.

Analisando as figuras 5.69 e 5.70 relativamente ao Índice PMV, é possível constatar que na situação II com temperatura do ar de entrada a 20°C, com 6 e 12 ocupantes, os valores encontram-se dentro da categoria B imposta pela ISO 7730 (2005) (linha azul).

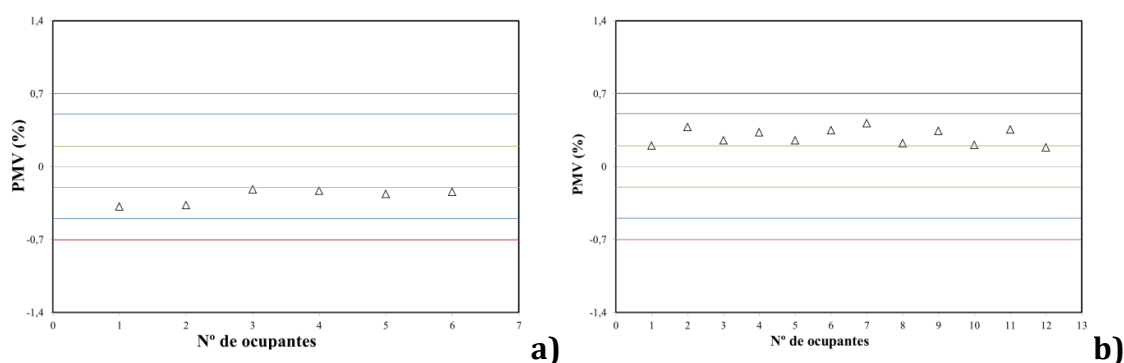


Figura 5.67 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação II com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

Na situação II a 24°C, figura 5.70, é possível verificar que os valores de PMV, com 6 ocupantes mantêm-se dentro da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005) (linha vermelha), no entanto quando se trata de uma situação com 12 ocupantes, o PMV é superior a 0,7.

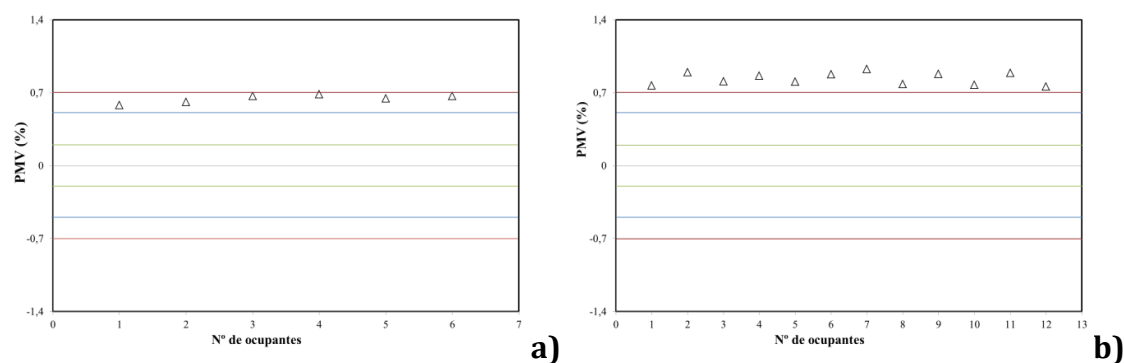


Figura 5.68 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação II com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

No geral, o índice PMV é superior na situação em que a temperatura do ar de entrada é de 24°C comparativamente à situação a 20°C.

5.2.3 Jactos verticais descendentes - Situação III

Procedendo à análise dos resultados da simulação da resposta térmica dos ocupantes relativamente ao risco de resfriamento na situação III, é possível verificar que os valores mais elevados são na cabeça e ombros. A situação III caracteriza-se por apresentar os jactos verticais directamente em cima dos ocupantes, a uma distância do chão de 1,80 m.

Através das figuras 5.69 a) e b), é possível analisar os resultados do risco de resfriamento na situação com 6 ocupantes, onde os valores encontram-se abaixo dos 15% (categoria A) excepto na zona da cabeça e ombros que são as secções que apresentam valores mais elevados.

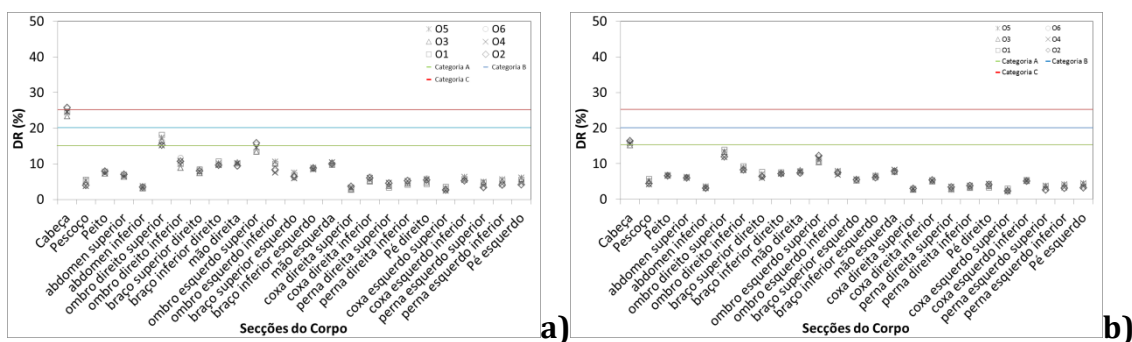


Figura 5.69 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Na situação III com 12 ocupantes, figuras 5.72 a) e b), é possível constatar que os valores de risco de resfriamento são ligeiramente superiores à situação com 6 ocupantes, figuras 5.71 a) e b). É possível também verificar que as secções do corpo com valores de risco de resfriamento mais elevados são os ombros e parte superior dos braços. A diferença entre estas secções e as restantes secções do corpo é superior na situação com 12 ocupantes do que na situação com 6 ocupantes, principalmente na situação em que a temperatura do ar na entrada é de 20°C.

Dependendo da posição dos ocupantes, verifica-se uma diferenciação entre os valores do risco de resfriamento nos ombros. Os valores de DR no ombro direito são mais elevados nos ocupantes 2, 4, 6, 8 e 10, e mais elevados no ombro esquerdo dos ocupantes 1, 3, 5, 7, 9 e 11 (figura 4.6).

Os valores do risco de resfriamento são inferiores nas secções inferiores do corpo humano, o que pode ser explicado devido à posição do ocupante, onde estas secções do corpo ficam protegidas pela secretária.

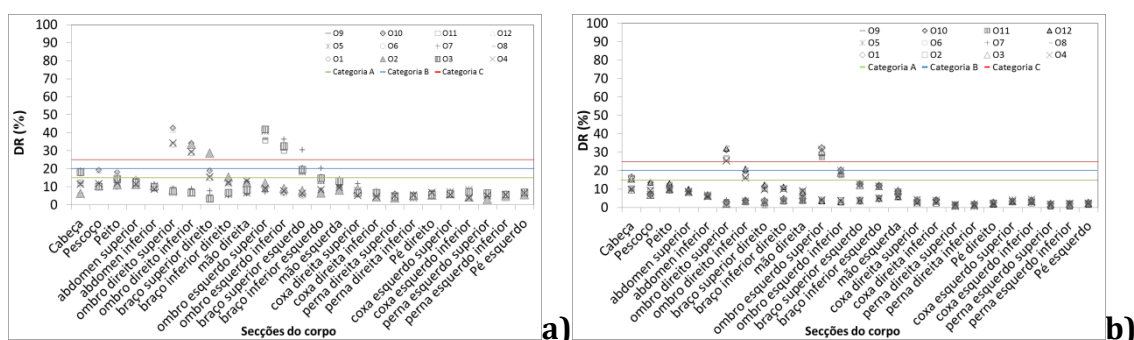


Figura 5.70 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Analisando as figuras 5.74 a) e b), é possível constatar que na situação III com o ar de entrada a 20°C, com 6 e 12 ocupantes, os valores de PMV encontram-se dentro da categoria B imposta pela ISO 7730 (2005) (linha azul). No entanto ao comparar ambas as figuras é visível que para a situação com 12 ocupantes o índice PMV é superior à situação com 6 ocupantes.

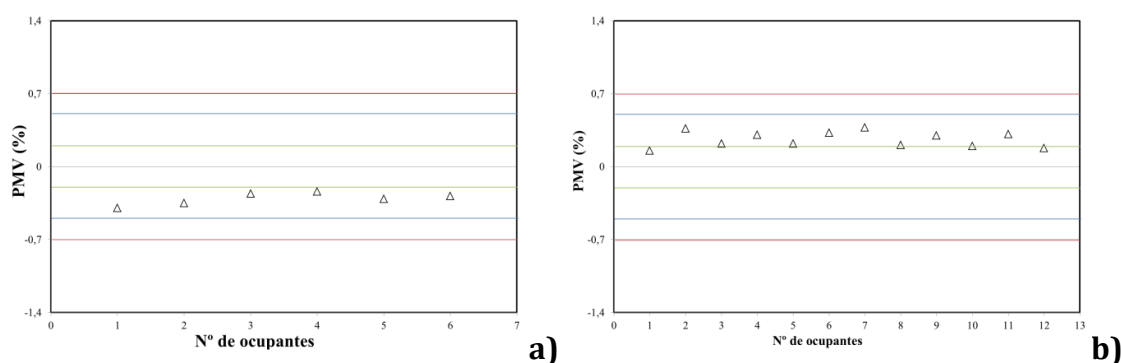


Figura 5.71 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação III com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

Ao analisar a situação III a 24°C, figura 5.78, é possível verificar que os valores de PMV, com 6 ocupantes mantêm-se dentro da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005) (linha vermelha), no entanto, quando se trata de uma situação com 12 ocupantes, o PMV é ligeiramente superior a 0,7.

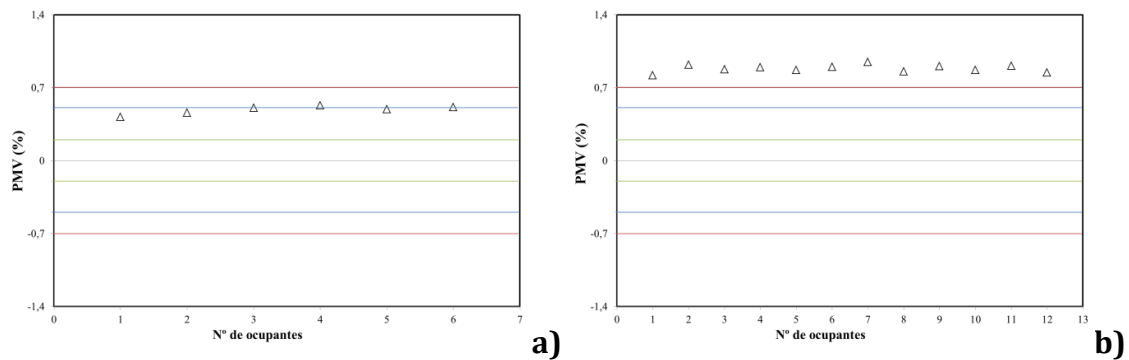


Figura 5.72 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação III com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

No geral, é possível constatar que o índice PMV é superior na situação em que a temperatura do ar de entrada é de 24°C comparativamente à situação a 20°C.

5.2.4 Jactos verticais descendentes - Situação IV

Segundo os resultados da simulação da resposta térmica dos ocupantes relativamente ao risco de resfriamento na situação IV (figuras 5.73 e 5.74), no geral, as secções do corpo com valores mais elevados são a cabeça e ombros.

Com excepção da cabeça e ombros, na situação com 6 ocupantes a 20°C, os valores do risco de resfriamento são inferiores a 25% enquadrando-se na categoria C imposta pela ISO 7730 (2005).

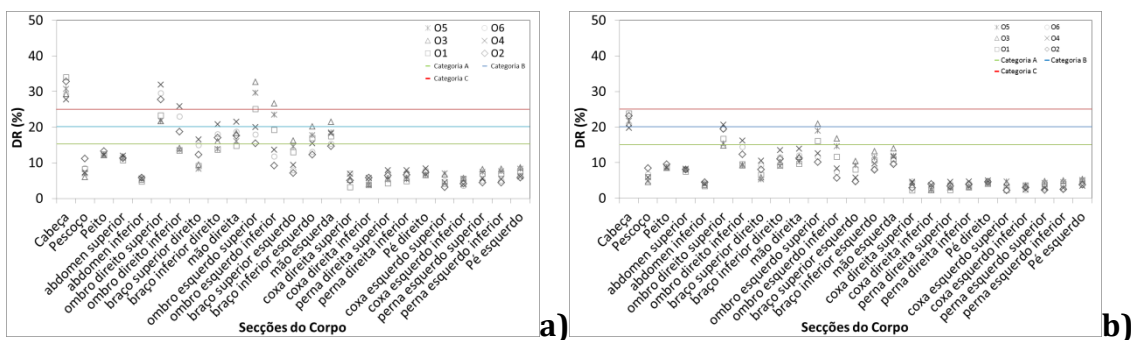


Figura 5.73 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Na situação com 12 ocupantes, o valor do risco de resfriamento na zona da cabeça não é tão elevado como na situação com 6 ocupantes, pois os ocupantes não ficam posicionados directamente abaixo do jacto de ar, ficando um pouco deslocados (figuras 4.7 e 4.8). Devido à posição relativamente aos jactos descendentes, nos ocupantes 2, 4, 6, 8, 10 e 12 o risco de resfriamento é superior no ombro direito, e nos ocupantes 1, 3, 5, 7, 9 e 11 o risco de resfriamento é mais elevado no ombro esquerdo.

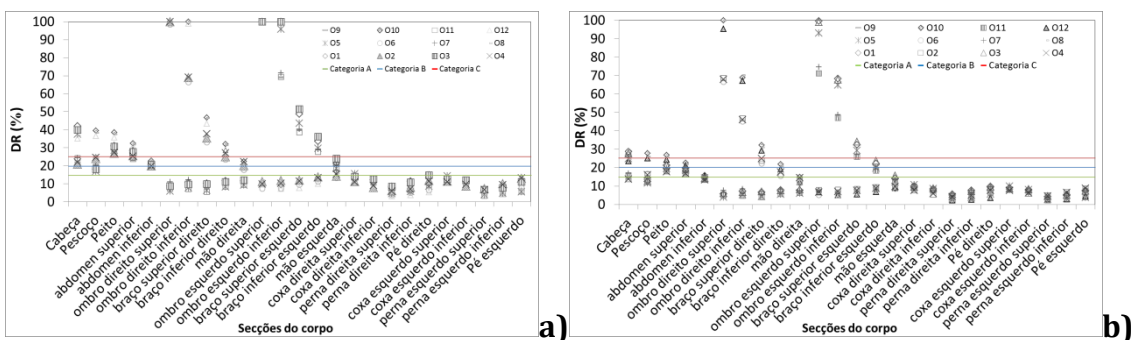


Figura 5.74 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Nesta situação, os valores do risco de resfriamento são mais baixos nas secções inferiores do corpo humano, o que pode ser explicado devido à posição do ocupante, onde estas secções do corpo ficam protegidas pela secretária.

Relativamente aos valores da Votação média previsível (PMV) de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação IV a 20°C, figura 5.75, é possível constatar que estes encontram-se dentro da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005) (linha vermelha).

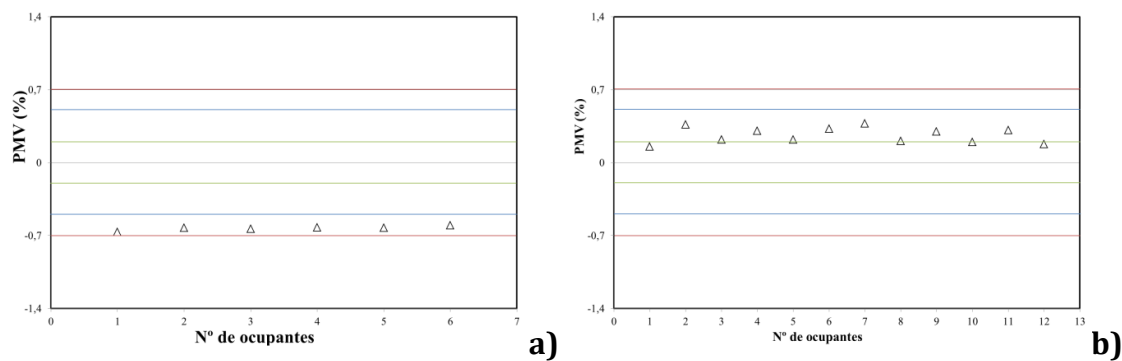


Figura 5.75 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação IV com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

Para a situação IV a 24°C, figura 5.76, é possível verificar que os valores de PMV, com 6 ocupantes mantêm-se dentro da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005) (linha vermelha), no entanto, com 12 ocupantes, o PMV é ligeiramente superior a 0,7.

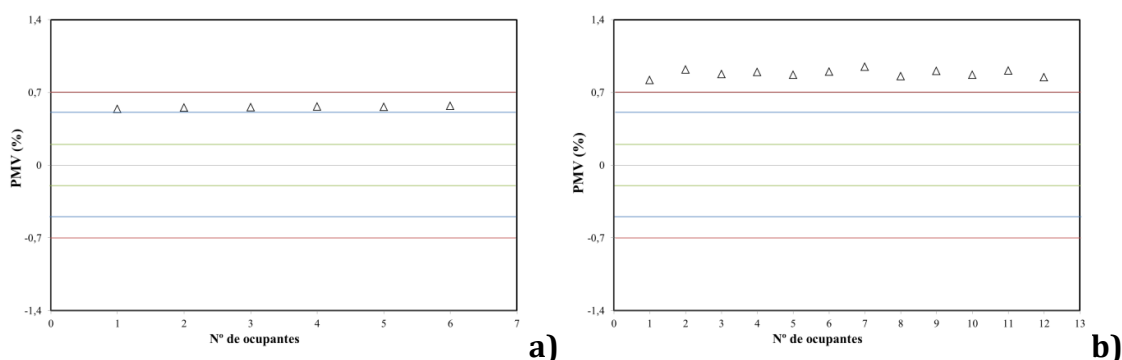


Figura 5.76 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação IV com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

No geral, é possível constatar que os valores do índice PMV para 24°C são mais elevados do que para 20°C, onde os valores do índice PMV situam-se no limite superior ou até acima da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005).

5.2.5 Ventilação com jactos horizontais

Através dos resultados da simulação da resposta térmica dos ocupantes relativamente ao risco de resfriamento na situação com jactos horizontais (figuras 5.77 e 5.78) é possível verificar que, com 6 ocupantes, as secções do corpo que apresentam valores mais elevados são os ombros, braços e mãos, assim como a parte superior das pernas.

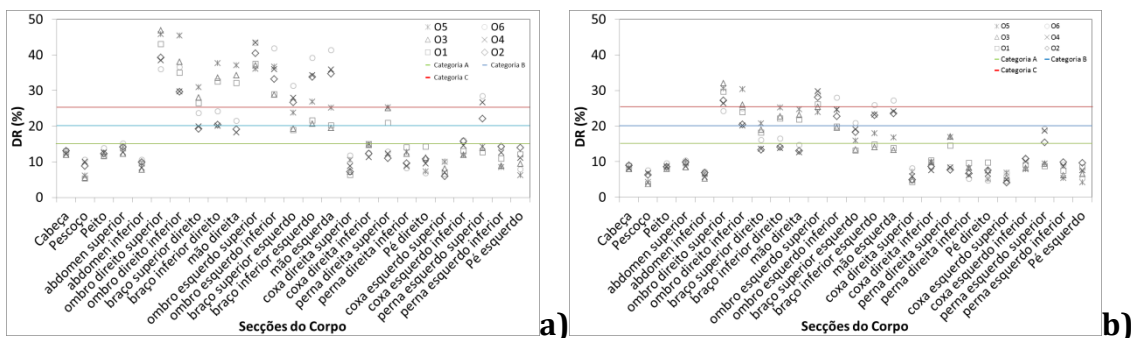


Figura 5.77 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação com jactos horizontais, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Ao comparar as figuras 5.77 a) e b) é possível constatar que os valores do risco de resfriamento são superiores para 6 ocupantes a 20°C, do que para a 24°C.

Analisando as figuras 5.78 a) e b), correspondentes aos resultados do risco de resfriamento da situação de ventilação com jactos horizontais com 12 ocupantes, é possível constatar que o risco de resfriamento é mais elevado na zona das pernas, sendo os valores nas restantes secções inferiores a 20%.

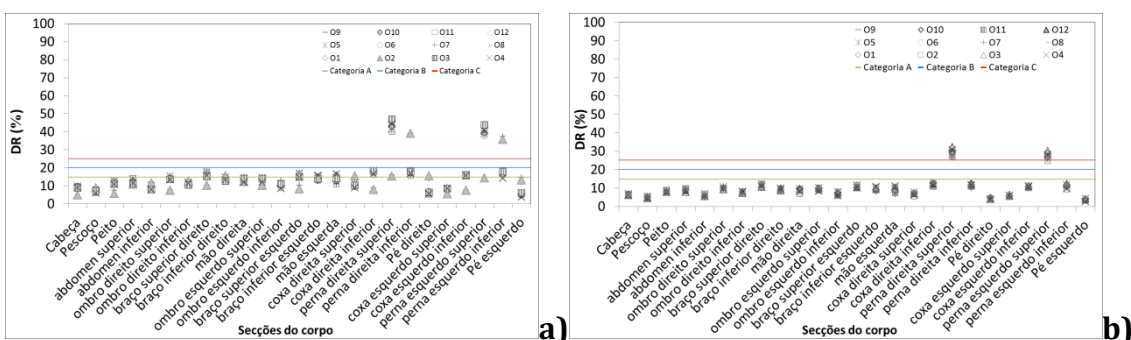


Figura 5.78 – Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação com jactos horizontais, com uma temperatura do ar de entrada de a) 20°C e b) 24°C.

Relativamente aos valores PMV na situação de ventilação com jactos horizontais com o ar de entrada a 20°C, figura 5.79, é possível constatar que, com 6 ocupantes, encontram-se no limite inferior da categoria C imposta pela ISO 7730 (2005) (linha vermelha), e com 12 ocupantes, os valores são superiores enquadrando-se na categoria B (linha azul).

Para a situação da ventilação com jactos horizontais a 24°C com 6 ocupantes, figura 5.80, verifica-se que os valores de PMV mantêm-se dentro da categoria B imposta pela

ISO 7730 (2005) (linha azul), no entanto, com 12 ocupantes, o PMV é ligeiramente superior a 0,7.

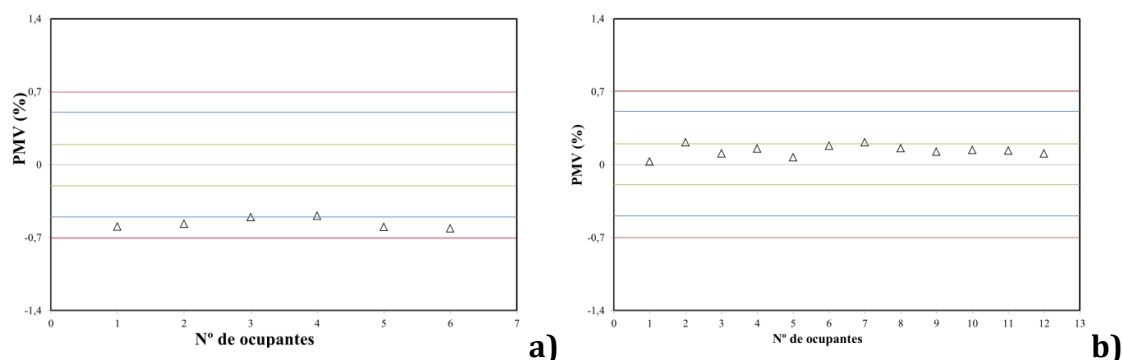


Figura 5.79 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação com jactos horizontais, com o ar de entrada a 20°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

No geral, é possível constatar que o índice PMV é superior na situação com jactos horizontais a 24°C comparativamente a 20°C.

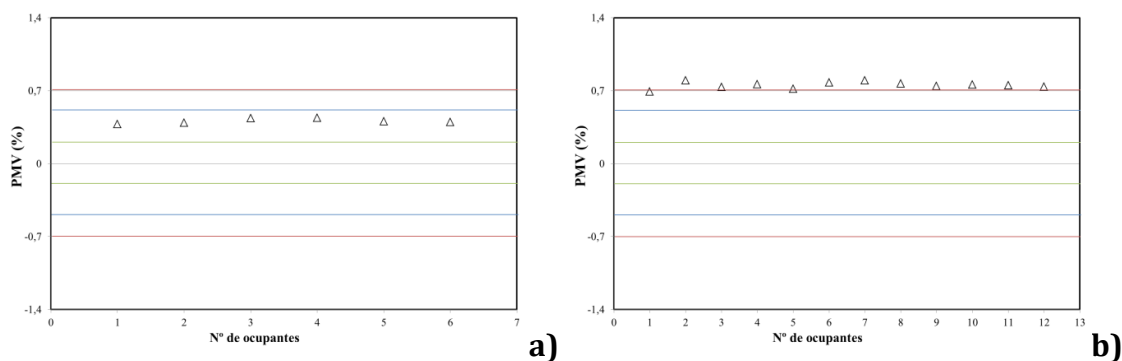


Figura 5.80 – Votação média previsível de um painel de avaliadores, relativamente às condições de conforto, na situação com jactos horizontais, com o ar de entrada a 24°C, a) com 6 ocupantes e b) 12 ocupantes.

5.3 ADI – Índice de Distribuição do Ar

5.3.1 Jactos Verticais descendentes – Situação I

Procedendo à análise dos resultados do índice de distribuição do ar, é possível verificar que na situação I para 6 pessoas, tabelas 5.1, 5.2, o número de conforto térmico é superior para 20°C, enquanto o número de resfriamento é superior para 24°C. Como

resultado, o ADI é ligeiramente superior quando o ar entra no compartimento a 24°C enquanto os ADTI são bastante semelhantes.

Tabela 5.1 - ADI na situação I, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	6,88	7,26	7,69	7,80	7,58	7,74
Número de qualidade do ar	0,23	0,23	0,30	0,28	0,26	0,25
Número do risco de resfriamento	1,66	2,54	2,10	2,24	2,24	2,43
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,27	1,28	1,51	1,47	1,40	1,38
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,39	1,61	1,68	1,69	1,64	1,67

Tabela 5.2 - ADI na situação I, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	4,35	4,15	4,37	4,22	4,42	4,26
Número de qualidade do ar	0,26	0,25	0,27	0,26	0,27	0,26
Número do risco de resfriamento	2,62	3,95	3,30	3,56	3,49	3,78
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,06	1,03	1,08	1,05	1,09	1,06
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,43	1,61	1,57	1,57	1,60	1,62

Na situação I com 12 ocupantes, tabelas 5.3 e 5.4, é possível verificar que o número de conforto térmico é bastante superior para 20°C, enquanto o número de resfriamento é ligeiramente superior na situação a 24°C. Como resultado, o ADI e ADTI são superiores quando o ar entra no compartimento a 20°C.

Tabela 5.3 - ADI na situação I, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	12,85	11,04	13,55	11,84	13,72	12,45	10,87	11,64	12,42	13,36	12,97	13,47
Número de qualidade do ar	0,26	0,38	0,28	0,38	0,26	0,38	0,38	0,28	0,38	0,30	0,38	0,28
Número de risco de resfriamento	2,45	3,74	2,49	2,91	3,02	3,36	2,75	3,63	2,25	2,73	2,54	3,35
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,83	2,06	1,96	2,12	1,89	2,17	2,02	1,79	2,16	2,00	2,21	1,95
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	2,02	2,51	2,12	2,35	2,21	2,51	2,24	2,27	2,19	2,22	2,32	2,33

Tabela 5.4 - ADI na situação I, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	3,18	2,44	3,22	2,82	3,26	2,82	2,43	2,50	2,96	2,86	2,90	3,00
Número de qualidade do ar	0,16	0,33	0,21	0,35	0,18	0,35	0,29	0,15	0,31	0,20	0,31	0,17
Número de risco de resfriamento	3,31	5,90	3,88	4,85	4,31	5,29	4,35	5,30	3,63	4,37	3,89	4,82
Índice de distribuição do ar (ADI)	0,71	0,90	0,82	1,00	0,78	0,99	0,84	0,62	0,95	0,75	0,94	0,71
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,18	1,68	1,37	1,69	1,37	1,73	1,45	1,27	1,49	1,35	1,51	1,35

5.3.2 *Jactos Verticais descendentes - Situação II*

Analisando os resultados do índice de distribuição de ar, é possível constatar que, na situação II com 6 ocupantes, o número de conforto térmico é relativamente superior para 20°C (tabela 5.5) comparativamente aos resultados em que a temperatura do ar de entrada é 24°C (tabela 5.6).

Tabela 5.5 - ADI na situação II, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	4,80	4,99	6,25	6,22	5,95	6,18
Número de qualidade do ar	4,30	5,59	3,89	4,96	4,55	5,76
Número do risco de resfriamento	2,02	2,86	3,15	3,03	3,08	3,07
Índice de distribuição do ar (ADI)	4,54	5,28	4,93	5,56	5,21	5,97
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	3,47	4,30	4,25	4,54	4,37	4,78

Tabela 5.6 - ADI na situação II, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	4,09	3,87	3,34	3,23	3,54	3,37
Número de qualidade do ar	2,76	3,56	2,51	3,22	2,92	3,72
Número do risco de resfriamento	2,83	4,02	4,39	4,28	4,34	4,31
Índice de distribuição do ar (ADI)	3,36	3,71	2,90	3,23	3,22	3,54
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	3,18	3,81	3,33	3,55	3,55	3,78

Na situação II com 12 ocupantes, tabelas 5.7 e 5.8, é possível verificar que o número de conforto térmico é bastante superior para 20°C, enquanto que o número de resfriamento e número de qualidade do ar são semelhantes aos da situação II em que o

ar de entrada é de 24°C. Como resultado, o ADI e ADTI são superiores quando o ar entra a 20°C.

Tabela 5.7 - ADI na situação II, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	10,71	7,55	9,99	8,44	10,14	8,30	6,98	10,46	8,17	10,87	8,14	11,39
Número de qualidade do ar	0,69	0,42	0,65	0,40	0,67	0,41	0,34	0,68	0,33	0,65	0,35	0,67
Número de risco de resfriamento	0,62	1,09	0,78	1,07	0,77	1,07	1,13	0,51	1,14	0,51	1,12	0,51
Índice de distribuição do ar (ADI)	2,72	1,78	2,55	1,85	2,60	1,84	1,55	2,66	1,64	2,67	1,70	2,76
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,67	1,51	1,72	1,54	1,74	1,54	1,40	1,54	1,45	1,54	1,48	1,58

Tabela 5.8 - ADI na situação II, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	3,98	3,01	3,78	3,26	3,81	3,26	2,85	3,93	3,17	4,06	3,16	4,24
Número de qualidade do ar	0,85	0,45	0,74	0,43	0,76	0,44	0,39	0,78	0,37	0,70	0,39	0,72
Número de risco de resfriamento	0,66	1,37	0,86	1,38	0,84	1,36	1,37	0,53	1,40	0,55	1,36	0,55
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,84	1,17	1,67	1,19	1,70	1,19	1,05	1,74	1,08	1,69	1,11	1,75
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,31	1,23	1,34	1,25	1,35	1,25	1,15	1,18	1,18	1,16	1,19	1,19

5.3.3 *Jactos Verticais descendentes - Situação III*

Através dos resultados do Índice de distribuição do ar, da situação III com 6 ocupantes, tabelas 5.9 e 5.10, verifica-se que quando o ar entra no compartimento a 20°C, o número de conforto térmico é superior nos ocupantes 3, 4 e 6 e menor nos ocupantes 1, 2 e 5, comparativamente à situação III a 24°C. Os números de qualidade do ar e de risco de resfriamento são superiores quando o ar entra no compartimento a 24°C, resultando em ADI e ADTI superiores nesta situação.

Tabela 5.9 - ADI na situação III, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	4,09	4,48	5,18	5,35	4,88	5,08
Número de qualidade do ar	2,39	2,46	2,18	2,28	2,40	2,54
Número do risco de resfriamento	3,00	4,53	4,92	4,83	4,50	4,49
Índice de distribuição do ar (ADI)	3,13	3,32	3,36	3,50	3,42	3,59
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	3,08	3,68	3,82	3,89	3,75	3,87

Tabela 5.10 - ADI na situação III, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	5,71	5,24	4,68	4,45	4,90	4,67
Número de qualidade do ar	3,89	4,14	3,38	3,63	3,84	4,12
Número do risco de resfriamento	4,20	6,12	6,43	6,45	6,18	6,20
Índice de distribuição do ar (ADI)	4,71	4,66	3,98	4,02	4,34	4,38
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	4,53	5,10	4,67	4,71	4,88	4,92

De acordo com as tabelas 5.11 e 5.12, os resultados do índice de distribuição do ar relativamente à situação III com 12 ocupantes, o número de conforto térmico é significativamente superior quando a temperatura do ar de entrada é 20°C, no entanto os números de qualidade de ar e de risco de resfriamento são superiores na situação III a 24°C.

Os valores de ADI e ADTI são superiores quando o ar entra no compartimento a 20°C.

Tabela 5.11 - ADI na situação III, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	12,55	8,36	11,52	9,55	11,72	9,40	8,27	11,82	9,72	12,10	9,70	12,65
Número de qualidade do ar	0,99	0,54	0,86	0,54	0,91	0,57	0,48	0,86	0,48	0,78	0,52	0,82
Número de risco de resfriamento	1,27	2,08	1,62	1,95	1,68	2,04	2,01	1,15	1,98	1,15	2,02	1,19
Índice de distribuição do ar (ADI)	3,53	2,12	3,14	2,27	3,27	2,31	2,00	3,19	2,16	3,08	2,25	3,23
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	2,51	2,11	2,52	2,16	2,62	2,21	2,01	2,27	2,10	2,22	2,17	2,32

Tabela 5.12 - ADI na situação III, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	3,64	3,01	3,30	3,17	3,42	3,23	2,86	3,45	3,10	3,39	3,14	3,60
Número de qualidade do ar	1,45	0,82	1,19	0,84	1,14	0,90	0,65	1,28	0,63	1,13	0,68	1,10
Número de risco de resfriamento	1,70	2,50	2,53	2,71	2,42	2,57	2,66	1,54	2,93	1,74	2,75	1,68
Índice de distribuição do ar (ADI)	2,30	1,57	1,98	1,63	1,98	1,71	1,36	2,10	1,40	1,96	1,46	1,99
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	2,08	1,83	2,15	1,93	2,12	1,96	1,70	1,89	1,79	1,88	1,81	1,88

5.3.4 *Jactos Verticais descendentes - Situação IV*

Procedendo à análise dos resultados do índice de distribuição de ar, na situação IV com 6 ocupantes, é possível constatar, através das tabelas 5.13 e 5.14, que o número de conforto térmico é superior quando o ar entra no compartimento a 24°C, no entanto os números de qualidade do ar e de risco de resfriamento são superiores quando o ar entra a 20°C. Como resultado, o ADTI é superior quando o ar entra no compartimento a 20°C e o ADI é superior quando o ar entra a 24°C.

Tabela 5.13 - ADI na situação IV, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	2,13	2,29	2,32	2,38	2,38	2,49
Número de qualidade do ar	0,51	0,47	0,43	0,42	0,45	0,42
Número do risco de resfriamento	1,14	1,39	1,56	1,50	1,68	1,65
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,04	1,04	0,99	0,99	1,03	1,03
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,07	1,15	1,16	1,14	1,21	1,20

Tabela 5.14 - ADI na situação IV, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	4,43	4,29	4,44	4,40	4,42	4,29
Número de qualidade do ar	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39
Número do risco de resfriamento	0,41	0,49	0,64	0,59	0,62	0,59
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,29	1,27	1,30	1,29	1,32	1,30
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	0,88	0,93	1,02	1,00	1,02	1,00

Na situação IV com 12 ocupantes, tabelas 5.15 e 5.16, é possível verificar que o número de conforto térmico é bastante superior e que os números de qualidade do ar e de risco de resfriamento são também superiores quando a temperatura do ar de entrada é de

20°C, comparativamente a 24°C. Como resultado, o ADI e ADTI são bastante superiores para 20°C.

Tabela 5.15 - ADI na situação IV, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	13,26	14,32	14,39	14,58	14,43	13,42	14,14	14,28	13,93	14,40	12,74	14,52
Número de qualidade do ar	3,66	2,11	3,28	2,72	2,63	3,08	1,83	2,93	1,72	3,66	2,83	2,98
Número de risco de resfriamento	0,32	0,33	0,35	0,33	0,37	0,35	0,36	0,25	0,37	0,25	0,37	0,27
Índice de distribuição do ar (ADI)	6,96	5,50	6,87	6,29	6,16	6,43	5,08	6,47	4,90	7,26	6,01	6,58
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	2,49	2,16	2,54	2,36	2,42	2,44	2,09	2,19	2,07	2,36	2,38	2,26

Tabela 5.16 - ADI na situação IV, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	4,96	4,19	4,50	4,23	3,82	3,79	3,86	5,27	3,71	5,28	3,39	4,58
Número de qualidade do ar	0,37	0,38	0,35	0,39	0,34	0,42	0,34	0,34	0,37	0,33	0,38	0,33
Número de risco de resfriamento	0,08	0,12	0,09	0,12	0,10	0,13	0,12	0,06	0,13	0,06	0,13	0,07
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,36	1,27	1,26	1,29	1,14	1,26	1,15	1,34	1,18	1,33	1,14	1,23
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	0,53	0,58	0,52	0,59	0,51	0,59	0,54	0,48	0,57	0,48	0,55	0,47

5.3.5 Jactos horizontais

Através da análise dos resultados do índice de distribuição de ar na situação com jactos horizontais, é possível constatar que, com 6 ocupantes, os números de conforto térmico, qualidade do ar e risco de resfriamento são relativamente superiores quando a temperatura do ar de entrada é 24°C (tabela 5.18) comparativamente a 20°C (tabela 5.17).

Os valores de ADI e ADTI são superiores para 24°C.

Tabela 5.17 - ADI na ventilação com jactos horizontais, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	4,14	4,37	4,91	5,04	4,26	4,15
Número de qualidade do ar	1,38	1,40	1,26	1,35	1,51	1,66
Número do risco de resfriamento	1,50	1,82	1,69	1,70	1,68	1,61
Índice de distribuição do ar (ADI)	2,39	2,47	2,48	2,61	2,54	2,63
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	2,05	2,23	2,19	2,26	2,21	2,23

Tabela 5.18 - ADI na ventilação com jactos horizontais, 6 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6
Número de conforto térmico	8,61	8,33	7,47	7,43	7,97	8,18
Número de qualidade do ar	1,61	1,64	1,41	1,52	1,85	1,98
Número do risco de resfriamento	2,18	2,63	2,49	2,50	2,51	2,37
Índice de distribuição do ar (ADI)	3,73	3,69	3,24	3,36	3,84	4,03
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	3,12	3,30	2,97	3,05	3,33	3,38

Na situação com jactos horizontais com 12 ocupantes, tabelas 5.19 e 5.20, é possível verificar que o número de conforto térmico é bastante superior quando a temperatura do ar de entrada é de 20°C, no entanto o número de risco de resfriamento é bastante superior quando o ar de entrada é de 24°C. Como resultado, o ADI é superior para a situação com jactos horizontais a 20°C e o ADTI é superior na situação com jactos horizontais a 24°C.

Tabela 5.19 - ADI na ventilação com jactos horizontais, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 20°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	17,72	14,23	16,83	15,61	17,70	15,43	14,34	16,04	16,17	16,44	16,38	17,13
Número de qualidade do ar	3,20	2,48	2,95	2,40	2,55	2,25	2,78	2,42	2,73	2,48	2,51	2,46
Número de risco de resfriamento	1,45	2,17	1,65	1,82	1,85	2,00	2,07	1,93	1,74	1,70	1,93	1,86
Índice de distribuição do ar (ADI)	7,53	5,94	7,05	6,12	6,72	5,90	6,32	6,23	6,64	6,38	6,41	6,49
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	4,35	4,25	4,35	4,08	4,37	4,11	4,35	4,21	4,25	4,11	4,30	4,28

Tabela 5.20 – ADI na ventilação com jactos horizontais, 12 ocupantes, para uma temperatura do ar de entrada a 24°C.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Número de conforto térmico	6,10	4,81	5,57	5,18	5,88	5,11	4,83	5,25	5,38	5,36	5,41	5,61
Número de qualidade do ar	3,23	2,51	2,98	2,43	2,57	2,27	2,81	2,45	2,75	2,51	2,53	2,49
Número de risco de resfriamento	16,01	15,14	13,80	11,80	10,35	14,42	12,97	19,85	9,99	14,74	12,41	20,16
Índice de distribuição do ar (ADI)	4,44	3,48	4,08	3,54	3,89	3,41	3,69	3,59	3,85	3,67	3,70	3,73
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	6,81	5,68	6,12	5,29	5,39	5,51	5,61	6,35	5,29	5,83	5,54	6,55

Relativamente ao estudo comparativo é possível retirar algumas conclusões para cada uma das situações estudadas.

Na situação I, no geral, os ocupantes estão sujeitos a:

- Velocidade mais elevada na zona em frente (cima da secretária), recirculações com velocidades do ar na ordem dos 0,1 e 0,3 m/s, a temperaturas de 23° quando tem 6 ocupantes e o ar entra a 20°C, e entre os 25 e 26°C quando o ar entra a 24°C. Nas situações com 12 ocupantes as temperaturas no compartimento estão entre os 24 e os 26°C na situação I a 20°C, e rondam os 27, 28° na situação I a 24°C.
- Um risco de resfriamento inferior a 25% excepto nas zonas dos ombros, braços e mãos, onde este atinge valores mais elevados;
- Índice PMV dentro da categoria A para 6 ocupantes e no limite ou superior à categoria C, segundo a ISO 7730 (2005), para 12 ocupantes;

Nesta situação com 6 ocupantes o CO₂ é arrastado no sentido descendente e lateral, e com 12 ocupantes a concentração de CO₂ é superior, com um maior arrastamento lateral.

Na situação II, no geral, os ocupantes estão sujeitos a:

- Recirculações com velocidades do ar na ordem dos 0,1 e 0,3 m/s, com velocidades mais elevadas na cabeça, a temperaturas de 23° na situação II com 6

ocupantes a 20°C, e entre os 25 e 26°C quando o ar entra a 24°C. Com 12 ocupantes as temperaturas no compartimento rondam os 24° quando o ar entra a 20°C, e rondam os 27, 28° quando o ar entra a 24°C.

- Um risco de resfriamento inferior a 25% excepto nas zonas dos ombros e braços, onde este atinge valores mais elevados;
- Índice PMV dentro da categoria B para 6 ocupantes e no limite ou superior à categoria C, segundo a ISO 7730 (2005), para 12 ocupantes;

Nesta situação o CO₂ é arrastado no sentido descendente e lateral, e verifica-se uma concentração de CO₂ mais elevada na situação com 12 ocupantes.

Na situação III, no geral, os ocupantes estão sujeitos a:

- Recirculações com velocidades do ar na ordem dos 0,1 e 0,3 m/s, com velocidades mais elevadas na cabeça, a temperaturas de 23° na situação III com 6 ocupantes a 20°C, e entre os 25 e 26°C quando o ar entra a 24°C. Na situação com 12 ocupantes as temperaturas no compartimento encontram-se entre os 23 e os 26° quando o ar entra a 20°C, e entre os 26 e os 28°, quando o ar entra a 24°C.
- Um risco de resfriamento inferior a 25% excepto nas zonas dos ombros e braços, onde este atinge valores mais elevados quando o ar entra a 24°C;
- Índice PMV dentro da categoria A para 6 ocupantes e no limite ou superior à categoria C, segundo a ISO 7730 (2005), para 12 ocupantes;

Nesta situação com 6 ocupantes o CO₂ é arrastado no sentido descendente e ocorre um arrastamento lateral nas situações com 12 ocupantes.

Na situação IV, no geral, os ocupantes estão sujeitos a:

- Velocidades elevadas na cabeça e as velocidades no compartimento chegam a 1,7m/s, no centro do compartimento.
- Um risco de resfriamento elevado com 12 ocupantes;

- Índice PMV dentro da categoria C para 6 ocupantes e no limite ou superior à categoria C, segundo a ISO 7730 (2005), para 12 ocupantes;

Nesta situação com 6 ocupantes a área de contaminação com CO₂ é reduzida e nota-se um ligeiro arrastamento no sentido descendente da concentração deste contaminante. Com 12 ocupantes verifica-se uma concentração de CO₂ mais elevada, onde ocorre um arrastamento lateral mais evidente.

Na situação com jactos horizontais, no geral, os ocupantes estão sujeitos a:

- Velocidades elevadas, onde as velocidades no compartimento chegam os 0,5m/s.
- Um risco de resfriamento inferior a 25%, excepto nos ombros, braços e mãos, com 6 ocupantes, e nas pernas, com 12 ocupantes;
- Índice PMV dentro da categoria C segundo a ISO 7730 (2005);

Nesta situação ocorre um arrastamento ascendente da concentração de CO₂.

As tabelas 5.21 e 5.22 apresentam os valores médios dos números de qualidade do ar, conforto térmico e risco de resfriamento, ADI e ADTI.

Tendo em conta que o ADI oferece informações úteis sobre o desempenho do sistema de ventilação e permite a comparação entre diferentes sistemas de ventilação, recorreu-se à comparação das tabelas 5.21 e 5.22 como suporte na decisão relativamente à melhor situação para aplicar na câmara experimental.

Tabela 5.21 – Valores médios dos números de qualidade do ar, conforto térmico e risco de resfriamento, ADI e ADTI, para 6 e 12 ocupantes, nas várias situações a 20°C.

	6 ocupantes 20°C					12 ocupantes 20°C				
	Situação I	Situação II	Situação III	Situação IV	horizontais	Situação I	Situação II	Situação III	Situação IV	horizontais
Número de conforto térmico	7,64	6,07	4,98	2,35	4,31	12,65	9,22	10,62	14,30	16,27
Número de qualidade do ar	0,25	4,76	2,40	0,44	1,39	0,34	0,54	0,68	2,88	2,50
Número do risco de resfriamento	2,24	3,05	4,52	1,53	1,68	2,83	0,93	1,82	0,34	1,86
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,39	5,24	3,39	1,03	2,51	2,01	2,20	2,69	6,36	6,40
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,65	4,34	3,78	1,15	2,22	2,25	1,54	2,21	2,36	4,26

Tabela 5.22 – Valores médios dos números de qualidade do ar, conforto térmico e risco de resfriamento, ADI e ADTI, para 6 e 12 ocupantes, nas várias situações a 24°C.

	6 ocupantes 24°C					12 ocupantes 24°C				
	Situação I	Situação II	Situação III	Situação IV	horizontais	Situação I	Situação II	Situação III	Situação IV	horizontais
Número de conforto térmico	4,31	3,46	4,79	4,41	8,08	2,88	3,52	3,27	4,21	5,37
Número de qualidade do ar	0,26	3,07	3,86	0,38	1,63	0,25	0,58	1,00	0,36	2,52
Número do risco de resfriamento	3,53	4,30	6,19	0,59	2,50	4,36	1,11	2,51	0,11	14,11
Índice de distribuição do ar(ADI)	1,06	3,30	4,36	1,30	3,71	0,83	1,43	1,83	1,26	3,69
Índice turbulento de distribuição do ar (ADTI)	1,59	3,55	4,79	1,00	3,21	1,41	1,21	1,89	0,54	5,64

Relativamente ao número de conforto térmico é possível concluir que, quando a temperatura aumenta, de uma forma geral, este diminui. No entanto, a diminuição é maior com 12 pessoas do que com 6 pessoas.

Com 6 pessoas é possível verificar que, no geral, a 20°C, o número de conforto térmico é maior nos ocupantes localizados na fila da direita da câmara, enquanto a 24°C é superior nos ocupantes da fila da esquerda (em relação a um observador que esteja na sala, virado para a frente).

No geral, com 12 ocupantes, o número de conforto térmico é superior nos ocupantes que ocupam o lado esquerdo das secretárias, para ambas as temperaturas de entrada do ar.

Analisando o número de qualidade do ar, de uma forma geral, é possível dizer que esta diminui quando a temperatura aumenta. No entanto, esta diminuição, apesar de ser maior com 12 pessoas do que com 6 pessoas, é muito baixa.

No geral, com 6 ocupantes, o número de qualidade do ar é superior para os ocupantes que ocupam as secretárias da direita. O número de qualidade do ar, com 12 ocupantes, é superior nos ocupantes do lado esquerdo de cada secretária.

Quando a temperatura aumenta o número do risco de resfriamento, de uma forma geral, aumenta.

Com 6 ocupantes, o número de risco de resfriamento, no geral, é superior para os ocupantes sentados o mais à direita do compartimento. O número de risco de resfriamento, com 12 ocupantes, no geral, até ao ocupante 6, é superior nos ocupantes que ocupam o lado direito das secretárias, e a partir do ocupante 7 é superior nos ocupantes que ocupam o lado esquerdo das secretárias.

Quando a temperatura aumenta o ADI e o ADTI, de uma forma geral, diminuem. No entanto, a diminuição é maior para 12 pessoas do que para 6 pessoas e o valor do ADI, de uma forma geral, é maior do que o valor do ADTI.

Analisando os resultados do ADI e do ADTI, com 6 pessoas, para 20°C verifica-se que estes são maiores nas Situações II e III e para 24°C é superior na situação III, enquanto que com 12 pessoas, para 20°C é maior na situação IV e na situação com jactos horizontais e para 24°C é maior nas situações III e com jactos horizontais.

É possível então concluir que a situação com maior valor do ADI e do ADTI verifica-se na situação III, situação escolhida para implementar na câmara experimental “sala piloto”.

Acoplar ao cálculo do ADI o número do risco de resfriamento revelou-se importante, pois para situações com números semelhantes de qualidade do ar e de conforto térmico, na situação com maior número de risco de resfriamento, o valor do ADI é superior e vice-versa. É possível, por exemplo, comparar as situações III e as situações com jactos horizontais (horizontais), com 6 ocupantes para 20°C, na tabela 5.22; e as situações I e IV, com 6 ocupantes a 24°C, na tabela 5.23.

A importância deste novo cálculo também é visível ao analisar um sistema de ventilação com números elevados de qualidade do ar e de conforto térmico, mas que possuem um número de risco de resfriamento pequeno, onde o ADTI vai ser inferior ao ADI, traduzindo um problema na eficiência do sistema de ventilação.

É possível, por exemplo, comparar as situações IV e com jactos horizontais, com 12 ocupantes para 20°C, tabela 5.22.

6 Validação

6.1 Modelo do escoamento unidireccional no interior das condutas

Para validar o modelo matemático utilizado para calcular a velocidade do ar no interior das condutas, foram comparados os resultados obtidos pelo modelo e efectuadas medições da velocidade do ar na saída das condutas implementadas na câmara experimental, sem ocupantes. Os resultados do modelo foram obtidos através de um sistema de equações não lineares desenvolvido, tendo em conta as perdas de carga contínuas e localizadas, a partir do método de Newton e Gauss-Jordan. Os resultados encontram-se representados na figura 6.1. Os resultados do nível de precisão, entre os valores numéricos e experimentais, são superiores a 0,7 o que revela uma boa concordância entre resultados numéricos e experimentais.

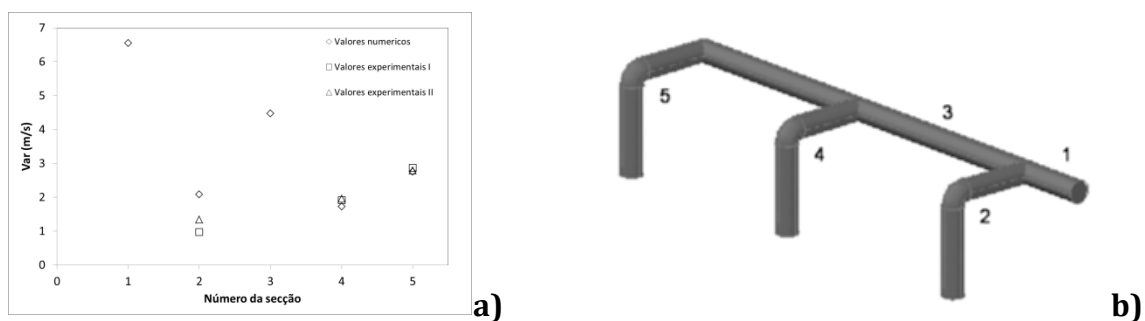


Figura 6.1 – a) Comparação dos resultados numéricos e experimentais (I e II, correspondentes às secções do lado direito e esquerdo do compartimento) na situação de validação do modelo do escoamento unidireccional dentro das condutas; b) esquema geral e numeração das condutas.

Com a utilização do modelo que simula o escoamento unidireccional dentro das condutas é possível concluir que, devido à existência de perdas de carga localizadas e contínuas dentro das condutas, cada entrada de ar do compartimento apresenta velocidades de ar diferentes. Uma vez que a velocidade de ar nas entradas é um dado de entrada do software de simulação numérica de escoamentos tridimensional dentro de um compartimento e que este encontra-se acoplado ao modelo da resposta térmica do corpo humano, a capacidade de prever estes valores revela-se de extrema importância em todos resultados das simulações numéricas.

6.2 Modelo de escoamentos tridimensional em espaços ocupados

No sentido de validar os resultados do modelo de escoamentos tridimensional em espaços ocupados - “Virtual Air Flow-3D”, foi efectuada uma simulação numérica da câmara virtual sem ocupantes. Nesta simulação foram aplicados os resultados do modelo que simula o escoamento unidireccional dentro das condutas. Posteriormente foram efectuadas medições experimentais na câmara “sala piloto”. As medições experimentais foram efectuadas a partir das entradas de ar no compartimento, no sentido vertical, com uma distância de 10 cm entre pontos de medição.

Através da figura 6.2 é possível verificar o campo de velocidade do ar no compartimento sem ocupantes. As saídas 1 e 2, apresentam velocidades do ar mais elevadas e o escoamento tem um maior alcance que as entradas 3 e 4, e que as 5 e 6, sucessivamente.

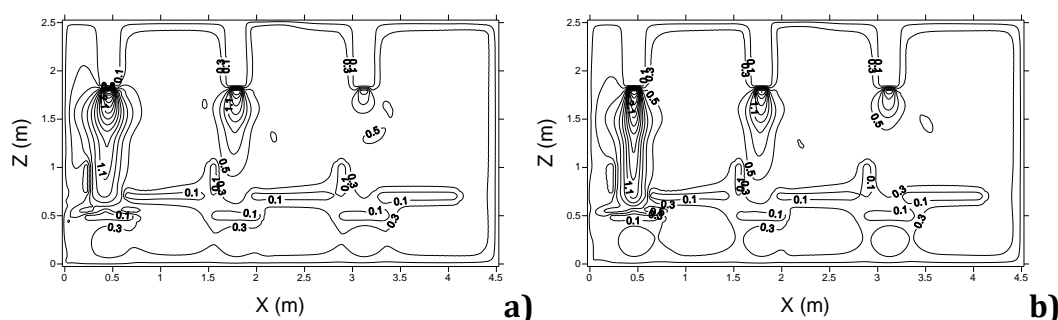


Figura 6.2 – Campo de velocidade do ar sem ocupantes, nos planos a) 0,65 m (entradas 1, 3 e 5) e b) 1,953 m (entradas 2, 4 e 6).

As figuras 6.3 e 6.4 e 6.5 mostram a comparação entre os resultados da simulação numérica e das medições experimentais da velocidade do ar, nas 6 entradas de ar no compartimento. Os valores do nível de precisão encontram-se próximos de 1 o que indica que existe uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e experimentais.

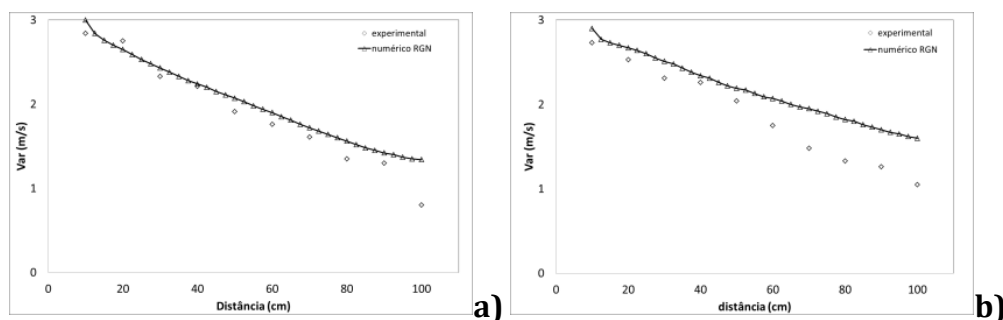


Figura 6.3 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais do campo de velocidades do ar na validação, nas entradas número a) 1, b) 2.

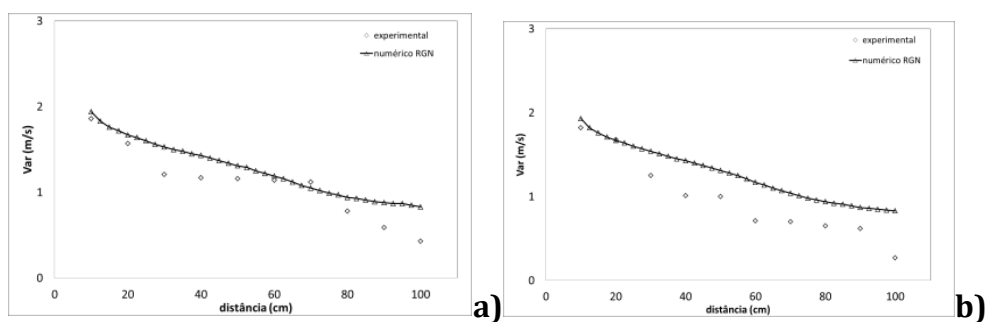


Figura 6.4– Comparação entre os resultados da simulação numérica e experimental do campo de velocidades do ar na validação, nas entradas número a) 3 e b) 4.

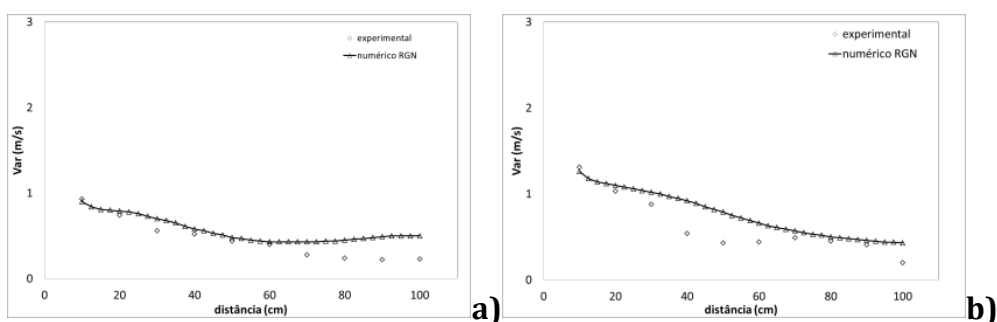


Figura 6.5– Comparação entre os resultados da simulação numérica e experimental do campo de velocidades do ar na validação, nas entradas número a) 5 e b) 6.

6.3 Modelo “Human Thermal Comfort” acoplado ao modelo “Virtual Flow”

No sentido de validar os resultados do modelo “Human Thermal Comfort” acoplado ao modelo “Virtual Air Flow”, foi efectuada uma simulação da câmara virtual com 2 ocupantes, e posteriormente foram medidos os valores da velocidade e temperatura do ar, em redor de dois termo-manequins na câmara experimental “sala piloto”.

As figuras 6.6, 6.7, 6.8 e 6.9 apresentam respectivamente a comparação dos resultados numéricos e experimentais relativamente à velocidade do ar, temperatura do ar, risco de resfriamento e intensidade de turbulência.

Na figura 6.6 são comparados os resultados numéricos e experimentais da velocidade do ar em torno dos dois ocupantes. Nesta situação, o nível de precisão encontra-se abaixo dos 0,5 o que indica uma fraca concordância dos resultados. No entanto estes resultados podem ser explicados devido à dificuldade de, na simulação experimental, reproduzir a posição dos ocupantes igual à posição que estes apresentam na simulação numérica.

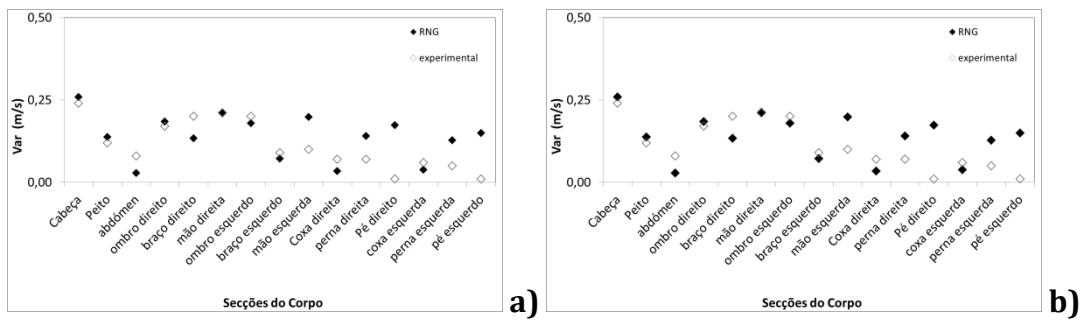


Figura 6.6 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da velocidade do ar na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.

Na figura 6.7 são comparados os resultados numéricos e experimentais da temperatura do ar em torno dos 2 ocupantes. Nesta situação o nível de precisão demonstra uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, encontrando-se perto de 1. Existe algum afastamento de alguns pontos, e os resultados com maior afastamento encontram-se nas secções das pernas e pés, o que pode ser explicado com a dificuldade de, na fase experimental, reproduzir a posição dos ocupantes que estes apresentam na simulação numérica.

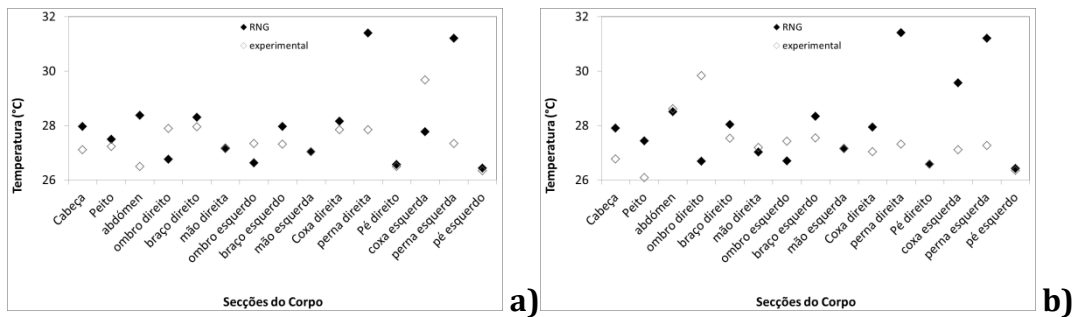


Figura 6.7 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da temperatura do ar na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.

Na figura 6.8 são comparados os resultados numéricos e experimentais da intensidade de turbulência em torno dos 2 ocupantes. Nesta situação, o nível de precisão demonstra uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Os valores com algum afastamento entre os resultados numéricos e experimentais devem-se devido à dificuldade de, na fase experimental, reproduzir a posição dos ocupantes da simulação numérica.

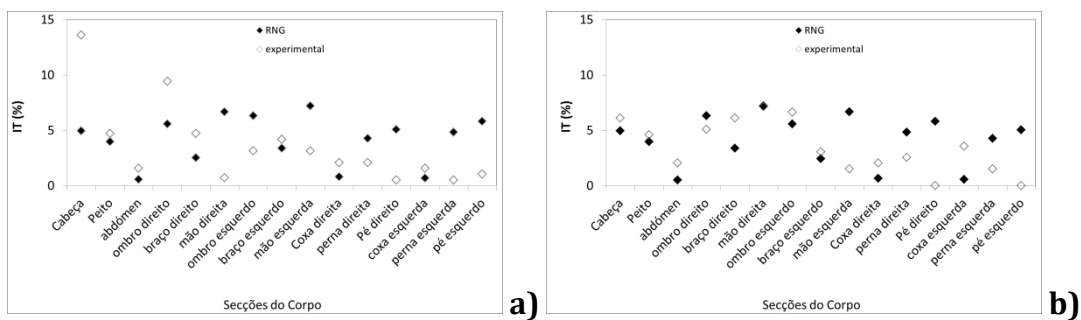


Figura 6.8– Comparação entre os resultados numéricos e experimentais da Intensidade de Turbulência na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.

Na figura 6.9 são comparados os resultados numéricos e experimentais do risco de resfriamento em redor dos 2 ocupantes. É possível verificar que os valores de risco de resfriamento são inferiores a 15%, onde se inclui-se na categoria A imposta pela ISO 7730 (2005) Nesta situação existe uma muito boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, uma vez que o nível de precisão encontra-se muito perto de 1.

As secções do corpo com um maior afastamento entre os resultados numéricos e experimentais são, mais uma vez, as pernas e pés, o que pode ser explicado pela dificuldade de, na fase experimental, reproduzir a posição dos ocupantes da simulação numérica.

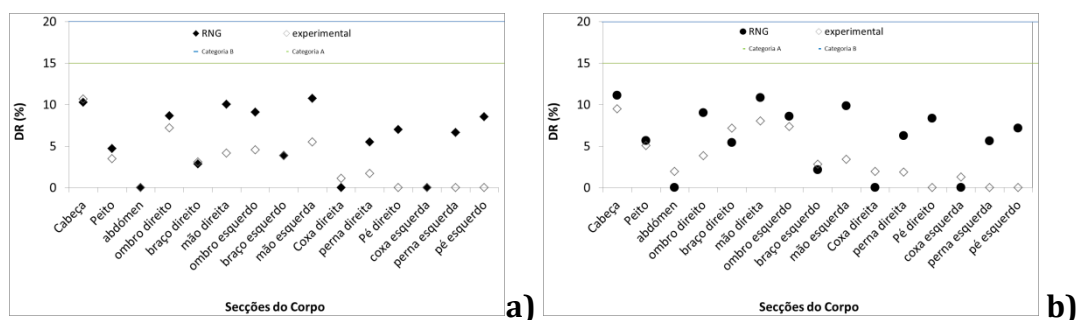


Figura 6.9– Comparação entre os resultados numéricos e experimentais do Risco de Resfriamento (DR) na simulação para validação, relativamente ao: a) ocupante 1 e b) ocupante 2.

No geral, é possível concluir que na situação de validação obteve-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, demonstrando que os resultados obtidos nas simulações efectuadas no capítulo 4 são fiáveis e encontram-se dentro da ordem de grandeza dos valores reais.

7 Aplicação Prática

Com o objectivo de aplicar este estudo num contexto mais realista foi simulada uma situação da sala piloto com uma pessoa sentada em cada secretária, num total de 6 ocupantes sentados (alunos), mais um ocupante em pé simulando um professor. O ocupante em pé encontra-se virado para a parede, representando uma situação em que o professor está a escrever no quadro.

Foram analisados os resultados da velocidade e temperatura do ar e concentração de CO₂ em três planos longitudinais, Y=0,63099 m, b) Y=1,275 m e c) Y=1,8929 m.

A figura 7.1 apresenta os resultados da velocidade do ar dentro da sala virtual onde é visível que os ocupantes 1 e 2 estão sujeitos a velocidades mais elevadas do que os ocupantes 3 e 4, e 5 e 6 sucessivamente.

É também visível a formação de algumas recirculações de ar em baixo das secretárias.

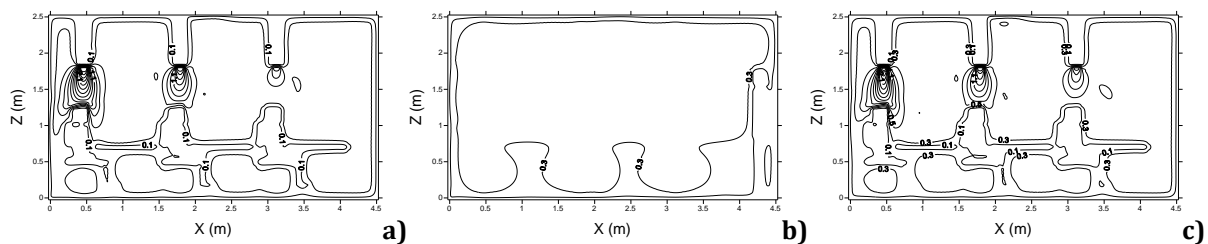


Figura 7.1- Velocidade do ar, na situação de aplicação prática, com 7 ocupantes, nos planos: a) Y=0,63099, b) Y=1,275m e c) Y=1,8929m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

Através da análise da figura 7.2 é possível constatar que ocorre a formação de um microclima em redor dos ocupantes e professor, com uma temperatura a rondar os 26°C, enquanto que no restante compartimento a temperatura ronda os 24°C.

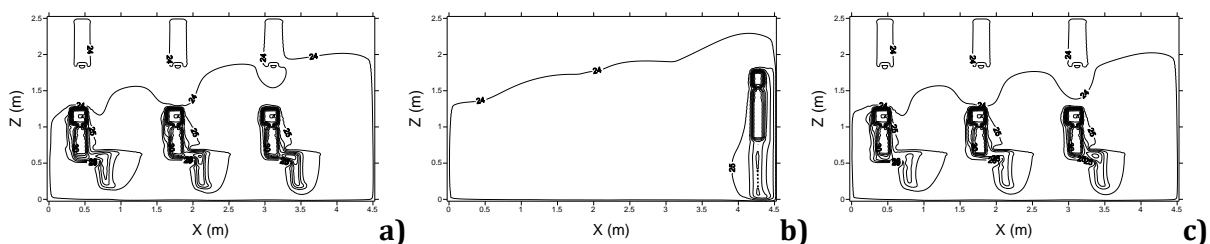


Figura 7.2- Temperatura do ar, na situação de aplicação prática, com 7 ocupantes, nos planos: a) Y=0,63099, b) Y=1,275m e c) Y=1,8929m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

Em relação à concentração de CO₂, através da figura 7.3 é possível verificar que na localização dos ocupantes 1 e 2, há um arrastamento da concentração de CO₂ no sentido descendente. Este arrastamento também ocorre em relação aos ocupantes 3, 4, 5 e 6, no entanto, é progressivamente menos visível devido à diferença da velocidade do ar nas entradas de ar, verificada anteriormente na figura 7.1.

Em relação ao ocupante em pé, devido ao facto de este encontrar-se virado para a parede (simulando um professor a escrever no quadro), e de não estar sujeito aos jactos verticais descendentes, é possível verificar que a concentração de CO₂ fica confinada no espaço entre o ocupante e a parede, e que num primeiro instante sofre um aumento no sentido descendente até a um nível a partir do qual ocorre o escoamento no sentido ascendente.

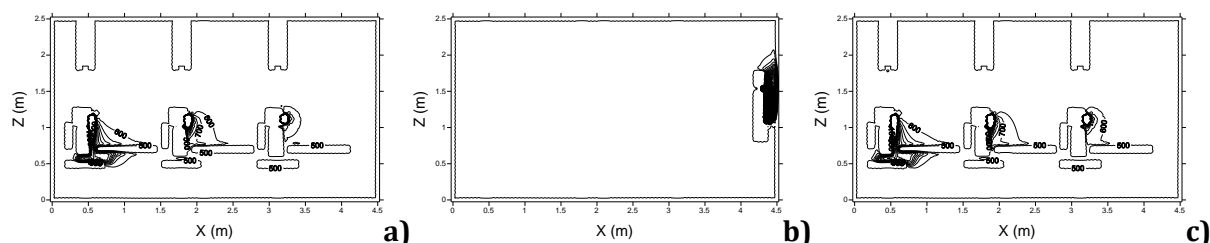


Figura 7.3 – Concentração de CO₂, na situação de aplicação prática, com 7 ocupantes, nos planos: a) Y=0,63099, b) Y=1,275m e c) Y=1,8929m, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

Tabela 7.1 - Concentração de CO₂ na área de respiração em cada um dos 7 ocupantes.

Ocupante	1	2	3	4	5	6	7
Concentração de CO ₂ na área de respiração (mg/m ³)	628	575	1095	1203	1754	1600	1136

Através da análise da tabela 7.1 é possível verificar que, no geral, os ocupantes apresentam uma boa qualidade do ar, com concentrações de CO₂ inferiores a 1800 mg/m³, definido pelo D.L. nº 79/2006 de 4 de Abril.

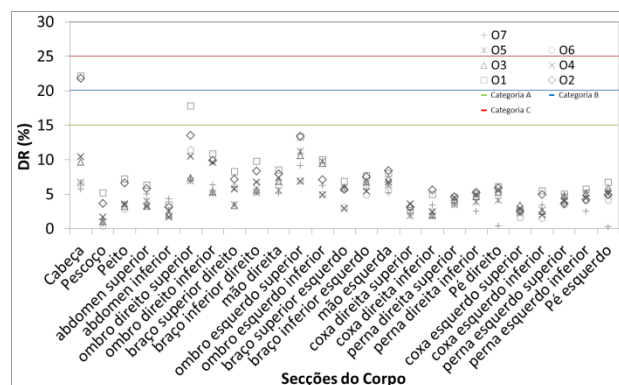


Figura 7.4- Risco de resfriamento, em torno das várias secções do corpo dos 7 ocupantes, na situação de aplicação, com uma temperatura do ar de entrada de 20°C.

Para avaliar o desconforto térmico local é analisado o índice de risco de resfriamento.

Através da figura 7.4 é possível constatar que os valores do risco de resfriamento, em redor dos 7 ocupantes, na maioria das secções do corpo humano, encontram-se dentro da categoria A, com excepção da cabeça e ombro direito, onde não é excedido o valor imposto pela ISO 7730 (2005) para a categoria C (25%).

No geral, os ocupantes estão sujeitos a um microclima, com velocidades do ar superiores na zona da cabeça e com temperaturas na ordem dos 24, 25°C. Os ocupantes estão sujeitos a uma qualidade do ar aceitável, e os valores de risco de resfriamento encontram-se dentro da categoria A, com excepção da cabeça e ombro direito.

Os ocupantes sentados nas últimas secretárias (ocupantes 1 e 2) estão sujeitos a velocidades do ar mais elevadas, a níveis de concentrações de CO₂ inferiores e a risco de resfriamento superiores aos outros ocupantes, seguindo-se os ocupantes sentados nas secretárias centrais (ocupantes 3 e 4). Os ocupantes sentados nas secretárias da frente (ocupantes 5 e 6) apresentam valores mais baixos de velocidade do ar e de risco de resfriamento e têm um nível de qualidade do ar menos bom. Estes resultados devem-se às diferentes velocidades do ar nas entradas.

8 Sugestão de Aplicação Futura

Este capítulo tem como objectivo sugerir a aplicação do estudo desenvolvido no corpo deste trabalho em contextos reais com geometrias mais complexas.

Nesta dissertação foram aplicados: o modelo do escoamento tridimensional em espaços ocupados acoplado ao modelo da resposta térmica do corpo humano; o modelo do cálculo das temperaturas das superfícies envolventes; o modelo de escoamentos unidireccionais dentro das condutas e o método do índice de distribuição do ar; em várias situações numa câmara virtual de dimensão $4,5 \times 2,55 \times 2,5 \text{ m}^3$. Através dos vários estudos provou-se que, com a aplicação destes modelos, é possível a previsão do comportamento do escoamento dentro de um espaço ocupado e da resposta térmica dos ocupantes nessas condições.

É então sugerido, que através da aplicação destes modelos, seja efectuada a análise da qualidade do ar, conforto e desconforto térmico local dos ocupantes em espaços que apresentem geometrias mais complexas, como por exemplo, um auditório e, caso se justifique, simular sistemas de ventilação alternativos.

Para tal, foi desenvolvido o domínio de um auditório da Universidade do Algarve, Auditório Verde (figura 8.1), onde posteriormente podem ser efectuados os mais diversos estudos.

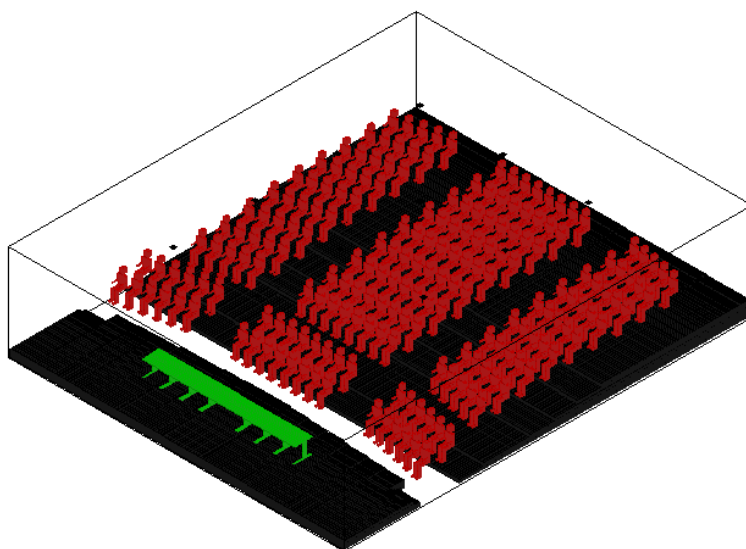


Figura 8.1 – Domínio do auditório, com 202 ocupantes, em perspectiva isométrica.

9 Conclusões

Nesta dissertação foi efectuado um estudo comparativo entre diferentes situações de sistemas de ventilação baseados em jactos localizados, nomeadamente, jactos verticais descendentes e jactos horizontais. Relativamente aos jactos verticais descendentes localizados, foram estudadas três situações em que a área da entrada do ar é de $0,01\text{m}^2$ e uma com $0,0025\text{m}^2$. Das três situações em que a entrada tem $0,01\text{ m}^2$ foram estudadas diferentes posições dos jactos, em cima (mais afastado e mais próximo do nível da cabeça dos ocupantes,) e à frente dos ocupantes. Relativamente à situação com jactos horizontais, estes foram posicionados em frente dos ocupantes, em cima e em baixo da secretária.

Através do estudo comparativo é possível concluir que nas diferentes situações dos jactos verticais descendentes em que a área de entrada do ar é de $0,01\text{ m}^2$, no geral, o risco de resfriamento encontra-se abaixo dos 25% (categoria C, segundo a ISO 7730, 2005), com excepção de algumas secções do corpo. Estas excepções variam de situação para situação, dependendo da posição dos jactos. Por outro lado, a situação com jactos verticais descendentes em que a área de entrada do ar no compartimento é de $0,0025\text{ m}^2$, apresenta valores mais elevados de risco de resfriamento. Na situação com jactos horizontais o risco de resfriamento é inferior a 25%, excepto em algumas secções do corpo, que varia com a ocupação.

Analisando o conforto térmico dos ocupantes nas várias situações é possível concluir que nas situações com 6 ocupantes, em todas as situações, o índice de PMV encontra-se dentro dos valores da categoria C, impostos ISO 7730 (2005). O mesmo já não acontece para uma ocupação com 12 pessoas, onde é possível encontrar índices de PMV no limite ou superiores a 0,7. Relativamente ao nível de qualidade do ar, verifica-se em todas as situações valores de concentração de CO_2 inferiores a $1800\text{mg}/\text{m}^3$, logo, no geral, o nível de qualidade do ar na zona de respiração dos ocupantes é aceitável.

Através do método do ADI foi possível concluir que a situação III dos jactos verticais descendentes (situação em cima e mais afastada do nível da cabeça) é a melhor situação para aplicar na câmara experimental “sala piloto”.

Após a escolha da melhor situação, a câmara experimental “sala piloto” foi construída durante o período de desenvolvimento desta dissertação, sendo acompanhada a sua construção.

Com o objectivo de validar os modelos utilizados (Virtual Air Flow acoplado ao Human Thermal Comfort e o modelo que permite calcular o escoamento unidireccional dentro de condutas), foram realizadas duas simulações numéricas (uma sem e outra com dois ocupantes), e vários ensaios experimentais na câmara experimental sala piloto. No geral, é possível concluir que foram obtidos resultados que corroboram uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, demonstrando que os resultados obtidos na fase do estudo comparativo encontram-se dentro da ordem de grandeza dos valores reais.

Após a validação dos modelos numéricos estes foram utilizados numa situação de aplicação prática. Para tal, foi efectuada uma simulação numérica da sala piloto virtual com 7 ocupantes (uma pessoa sentada em cada secretária, alunos, mais um ocupante em pé, simulando um professor). A aplicação prática permitiu concluir que, no geral, os ocupantes estão sujeitos a um microclima, a uma qualidade do ar aceitável e que os valores de risco de resfriamento encontram-se dentro da categoria A, com excepção da cabeça e ombro direito.

10 Bibliografia

ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2004), ASHRAE Standard – Ventilation of Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Inc, Atlanta.

ASHRAE (1997), handbook – fundamental. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Inc, Atlanta.

Awbi, H.B. (1998) – Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection. *Energy and Buildings*; 28: 219-227.

Azer, N.Z., Hsu, S. (1977) – The prediction of thermal sensation from a simple thermo-regulatory model. *ASHRAE Transactions*: 83, Part 1.

Bird, R.B., Stewart, W., Lightfoot, E. (2006) – *Transport Phenomena*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Bolashikov, Z., Melikov, A., Krenek, M. (2009) – Improved Performance of personalized ventilation by control of the convective flow around occupant body. *ASHRAE transactions*, vol. 115, part 2.

Causone, F., Baldin, F., Olesen, B., Corngnati, S. (2010) – Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations. *Energy and Buildings*; 42: 2338-2352.

Cheng, Y., Niu, J., Gao, N. (2012)– Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*; 47: 13-22.

Cho Y, Awbi HB., Karimipannah, T. (2002) – A comparison between four different ventilation systems. In: *Proceedings of the 8th Int. Conference on Air Distribution in Rooms (Roomvent 2002)*, Denmark, pp. 181-184.

Cho Y, Awbi HB., Marchetti, M. (2003) – The variation of ventilation performance in relation to change in workstation location in a ventilated room. In: *Proceedings of the 7th International Conference of Healthy Buildings, Singapore, V.2*, pp.296-301.

Cho, Y., Awbi, H.B., Karimipannah, T. (2008) – Theoretical and experimental investigation of wall confluent jets ventilation and comparison with wall displacement ventilation. *Building and Environment*; 43: 1091-1100.

Conceição EZE, Lúcio M^aMJR, Farinho JP. (2007) – Experimental and Numerical Study of Personalized of Ventilation in Classroom's Desks. In: *Proceedings of the 10th International conference in rooms, RoomVent., Helsinki, Finland; 13-15 of July 2007.*

Conceição EZE, Lúcio M^aMJR. (2006) – Modelação das trocas radiactivas verificadas em indivíduos sentados em secretárias climatizadas. Conferência nacional de métodos numéricos em mecânica dos fluidos e termodinâmica. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Conceição EZE, Lúcio M^aMJR. (2010) – Evaluation of the thermal comfort conditions in a localized radiant system placed in front and behind two students seated nearby warmed curtains. *Building and Environment*; 45: 2100-2110.

Conceição EZE, Vicente VDSR, Lúcio M^aMJR. (2008) – Airflow inside school buildings office compartments with moderate environment. *International Journal on Heating Air Conditioning and Refrigerating Research*, Vol. 14, N.2: 195-207.

Conceição, E. Z. E. (1996) - "Estudo Aero-Térmico de Habitáculos de Veículos de Transporte de Passageiros", Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica na especialidade de Aerodinâmica, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Conceição, E.Z.E., e Lúcio, M^a.M. (2011) - Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to uniform convective environment. *Applied Mathematical Modeling*; 35: 1295-1305.

Conceição, E.Z.E., Lúcio, M^a.M., Awbi, H.B. (2012) – Comfort and airflow evaluation in spaces equipped with mixing ventilation and cold radiant floor.

Conceição, E.Z.E., Lúcio, M^a.M., Rosa, S., Custódio, A., Andrade, R., Meira, M^a. (2010) – Evaluation of Comfort level in desks equipped with two personalized ventilation systems in slightly warm environments. *Building and Environment*; 45: 601-609.

Conceição, E.Z.E., Santiago, C.I.M., e Lúcio, M^aM.J.R. (2013) -Numerical Study of the Internal Air Quality in Classrooms Equipped with Personalized Ventilation. Conference on Environment & Health Basel 2013.

Decreto – Lei n.º 79 (2006), Regulamento dos Sistemas Energéticos de Edifícios (RSECE), Diário da República, I Série – A, n.º 67, 4 de Abril.

Djongyang, N., Tchinda, R., Njomo, D. (2010) - Thermal Comfort: A review paper. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 14: 2626-2640.

Fager, P.O., e Toftum, J. (2002) – Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. Energy and Buildings; 34: 533-536.

Fanger, P. (2001) – Human requirements in the future air-conditioned environments. International Journal of Refrigeration; 24: 148-153.

Farinho, J. (2010) – Utilização da ventilação personalizada na melhoria das condições ambientais Internas. Elaborado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve.

Ferreira, P.M.MA, Amaro, P.M.M.M. (1990) – Guia do Programa Canal. Versão para velocidades e pressão do programa Teach. Elaborado no âmbito das cadeiras de seminário I e II do Ramo de Termodinâmica e Fluídos, do Curso de Engenharia Mecânica pela Secção Autónoma de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

Florides, G., e Kalogirou, S. (2007) – Ground heat exchanges – A review of systems models and applications. Renewable Energy; 32: 2461-2478.

Gagge, AP., Stolwijk, J.A.J., Nishi, Y. (1971) – An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. ASHRAE Transactions; 77(1): 247-62.

Givoni, B. e Goldman, R. (1971) – Predicting metabolic energy cost. Journal of Applied Physiology; 30: 429-33.

Guan, Y., Hosni, M.H., Jones, B.W., Giolda T.P. (2003) – Investigation of human thermal comfort under highly transient conditions for automobile applications – part 1: experimental design and human subject testing implementation. ASHAE Transactions; 109 (2): 885-97.

Idel'cik, IE. (1969) – Memento der pertes de charge. Volume 13 de collection du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Eyrolles.

Incropera, FP e Dewitt, DP (1990) – Introduction to heat transfer. 2nd edition. J.Wiley, New York.

ISO 7730 (2005), Ergonomics of thermal environmental – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

Karimipannah, T., Awbi, H.B., Sandberg, M., Blomqvist, C. (2007) – Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor-level air supply systems in classrooms. *Building and Environment*; 42: 647-655.

Makhoul, A., Ghali, K., Ghaddar, N. (2013) – Desk fans for the control of the convection flow around occupants using ceiling mounted personalized ventilation. *Building and Environment*; 59: 336-348.

Melikov, A., Ivanova, T., Stefanova, G. (2012) – Seat headrest-incorporated personalized ventilation: thermal Comfort and inhaled air quality. *Building and Environment*; 47: 100-108.

Melikov, A.K, Kaczmarczyk, J. (2012) – Air movement and perceived air quality. *Building and Environment*. 47: 400-409.

Melikov, A.K., Radim, C., Majer, M. (2002) – Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices. *Energy and Buildings*. 34: 829-836.

Miller, D. S. (1971) – *Internal Flow – A Guide to Losses in Pipe and Duct Systems*, England, Printed and Published by the British Hydromechanics Research Association.

Muhic, S. e Butala, V. (2006) – Effectiveness of personal ventilation system using relative decrease of tracer gas in the first minute parameter. *Energy and Buildings*; 38: 538-542.

Pan, C., Chiang, H., Yen, M., Wang, C. (2005) – Thermal comfort and energy saving of a personalized PFCU air-conditioning system. *Energy and Buildings*; 37: 443-449.

Perez -Lombard, L., Ortiz, J., Maestre, I.R. (2011) – The map of energy flow in HVAC systems. *Applied Energy*; 88: 5020-5031.

Quintela, A. (2009) – *Hidráulica*. 11^aedição. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

Rabinovich, S. (2010) - Evaluating measurement accuracy: a practical approach. Springer New York Dordrecht Heidelberg, London.

Santiago, C. (2013) – Projecto de uma sala equipada com sistemas de ventilação ecológicos. Desenvolvido no âmbito da disciplina de projecto, do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve.

Sarmiento, P. (2010) – Avaliação das condições de conforto em ambientes equipados com sistemas de ventilação híbrida. Elaborado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, especialização em Saúde e Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve.

Smith, G.E. (1991) – A transient, three-dimensional model of human thermal system. PH.D. Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas.

Stolwijk, J.A.J. (1971) –A Mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA Contract Report., NASA CR-1855. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration.

Thorn, A. (1998) –The sick Building syndrome: a diagnostic dilemma. Elsevier Science; Vol.47, Nº9, pp. 1307-1312.

Tian, Z., Ding, Y., Wang, S., Yin, X., Wang, M. (2010) – Influence of the ventilation system on thermal comfort of the chilled panel system in heating mode. Energy and Buildings. 42: 2360-2364.

Welty, J., Wicks, C., Wilson, R., Rorrer, G. (2007) – Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc.

Yang, B., Melikov, A., Sekhar, C. (2009) – Performance Evaluation of ceiling mounted personalized ventilation system. ASHRAE transactions, vol.115, part 2.

Yang, B., Sekhar, C., Melikov., A.K. (2010) – Ceiling mounted personalized ventilation system in hot and humid climate – An energy analysis. Energy and Buildings. 42: 2304-2308.

ANEXO 1 - “Virtual Air Flow- 3D” – Esquema

O presente esquema pretende descrever os passos, de uma forma muito generalizada, com os dados de entrada que um utilizador terá que introduzir durante a implementação e realização de um projecto.

Fundamentos teóricos:

O modelo numérico de simulação de escoamento tridimensional em espaços ocupados – “Virtual Air Flow 3D” – é utilizado como ferramenta para simular tridimensionalmente e em coordenadas cartesianas o escoamento em regime estacionário e em condições não isotérmicas dentro de um espaço ocupado.

Este modelo permite calcular os campos de velocidade, pressão, temperatura, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação de energia turbulenta e concentração de dióxido de carbono, em espaços ocupados, simulando escoamentos incompressíveis, com termo de impulsão, em condições de regime permanente.

1. Definição da malha:

Num primeiro instante há a necessidade de definir a malha, com o objectivo de representar o domínio físico de uma forma que possa ser “entendida” e tratada pelo computador, e o sistema de coordenadas que melhor se adaptar ao domínio físico definido, sendo neste caso utilizado o sistema de coordenadas cartesianas.

Uma vez que no sistema de coordenadas cartesianas os nodos são alinhados em linhas, colunas e profundidades perpendiculares entre si, é escolhido pelo utilizador o número de linhas e colunas que constituem a altura, largura e comprimento do domínio simulado.

Quanto mais fina for a malha, maior será a informação, em quantidade e em qualidade, pois a precisão será maior, mas a memória ocupada no computador e o tempo de cálculo também serão superiores. No entanto, existem técnicas para “criar” densidades diferentes de linhas e colunas, dependendo da necessidade de precisão.

2. Definição das entradas e saídas do domínio (figura 3):

São impostas as condições de escoamento nas entradas e as características do escoamento, em todos os outros nodos do domínio, são determinadas a partir das primeiras. As condições de saída são calculadas pelo princípio de conservação de massa.

3. Definição dos obstáculos no compartimento:

Este tipo de informação é introduzido através do Microsoft Excel (figuras 4 e 5). Esta metodologia inovadora permite desenvolver projectos mais complexos com menos tempo de introdução de dados. A metodologia permite ainda exportar a informação para o Computer-Aided-Design.

No método de discretização espacial utilizado designado método dos volumes finitos, as equações relacionam valores nodais vizinhos, das várias variáveis, com os valores correspondentes no nodo em estudo. Assim, chamando P ao nodo em que se quer determinar o valor da variável dependente, a equação algébrica que relaciona o valor da variável dependente nesse nodo com os valores desta nos vizinhos, será do tipo:

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_T \phi_T + a_B \phi_B + S \quad (1)$$

a -coeficientes;

ϕ - Variáveis, nomeadamente, as velocidades (u, v e w), a pressão (P), a temperatura (T), a energia de cinética turbulenta (k) e a taxa de energia turbulenta (ϵ);

S - termo fonte geral;

Os índices S, N, W, E, T e B (respectivamente Sul, Norte, Oeste, Este, Cima e Baixo) se tornam-se facilmente compreensíveis quando observada a figura 1.

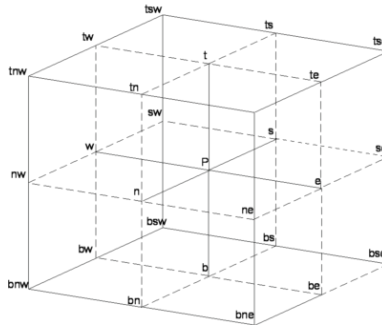


Figura 1 - Malha principal.

A equação 1 é a equação genérica discretizada. Para o cálculo da velocidade, pretende-se obter três sistemas de equações nesta forma, um para a coordenada u da velocidade do escoamento, outro para a coordenada v e outro para a coordenada w . Estes sistemas, que têm uma equação desta forma para cada nodo da malha, são sistemas fechados, que têm apenas uma solução. Ao obter uma equação na forma (1) para um ponto genérico P, ela será aplicável aos nodos de toda a malha.

Para a determinação da componente da velocidade são utilizadas as equações de conservação da quantidade de movimento, na sua forma geral, para coordenadas cartesianas, em regime permanente, em 3 dimensões e massa volumica constante (equações, 2, 3 4, 5 e 6):

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\text{div} \vec{V}) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} + \rho_0 \beta g (T - T_0) \quad (2)$$

Para $i, j = 1, 2$ ou 3 , e em que:

$$u_1 = u ; u_2 = v ; u_3 = w ;$$

$$x_1 = x ; x_2 = y ; x_3 = z ;$$

x, y, z - Eixo coordenado (m).

u, v, w - Componentes das velocidades (m/s), segundo x, y e z , respectivamente;

ρ - Massa específica do fluido (kg/m³);

$div \vec{V}$ - divergência da velocidade.

Γ - Coeficiente de difusão genérico;

P - Pressão total;

K - Energia cinética turbulenta;

ρ_0 - Massa específica de referência;

β - Coeficiente de expansão volúmica;

g - Aceleração da gravidade (m/s²);

T - Temperatura (k);

T_0 - Temperatura de referência (k);

A equação de continuidade é dada, para as mesmas condições, por (3):

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Equação da quantidade de movimento segundo x

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) = & -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) - \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho K)}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

Equação da quantidade de movimento segundo y

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v w) = & -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) - \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho K)}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

Equação da quantidade de movimento segundo z

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) - \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho K)}{\partial z} + \rho_0 \beta g (T - T_0) \end{aligned} \quad (6)$$

Equações para o cálculo da Temperatura (T)

Para o cálculo da temperatura consideramos a seguinte equação genérica (7):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{ef} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{S_T}{c_p} \quad (7)$$

Para $i = 1, 2$ ou 3 , e em que:

$$x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z;$$

$$u_1 = u; u_2 = v; u_3 = w$$

Γ_{ef} - Coeficiente de difusão efectiva;

S_T - Taxa de geração de energia por unidade de volume;

c_p - Capacidade calorífica a pressão constante (J/kg.k).

Equação da concentração

É possível obter os valores de concentração recorrendo à seguinte equação genérica (8):

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

Para $j = 1, 2$ ou 3 , e em que:

$$x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z;$$

$$u_1 = u; u_2 = v; u_3 = w$$

D - Difusibilidade mássica;

C - Concentração de CO₂.

Equações da Energia Cinética Turbulenta (K)

A energia cinética turbulenta pode ser obtida através da seguinte equação genérica (9):

$$\frac{\partial}{\partial u_j}(\rho u_i K) = \frac{\partial}{\partial u_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial u_j} \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon + \beta g \underbrace{\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z}}_{GI} \quad (9)$$

Para $i, j = 1, 2$ ou 3 , e que:

$$u_1 = u; u_2 = v; u_3 = w;$$

$$x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z;$$

G e σ_k - Constantes empíricas.

Pr_t - Número de Prandtl turbulento.

Equações da Taxa de Dissipação de Energia Turbulenta (ε)

Para calcular a taxa de dissipação de energia turbulenta é possível recorrer à seguinte equação genérica (10):

$$\frac{\partial}{\partial u_j}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial u_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial u_j} \right) + \frac{\varepsilon}{K} \left(C_1 \mu_t G - C_2 \rho \varepsilon + C_3 \beta g \underbrace{\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z}}_{GI} \right) \quad (10)$$

Para $i, j = 1, 2$ ou 3 , e que:

$$u_1 = u; u_2 = v; u_3 = w;$$

$$x_1 = x; x_2 = y; x_3 = z;$$

μ_t - Viscosidade turbulenta;

C_1, C_2, C_3 - Constantes empíricas do modelo k- ε .

Após as simplificações necessárias são encontradas as equações finais é efectuada a discretização das mesmas com o objectivo de transformar as equações diferenciais de conservação, "exactas" mas irresolúveis, em equações algébricas, que são aproximadas mas resolúveis por programação.

Para tal, é utilizado o Método de Discretização espacial dos Volumes Finitos, no qual a equação diferencial é formalmente integrada através do volume de controlo que envolve cada nodo da malha definida. Os fluxos calculados reportam-se às fronteiras dos volumes de controlo, e são dados por expressões arbitradas, consideradas satisfatórias para a aproximação requerida.

No caso do cálculo da velocidade do escoamento, é utilizado um subterfúgio que visa resolver um problema que surge frequentemente e que consiste no falseamento de resultados devido à introdução de erros que surgem devido ao facto dos gradientes de pressão serem definidos através de nodos alternados em vez de nodos adjacentes. Este subterfúgio vai-se definir por uma alteração na malha, para a coordenada x, para Oeste (figura 2-a), na coordenada y, para Sul (figura 2-b), e na coordenada z, para Baixo (figura 2-c). As componentes da velocidade passam assim a ser calculadas nos nós principais, e não nas fronteiras dos volumes de controlo, onde interessa calcular os fluxos das equações de transporte.

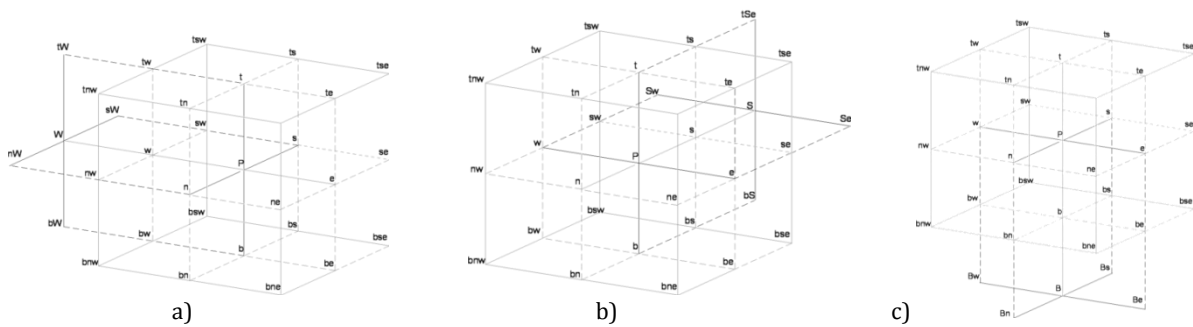


Figura 2 – a) Malha desviada Oeste; b) Malha desviada para Sul; c) Malha desviada para Baixo.

Para o cálculo da temperatura, concentração, e energia turbulenta são utilizadas as malhas principais (figura 1).

Para efectuar a discretização, a equação final é dividida em várias componentes, de modo a integrar as suas componentes uma a uma.

Uma vez discretizados todos os termos das equações, é efectuada a construção das equações. Para tal, é necessário calcular os coeficientes principais, a partir dos coeficientes de convecção e dos coeficientes de difusão, calculados aquando da discretização dos termos das equações.

Na ligação entre as equações de conservação de modelo e de massa é utilizado o algoritmo SIMPLE (semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), que só “aceita” equações lineares, o que nos impõe a linearização do termo-fonte.

$$S = S_p \phi_p + S_U \quad (11)$$

Onde S_p é o coeficiente, da parte do termo-fonte, dependente em relação à variável (no nodo genérico P), e S_U o termo independente. O termo S_p inclui a fonte residual de massa multiplicada pela velocidade no nodo. Este coeficiente é negativo, de forma a respeitar as regras de estabilização do cálculo. O termo S_U inclui o termo devido às diferenças de pressão entre fronteiras do volume de controlo, e os termos de natureza difusiva que são utilizados para a determinação dos coeficientes principais.

Equação de Pressão

Contrariamente ao que acontece para os campos a calcular até agora, não existe nenhuma equação que nos permita estabelecer directamente uma variação da pressão ao longo do domínio.

Para a obtenção da pressão, de um modo indirecto, é feita uma conjugação entre as equações de conservação da quantidade de movimento, que contêm um termo dependente da pressão, e da equação da continuidade. Esta conjugação tem lugar após a integração e discretização das equações.

Os valores de pressão não são, como acontecia com as velocidades, calculados nos nodos de uma malha desviada, mas sim nos nodos da malha principal.

O valor correcto da pressão (P), em cada nodo, é constituído por um valor aproximado (P_a) ao qual é sempre somado um valor de correcção (P'):

$$\underbrace{P}_{\text{valor correcto}} = \underbrace{P_a}_{\text{valor aproximado}} + \underbrace{P'}_{\text{valor de correcção}} \quad (12)$$

Em que o valor de correcção, para a coordenada u , é dado por:

$$u'_w = (P'_w - P'_p) \cdot \underbrace{\frac{(y_{nw} - y_{sw})(z_T - z_B)}{a_w}}_{d_w} \quad (13)$$

E o valor correcto da pressão, para a coordenada u , é dado por:

$$u_w = u_{w_a} + (P'_w - P'_p)d_w \quad (14)$$

Para discretizar a equação de continuidade, obtém-se a pressão de correcção (P') e não a pressão P , referida anteriormente, e portanto vamos ter de somar a P' o valor aproximado, ou seja, pressão P_a .

Partindo da equação de continuidade (3) e discretizando-a em relação ao volume controle da malha principal, (VC)-VOL= $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$. Obtem-se:

$$\begin{aligned} u_e &= u_{e_a} + (P'_p - P'_E)d_e \\ u_w &= u_{w_a} + (P'_w - P'_p)d_w \\ v_n &= v_{n_a} + (P'_p - P'_N)d_n \\ v_s &= v_{s_a} + (P'_s - P'_p)d_s \\ w_t &= w_{t_a} + (P'_p - P'_T)d_t \\ w_b &= w_{b_a} + (P'_B - P'_p)d_b \end{aligned} \quad (15)$$

A equação de continuidade discretizada ficará:

$$\begin{aligned} &\rho_e \Delta y \Delta z [u_{e_a} + (P'_p - P'_E)d_e] - \rho_w \Delta y \Delta z [u_{w_a} + (P'_w - P'_p)d_w] + \rho_n \Delta x \Delta z [v_{n_a} + (P'_p - P'_N)d_n] - \\ &- \rho_s \Delta x \Delta z [v_{s_a} + (P'_s - P'_p)d_s] + \rho_t \Delta x \Delta y [w_{t_a} + (P'_p - P'_T)d_t] - \rho_b \Delta x \Delta y [w_{b_a} + (P'_B - P'_p)d_b] = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Logo, a equação para o cálculo da pressão poderá escrever-se:

$$a^*_P P'_P = a^*_E P'_E + a^*_W P'_W + a^*_N P'_N + a^*_S P'_S + a^*_T P'_T + a^*_B P'_B + S \quad (17)$$

Introdução de dados:

Inicialmente é necessário definir o compartimento em estudo e apresentar as suas dimensões (comprimento, largura e altura).

1. Dimensões do compartimento (exemplo: comprimento: 4,5m, largura: 2,55m e altura 2,5m).

A partir das dimensões do compartimento, após definir o refinamento da malha e a posição do eixo, é criada a malha.

2. Após definir o refinamento da malha, o comprimento, largura e altura, são divididos por esse valor. Os valores resultantes correspondem ao número de linhas e colunas que dividem o compartimento. Está então definida a malha (exemplo: refinamento da malha (x, y e z) = 5 cm; comprimento = 90x; largura = 51y; altura = 50z).

Deve ser definido o modelo de turbulência e impor com que tipo de grelha se vai modelar.

3. Deve-se optar pelo modelo de turbulência k-ε ou RNG;
4. Deve-se optar entre trabalhar com uma grelha uniforme ou não uniforme.

Qualquer corpo dentro da câmara (ocupantes, mesa, cadeira e sistemas de ventilação) é um obstáculo à normal deslocação do fluxo do ar, sendo por isso necessário identificá-los. Da mesma forma, é necessário definir a temperatura, velocidade, concentração de CO₂ e Intensidade de turbulência nas entradas do ar no compartimento.

5. Definir condições no interior do compartimento.
 - Número de pessoas;
 - Número de cadeiras;
 - Número de mesas;
 - Número de saídas;
 - Número de entradas;
 - Velocidade do ar à entrada do ar;
 - CO₂ à entrada do ar;
 - Temperatura à entrada do ar;
 - Intensidade de turbulência à entrada do ar;

Devem ser definidas as posições das entradas e saídas do ar no compartimento, como no exemplo da figura 4. Também é importante definir a posição dos ocupantes.

6. Definir posição das entradas e saídas.

Posição - 6 Ocupantes		
Ocupante	x	y
1	10	14
2	10	38
3	36	14
4	36	38
5	62	14
6	62	38

a)

Posição - 12 ocupantes		
Ocupante	x	y
1	10	10
2	10	19
3	36	10
4	36	19
5	62	10
6	62	19
7	10	33
8	10	42
9	36	33
10	36	42
11	62	33
12	62	42

b)

Posição Saídas			
Saída	X	Y	Z
1	42	18	50
1	43	18	50
1	42	19	50
1	43	19	50
2	42	33	50
2	43	33	50
2	42	34	50
2	43	34	50

c)

Posição Entradas			
Ocupante (1-6)	X	Y	Z
1	10	13	37
1	11	13	37
1	10	14	37
1	11	14	37
2	10	38	37
2	11	38	37
2	10	39	37
2	11	39	37
3	36	13	37
3	37	13	37
3	36	14	37
3	37	14	37
4	36	38	37
4	37	38	37
4	36	39	37
4	37	39	37
5	61	13	37
5	62	13	37
5	61	14	37
5	62	14	37
6	61	38	37
6	62	38	37
6	61	39	37
6	62	39	37

d)

Figura 3 - Tabelas de definição das posições, relativamente a, a) seis ocupantes, b) doze ocupantes, c) Saídas e d) entradas de ar.

O passo que se segue consiste em definir a localização dos obstáculos. As localizações das condutas, mesas e cadeiras são definidos através de uma folha Excel, como é possível ver nas figuras 4 e 5.

Onde se localizam os obstáculos numera-se com 1, e onde não existem obstáculos permanece o zero. A coloração dos obstáculos permite uma melhor visualização do esquema da sala.

Esta metodologia permite desenvolver projectos complexos com um menor tempo na introdução de dados e exportar a informação para Computer-Aided-Design.

Devem ser consideradas as paredes do compartimento, logo nos primeiros e últimos valores da malha não vão existir obstáculos. Por exemplo, em X=1, X=90, Y=1, Y=51 e Z=1 e Z=50 existem apenas zeros.

7. Localização dos obstáculos.

É também necessário fornecer as informações relativamente às temperaturas dos obstáculos e das superfícies do compartimento.

8. Temperaturas

- Temperaturas das superfícies
- Temperaturas dos ocupantes
- Temperaturas das condutas
- Temperaturas dos obstáculos
- Temperaturas do compartimento
- Temperaturas das janelas

Output:

É possível dividir os dados resultantes deste programa em três: Domínio, Grelha e Isolinhas.

- Geometria/ Malha

O domínio é gerado com as informações de entrada disponibilizadas, no entanto é sempre necessário confirmar que não houve geração de erros e se a posição das entradas e saídas estão correctas.

- Grelha

Para gerar as isolinhas é necessário definir quais os planos que interessa estudar. Por exemplo, na zona de respiração dos ocupantes, nas entradas e saídas de ar, etc.

- Isolinhas

Após definidos as grelhas que interessa estudar, são geradas as isolinhas das quais é possível obter informações relativamente à temperatura e velocidade do ar, concentração de CO₂, Turbulência, entre outros dados, dentro do compartimento.

ANEXO 2 - cálculo das temperaturas das superfícies envolventes

Cálculo do coeficiente de transmissão de calor na parede interior h_{pi} :

$$Pr \equiv \frac{\mu c_p}{k}$$

$$Nu \equiv \frac{hL}{k}$$

$$\text{Se } T_{\text{Sup}} > T_{\text{arInt}}: Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{Sup}} - T_{\text{arInt}}) L^3}{\mu^2}$$

$$\text{Se } T_{\text{Sup}} < T_{\text{arInt}}: Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{arInt}} - T_{\text{Sup}}) L^3}{\mu^2}$$

$$Ra_L = Gr \times Pr$$

De acordo com Incropera e Dewitt (1990):

$$Nu = 0,59 Ra^{1/4} \text{ para } 10^4 < Ra < 10^9$$

$$Nu = 0,1 Ra^{1/3} \text{ para } Ra > 10^9$$

$$h_{pi} = \frac{(Nu \times k_f)}{L}$$

Cálculo do coeficiente de transmissão de calor na parede exterior h_{po} :

$$\text{Se } T_{\text{Sup}} > T_0: Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{Sup}} - T_0) L^3}{\mu^2}$$

$$\text{Se } T_{\text{Sup}} < T_0: Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_0 - T_{\text{Sup}}) L^3}{\mu^2}$$

$$Ra_L = Gr \times Pr$$

De acordo com Incropera e Dewitt (1990):

$$Nu = 0,59 Ra^{1/4} \text{ para } 10^4 < Ra < 10^9$$

$$Nu = 0,1 Ra^{1/3} \text{ para } Ra > 10^9$$

$$h_{po} = \frac{(Nu \times k_f)}{L}$$

Cálculo de Resistência da Parede

$$R_{parede} = \left(\frac{1}{(h_{pi} \times \text{área})} \right) + \left(\frac{\Delta x}{(k_p \times \text{área})} \right) + \left(\frac{1}{(h_{po} \times \text{área})} \right)$$

Cálculo do coeficiente de transmissão de calor no tecto interior h_{ti} :

$$\begin{aligned}\text{Se } T_{\text{Sup}} > T_{\text{arInt}}: Gr &= \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{Sup}} - T_{\text{arInt}}) L^3}{\mu^2} \\ \text{Se } T_{\text{Sup}} < T_{\text{arInt}}: Gr &= \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{arInt}} - T_{\text{Sup}}) L^3}{\mu^2} \\ Ra_L &= Gr \times Pr\end{aligned}$$

Para paredes horizontais, para a superfície inferior:

De acordo com Incropera e Dewitt (1990):

$$Nu = 0,27(Ra_L)^{1/4} \text{ para } 3 \times 10^5 < Ra_L < 10^{10}$$

$$h_{ti} = \frac{(Nu \times k_f)}{L}$$

Cálculo do coeficiente de transmissão de calor no tecto exterior h_{to} :

$$\begin{aligned}\text{Se } T_{\text{Sup}} > T_0: Gr &= \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{Sup}} - T_0) L^3}{\mu^2} \\ \text{Se } T_{\text{Sup}} < T_0: Gr &= \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{Sup}} - T_0) L^3}{\mu^2} \\ Ra_L &= Gr \times Pr\end{aligned}$$

De acordo com Incropera e Dewitt (1990):

$$Nu = 0,14(Ra_L)^{1/3} \text{ para } 2 \times 10^7 < Ra_L < 3 \times 10^{10}$$

$$Nu = 0,54 (Ra_L)^{1/4} \text{ para } 10^5 < Ra_L < 2 \times 10^7$$

$$h_{to} = \frac{(Nu \times k_f)}{L}$$

Cálculo de resistência do tecto:

$$R_{tecto} = \left(\frac{1}{(h_{ti} \times \text{área})} \right) + \left(\frac{\Delta x}{(h_{to} \times \text{área})} \right) + \left(\frac{1}{(h_{to} + \text{área})} \right)$$

Cálculo do coeficiente de transmissão de calor no chão interior h_{chi} :

$$\begin{aligned}\text{Se } T_{\text{Sup}} > T_{\text{arInt}}: Gr &= \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{Sup}} - T_{\text{arInt}}) L^3}{\mu^2} \\ \text{Se } T_{\text{Sup}} < T_{\text{arInt}}: Gr &= \frac{\rho^2 g \beta (T_{\text{arInt}} - T_{\text{Sup}}) L^3}{\mu^2} \\ Ra_L &= Gr \times Pr\end{aligned}$$

De acordo com Incropera e Dewitt (1990):

$$Nu = 0,14(Ra_L)^{1/3} \text{ para } 2 \times 10^7 < Ra_L < 3 \times 10^{10}$$

$$Nu = 0,54 (Ra_L)^{1/4} \text{ para } 10^5 < Ra_L < 2 \times 10^7$$

$$h_{chi} = \frac{(Nu \times k_f)}{L}$$

Cálculo do coeficiente de transmissão de calor no chão interior h_{cho} :

$$\text{Se } T_{Sup} > T_0: Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_{Sup} - T_0) L^3}{\mu^2}$$

$$\text{Se } T_{Sup} < T_0: Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_0 - T_{Sup}) L^3}{\mu^2}$$

$$Ra_L = Gr \times Pr$$

Para paredes horizontais, para a superfície inferior, de acordo com Incropera e Dewitt (1990):

:

$$Nu = 0,27(Ra_L)^{1/4} \text{ para } 3 \times 10^5 < Ra_L < 10^{10}$$

$$h_{cho} = \frac{(Nu \times k_f)}{L}$$

Resistência térmica do chão:

$$R_{ch\tilde{a}o} = \left(\frac{1}{(h_{chi} \times \acute{a}rea)} \right) + \left(\frac{\Delta x}{(k_{ch} \times \acute{a}rea)} \right) + \left(\frac{1}{(h_{cho} \times \acute{a}rea)} \right)$$

Cálculo das temperaturas:

$$T_{arInt} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ch\tilde{a}o}} + \frac{1}{R_{paredes}} + \frac{1}{R_{tecto}} + \dot{m}C_p \right)} \times \left(N_{pessoas} \times 100 + \dot{m}C_p T_0 \times \left(\frac{1}{R_{ch\tilde{a}o}} + \frac{1}{R_{paredes}} + \frac{1}{R_{tecto}} \right) \right)$$

$$T_{SupIn} = T_{arInt}$$

$$T_{paredes} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{ip}} + \frac{1}{R_p + R_{op}}} \right) \times \left(\frac{T_{arInt}}{R_{ip}} + \frac{T_0}{(R_p + R_{op})} \right)$$

$$T_{paredes0} = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{R_{ip} + R_p} \right) + \frac{1}{R_{op}}} \right) \times \left(\frac{T_{arInt}}{(R_{ip} + R_p)} + \frac{T_0}{R_{op}} \right)$$

$$T_{tecto} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{it}} + \frac{1}{(R_t + R_{ot})}} \right) \times \left(\frac{T_{arInt}}{R_{it}} + \frac{T_0}{(R_t + R_{ot})} \right)$$

$$T_{tecto0} = \left(\frac{1}{\frac{1}{(R_{it} + R_t)} + \frac{1}{R_{ot}}} \right) \times \left(\frac{T_{arInt}}{(R_{it} + R_t)} + \frac{T_0}{R_{ot}} \right)$$

$$T_{ichão} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{ich}} + \frac{1}{R_{ch} + R_{och}}} \right) \times \left(\frac{T_{arInt}}{R_{ich}} + \frac{T_0}{(R_{ch} + R_{och})} \right)$$

$$T_{chão0} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_{ich} + R_{ch}} + \frac{1}{R_{och}}} \right) \times \left(\frac{T_{arInt}}{R_{ich} + R_{ch}} + \frac{T_0}{R_{och}} \right)$$

ANEXO 3 – Tabelas com os dados de entrada

Neste anexo são apresentadas tabelas com alguns dos dados de entrada dos modelos utilizados no corpo deste trabalho.

A tabela 1 apresenta os valores das temperaturas das envolturas, temperatura do ar e concentração de CO₂ nas entradas, umidade relativa, intensidade de turbulência e número de ocupantes. Estes valores são dados de entrada do modelo de escoamento tridimensional em espaços ocupados. Outro dado de entrada do modelo de simulação do escoamento tridimensional em espaços ocupados é a velocidade do ar nas entradas. Os valores das velocidades do ar nas entradas utilizados no capítulo 5 encontram-se na tabela 2.

Tabela 1 – Alguns dos valores de entrada do modelo de simulação do escoamento tridimensional em espaços ocupados.

Concentração de CO₂ nas entradas (mg/m³)	500			
Intensidade de turbulência	10%			
Umidade relativa	50%			
Temperatura do ar de entrada	20°C		24°C	
Número de ocupantes	6	12	6	12
Temperatura das superfícies envolturas:				
Temperatura superfície interior	22,15	23,56	25,78	27,48
Temperatura superfície Oeste	21,83	24,15	26,11	27,57
Temperatura superfície Este	21,83	24,15	26,11	27,57
Temperatura superfície Sul	21,83	24,15	26,11	27,57
Temperatura superfície Norte	21,83	24,15	26,11	27,57
Temperatura superfície inferior	21,89	24,05	26,05	27,55
Temperatura superfície Superior	21,69	24,41	26,25	27,61

Tabela 2 - Velocidade de ar nas entradas, para as diferentes situações estudadas, input do modelo de simulação do escoamento tridimensional em espaços ocupados, utilizados no capítulo 5.

Situação:	Velocidades das entradas de ar (m/s):
I	3
II	3
III	3
IV	12
horizontais	3

Nos capítulos de validação e de aplicação prática, no modelo de simulação do escoamento tridimensional em espaços ocupados, são introduzidos os valores da velocidade do ar nas entradas, calculados através do modelo de cálculo de escoamento unidireccional dentro de condutas. Estes valores encontram-se apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Velocidade de ar nas entradas, para as diferentes situações estudadas, input do modelo de simulação do escoamento tridimensional em espaços ocupados aplicados nos capítulos 6 e 7.

Entrada	Velocidades das entradas de ar (m/s):
1	2,87
2	2,79
3	1,91
4	1,96
5	0,97
6	1,34

Anexo 4 - Malhas utilizadas na aplicação do modelo de simulação da resposta térmica dos ocupantes

Um indivíduo no interior de um compartimento está sujeito a fenómenos radiactivos. Estes fenómenos dependem não só, mas também, das trocas de calor por radiação verificadas entre a superfície exterior do corpo humano, como também das trocas de calor por radiação verificadas entre a superfície do corpo e as superfícies envolventes. Estas trocas de calor, que dependem do valor da temperatura superficial de cada secção dos ocupantes e das temperaturas envolventes, podem ser calculadas a partir do método da Temperatura Média Radiante, sendo calculado o valor da temperatura média radiante a que cada secção do corpo está sujeita. Este método é baseado nos valores das temperaturas das superfícies e dos factores de forma (Conceição e Lúcio, 2006).

No cálculo dos factores de forma o corpo humano é dividido em 24 elementos cilíndricos e 1 esférico. A superfície exterior de cada um destes elementos é ainda subdividida em 5 partes, lateralmente e em 8 partes longitudinalmente (figuras 1 e 2).

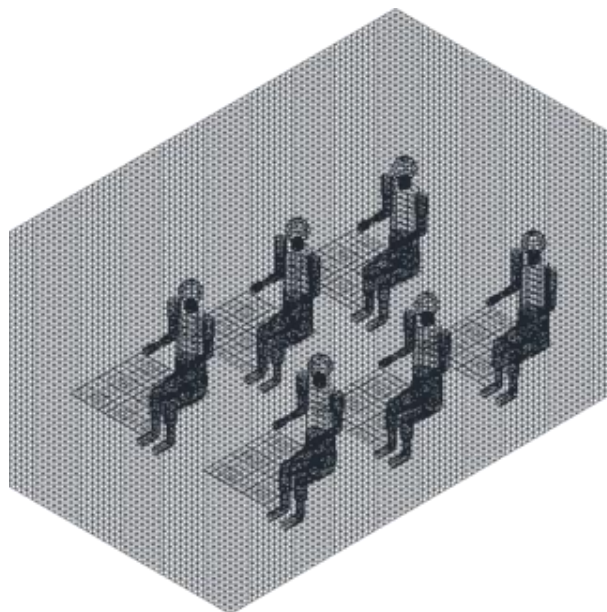


Figura 1- Malhas utilizadas na simulação numérica do “Human Thermal Comfort” (pessoa 5x8, planos 10x10), com 6 ocupantes.

No cálculo dos factores de forma as envolventes são dídas 10x10 partes (figuras 1 e 2).

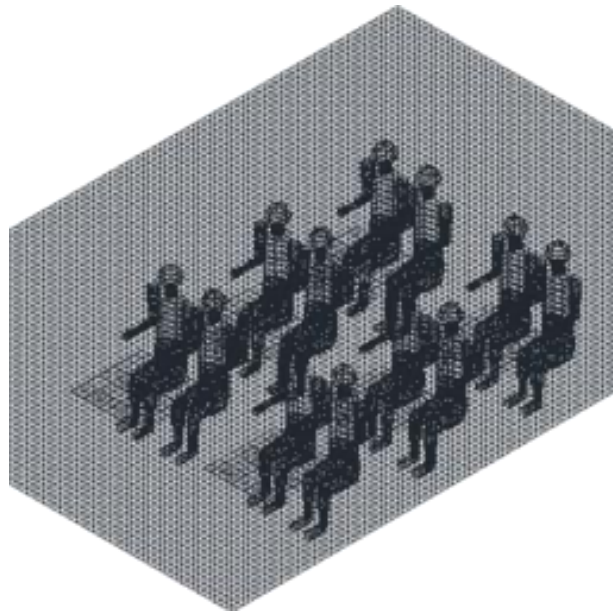


Figura 2 - Malhas utilizadas na simulação numérica do “Human Thermal Comfort” (pessoa 5x8, planos 10x10), com 12 ocupantes.

ANEXO 5 - Imagens do acompanhamento da construção da câmara experimental

Neste anexo são apresentadas as figuras 1-6, que ilustram o acompanhamento da fase de construção da câmara experimental.



Figura 1 - Fase inicial da construção.



Figura 2 - Fase de construção da estrutura da câmara.



Figura 3 - Fase final de construção da estrutura da câmara.



Figura 4 - Câmara experimental "Sala Piloto".



Figura 5 - Montagem do sistema de ventilação no interior da câmara experimental "Sala Piloto".



Figura 6 - Câmara experimental "Sala Piloto" totalmente equipada.

ANEXO 6 – Resultados complementares do capítulo 5

Neste anexo são apresentados alguns resultados complementares do capítulo 5, nomeadamente, a velocidade (figuras 1-10) e temperatura do ar em redor das secções do corpo dos ocupantes (figuras 11-20), temperatura média radiante (figuras 21-30), temperatura da pele (figuras 31-40) e temperatura do vestuário em torno das secções do corpo dos ocupantes (figuras 41-50).

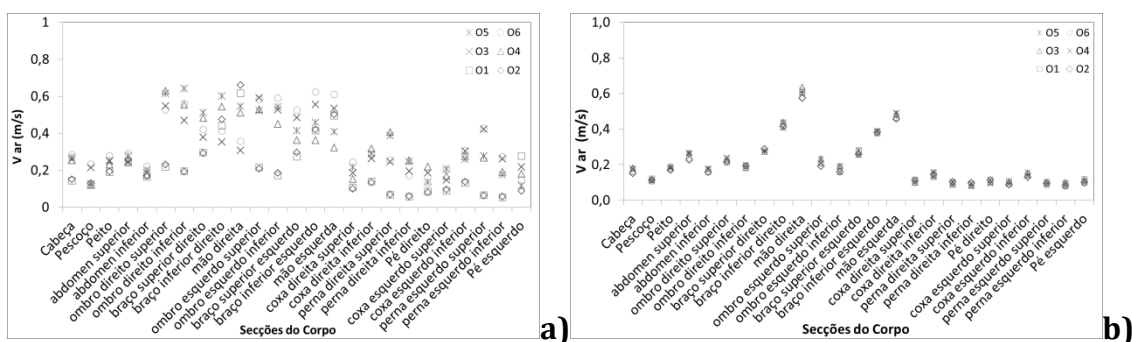


Figura 1 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

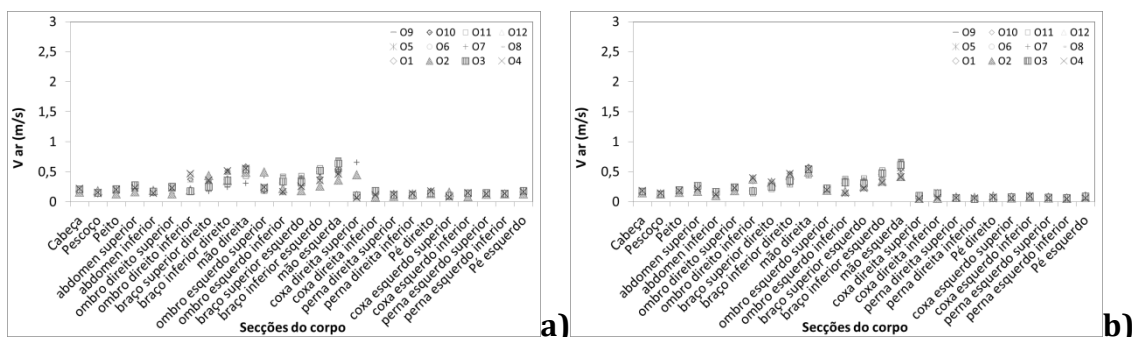


Figura 2 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

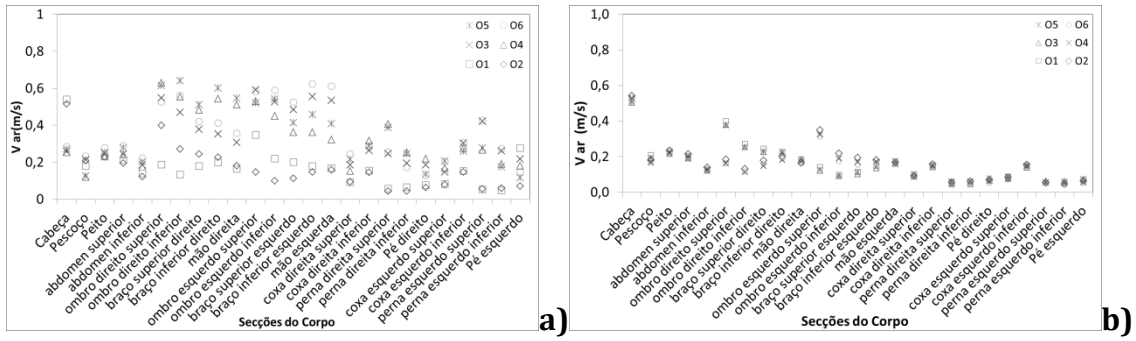


Figura 3 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

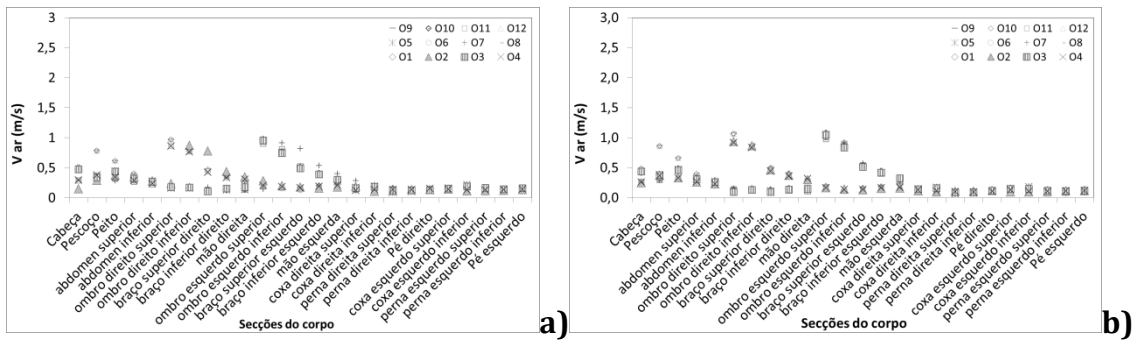


Figura 4 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

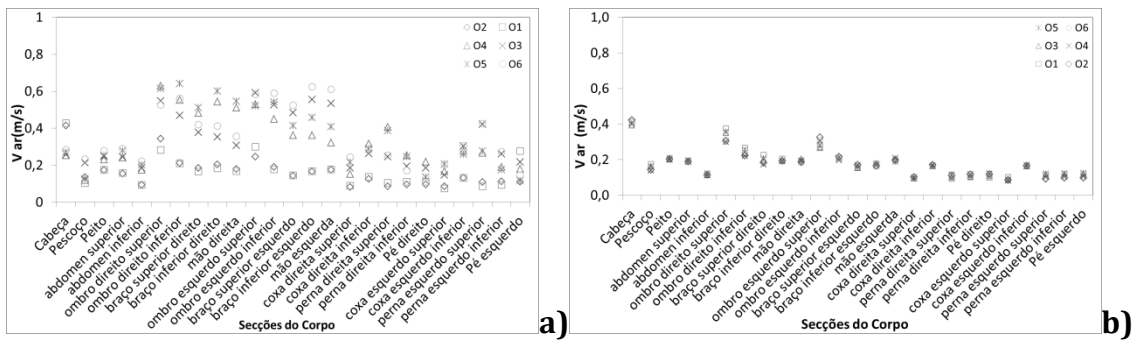
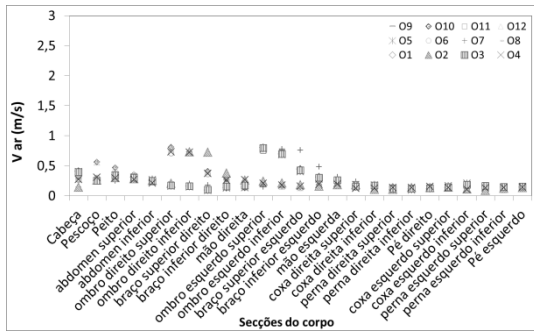
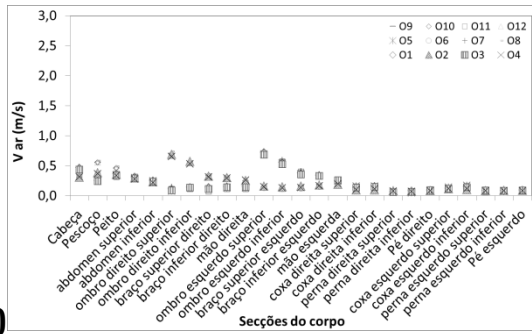


Figura 5 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

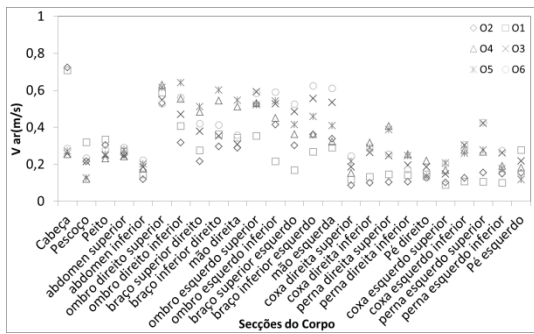


a)

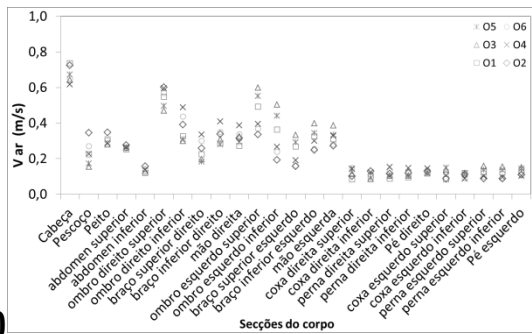


b)

Figura 6 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

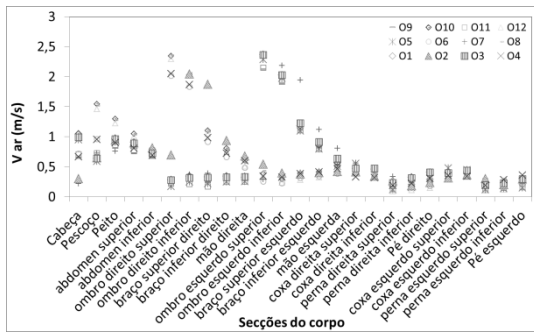


a)

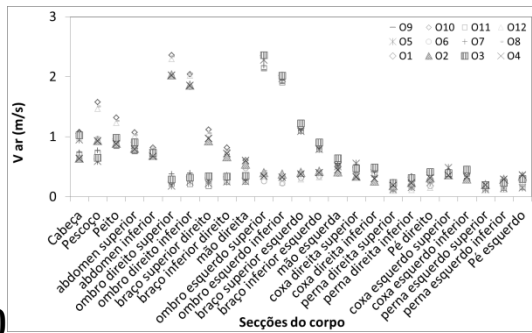


b)

Figura 7 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.



a)



b)

Figura 8 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

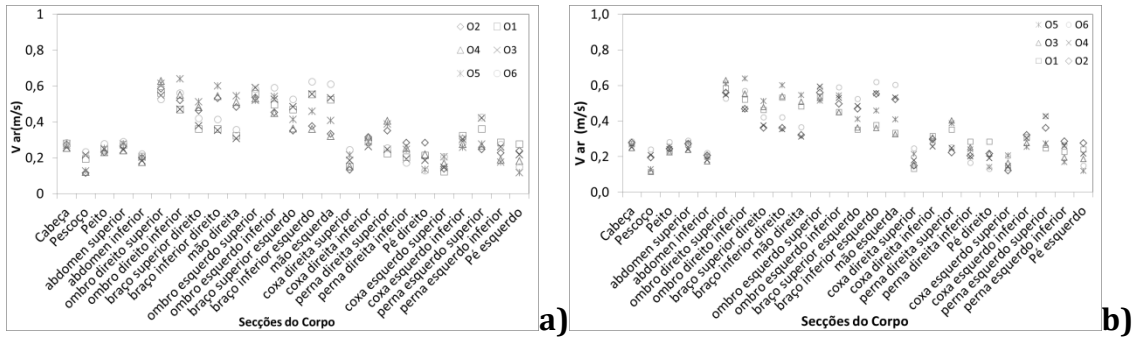


Figura 9 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

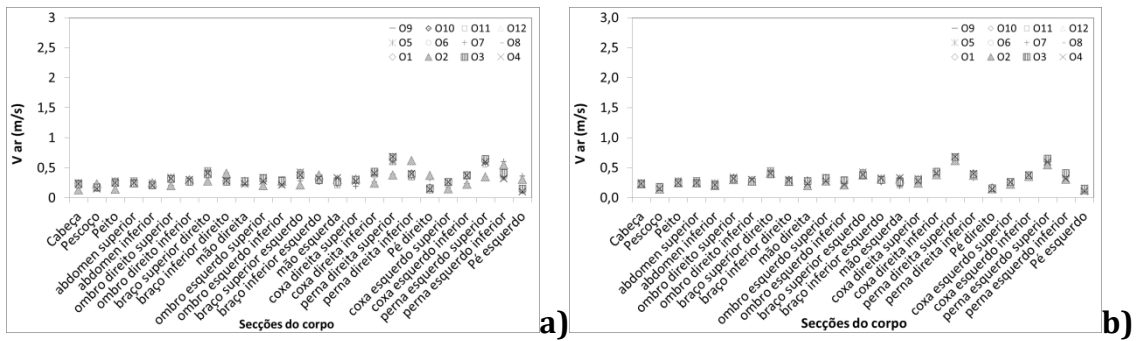


Figura 10 - Velocidade do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

Temperatura do ar

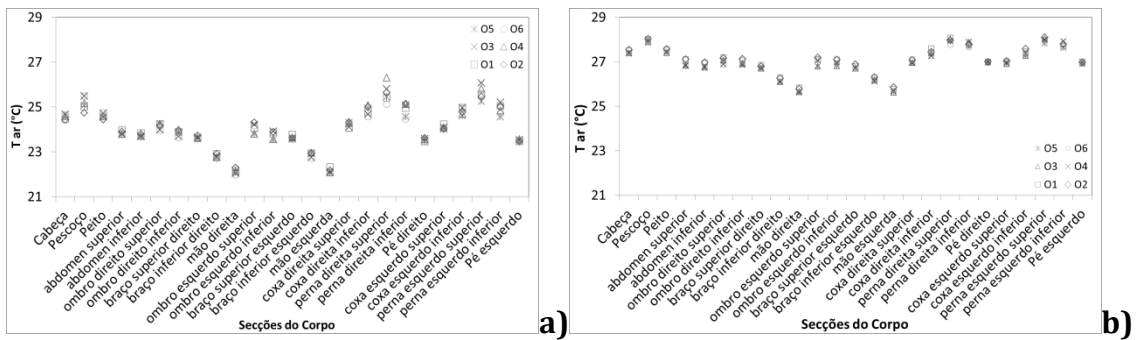


Figura 11 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

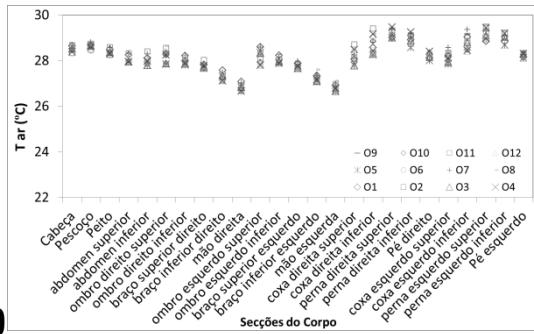
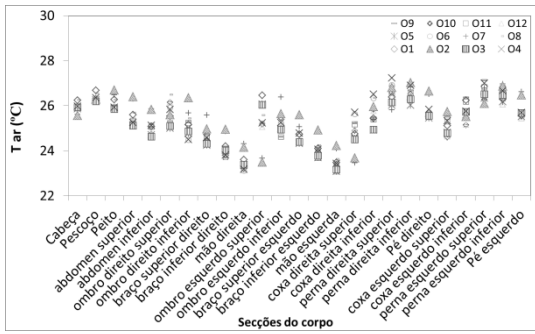


Figura 12 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

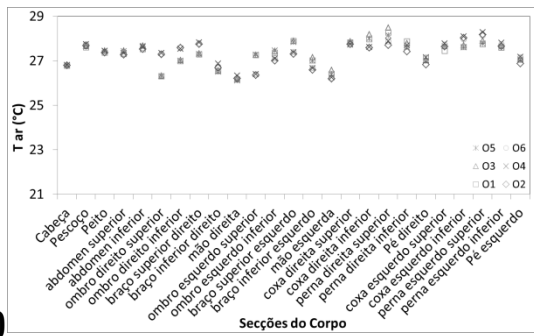
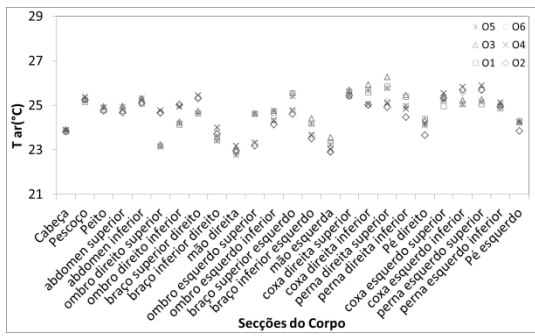


Figura 13 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

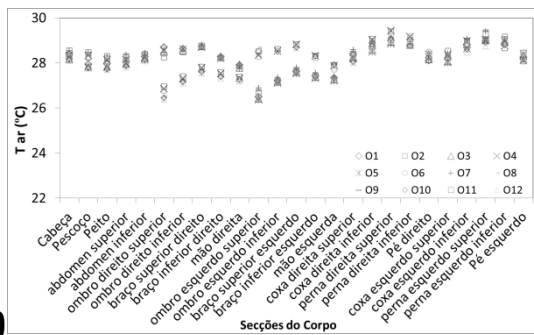
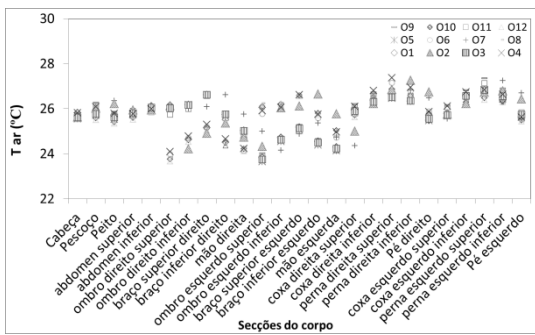


Figura 14 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

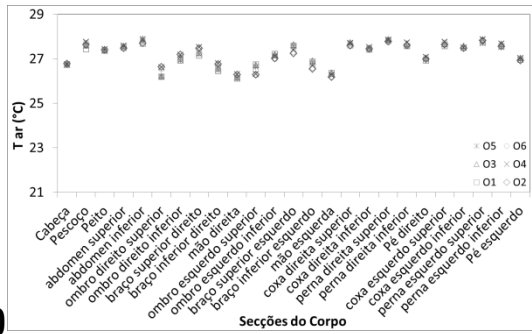
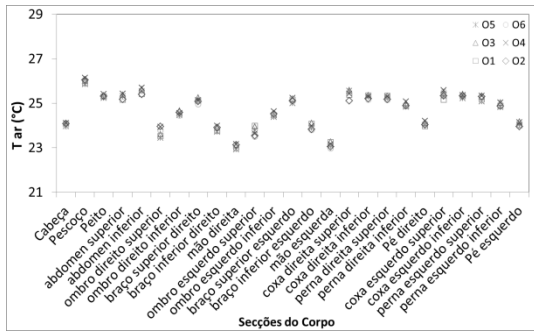


Figura 15 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

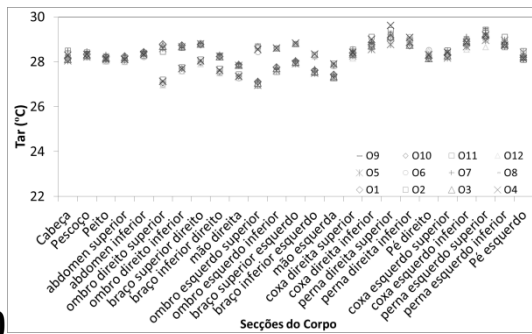
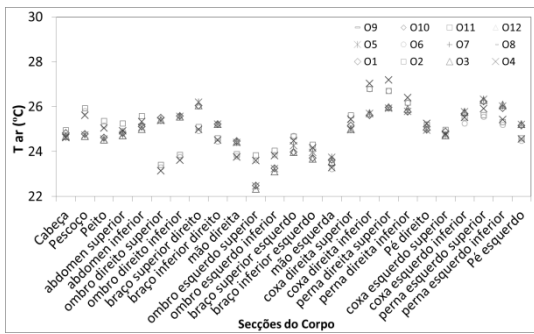


Figura 16 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

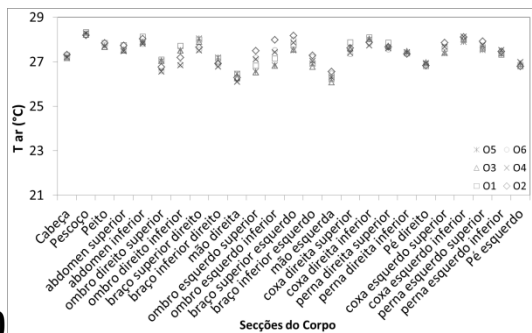
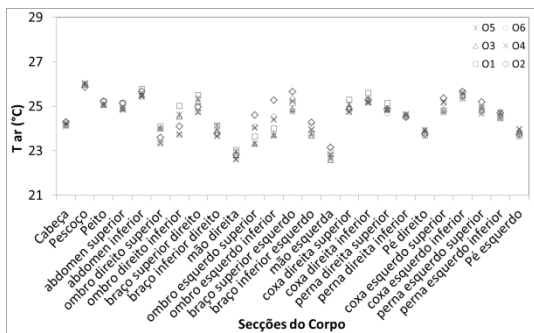


Figura 17 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

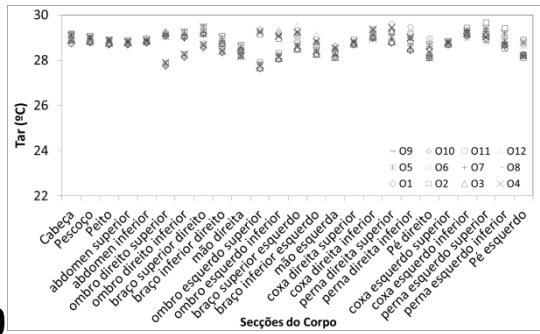
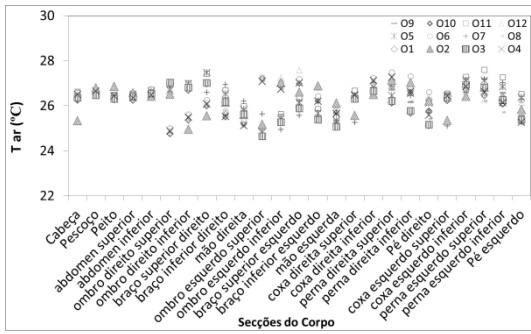


Figura 18 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

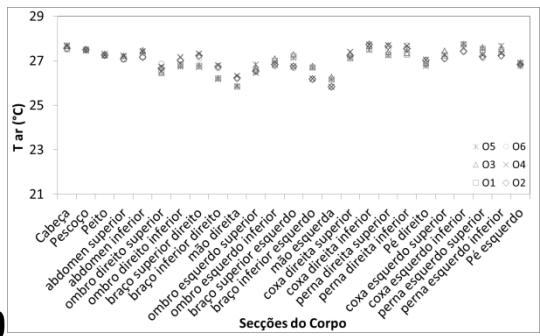
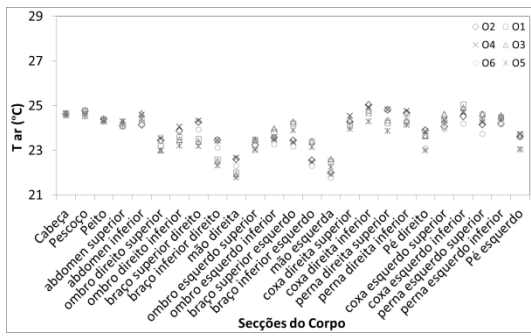


Figura 19 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

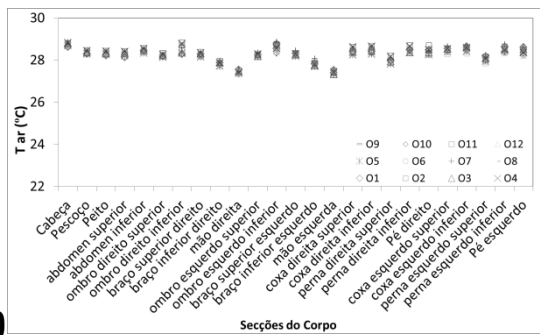
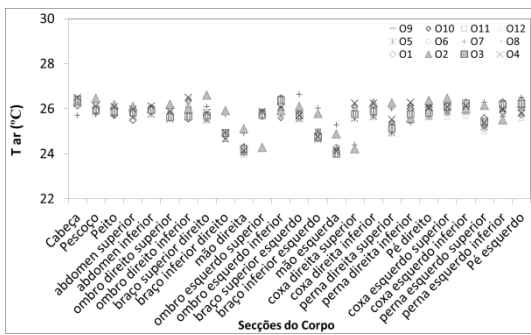


Figura 20 - Temperatura do ar, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

Temperatura média Radiante

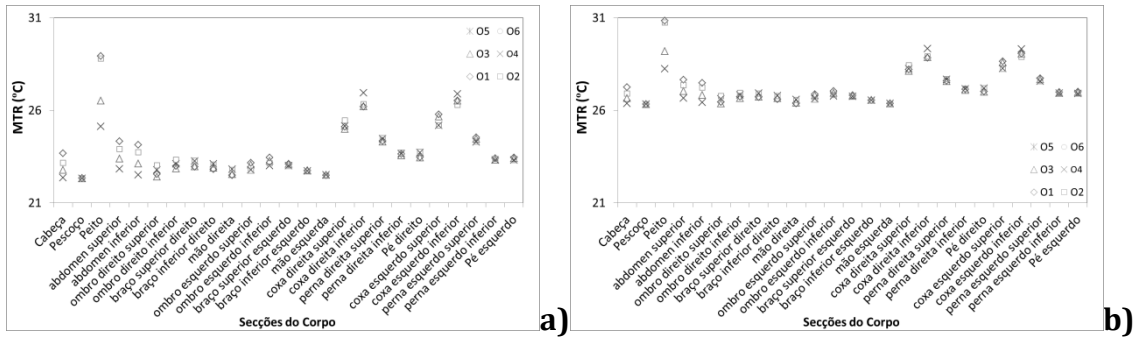


Figura 21 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

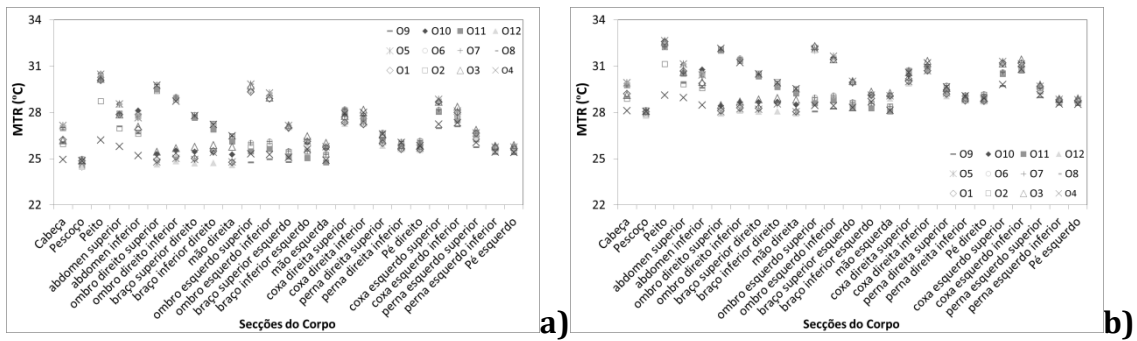


Figura 22 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

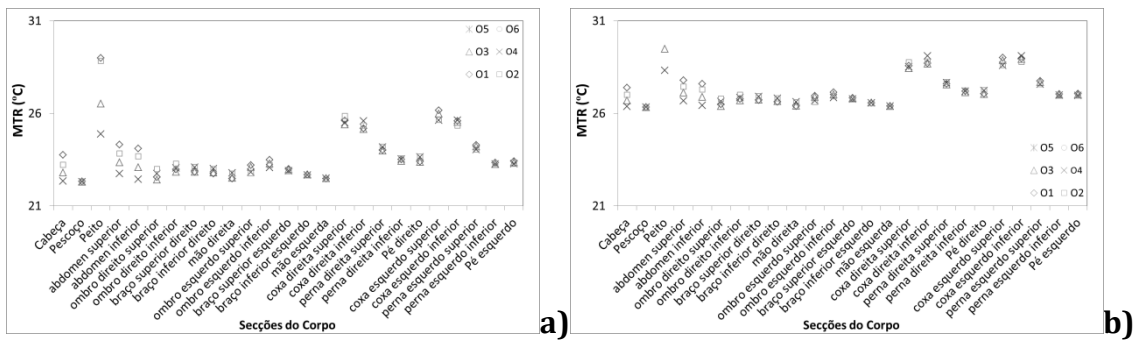


Figura 23 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

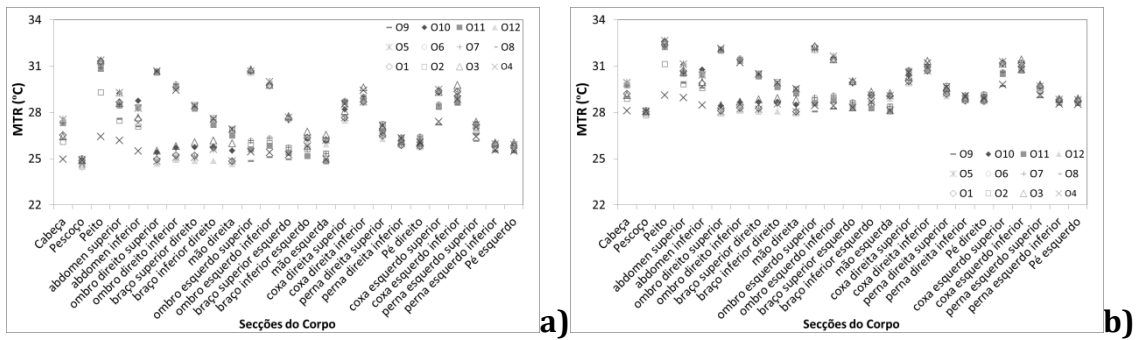


Figura 24 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

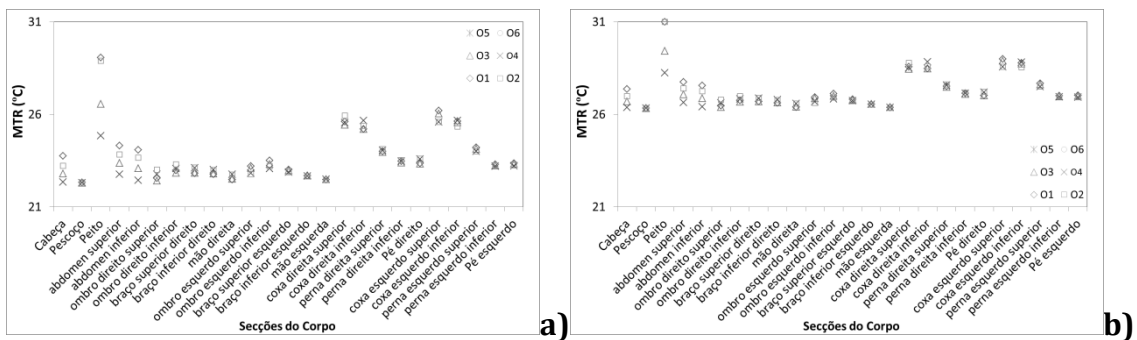


Figura 25 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

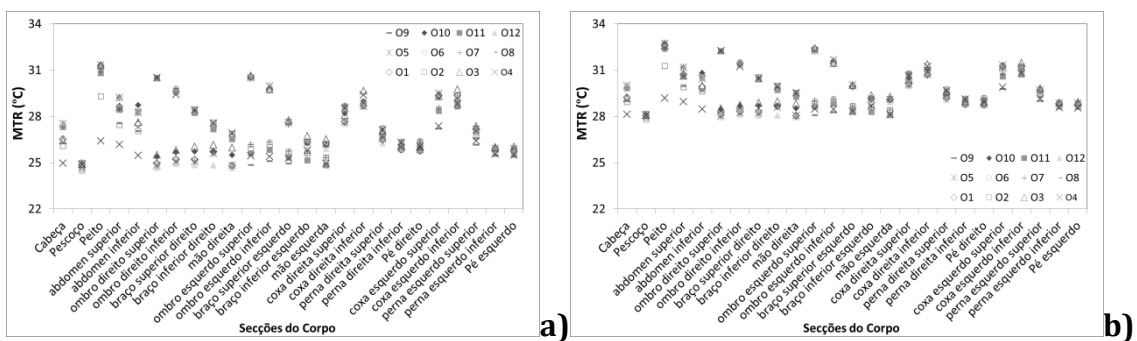


Figura 26 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

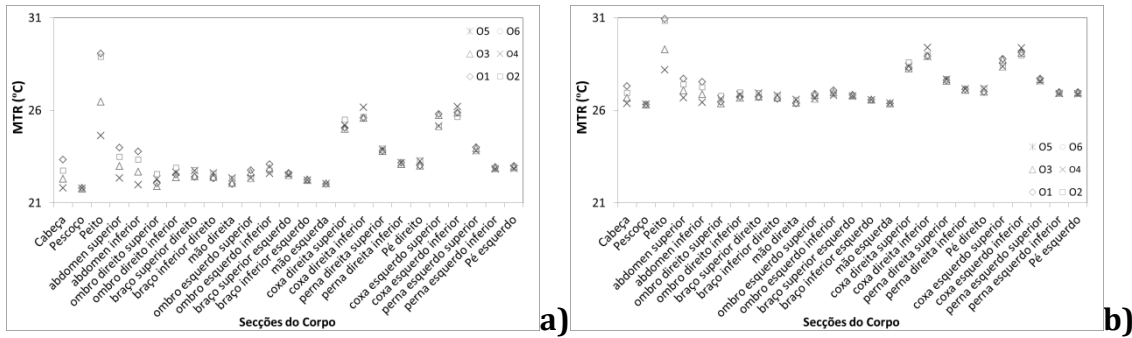


Figura 27 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

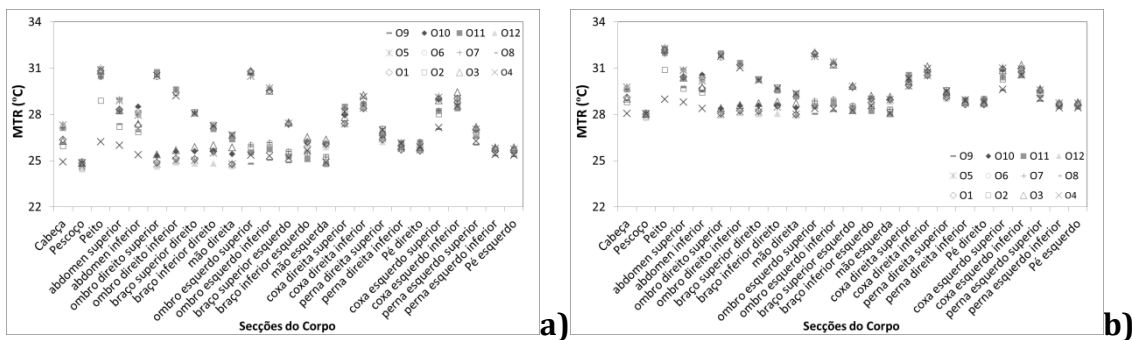


Figura 28 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

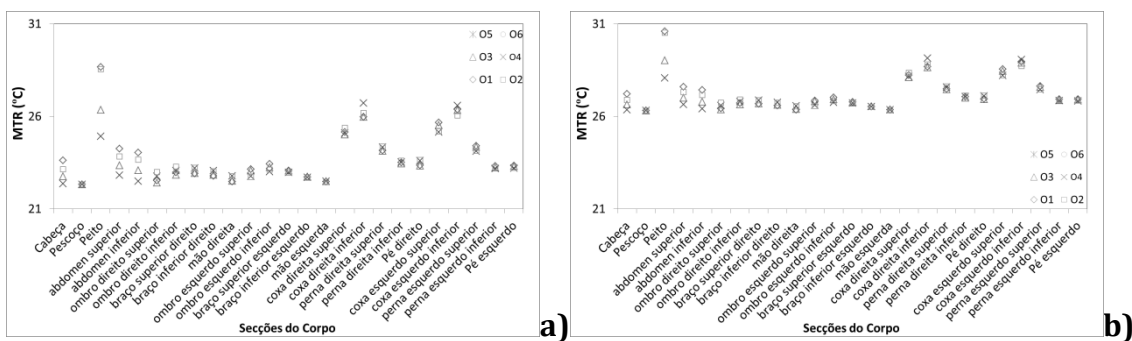


Figura 29 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

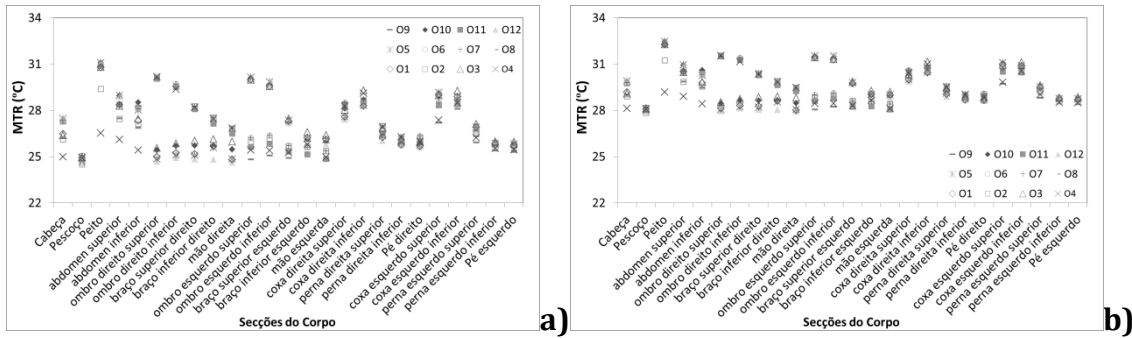


Figura 30 - Temperatura média radiante, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

Temperatura da pele

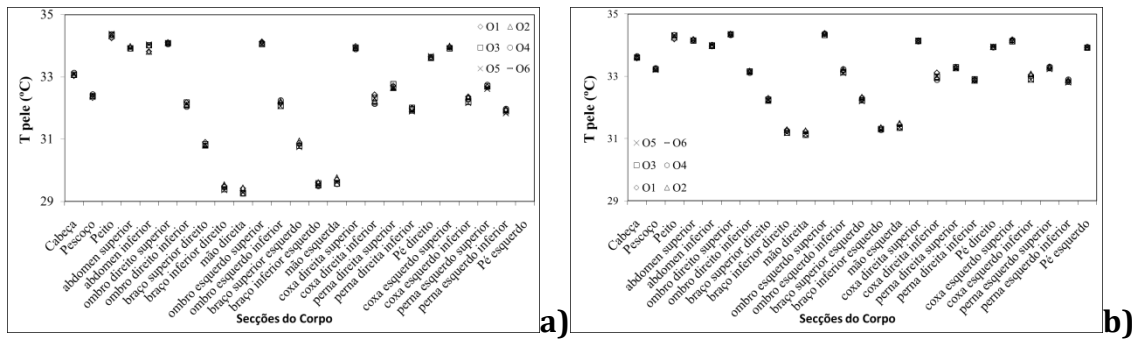


Figura 31 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

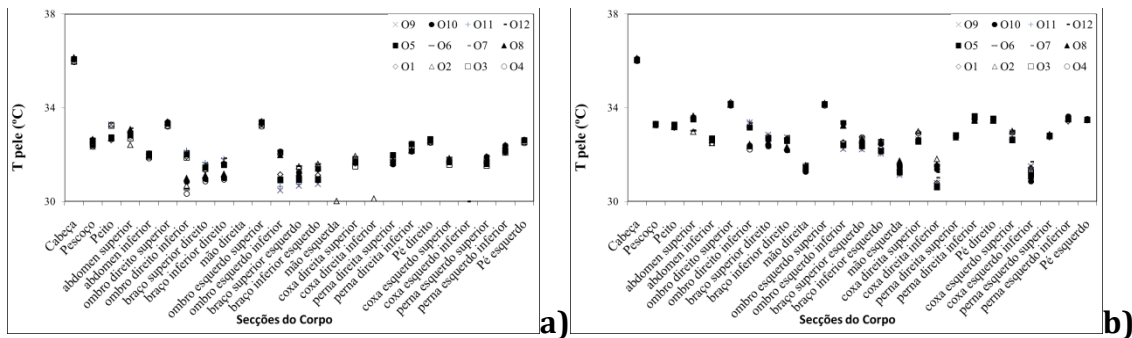


Figura 32 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

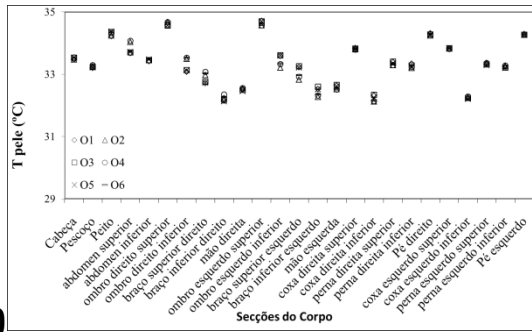
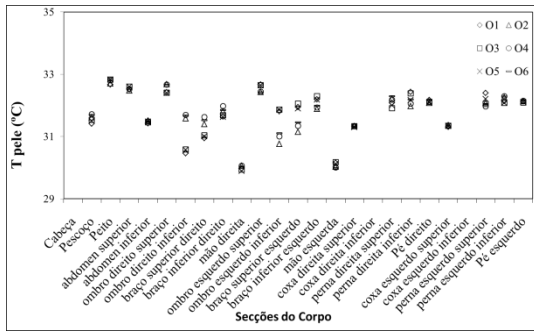


Figura 33 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

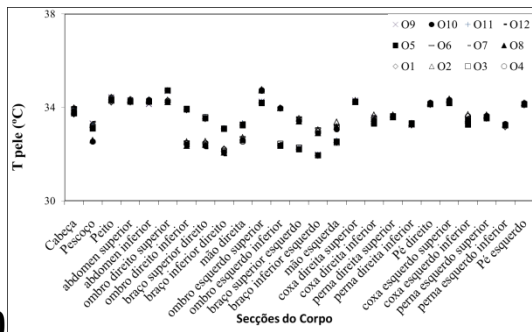
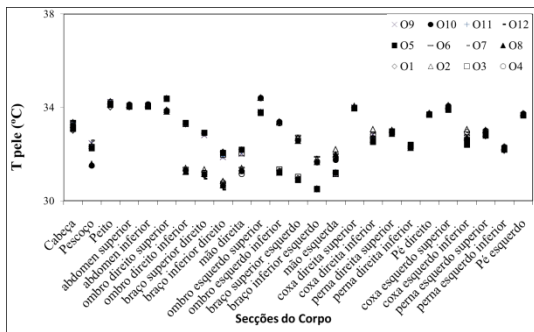


Figura 34 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

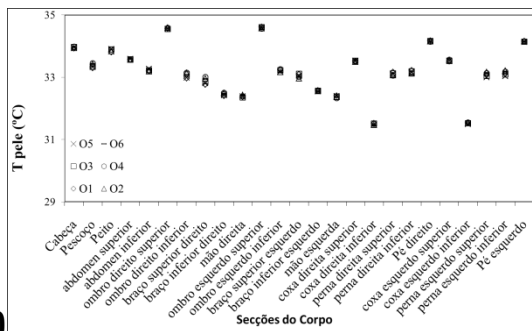
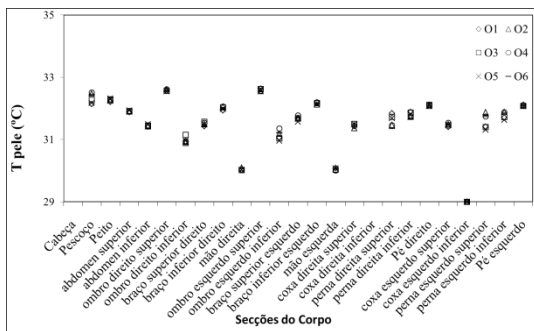


Figura 35 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

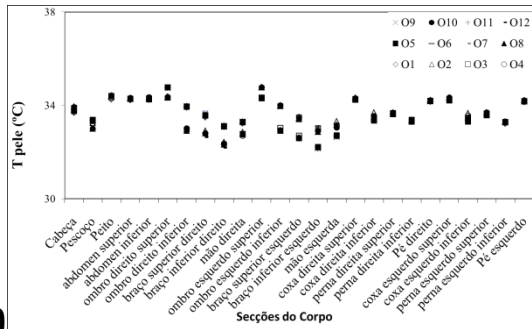
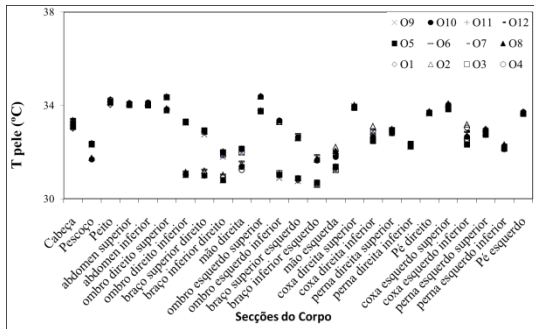


Figura 36 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

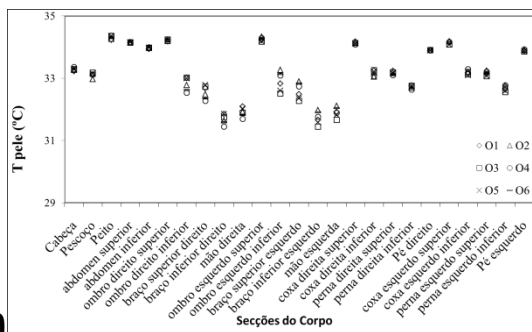
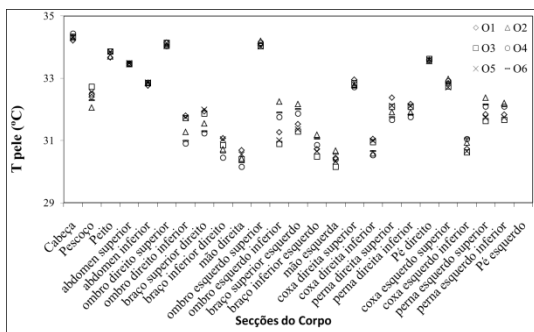


Figura 37 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

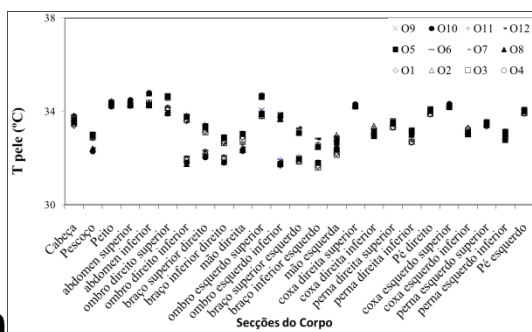
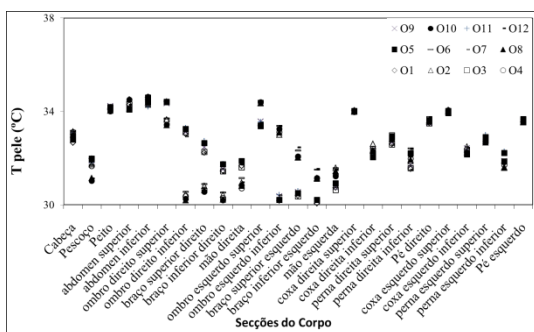


Figura 38 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

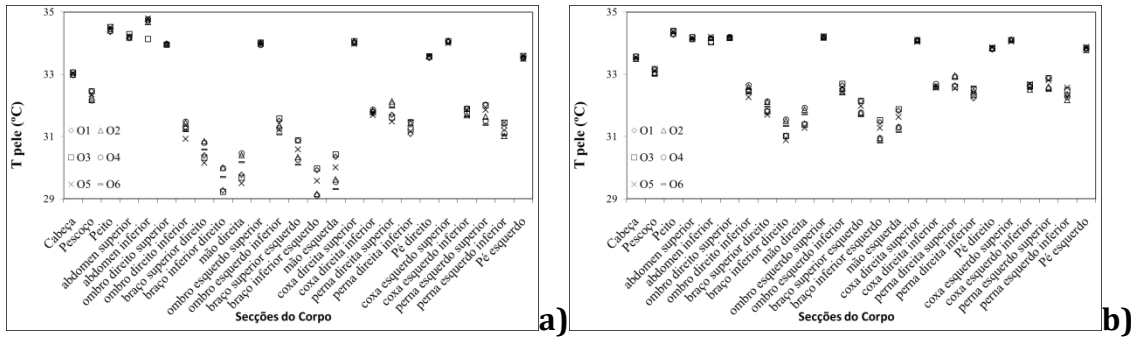


Figura 39 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

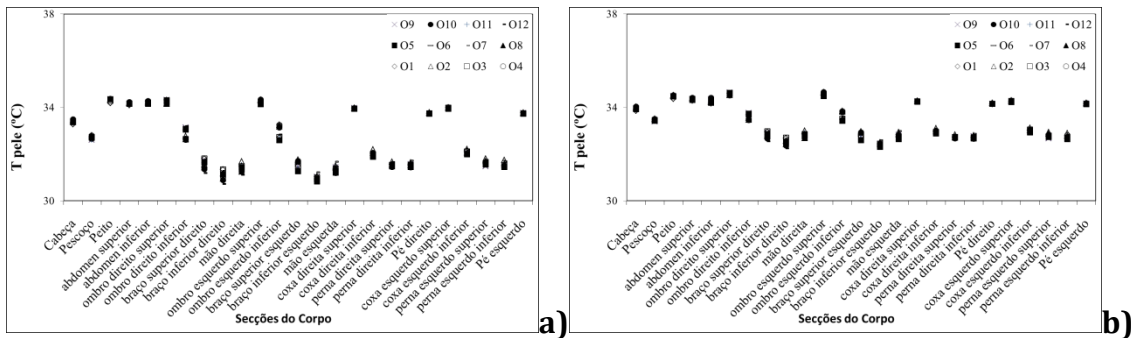


Figura 40 - Temperatura da pele, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

Temperatura do vestuário

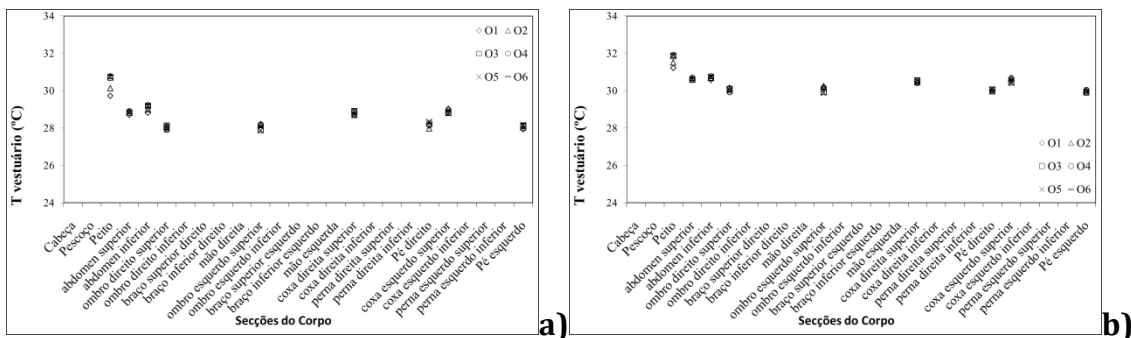


Figura 41 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

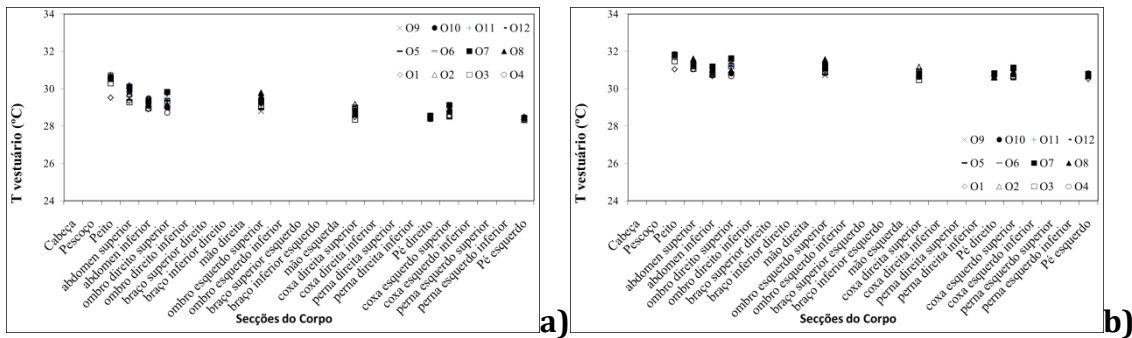


Figura 42 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação I, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

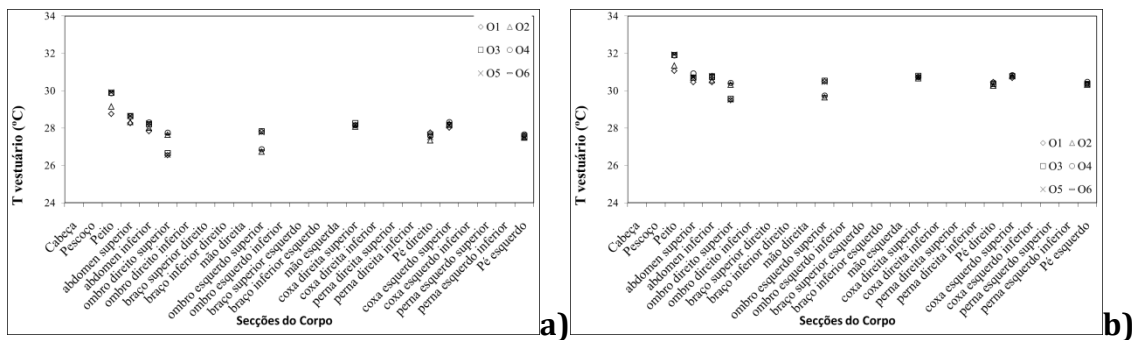


Figura 43 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

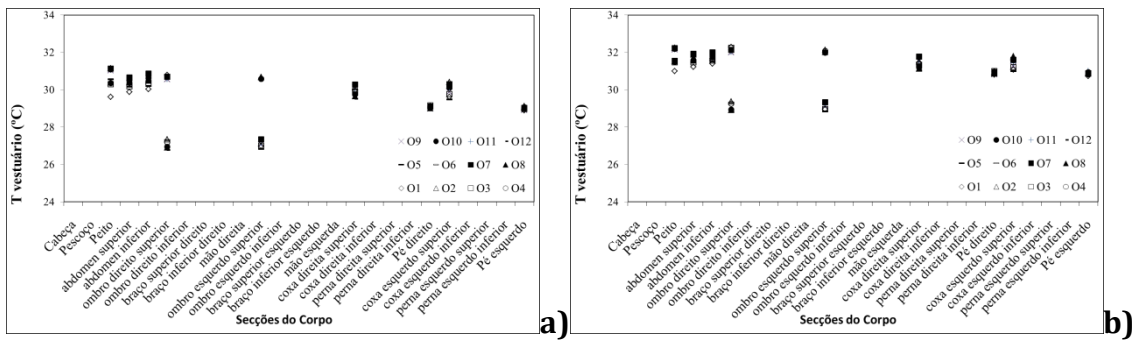


Figura 44 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação II, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

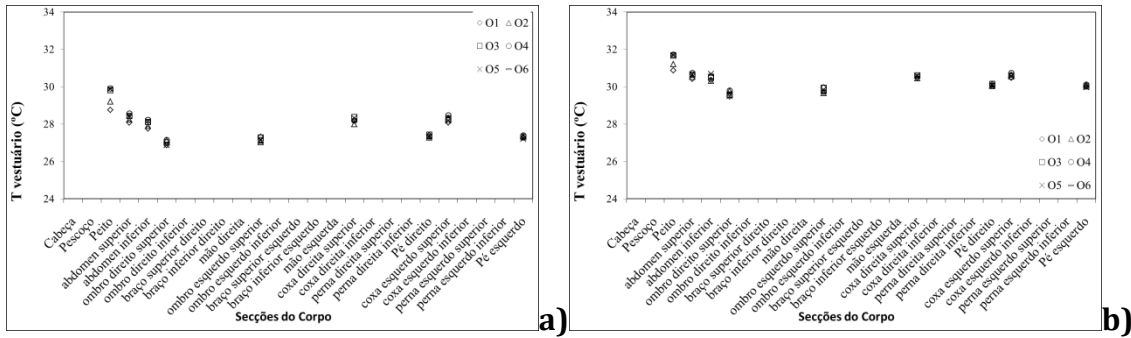


Figura 45 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

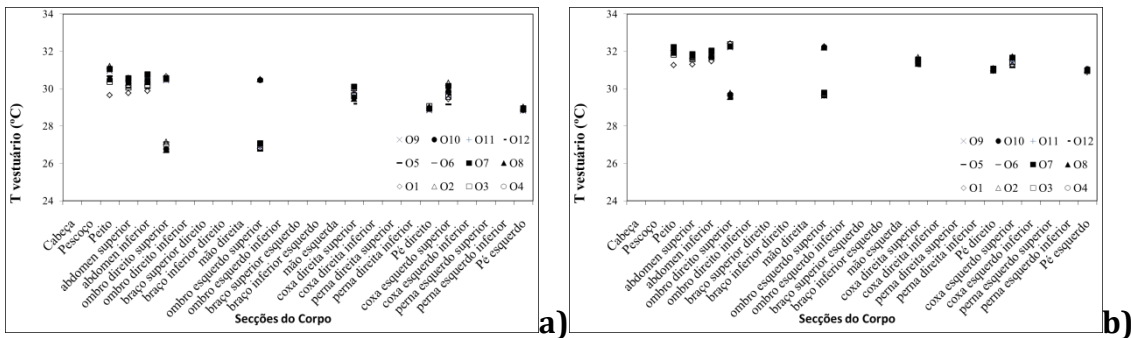


Figura 46 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação III, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

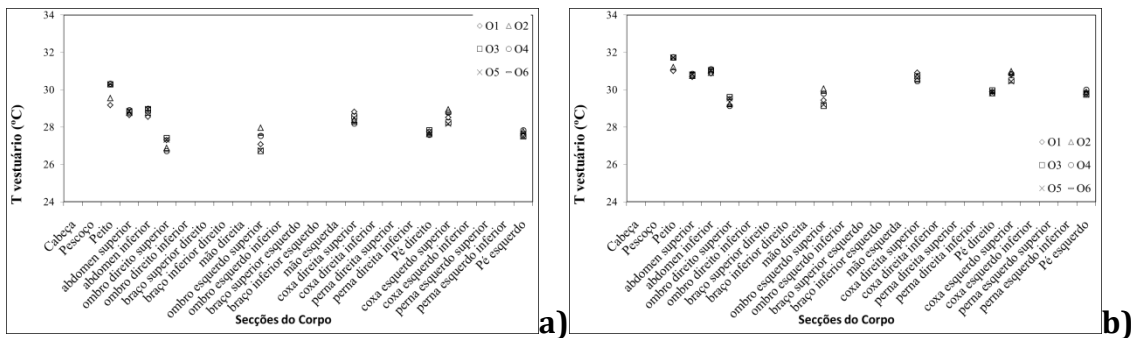


Figura 47 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

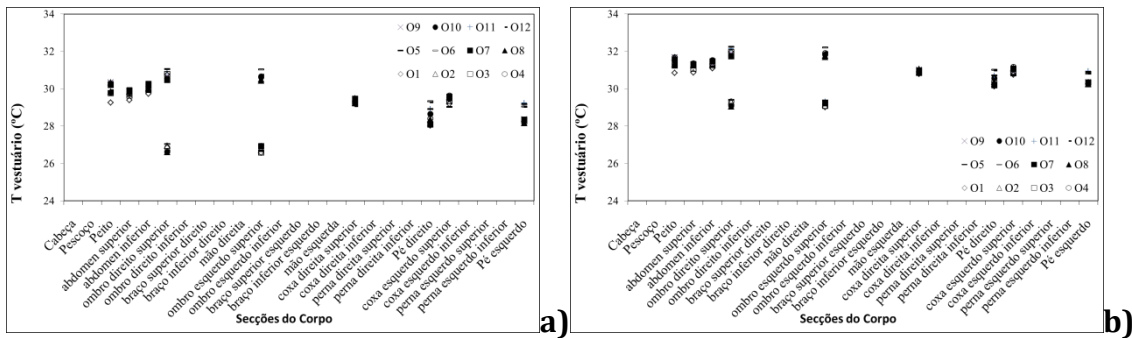


Figura 48 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação IV, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

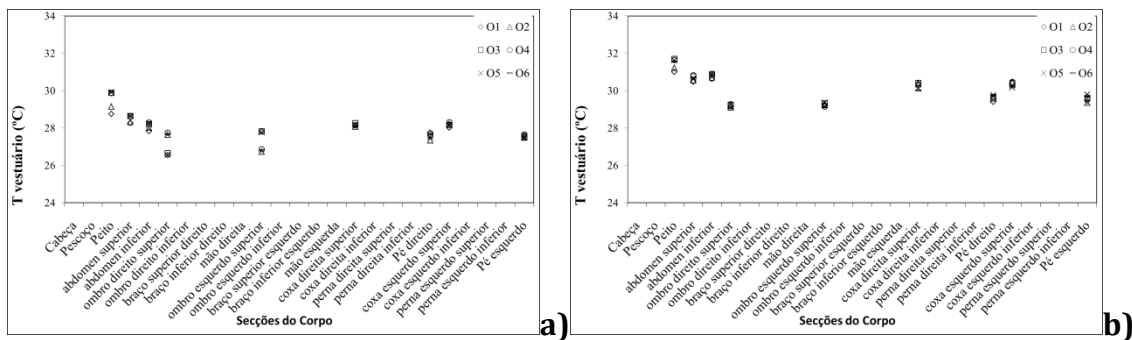


Figura 49 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 6 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

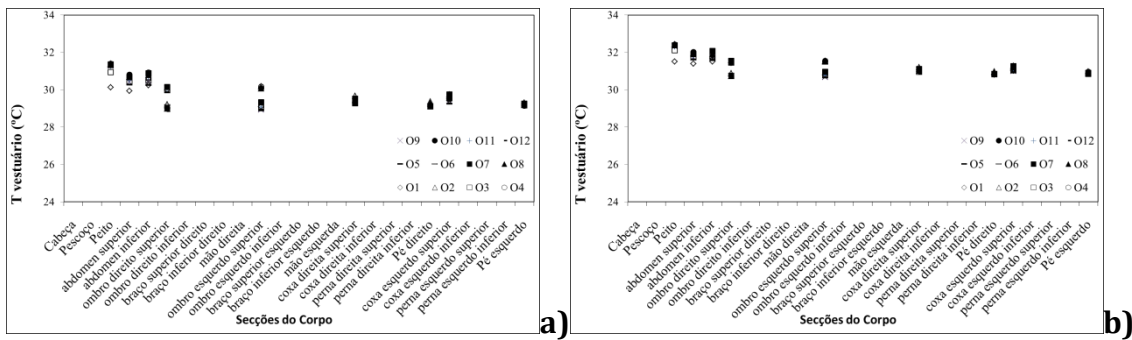


Figura 50 - Temperatura do vestuário, em redor das secções do corpo dos 12 ocupantes, na situação de ventilação personalizada, com o ar de entrada a a) 20°C e b) 24°C.

