



Universidade do Algarve

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**Avaliação das condições de conforto térmico em espaços
equipados com superfícies radiantes e ventilação utilizando as
energias renováveis**

Daniel Guerreiro Correia

Dissertação em Energias Renováveis e Gestão de Energia

Mestrado em Energias Renováveis e Gestão de Energia

Orientador: Prof. Doutor Eusébio Conceição

Faro, 2014



Universidade do Algarve

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**Avaliação das condições de conforto térmico em espaços
equipados com superfícies radiantes e ventilação utilizando as
energias renováveis**

Daniel Guerreiro Correia

Dissertação em Energias Renováveis e Gestão de Energia

Mestrado em Energias Renováveis e Gestão de Energia

Orientador: Prof. Doutor Eusébio Conceição

Faro, 2014

Avaliação das condições de conforto térmico em espaços equipados com superfícies radiantes e ventilação utilizando as energias renováveis

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito.

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

Daniel Guerreiro Correia

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 objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram em alcançar mais esta etapa, quer participando direta quer participando indiretamente.

Em especial ao meu orientador, professor Eusébio Conceição, expressos os meus sinceros agradecimentos pela valiosa e empolgante orientação, apoio e disponibilidade total e por todo o conhecimento disponibilizado.

A entidade ROLEAR, pelo apoio prestado no decurso dos ensaios experimentais.

Aos meus colegas Cristina Santiago pela disponibilidade e conhecimento transmitido nas simulações efetuadas, assim com a colega Juliana Revés pelo apoio e incentivo.

A todos os meus colegas de curso e não só que fizeram parte integrante deste objetivo de vida.

A minha esposa, pela dedicação e compreensão nos momentos mais difíceis.

Resumo

Com a realização deste trabalho pretendeu-se realizar um estudo de avaliação das condições de conforto térmico em espaços ocupados, com superfícies radiante e ventilação por jatos confluentes.

As superfícies radiantes desenvolvidas incorporam o sistema radiação através do chão radiante em período de Inverno e chão radiante no período de Verão.

Desta forma pretende-se, através de superfícies radiantes criar um conjunto de condições que proporcionam um ambiente térmico confortável, e agradável, dentro dos parâmetros ambientais pré-definidos, assegurando a boa qualidade do ar interior com valores baixos de risco de resfriamento.

Foram avaliados, o desempenho ao nível da qualidade do ar interior, o conforto térmico dos ocupantes, o desconforto térmico dos ocupantes (risco de resfriamento), em período de Inverno e de Verão, a que os ocupantes de um determinado espaço irão estar sujeitos e o índice ADI (Air Distribution Index).

Na componente experimental o estudo foi realizado através da câmara experimental existente na Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade do Algarve, sendo a simulação numérica baseada na utilização de dois softwares. O “Virtual Flow 3D” (utilizado na simulação do escoamento) e o “Human Thermal Comfort” (utilizado na avaliação do nível de conforto dos ocupantes). De forma a definir um refinamento superior junto as entradas de ar, e junto ao ocupantes, foi utilizada no “Air Flow 3D” uma malha não uniforme.

No estudo em causa, foram realizadas medições experimentais, sem ocupantes, de forma a validar a utilização dos softwares.

Palavras Chave: Conforto Térmico, Desconforto Térmico local, Qualidade do ar interior, Virtual Air Flow, Superfícies Radiantes.

Abstract

With this work we intended to carry out an evaluation study of the thermal comfort in occupied spaces with radiant surfaces and confluent jets ventilation.

Radiating surfaces developed incorporating the radiation through the underfloor heating system in the winter period and underfloor heating in the summer period.

In this way it is intended, through radiant surfaces to create a set of conditions that provide a comfortable and pleasant thermal environment within the pre-defined environmental parameters, ensuring good indoor air quality with low risk values of cooling.

We evaluated the performance level of indoor air quality, thermal comfort of the occupants, the occupants thermal discomfort (draught risk), in the winter and summer times, the occupants of a particular space will be subjected and the ADI index (Air Distribution index).

In the experimental component analysis was performed using the existing experimental chamber at the Faculty of Science and Technology of the "Universidade do Algarve", being a numerical simulation based on the use of two softwares. The "3D Virtual Flow" (used in the simulation of flow) and the "Human Thermal Comfort" (used in assessing the level of occupant comfort). In order to set an upper refinement with the vents and along the occupants was used in the "Air Flow 3D" non uniform mesh.

For the purposes of this study, experimental measurements were made, without occupancy, in order to validate the use of the softwares.

Keywords: Thermal Comfort, Local Thermal Discomfort, Indoor Air Quality, Virtual Air Flow, Radiant Surfaces.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento Geral	1
1.2	Objetivos	3
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Sistemas de superfícies radiantes e ventilação	4
2.1.1	Superfícies radiantes – Piso Radiante	4
2.1.2	Ventilação de jatos Confluentes	5
2.1.3	Sistema de aquecimento - Biomassa	5
2.1.1	Sistema de arrefecimento - Geotermia	6
2.2	Conforto térmico	6
2.3	Desconforto térmico local	7
2.3.1	Diferenças de temperatura na vertical	9
2.3.2	Temperatura do chão	9
2.3.3	Assimetria de temperatura radiante	9
2.4	Qualidade do ar interior	10
3	Metodologia	11
3.1	Softwares utilizados	11
3.1.1	Modelo Numérico de Simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	11
4	Casos de Estudo	15
4.1	Simulação numérica	15
4.1.1	Simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados	15
4.2	Validação Experimental	16
5	Estudo Comparativo	18
5.1	Situação I - Validação de resultados Experimental/Numéricos sem ocupantes	18
5.1.1	Análise da velocidade do ar	18
5.2.1	Análise do risco de resfriamento	20
5.3.1	Análise da intensidade de turbulência	22
5.4.1	Análise de Frequências Incomodativas	24
5.2	Situação II - Jatos confluentes com ocupação	32
5.2.1	Análise de conforto	35
5.3	Situação III - Jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Inverno	40
5.3.1	Análise de conforto	43

5.4	Situação IV - Jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Verão.....	49
5.4.1	Análise de conforto.....	52
6	Aplicação das energias renováveis.....	58
7	Análise de Resultados.....	59
8	Referências Bibliográficas.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema do corpo humano dividido em 25 elementos.....	12
Figura 4.1 – Câmara Virtual com jatos confluentes e ventilação a), Câmara Virtual com malha quadrada b) e Câmara Virtual com cadeira dos dois ocupantes c).....	15
Figura 4.2 – Modelo da Câmara Experimental.....	16
Figura 4.3 – Localização de pontos de medição no interior da Câmara Experimental.....	17
Figura 5.1 – Velocidade experimental do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	19
Figura 5.2 – Velocidade Numérica do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	19
Figura 5.3 – Comparação de resultado experimental Vs numérico para a velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	19
Figura 5.4 – Risco de Resfriamento Experimental no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	21
Figura 5.5 – Risco de Resfriamento Numérico no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	21
Figura 5.6 – Comparação de resultado experimental Vs numérico para risco de resfriamento do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	21
Figura 5.7 – Intensidade de Turbulência em % Experimental no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	23
Figura 5.8 – Intensidade de Turbulência em % Numérica no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	23
Figura 5.9 – Análise de resultados Experimental Vs Numérico para a Intensidade de turbulência em %, no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	23
Figura 5.10 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto A no plano $Z_1=0,07$.	25
Figura 5.11 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto B no plano $Z_1=0,07$.	25
Figura 5.12 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto C no plano $Z_1=0,07$.	25
Figura 5.13 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto D no plano $Z_1=0,07$.	25
Figura 5.14 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A no plano $Z_1=0,07$.	26
Figura 5.15 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto B no plano $Z_1=0,07$.	26
Figura 5.16 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto C no plano $Z_1=0,07$.	26
Figura 5.17 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto D no plano $Z_1=0,07$.	26
Figura 5.18 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto A no plano $Z_1=0,63$.	27
Figura 5.19 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto B no plano $Z_1=0,63$.	27
Figura 5.20 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto C no plano $Z_1=0,63$.	27

Figura 5.21 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto D no plano Z1=0,63.	27
Figura 5.22 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A no plano Z2=0,63.	28
Figura 5.23 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto B no plano Z2=0,63.	28
Figura 5.24 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto C no plano Z2=0,63.	28
Figura 5.25 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto D no plano Z2=0,63.	28
Figura 5.26 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto A no plano Z1=1,2.	29
Figura 5.27 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto B no plano Z1=1,2.	29
Figura 5.28 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto C no plano Z1=1,2.	29
Figura 5.29 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto D no plano Z1=1,2.	29
Figura 5.30 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A no plano Z3=1,2.	30
Figura 5.31 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto B no plano Z3=1,2.	30
Figura 5.32 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto C no plano Z3=1,2.	30
Figura 5.33 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto D no plano Z3=1,2.	30
Figura 5.34 – Representação da localização os pontos de medição onde ocorreram as frequências de maior intensidade energética	31
Figura 5.35 – Velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a Z=0.07 a), Z=0.63 b) e Z=1.2 c) acima do nível do chão.	33
Figura 5.36 – Temperatura do ar no plano horizontal XY localizado a Z=0.07 a), Z=0.63 b) e Z=1.2 c) acima do nível do chão.	33
Figura 5.37 – Intensidade de Turbulência no plano horizontal XY localizado a Z=0.07 a), Z=0.63 b) e Z=1.2 c) acima do nível do chão.	33
Figura 5.38 – Risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a Z=0.07 a), Z=0.63 b) e Z=1.2 c) acima do nível do chão.	34
Figura 5.39 – Concentração de CO2 localizado com dois ocupantes no plano Y=1,0 a) (ocupante da direita) e Y=1,7 b) (ocupante da esquerda).	34
Figura 5.40 – Velocidade do ar, calculada numericamente nas 25 do corpo humano de dois ocupantes.	35
Figura 5.41 – Temperatura do ar, calculada numericamente nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.	36
Figura 5.42 – Temperatura de superfície da pele do corpo, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.	36
Figura 5.43 – Temperatura Média Radiante, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.	37
Figura 5.44 – Intensidade de Turbulência do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois	

ocupantes.....	37
Figura 5.45 – Risco de resfriamento, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	38
Figura 5.46 – Velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.	41
Figura 5.47 – Temperatura do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.	41
Figura 5.48 – Temperatura do ar no plano horizontal XZ localizado a $Y=1,0$ a), $Y=1,7$ b).....	42
Figura 5.49 – Intensidade de Turbulência no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	42
Figura 5.50 – Risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.	42
Figura 5.51 – Concentração de CO ₂ localizado com dois ocupantes no plano $Y=1,0$ a) e $Y=1,7$ b).....	43
Figura 5.52 – Velocidade do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	44
Figura 5.53 – Temperatura do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	44
Figura 5.54 – Temperatura de superfície da pele do corpo, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	45
Figura 5.55 – Temperatura Média Radiante, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	45
Figura 5.56 – Intensidade de Turbulência do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	46
Figura 5.57 – Risco de resfriamento, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	46
Figura 5.58 – Velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.	50
Figura 5.59 – Temperatura do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.	50
Figura 5.60 – Temperatura do ar no plano horizontal XZ localizado a $Y=1,0$ a), $Y=1,7$ b).....	51
Figura 5.61 – Intensidade de Turbulência no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.....	51
Figura 5.62 – Risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.	51
Figura 5.63 – Concentração de CO ₂ localizado com dois ocupantes no plano $Y=1,0$ a) e $Y=1,7$ b).....	52
Figura 5.64 – Velocidade do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	53
Figura 5.65 – Temperatura do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	53
Figura 5.66 – Temperatura de superfície da pele do corpo, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	54
Figura 5.67 – Temperatura Média Radiante, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	54
Figura 5.68 – Intensidade de Turbulência do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	55
Figura 5.69 – Risco de resfriamento, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.....	55

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Categorias da sensação térmica, segundo ISO 7730 (2005).	7
Tabela 2.2 – Categorias do desconforto local, propostas pela ISO 7730 (2005).	8
Tabela 5.1 – Accuracy de resultado experimental Vs numérico para a velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a Z=0.07, Z=0.63 e Z=1.2.	19
Tabela 5.2 – Accuracy de resultado experimental Vs numérico para o risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a Z=0.07, Z=0.63 e Z=1.2.	21
Tabela 5.3 – Accuracy de resultado experimental Vs numérico para a intensidade de turbulência no plano horizontal XY localizado a Z=0.07, Z=0.63 e Z=1.2.	23
Tabela 5.4 – Tabela resumo das 20 frequências de maior intensidade energética adimensional no período de 0.3 a 0.5 Hz.	31
Tabela 5.5 – ADI Jatos confluentes com ocupantes.....	39
Tabela 5.6 – ADI Jatos confluentes com ocupantes e com chão radiante aquecido / Inverno	48
Tabela 5.7 – Tabela 5.6 – ADI Jatos confluentes com ocupantes e com chão radiante aquecido / Verão	57
Tabela 7.1 – Resumo ADI Jatos confluentes com ocupantes e com chão radiante aquecido Inverno e Verão	60

1 Introdução

1.1 Enquadramento Geral

Face aos custos de energia atualmente impostos pela conjuntura económica, assim como pelas necessidades energéticas da população em geral, existe atualmente uma maior consciencialização relativa à eficiência energética dos espaços onde as pessoas predominantemente habitam ou desenvolvem serviços. O conforto térmico associado a qualidade do ar interior encontram-se amplamente interligados, promovendo uma mais valia para o nível de vida dos seus utilizadores.

Atendendo ao desenvolvimento socio e económico das últimas décadas, e ao tipo de vida da população em geral, verifica-se uma necessidade de busca de conforto térmico muito acentuada, durante todo o ano. Face a elevada amplitude térmica entre o Verão e Inverno, existem necessidades térmicas que devem ser suprimidas tanto ao nível de aquecimento como de arrefecimento. Contudo face aos dispêndios de energia consumida, em equipamento de produção de aquecimento/arrefecimento, é cada vez mais preciosa a busca de novas soluções que visem o alcance da eficiência energética, e da qualidade do ar interior.

Já tendo sido realizados diversos estudos sobre os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), verifica-se que estes são os grandes consumidores de energia. Foi estimado que nos países desenvolvidos, a utilização de energia para efeitos de aquecimento, ventilação e ar condicionado, representa muitas vezes mais de metade do total da energia primária usada. A utilização crescente de sistema de equipamento de AVAC, promoveu o maior consumo de energia, causando a crise mundial de energia e ambiente.

A poupança de energia, a melhoria da eficiência energética, e o uso de fontes de energia renovável são instrumentos chave para diminuir a crise da energia (Perez-Lombard, 2011).

Associado a eficiente utilização de fontes de energia renovável, nos últimos anos, arquitetos e engenheiros na Europa, estão cada vez mais a utilizar as superfícies radiantes como forma de climatizar os espaços. O sistema de piso/teto radiante realizados através da energia da água é uma forma mais eficiente comparativamente a um sistema de ar, devido à maior capacidade de absorção da água (Olesen, 2008).

O elevado nível de transferência de calor radiante entre uma superfície, os seus ocupantes e as superfícies circundantes, faz com que seja possível reduzir a temperatura do ar ambiente, na estação

de aquecimento e aumentar a temperatura na estação de arrefecimento, mantendo o nível requerido de temperatura operativa (Causone, 2010).

Estando reunidas as condições ideais de conforto térmico, existe uma maior probabilidade de um individuo sentir-se na sua zona de conforto (ISO 7730, 2005).

Contudo associado ao conforto térmico, está qualidade do ar interior, que no caso de sistemas de ar condicionado é propício à criação de ambientes poluídos e dissipadores de doenças, contrariamente as superfícies radiantes, não podem ser a causa de transmissão de doenças (Miriel, 2002).

De acordo com Fanger (2001), está comprovado que a qualidade do ar interior tem impacto na produtividade dos ocupantes. O estudo desenvolvido em escritório, sob condições controladas, compara a qualidade do ar interior com a produtividade dos indivíduos, sendo que os indivíduos que permanecem em locais de melhor qualidade do ar, a sua produtividade é 6,5% superior.

A qualidade do ar encontra-se legislada em Portugal pelo D.L. nº 79/2006 de 4 de Abril.

Como forma de melhorar a qualidade do ar interior, a qualidade de vida das pessoas e a saúde, assim como a aprendizagem, existe a necessidade da renovação de ar ambiente, tendo sido desenvolvido um novo sistema de ar, baseado no sistema de jatos confluentes, fornecendo ar em alta velocidade (Karimipannah, 2007).

Neste contexto revela-se importante a monitorização da aplicação da ventilação em espaços climatizáveis, com uma elevada eficiência na remoção de poluentes proporcionando um nível de conforto térmico aceitável, associado um consumo energético reduzido de forma a poderem ser implementados e utilizados sem impedimentos relativamente aos custos.

1.2 Objetivos

Face ao conceito atual de conforto térmico, existe a necessidade de tornar as edificações habitáveis, energeticamente mais eficientes, sendo através da implementação de medidas que visem uma eficiente utilização da energia, como sendo através da utilização de fontes de energias renováveis. O consumo de energia nos sistemas de aquecimento ou de arrefecimento, são uma forte percentagem do consumo total de um edifício.

Neste sentido é importante desenvolver soluções que permitam racionalizar o consumo de energia, promover novos sistemas sem comprometer o conforto térmico e a qualidade do ar interior, exigido pelos seus ocupantes.

Desta forma com este estudo pretende-se atingir-se os seguintes objetivos:

1. Avaliar o nível de conforto térmico e desconforto térmico local (risco de resfriamento) e a qualidade do ar numa sala em condições de temperatura ambiente a 25°C.
2. Avaliar o nível de conforto térmico e desconforto térmico local (risco de resfriamento) e a qualidade do ar numa sala com chão radiante em período de Inverno.
3. Avaliar o nível de conforto térmico e desconforto térmico local (risco de resfriamento) e a qualidade do ar numa sala com chão radiante em período de Inverno.
4. Adaptar e utilizar os programas de simulação numérica através dos seguintes softwares:
 - ✓ “Human Thermal Comfort” através de cálculo numérico, pretende-se avaliar o campo de temperatura no corpo e no vestuário, assim como os índices de conforto térmico dos ocupantes da sala;
 - ✓ “Virtual Air Flow 3D” irá calcular a temperatura e velocidade do ar em torno dos ocupantes, concentração de dióxido de carbono existente na câmara e o risco de resfriamento dos ocupantes;

O trabalho será realizado na sua maioria de através da simulação numérica, tendo ensaios experimentais como forma de validação.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica relativamente aos sistemas de superfícies radiantes, a sua aplicação a energias renováveis, ao sistema de ventilação por jatos confluentes e a sua conjugação para efeitos de avaliação dos níveis de conforto térmico, desconforto térmico local e qualidade do ar interior.

2.1 Sistemas de superfícies radiantes e ventilação

Com o objetivo de melhorar o conforto térmico e a qualidade do ar interior dos utentes, associado a eficiente utilização do consumo de energia, serão abordados neste trabalho os seguintes temas:

- ✓ Superfícies Radiantes – Piso Radiante;
- ✓ Sistema de ventilação de jatos confluentes;
- ✓ Sistema de aquecimento – Biomassa
- ✓ Sistema de arrefecimento - Geotermia

2.1.1 Superfícies radiantes – Piso Radiante

O sistema de superfície radiante, através do aquecimento de piso radiante em condições de inverno, permite a diminuição da humidade relativa do ar e aquecimento da temperatura ambiente através de fenómenos radiativos.

A aplicação deste sistema associado ao aquecimento da água com coletores solares pode ser especialmente eficiente relativamente ao consumo de energia (Conceição, 2006).

Em relação a outros sistemas radiantes, o chão radiante devido a disposição das suas tubagens no espaço, apresenta um fator de forma superior com os ocupantes, promovendo um maior nível de conforto térmico, com a temperatura de superfície na época de calor superior e na época de frio inferior. Dada a disposição do piso radiante, permite fornecer as condições térmicas ideais, de forma homogénea, reduzindo as zonas com diferenças de temperatura vertical e assimetria da temperatura radiante dadas as trocas de energia com o meio envolvente por radiação e por convecção.

As transferências de calor entre as superfícies radiantes e os seus ocupantes, permitem no período de Inverno aumentar a temperatura ambiente, indo de encontro com as necessidades dos ocupantes. Em

Período de Verão o arrefecimento do chão radiante irá provocar uma diminuição da temperatura ambiente e um nível de conforto superior.

Existem diversos estudos de trocas de calor radiante entre o corpo humano e as superfícies envolventes, nos últimos anos, considerando diferentes tipos de espaços e situações, realizados por exemplo, por (Kim, 2001) e (Kim, 2005). O estudo da performance, conforto térmico e consumo de energia deste sistema de ventilação, pode ser analisado, por exemplo, em (Miriél, 2002).

2.1.2 Ventilação de jatos Confluentes

Karimipannah et al (2007) apresenta um novo sistema de ventilação designado por ventilação de jatos confluentes, que está neste momento a ser desenvolvido em ambientes mais frios no norte da Europa, mais propriamente na Suécia.

O sistema de jatos confluentes é constituído por uma conduta de bicos circulares terminando a uma determinada altura do chão. Os jatos de ar fornecidos a alta velocidade para as paredes e cantos, em comparação com outros dispositivos de ventilação, de até 12m/s. A elevada velocidade produz uma zona de ar limpo na parte inferior da zona ocupada, permitindo a renovação de ar desejável para a qualidade de ar interior. Este método tem algumas semelhanças com a filosofia da ventilação por jatos de colisão, em que o ar é projetado para o chão, por jatos a alta velocidade. Estudos deste sistema de ventilação são, por exemplo, Chen et al (2012) e Chen et al (2013).

Utilizando fenómenos convectivos, o sistema não é dispendioso, o que permite ser utilizado em condições de Verão e Inverno.

2.1.3 Sistema de aquecimento - Biomassa

Sendo a biomassa uma fonte renovável de produção de energia, para sociedades que não dispõem de combustíveis fósseis podem constituir uma prioridade, dado a sua utilidade na produção de eletricidade ou calor.

Atualmente existem diversos tipos de caldeiras, sendo que se podem classificar pelo modo de utilização, tipo de fluido gerado, combustível utilizado e conceção do equipamento. As caldeiras de Biomassa utilizadas para aquecimento residencial podem ser a gasóleo, gás (natural/propano) ou pellets.

As caldeiras a gás de condensação apresentam valores de eficiência superiores por utilizar a tecnologia de condensação, funcionando assim a temperaturas mais baixas, sendo uma boa solução para o aquecimento central.

A tecnologia de condensação permite o aproveitamento da energia dos gases de combustão, devido ao arrefecimento destes ao passar na água do circuito, recuperando assim energia que poderá ser reaproveitada. Face a este reaproveitamento de energia, é possível aumentar o seu rendimento.

2.1.1 Sistema de arrefecimento - Geotermia

O sistema de geotermia usualmente aproveita o calor do solo como fonte de calor por meio de tubos enterrados a profundidades diferentes. Nestes tubos circula um fluido que aquece e percorre o circuito até à bomba de calor. Através de uma serpentina, circula um líquido de refrigeração, que dissipa a sua energia através de um radiador.

O sistema de arrefecimento através de geotermia entende-se como sendo um dispositivo que permite realizar a diminuição da temperatura interior, com poupança de energia, ideal para efeitos de arrefecimento em período de Verão.

2.2 Conforto térmico

Segundo as normas ASRAE 55-1981 e ISO 7730 o conceito de conforto térmico é definido como sendo “o estado de espírito em que o individuo expressa satisfação em relação ao ambiente térmico”. Desta forma o conceito de conforto térmico reverte-se de uma grande subjetividade, dependendo de pessoa para pessoa, e estando associada a um conjunto de grandezas, que fisicamente caracterizam um ambiente. A criação de condições de conforto podem acontecer naturalmente ou podem necessitar de um sistema de climatização, para que tal se verifique.

O equilíbrio térmico tem influência na sensação do conforto térmico que um individuo sente. Este equilíbrio depende de dois fatores pessoais (a resistência térmica do vestuário e o nível de atividade) e de quatro fatores ambientais (a temperatura media do ar, a temperatura media radiante, a velocidade do ar e a humidade relativa).

O equilíbrio térmico de um individuo é descrito pela equação de conforto térmico, pelo índice PMV (Predicted Mean Vote) ou pelo PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). No entanto, esta não é a

única condição de conforto térmico, porque podem existir situações de desconforto local causadas pela assimetria da radiação, por uma corrente de ar, pelo contacto com o chão demasiado quente ou frio e por gradientes de temperatura existentes na vertical, além de outros fatores, como e referido por exemplo em ASHRAE Handbook (1989). As pessoas quando se sentem localmente desconfortáveis, requerem normalmente níveis de temperatura excessivos para anular este efeito. Segundo Olesen (1985b), este desconforto local irá influenciar o aumento do consumo energético por parte dos sistemas de climatização.

Devido à variação biológica entre as pessoas, é impossível que todos os ocupantes de um determinado ambiente se sintam confortáveis termicamente, contudo as condições de conforto a criar são sempre para um grupo, ou seja, condições para as quais existe uma maior percentagem de pessoas satisfeitas. Segundo a ISSO 7730 os ambientes térmicos são classificados em três categorias de qualidade, tabela 3.1, e tem como vantagem o fato de selecionar o tipo de ambiente térmico de acordo com as exigências impostas:

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

Tabela 2.1 – Categorias da sensação térmica, segundo ISO 7730 (2005).

2.3 Desconforto térmico local

Desconforto térmico local, este relacionado com a insatisfação que um individuo sente numa determinada zona do corpo, provocado por parâmetros ambientais que não são admissíveis para o conforto.

Geralmente pessoas com uma atividade física moderada, são mais suscetíveis ao desconforto térmico local, do que as pessoas com níveis de atividade mais elevados (Conceição, 1996).

Os parâmetros que proporcionam a sensação de desconforto são nomeadamente, a velocidade do ar, diferença de temperatura do ar na vertical, temperatura do chão ou pela assimetria da temperatura radiante (Conceição, 2013)

Num sistema de ventilação, o escoamento turbulento da movimentação do ar, gera por vezes zonas de arrefecimento local no corpo humano, designado de resfriamento. O resfriamento é mais frequente em espaços ventilados pelo homem, sendo que os ocupantes têm tendência a aumentar a temperatura para evitar este tipo de situação, elevando os consumos energéticos. A parte mais sensível a este tipo de fenómeno é a cabeça, seguido das zonas do corpo que não estão cobertas. A forma de quantificação do risco de resfriamento em espaços ventilados é dado a partir da percentagem de pessoas insatisfeitas devido a resfriamento locais (Conceição, 1996).

O Índice de resfriamento segundo a ISO 7730, encontra-se definido em três categorias, de acordo com a tabela 3.2

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

Tabela 2.2 – Categorias do desconforto local, propostas pela ISO 7730 (2005).

Segundo a normalização ISO 7730, o Risco de resfriamento pode ser calculado pela equação 2.1.

$$DR = 3.143(34 - T_{ar})(V_{ar} - 0.05)^{0.6223} + 0.3696V_{ar}IT(34 - T_{ar})(V_{ar} - 0.05)^{0.6223} \quad (2.1)$$

A primeira parcela está associada a sensibilidade estática dos termo-recetores, que irá depender da temperatura média da pele, quando estes estão sujeitos a um escoamento laminar. A segunda parcela diz respeito a sensibilidade dinâmica dos termo-recetores quando estes estão sujeitos a um escoamento turbulento. Caso a intensidade de turbulência seja nula, a parcela b), dinâmica, anula-se.

Por sua vez, a intensidade de turbulência (IT) do ar pode ser calculada através da equação 2.2.

$$IT = \left(v_{ar \text{ de entrada}}^{RMS} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

A densidade espectral da média quadrática das flutuações da velocidade do ar é muito utilizada para caracterizar o escoamento em ambientes interiores (ver Hazawa *et al.* (1987)).

A frequência de flutuação dominante da velocidade do ar influencia também o nível de desconforto. Fanger e Pedersen (1977), a partir da resposta de um painel de dezasseis avaliadores, expostos a um escoamento horizontal na parte de trás do pescoço, concluíram que as frequências mais incómodas se situam na gama de 0.3 a 0.5 Hz.

2.3.1 Diferenças de temperatura na vertical

Num determinado espaço, a temperatura varia desde o chão até ao nível do teto. Quando o gradiente desta grandeza é muito elevado, pode ocorrer desconforto devido ao aquecimento na zona da cabeça ou devido ao arrefecimento na zona dos pés (Conceição, 2013).

Tanto a norma ISO 7730, como a ASHRAE 55-1981, referem que o diferencial de temperatura na vertical, para indivíduos com uma atividade moderada, entre as cotas de 0.1 e 1.1 m, deve ser inferior a 3 °C.

A norma ISO 7730 apresenta as diferenças de temperatura do ar admissíveis na vertical, para um nível de atividade moderado, cuja classificação é entre A e C.

2.3.2 Temperatura do chão

A temperatura do chão, devido ao contato direto dos pés com o chão, influencia o desconforto local, caso o piso esteja a ser aquecido ou arrefecido.

De modo a evitar o desconforto das pessoas, os limites da temperatura do chão, para pessoas que usam sapatos adequados, de acordo as diversas normalizações, estar compreendida entre 18° e 29°C (ASHRAE 55-1981) ou 19° e 26°C (ISO 7730) (Conceição, 2013).

2.3.3 Assimetria de temperatura radiante

O desconforto provocado pela assimetria de temperatura radiante, pode ser provocado por janelas, por paredes sujeitas a radiação solar, por painéis de aquecimento localizados nas paredes ou tetos, entre muitas outras causas (Fanger 1980 e 1985).

A assimetria de temperaturas radiantes é definida pela diferença entre a temperatura de planos radiantes de lados opostos de um pequeno elemento plano. No método de medida proposto pela

norma ASHRAE 55-1981 o elemento plano e colocado numa posição a 0.6 metros acima do nível do solo, na posição vertical quando se pretendem medir assimetrias de temperatura (Conceição, 2013).

2.4 Qualidade do ar interior

Diariamente estima-se que a população passe cerca de 80% do tempo em ambientes interiores, associado ao desenvolvimento de microorganismos, o uso de produtos de limpeza, a existência de materiais e equipamentos poluentes, à própria ocupação humana e a deficiente ventilação e renovação do ar, apresente alguns dos contributos para que tanto o número de poluentes como a sua concentração sejam, em geral, muito mais elevados do que no ar exterior. Por estas razões, tem-se verificado uma atenção crescente para os problemas da qualidade do ar interior.

Na qualidade do ar interior não se trata somente da inexistência de poluentes (dióxido de carbono, monóxido de carbono, partículas, compostos orgânicos voláteis, entre muitos outros), mas também do nível de conforto, humidade relativa e temperatura, e da percepção que cada um faz da qualidade do ar que se respira. Os níveis de humidade relativa, temperatura e mesmo a presença de certos compostos orgânicos voláteis podem ser considerados “confortáveis” para alguns ocupantes, e “desconfortáveis” para outros. A qualidade do ar interior ótima pode então ser definida como o ar que se encontra livre de poluentes que causam irritação, desconforto e prejudicam a saúde dos que o inspiram.

A taxa de renovação de ar é também um aspeto importante a considerar, pois expressa o número de renovações de ar por hora que um compartimento deverá ter (Conceição, 2013).

Esta é dada por:

$$n = \frac{Q}{V} [h^{-1}] \quad (2.3)$$

n – numero de renovações de ar ; Q – caudal volúmico de ar que entra; V – volume efetivo do compartimento.

3 Metodologia

3.1 Softwares utilizados

3.1.1 Modelo Numérico de Simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados

O modelo numérico de simulação de escoamentos – “Virtual Flow 3D” – permite simular tridimensionalmente e em coordenadas cartesianas o escoamento em regime estacionário e em condições não isotérmicas dentro de um espaço ocupado.

Em Conceição et al. (2008) em 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 também foi utilizado por Cho et al. (2008) com resultados experimentais para prever as características dos jatos confluentes numa sala. Os resultados obtidos em condições não isotérmicas permitem apresentar os perfis de velocidade e temperatura ao longo do chão de uma sala com um sistema de ventilação de impulsão e um sistema com jatos confluentes.

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.

3.1.1.1 *Modelo numérico da resposta térmica do corpo humano*

O modelo numérico de resposta térmica do corpo humano “Human Thermal Comfort”, foi utilizado como software que simula a resposta térmica do corpo humano, avaliando o nível de conforto térmico e desconforto térmico local a que os ocupantes estão sujeitos em ambientes interiores não uniformes. Este modelo 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 2010). O corpo tridimensional é dividido em 24 elementos cilíndricos, um elemento esférico e em quatro camadas (osso, musculo, gordura e pele) podendo ser protegido do ambiente externo através de camadas de roupa (figura 3.1).

Dentro de um compartimento fechado, um corpo apresenta além das perdas de calor por evaporação e respiração e das trocas de calor com o ambiente envolvente por condução e convecção, também a exposição a fenômenos radiativos. Fenômenos esses, que dependem da radiação solar do momento, como também das trocas de calor por radiação, realizadas entre a superfície do corpo e as superfícies radiantes envolventes.

De forma a avaliar as trocas radiativas é necessário conhecer a temperatura radiante, de cada elemento do corpo, que por sua vez depende dos fatores de forma, entre cada secção do corpo e as superfícies da envolvente, e da temperatura das mesmas superfícies (Conceição e Lúcio, 2006).

Conceição et al. (2012) avaliou o conforto térmico em ocupantes de um espaço equipado com ventilação de mistura e com chão radiante frio; entre outros.

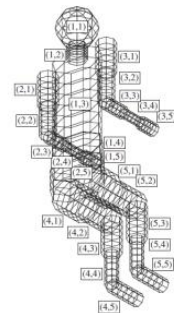


Figura 3.1 – Esquema do corpo humano dividido em 25 elementos

3.1.1.2 Método do ADI

O método do Índice de distribuição do ar (ADI) baseado no nível de conforto térmico, qualidade do ar interior e na eficiência da ventilação, permite obter informações uteis sobre o desempenho do sistema de ventilação.

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.

O ADI, em ambientes não uniformes, é calculado pela equação 3.1 (Conceição, 2012):

$$ADI = \sqrt[2]{N_{TC} \times N_{AQ}} \quad (3.1)$$

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 3.2 (Conceição, 2012):

$$N_{TC} = \frac{\varepsilon_{TC}}{PPD} = \frac{\frac{T_0 - T_i}{T_{corpo} - T_i}}{PPD} \quad (3.2)$$

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 3.3 (Conceição, 2012):

$$N_{AQ} = \frac{\varepsilon_{AQ}}{PD} = \frac{\frac{C_0 - C_i}{C_R - C_i}}{395e^{(-1.83V^{0.25})}} \quad (3.3)$$

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.

3.1.1.3 Modelo de cálculo da temperatura das superfícies

O modelo de cálculo da temperatura das superfícies é baseado no modelo dinâmica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD), desenvolvido por Awbi et al.(1998), onde apresenta resultados para o coeficiente de transferência de calor, em relação a uma parede e chão aquecido por convecção natural. A transmissão de calor por efeitos de convecção, das superfícies radiantes, tem impacto significativo no conforto térmico e na capacidade de aquecimento/arrefecimento de uma determinada sala.

3.1.1.4 Accuracy

Para efeitos de validação da simulação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente será utilizado o método designado de Accuracy que descreve a exatidão de uma medição e reflete o grau para o qual o valor medido se aproxima do verdadeiro valor (Rabinovich, 2010). O valor da Accuracy encontra-se entre 0 e 1, e pode ser calculada através da equação 3.1.

$$\text{Accuracy} = \frac{\sum \text{valores experimentais}}{\sum \text{valores experimentais} + \text{erro}} \quad (3.4)$$

4 Casos de Estudo

No trabalho desenvolvido foram analisadas três situações diferentes relativamente ventilação com jatos confluentes. A primeira situação é relativa ao jatos confluentes com e sem ocupantes no interior da camara virtual, sendo a segunda situação com jatos confluentes e chão radiante em situação de Inverno e a terceira com jatos confluentes e chão radiante em período de Verão. Para efeitos de avaliação, é tido em consideração o conforto térmico, desconforto térmico, qualidade do ar e eficiência do sistema de ventilação. Foram realizadas simulações numéricas com recurso ao acoplamento do modelo numérico de simulação de escoamentos tridimensional em espaços ocupados com modelo de resposta térmica do corpo humano e da aplicação do Índice de Distribuição do Ar (ADI).

4.1 Simulação numérica

4.1.1 Simulação numérica de escoamentos tridimensional em espaços ocupados

As simulações numéricas de escoamentos tridimensionais realizados em espaços ocupados, tiveram lugar numa camara virtual, utilizando uma malha quadrada com espaçamentos iguais a 5,45 centímetros segundo o eixo X, 5,2 centímetros no eixo Y e 5,45 centímetros no eixo Z. Sendo uma malha não uniforme, foi utilizado um maior refinamento junto dos obstáculos e na entrada de ar, com vista a obtenção de resultados mais precisos. A figura 4.1 apresenta a câmara virtual com jatos confluentes e ventilação a), Câmara Virtual com malha quadrada b) e Câmara Virtual com cadeira dos dois ocupantes c).

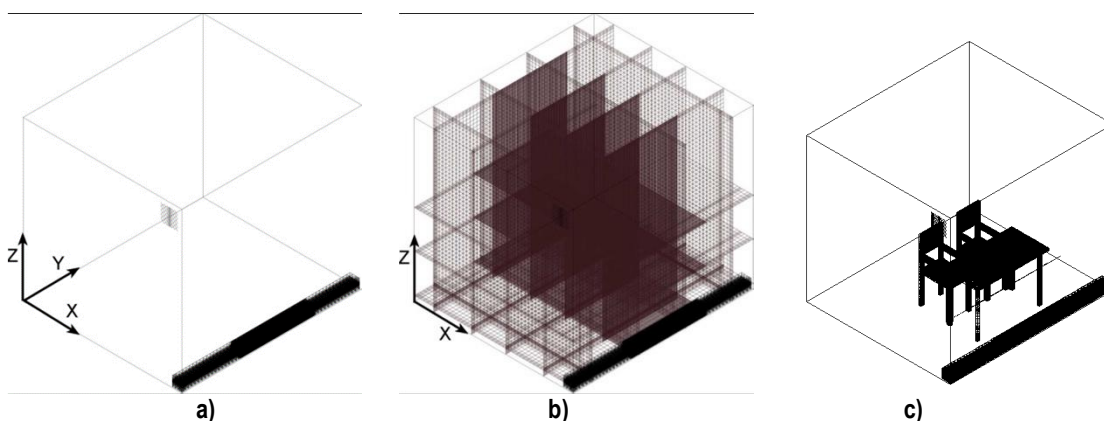


Figura 4.1 – Câmara Virtual com jatos confluentes e ventilação a), Câmara Virtual com malha quadrada b) e Câmara Virtual com cadeira dos dois ocupantes c).

Na simulação numérica o duto circular é aproximado a um duto quadrado. A conduta de ventilação por jatos confluentes tem um diâmetro 125mm com comprimento de 2700mm. A entrada de ar dos jatos confluentes tem dimensão 837,93mm de comprimento por 1,621mm de largura.

O sistema de ventilação por jatos confluentes é colocado acima do nível do solo, junto à parede, colocando o ar de entrada dissipado pelos jatos confluentes paralelo ao chão da superfície. O fluxo de ar desenvolve-se ao longo da superfície do chão e da área ocupada.

4.2 Validação Experimental

Para efeitos da validação experimental foi considerada a câmara experimental existentes na Faculdade de Ciências Tecnologias da Universidade do Algarve, com as dimensões de 2.7x2.3x2.7m³ (Figura 4.2). No interior da câmara com jatos confluentes, foi analisado a velocidade do ar, a temperatura do ar, a intensidade de turbulência e o risco de resfriamento, para efeitos de validação.

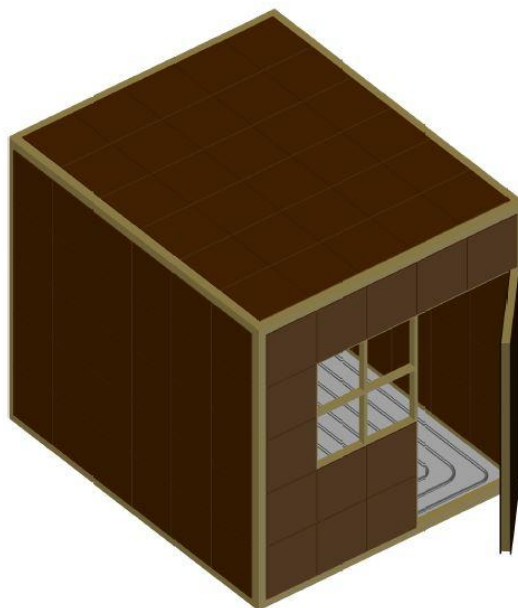


Figura 4.2 – Modelo da Câmara Experimental

A figura 4.3 localização de pontos de medição no interior da câmara experimental, representa a disposição e a localização dos pontos onde foram efetuadas as leituras de velocidades. Os pontos

permitem recolher três medições em cotas de alturas diferentes. As cotas de leituras consideradas foram a cota $Z=0,07\text{m}$, $Z=0,63\text{m}$ e $Z=1,2\text{m}$.

Camara Experimental - Localização de Pontos de Medição

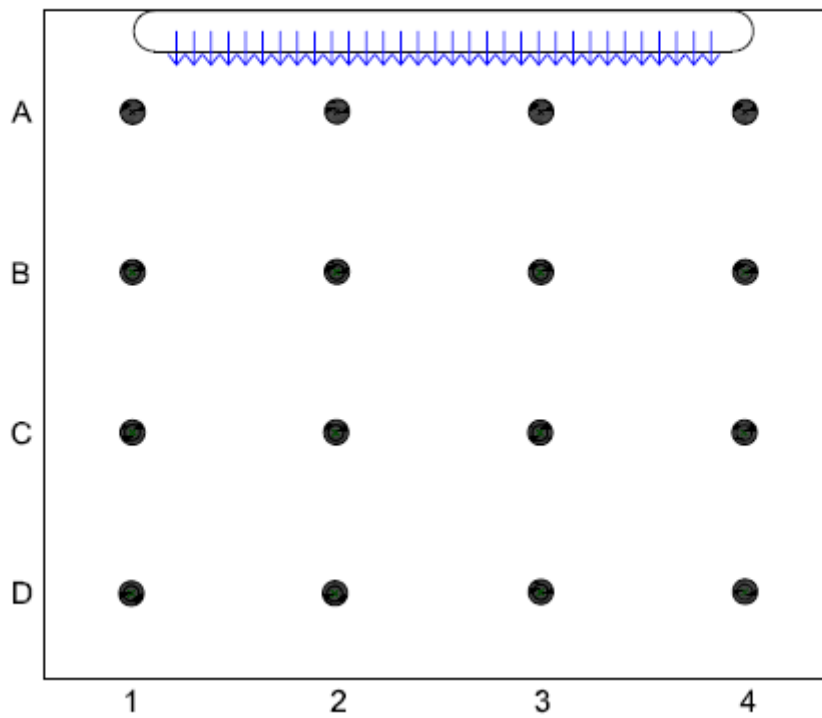


Figura 4.3 – Localização de pontos de medição no interior da Câmara Experimental

5 Estudo Comparativo

O estudo desenvolvido relativo a análise das condições de conforto térmico, com ventilação por jatos confluentes aplicado a superfícies radiantes, realizou-se em duas fases. Inicialmente de forma a obter dados reais, foram simulados em condições normais numa câmara experimental a ventilação dos jatos confluentes sem ocupantes, de forma a obtermos dados relativos a velocidade do ar, risco de resfriamento e intensidade de turbulência.

Após a concretização desta primeira fase, entrou-se numa segunda fase, que é a simulação numérica através da utilização da dinâmica de fluidos computacional, que permitiu a validação do modelo numérico a utilizar e da simulação das situações:

II – jatos confluentes com condições iguais a anterior de forma a verificar a influência dos ocupantes;

III – jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Inverno;

IV - jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Verão;

No seguimento do modelo numérico definido, foram desenvolvidas as simulações numéricas adicionando ocupantes e chão radiante, com vista a analisar as condições de conforto térmico, qualidade do ar interior e eficiência da ventilação.

5.1 Situação I - Validação de resultados Experimental/Numéricos sem ocupantes

Nesta secção é analisado o fluxo de ar em termos de velocidade do ar, risco de resfriamento e intensidade de turbulência da câmara experimental, sem ocupantes. Existindo desconfortos que possam surgir em ambientes confinados, devido à turbulência das flutuações da velocidade do ar, são analisadas as frequências mais incómodas da flutuação da velocidade do ar a sua energia.

5.1.1 Análise da velocidade do ar

Na figura 5.1 e 5.2 é apresentado as velocidades do ar das medições experimentais e das simulações numéricas, respetivamente, em três planos horizontais localizados acima do nível do solo. A figura 5.3 apresenta a comparação dos resultados obtidos experimental e numericamente da velocidade do ar, nos três planos horizontais considerados, e na tabela 5.1 é calculada a precisão da comparação dos resultados da velocidade do ar, obtidos anteriormente.

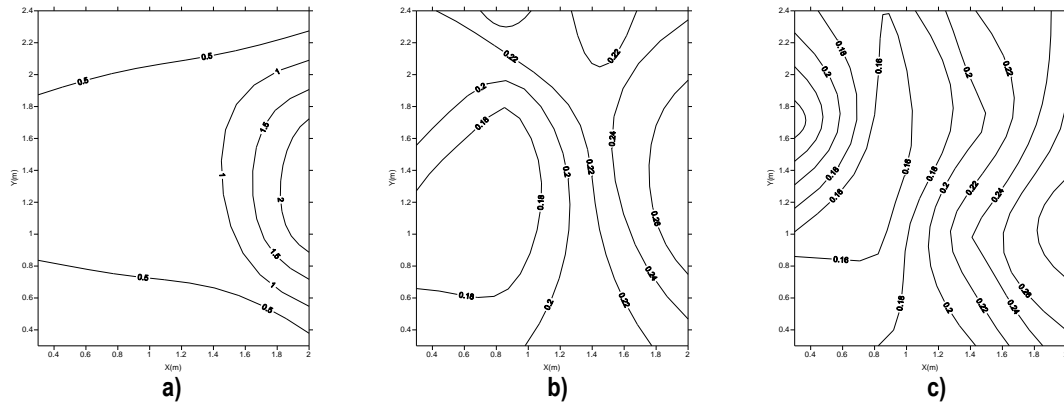


Figura 5.1 – Velocidade experimental do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

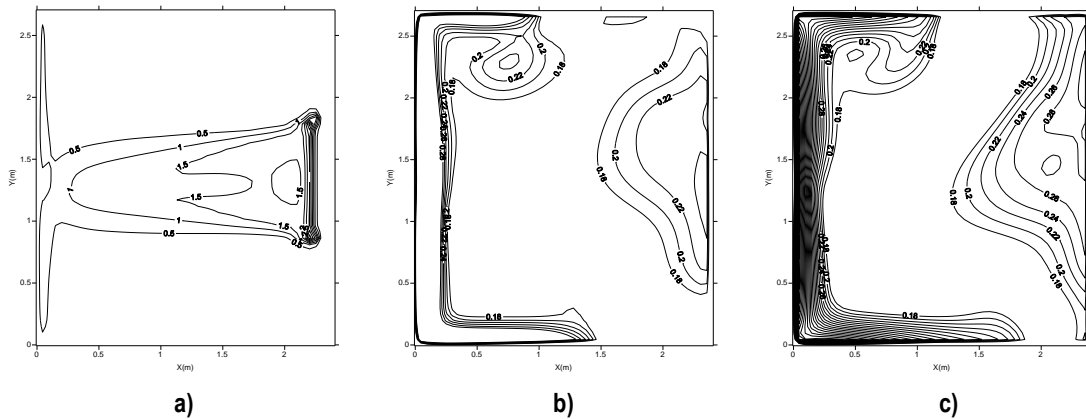


Figura 5.2 – Velocidade Numérica do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

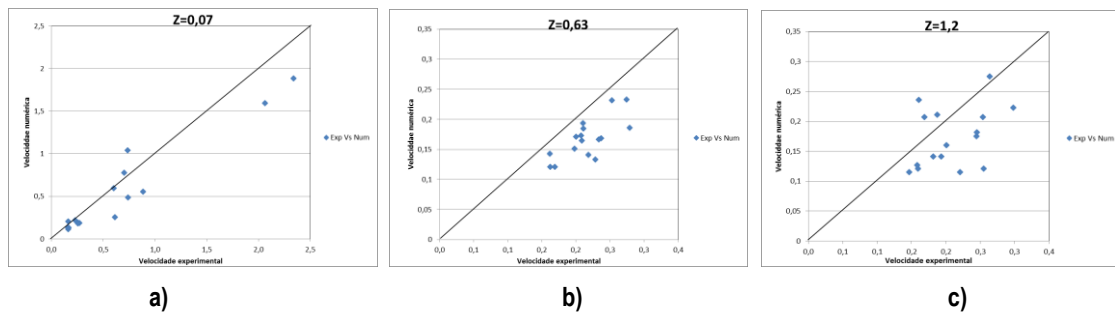


Figura 5.3 – Comparação de resultado experimental Vs numérico para a velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

Accuracy	Z=0,07	Z=0,63	Z=1,2
Velocidade do ar	0,798	0,818	0,791

Tabela 5.1 – Accuracy de resultado experimental Vs numérico para a velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$, $Z=0.63$ e $Z=1.2$.

Na figura 5.1 a) em simulação experimental, observa-se que a velocidade do ar apresenta valores mais elevados junto a entrada dos jatos confluentes, ao nível do plano $Z=0,07\text{m}$, criando uma fluxo de ar em direção da parede oposta deflectindo para a parte superior em direção ao teto. Nas figuras 5.1 b) e c) verifica-se que a velocidade do ar diminui.

Na simulação numérica realizada, verifica-se que a velocidade do ar ao nível do solo é superior junto a entrada dos jatos confluentes (figura 5.2 a)). Nas figuras 5.2 b) e c) a velocidade do ar, tende a diminuir no plano ascendente, existindo junto a parede oposta uma recirculação de ar.

Na validação de dados relativamente a velocidade do ar, verifica-se que a simulação experimental versus numérica, de acordo com a figura 5.3 a) e a tabela 5.1 o nível de precisão apresenta uma boa concordância de valores, aproximando os valores do nível desejado, próximo de 1.

5.2.1 Análise do risco de resfriamento

A percentagem de risco de resfriamento é apresentado nas figuras 5.4 e 5.5 através das medições experimentais e das simulações numéricas, respetivamente, em três planos horizontais localizados acima do nível do solo. A figura 5.6 apresenta a comparação dos resultados obtidos experimental e numericamente do risco de resfriamento, nos três planos horizontais considerados, podendo ser observado na tabela 5.2 a precisão da comparação dos resultados obtidos anteriormente do risco de resfriamento.

Na simulação experimental relativo ao risco de resfriamento, observa-se que junto a zona de ventilação por jatos os valores são mais elevados, como seria de esperar, ao nível do plano $Z=0,07$, figura 5.4 a), podendo criar uma zona de desconforto. O seu risco de resfriamento diminui com a elevação do plano de análise (figura 5.4 b) e c)), sendo os valores médios inferiores a 15%.

Como se observa na figura 5.5 a) a simulação numérica segue em linha de concordância, sendo a zona mais potencial a risco de resfriamento junto a entrada de ar. Nos planos superiores a intensidade do risco de resfriamento diminui, devido às recirculações de ar, no interior da câmara.

Observando a figura 5.6 da comparação de resultados e a tabela 5.2 do nível de precisão de resultados, verifica-se que na análise comparativa realizada entre os ensaios experimentais e numéricos, existe uma boa concordância, dados os valores estarem próximos de 1.

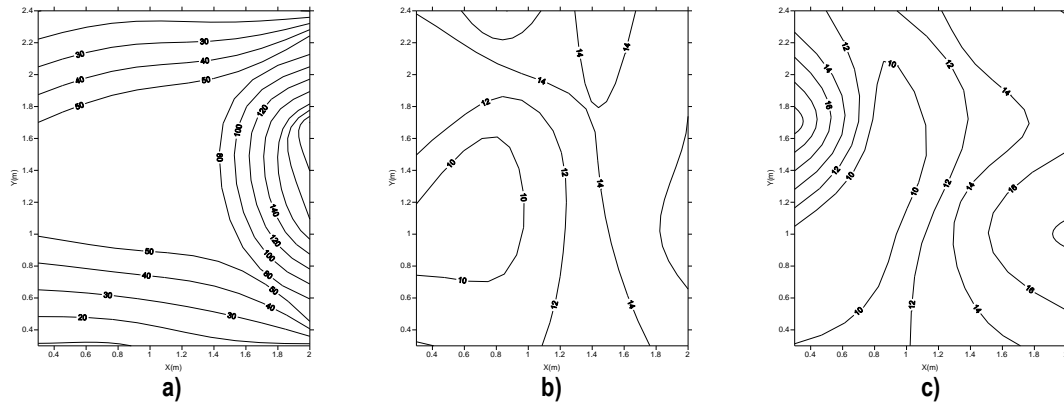


Figura 5.4 – Risco de Resfriamento Experimental no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

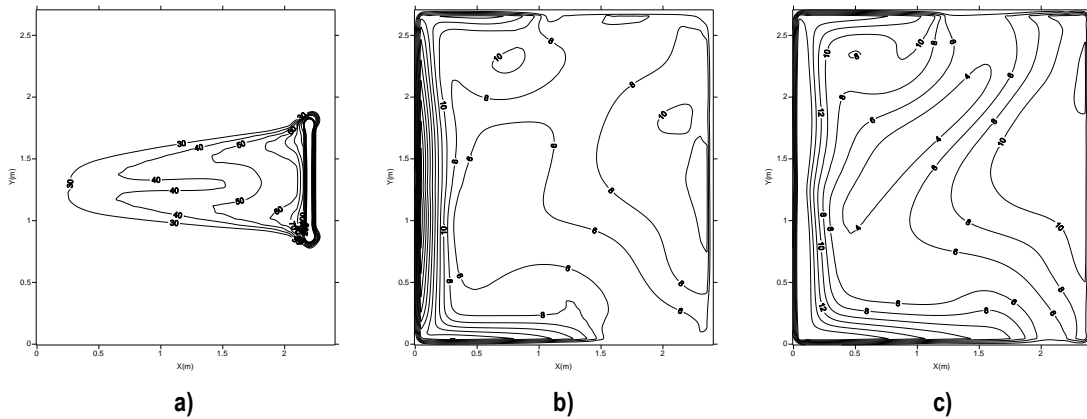


Figura 5.5 – Risco de Resfriamento Numérico no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

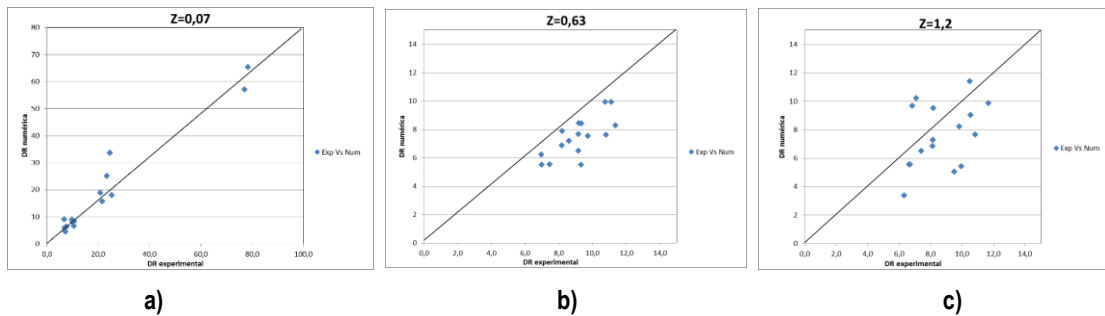


Figura 5.6 – Comparação de resultado experimental Vs numérico para risco de resfriamento do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

Accuracy	Z=0,07	Z=0,63	Z=1,2
Risco de Resfriamento	0,825	0,844	0,805

Tabela 5.2 – Accuracy de resultado experimental Vs numérico para o risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$, $Z=0.63$ e $Z=1.2$.

5.3.1 Análise da intensidade de turbulência

Na figura 5.7 e 5.8 é apresentado a percentagem da intensidade de turbulência do ar das medições experimentais e das simulações numéricas, respetivamente, em três planos horizontais localizados acima do nível do solo. A figura 5.9 apresenta a comparação dos resultados obtidos experimental e numericamente da intensidade de turbulência do ar, nos três planos horizontais considerados, e na tabela 5.3 é calculada a precisão da comparação dos resultados obtidos anteriormente.

Na figura 5.7 e 5.8 verifica-se que a intensidade de turbulência é elevada na zona de entrada de ar dos jatos confluentes, criando correntes de fluxo que tendem a diminuir a sua intensidade com o afastamento desta zona e com a elevação dos planos de análise.

Analisando os resultados obtidos experimentalmente e numericamente, observa-se na figura 5.9 e pela tabela 5.3, que existe uma concordância de valores, aproximando do 0,8 na zona de plano inferior, sendo que no plano intermédio se fica pelos 0,73 e no plano superior nos 0,75. Neste dois últimos planos o nível de precisão diminui muito possivelmente devido as recirculações de ar, que não foi possível simular devidamente.

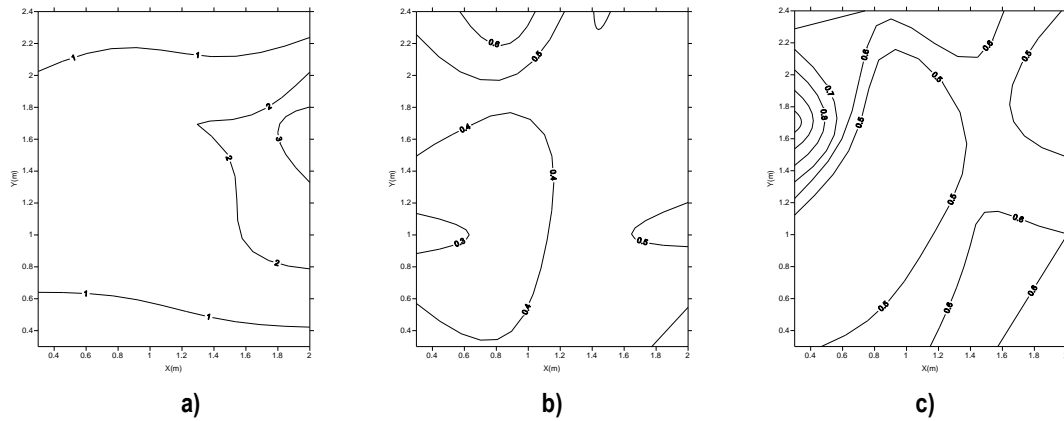


Figura 5.7 – Intensidade de Turbulência em % Experimental no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

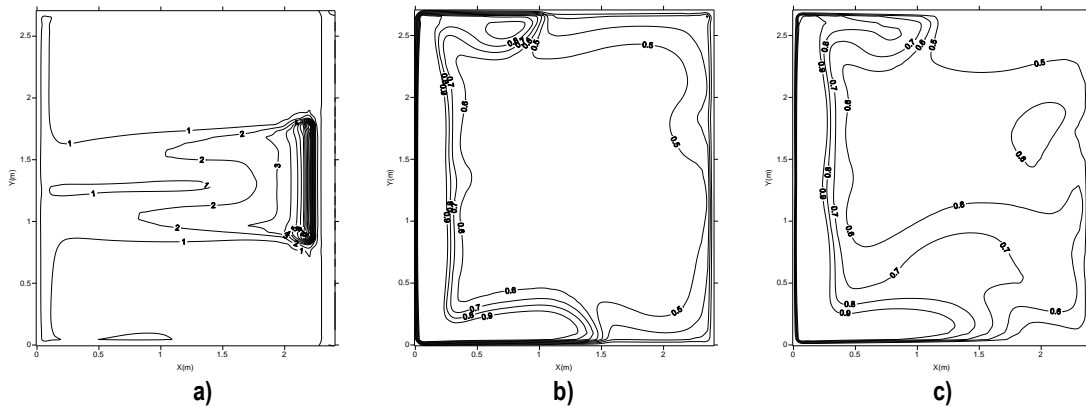


Figura 5.8 – Intensidade de Turbulência em % Numérica no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

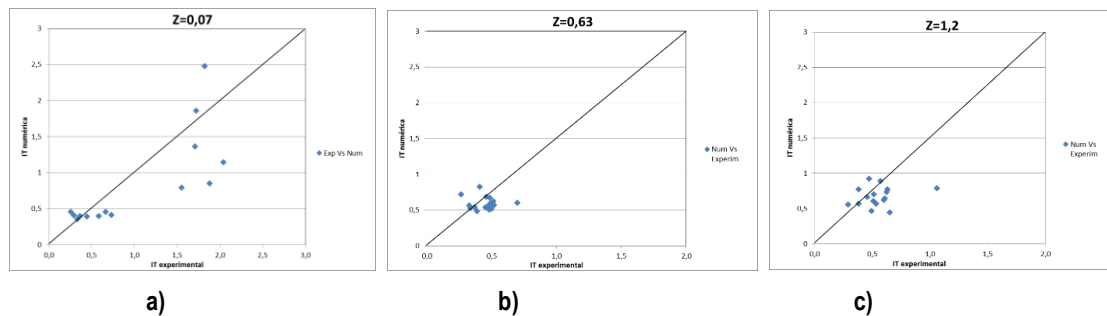


Figura 5.9 – Análise de resultados Experimental Vs Numérico para a Intensidade de turbulência em %, no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

Accuracy	Z=0,07	Z=0,63	Z=1,2
Intensidade de Turbulência	0,773	0,734	0,748

Tabela 5.3 – Accuracy de resultado experimental Vs numérico para a intensidade de turbulência no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$, $Z=0.63$ e $Z=1.2$.

5.4.1 Análise de Frequências Incomodativas

Em espaços fechados devido a movimentação dos fluxos de ar, existe variações na flutuação da velocidade do ar, que em determinadas frequências se podem tornar incomodativas para o ser humano.

Neste sentido foram efetuados ensaios experimentais com medição de velocidade nos diversos pontos existentes na câmara, nos planos $Z1=0,07$, $Z2=0,63$ e $Z3=1,2$ m, com o objetivo de caracterizar o escoamento turbulento existente no interior da câmara experimental, identificando as frequências dominantes das flutuações da velocidade, que podem causar incómodo aos ocupantes.

Os espectros de frequência dos sinais de velocidade, adquiridos nos diversos pontos da camara experimental, foram calculados utilizando a Transformada de Fourier.

5.4.1.1 Frequências de desconforto no Plano $Z1=0,07$

A transformada de Fourier do sinal adquirido pelos sensores de velocidade do ar dos pontos A1, A2, A3 e A4, no plano $Z1=0,07$ m são apresentadas na figura 5.10. A figura 5.11 representa a transformada de Fourier do sinal adquirido pelos sensores de velocidade do ar dos pontos B1, B2, B3 e B4, no plano $Z1=0,07$ m. Na figura 5.12 está representada a transformada de Fourier do sinal adquirido pelos sensores de velocidade do ar dos pontos C1, C2, C3 e C4, no plano $Z1=0,07$ m e na figura 5.13 pode-se observar a transformada de Fourier do sinal adquirido pelos sensores de velocidade do ar dos pontos D1, D2, D3 e D4, no plano $Z1=0,07$ m. A análise é efetuada no eixo X com a gama de frequências entre 0 Hz e 3 Hz, e no eixo Y a energia adimensional

Verifica-se que na zona central da câmara experimental, do plano em análise, as frequências de flutuação da velocidade apresentam uma maior intensidade, muito devido ao fluxo de ar provocado pela entrada de ar.

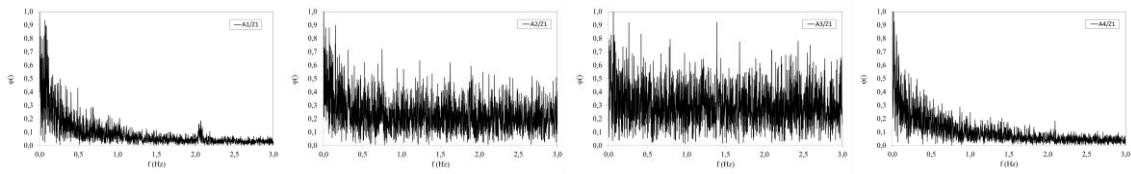


Figura 5.10 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto A no plano $Z_1=0,07$.

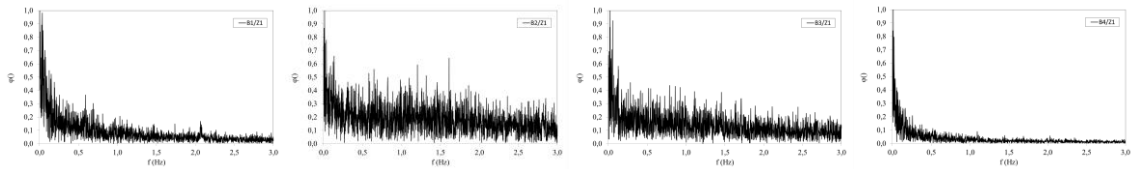


Figura 5.11 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto B no plano $Z_1=0,07$.

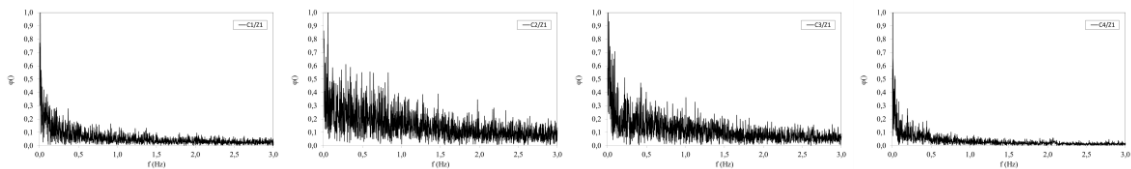


Figura 5.12 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto C no plano $Z_1=0,07$.

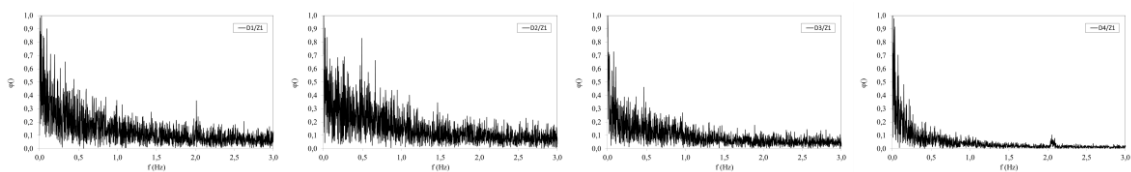


Figura 5.13 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto D no plano $Z_1=0,07$.

Observando o plano em análise ($Z_1=0,07\text{m}$), verifica-se que na zona central da câmara experimental, nos pontos de medição, as frequências de flutuação da velocidade apresentam uma maior intensidade de energia, muito devido ao fluxo de ar gerado pela entrada de ar dos jatos confluentes.

Nas figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17, é apresentada a transformada de Fourier, da velocidade do ar, para gama de frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A, B, C e D respetivamente, no plano $Z_1=0,07\text{m}$.

Na gama de frequências entre 0.3 e 0.5 Hz são apresentadas as frequências de maior intensidade energética adimensional, determinadas pelos sensores de velocidade.

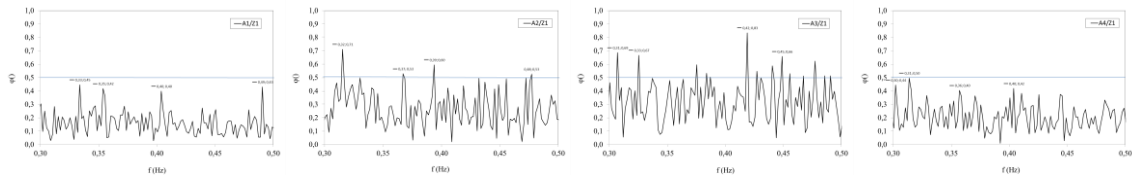


Figura 5.14 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A no plano Z1=0,07.

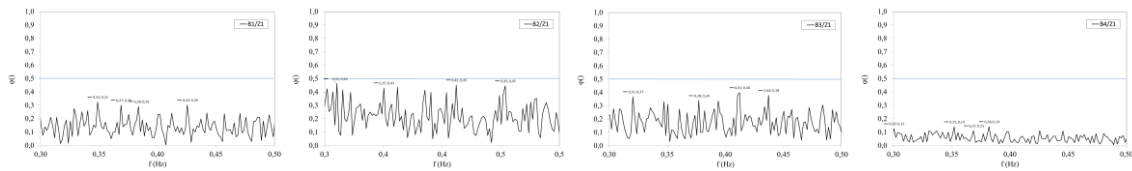


Figura 5.15 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto B no plano Z1=0,07.

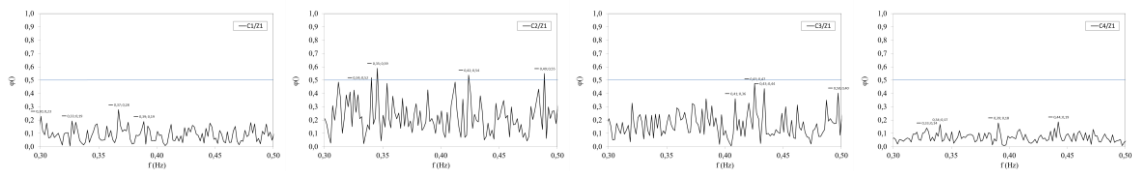


Figura 5.16 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto C no plano Z1=0,07.

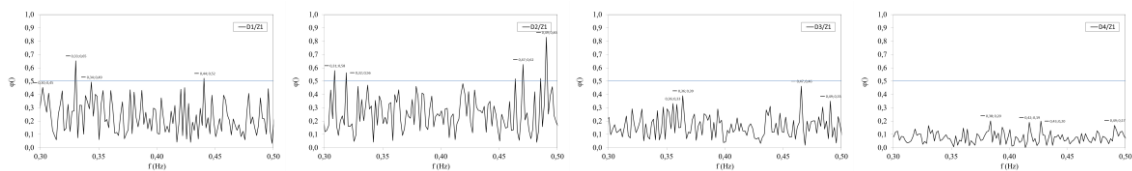


Figura 5.17 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto D no plano Z1=0,07.

Devido a entrada de ar, se localizar junto ao solo, neste plano verifica-se que a intensidade energética mais elevada se verifica na zona mais próxima dos jatos confluentes, fluindo pela zona central e criando na proximidade com a parede oposta zonas de maior intensidade energética (pontos D1 e D2). Desta forma a velocidade do ar tende a dissipar a sua energia.

5.4.1.2 Frequências de desconforto no Plano Z2=0,63

No plano Z=0,63m, as figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam a transformada de Fourier do sinal adquirido pelos sensores de velocidade do ar dos pontos A, B, C e D, respectivamente.

No eixo X é apresentada a gama de frequências entre 0 Hz e 3 Hz, e no eixo Y a energia adimensional correspondente.

Pode-se observar que na zona central da câmara experimental, do plano em análise, as frequências de flutuação da velocidade apresentam uma menor intensidade, relativamente ao plano de análise anterior.

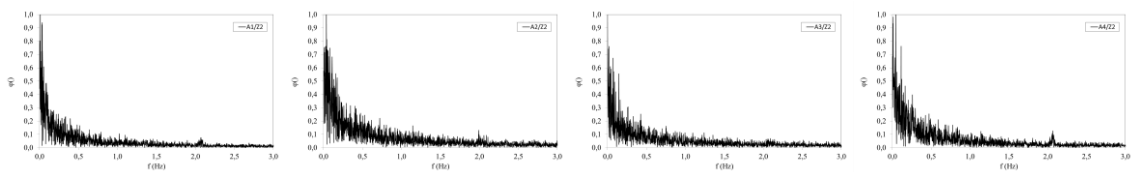


Figura 5.18 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto A no plano Z1=0,63.

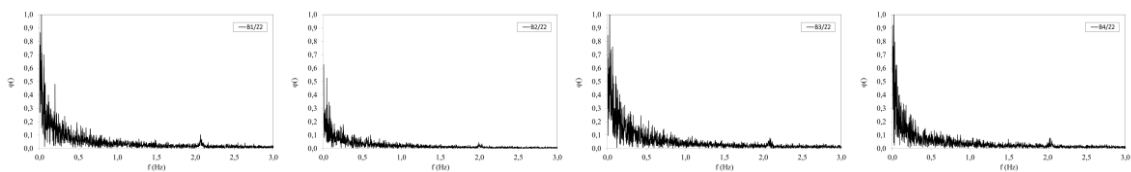


Figura 5.19 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto B no plano Z1=0,63.

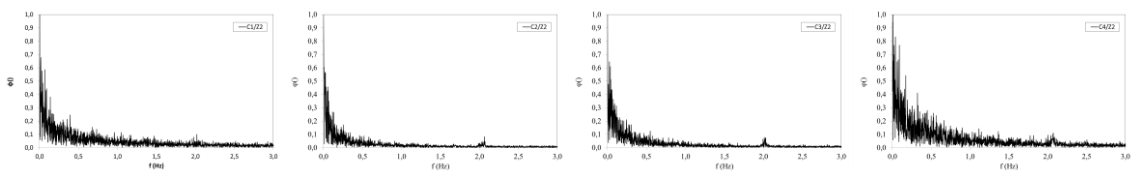


Figura 5.20 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto C no plano Z1=0,63.

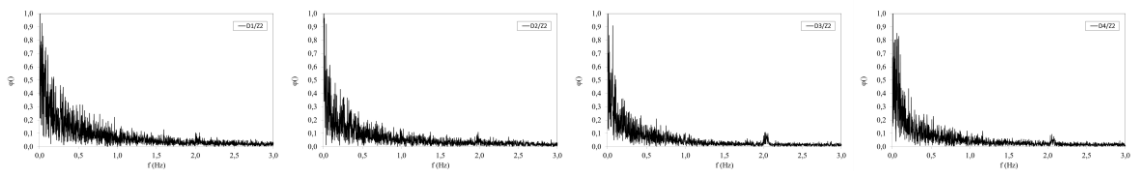


Figura 5.21 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto D no plano Z1=0,63.

Nas figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25, é apresentada a transformada de Fourier, da velocidade do ar, para gama de frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A, B, C e D respectivamente, no plano Z2=0,63m.

Na gama de frequências entre 0.3 e 0.5 Hz são apresentadas as frequências de maior intensidade energética adimensional, determinadas pelos sensores de velocidade.

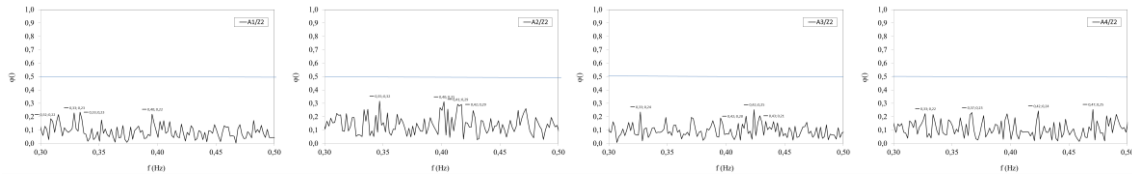


Figura 5.22 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A no plano Z2=0,63.

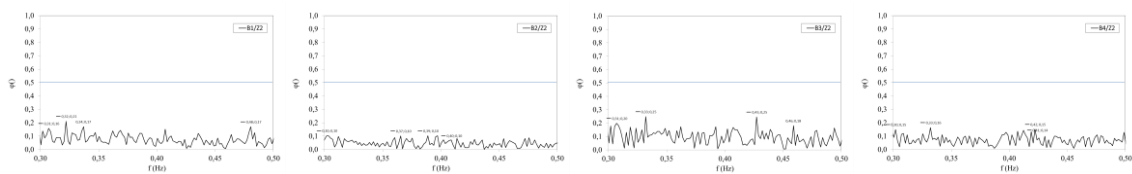


Figura 5.23 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto B no plano Z2=0,63.

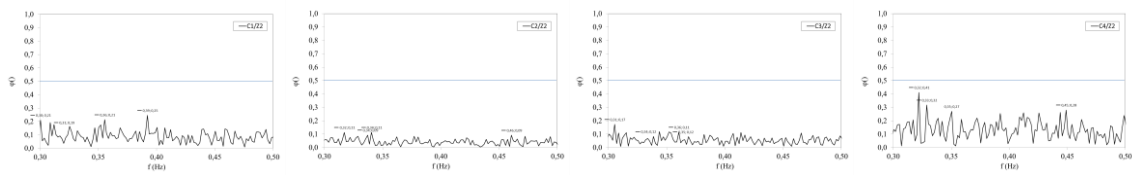


Figura 5.24 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto C no plano Z2=0,63.

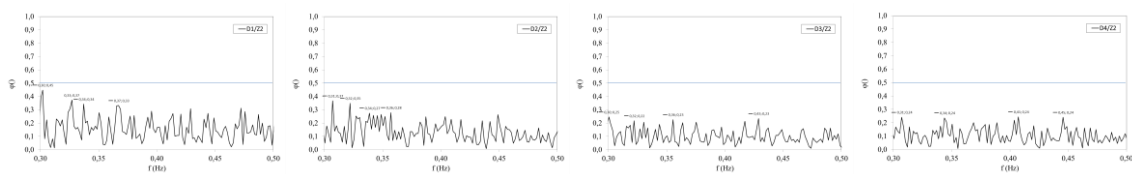


Figura 5.25 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto D no plano Z2=0,63.

Pode-se observar que a intensidade de turbulência maior se verifica na zona do ponto C4 e na zona dos pontos D1 e D2. Este fato deve-se ao fluxo de ar projetado pelo jatos confluentes que ao criar recirculações de ar provoca aumentos espontâneos de velocidade em determinadas zonas, assim como no ponto C4 a proximidade com a ventilação de saída do ar, proporciona aumento de velocidade.

5.4.1.3 Frequências de desconforto no Plano Z3=1,2

As figuras 5.26, 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam a transformada de Fourier do sinal adquirido pelos sensores de velocidade do ar dos pontos A, B, C e D, respectivamente, no plano Z3=1,2m.

No eixo X é apresentada a gama de frequências entre 0 Hz e 3 Hz, e no eixo Y a energia adimensional correspondente.

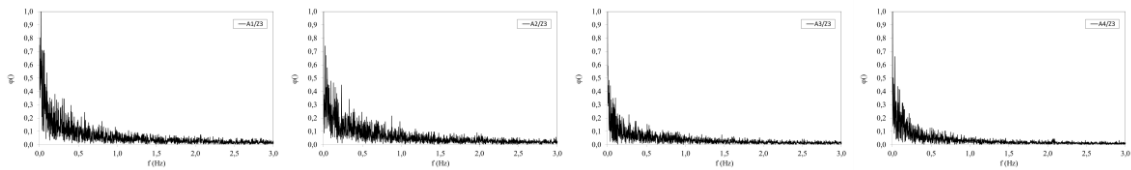


Figura 5.26 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto A no plano Z1=1,2.

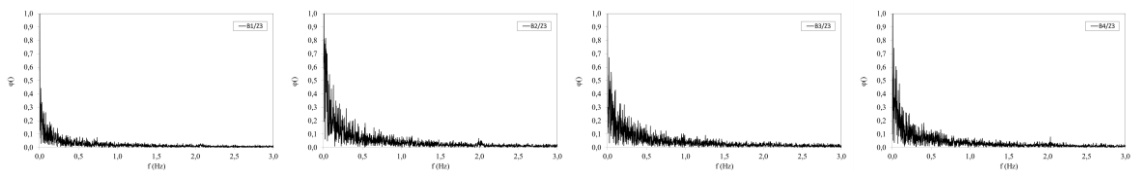


Figura 5.27 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto B no plano Z1=1,2.

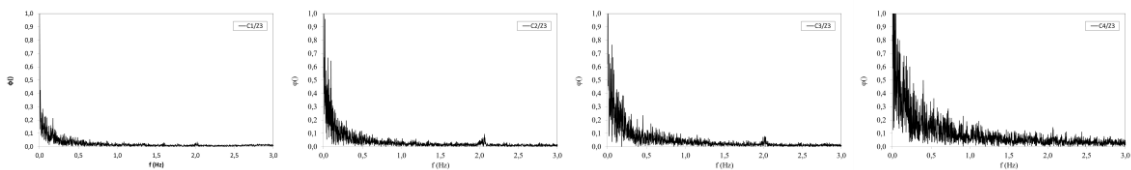


Figura 5.28 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto C no plano Z1=1,2.

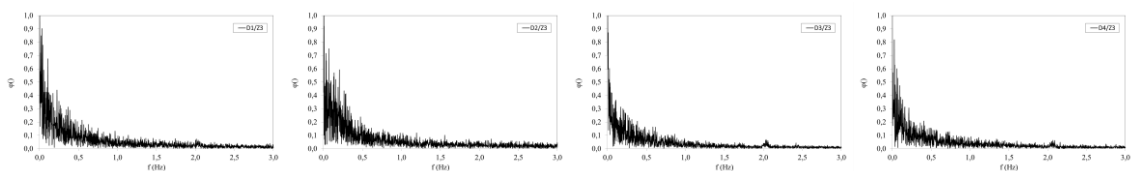


Figura 5.29 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, do ponto D no plano Z1=1,2.

Nas figuras 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33, é apresentada a transformada de Fourier, da velocidade do ar, para gama de frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A, B, C e D respectivamente, no plano Z3=1,2m.

Na gama de frequências entre 0.3 e 0.5 Hz são apresentadas as frequências de maior intensidade energética adimensional, determinadas pelos sensores de velocidade.

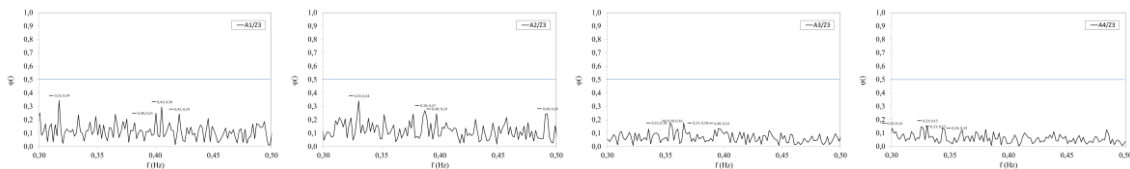


Figura 5.30 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto A no plano Z3=1,2.

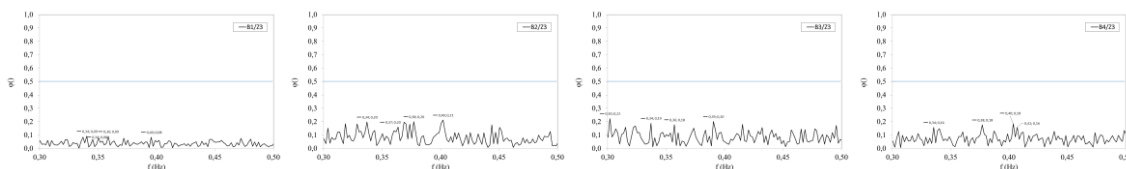


Figura 5.31 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto B no plano Z3=1,2.

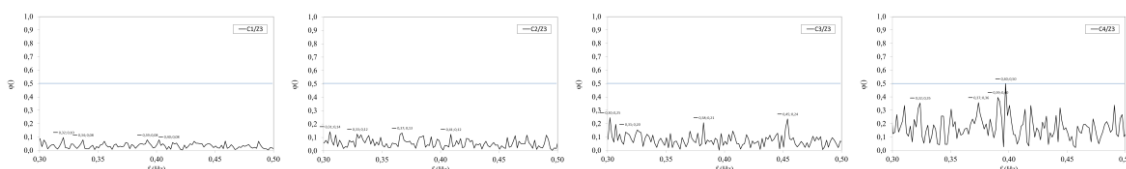


Figura 5.32 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto C no plano Z3=1,2.

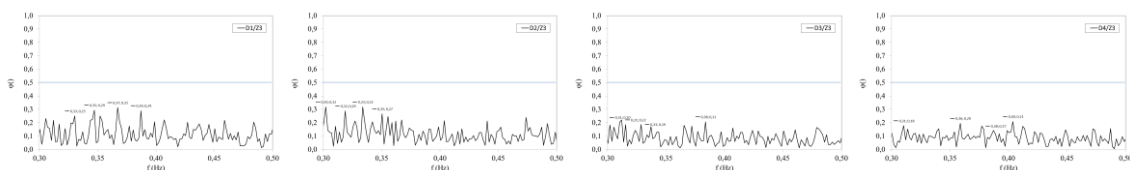


Figura 5.33 – Transformada de Fourier do sinal adquirido pelo sensor de velocidade do ar, para frequências entre 0.3 e 0.5 Hz do ponto D no plano Z3=1,2.

Pode-se observar que na zona central da câmara experimental, do plano em análise ($Z3=1,2m$), as frequências de flutuação da velocidade na zona central diminuem de intensidade, criando maior relevância na zona lateral, ponto C4, muito devido a grelha de ventilação existente junto ao teto, que serve de saída do ar.

A tabela 5.4 apresenta em resumo as 20 frequências de maior intensidade energética adimensional, no período de frequências de 0.3Hz a 0.5Hz. Na figura 5.34 representa a localização dos pontos de medição onde ocorreram as frequências de maior intensidade energética.

Frequencia	Energia Adimensional	Localização
0,419	0,833911	A3/Z1
0,491	0,829044	D2/Z1
0,315	0,711155	A2/Z1
0,307	0,685644	A3/Z1
0,325	0,666206	A3/Z1
0,449	0,657591	A3/Z1
0,330	0,652357	D1/Z1
0,471	0,624844	D2/Z1
0,394	0,595556	A2/Z1
0,345	0,588367	C2/Z1
0,309	0,579088	D2/Z1
0,319	0,563215	D2/Z1
0,424	0,549759	C2/Z1
0,424	0,537412	C2/Z1
0,367	0,527919	A2/Z1
0,477	0,525526	A2/Z1
0,440	0,521495	D1/Z1
0,340	0,518510	C2/Z1
0,397	0,498091	C4/Z3
0,314	0,496096	A4/Z1

Tabela 5.4 – Tabela resumo das 20 frequências de maior intensidade energética adimensional no período de 0.3 a 0.5 Hz.

Camara Experimental - Localização de Pontos de Medição

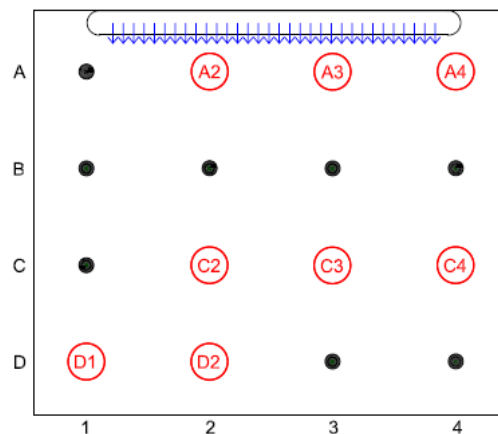


Figura 5.34 – Representação da localização os pontos de medição onde ocorreram as frequências de maior intensidade energética

Analisando a tabela 5.4 observa-se que a zona de entrada de ar é onde se verifica as frequências de maior intensidade energética (pontos A2 e A3), como seria de esperar, contudo nos pontos D1 e D2, também existem frequências de elevada intensidade energética, muito devido a recirculação de ar criada pelo fluxo central. O plano representado (Z1=0,07m), é onde existem as frequências de maior intensidade energética, sendo a sua localização representada na figura 5.34. Estes são pontos que deverão ser evitados pelos ocupantes devido às suas frequências incomodativas.

5.2 Situação II - Jatos confluentes com ocupação

Nesta secção são apresentadas as simulações numéricas, referente à situação II com ventilação por jatos confluentes com ocupantes no interior da câmara virtual, de forma analisar o fluxo de ar em torno dos ocupantes, temperatura do ar, intensidade de turbulência, risco de resfriamento e qualidade do ar. As simulações numéricas visam a demonstração pormenorizada da tipologia do fluxo no interior da câmara. Na simulação numérica efetuada com ventilação com jatos confluentes com ocupantes, a temperatura de entrada de ar no compartimento é de 25°C.

A figura 5.35 a), b) e c) apresenta a simulação numérica da velocidade do ar no plano XY, localizada à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Nesta figura observa-se que a velocidade do ar mais elevada é próxima da entrada do jato confluyente junto ao chão (figura 5.35 a)). Na zona dos ocupantes a velocidade do ar é mais uniforme e apresenta valores na ordem dos 0,3 a 0,4m/s (figura 5.35 b) e c)).

A figura 5.36 a), b) e c) apresenta a simulação numérica da temperatura do ar no plano XY, localizada à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. A temperatura do ar nesta situação em redor do ocupante ronda os 25/26°C.

A intensidade de turbulência é representada numericamente na figura 5.37, no plano XY, através da cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Os campos da intensidade de turbulência apresentam maior incidência na zona de entrada dos jatos confluentes. Na figura 5.37 b) e c) verifica-se que a intensidade de turbulência junto aos ocupantes é de cerca 2%.

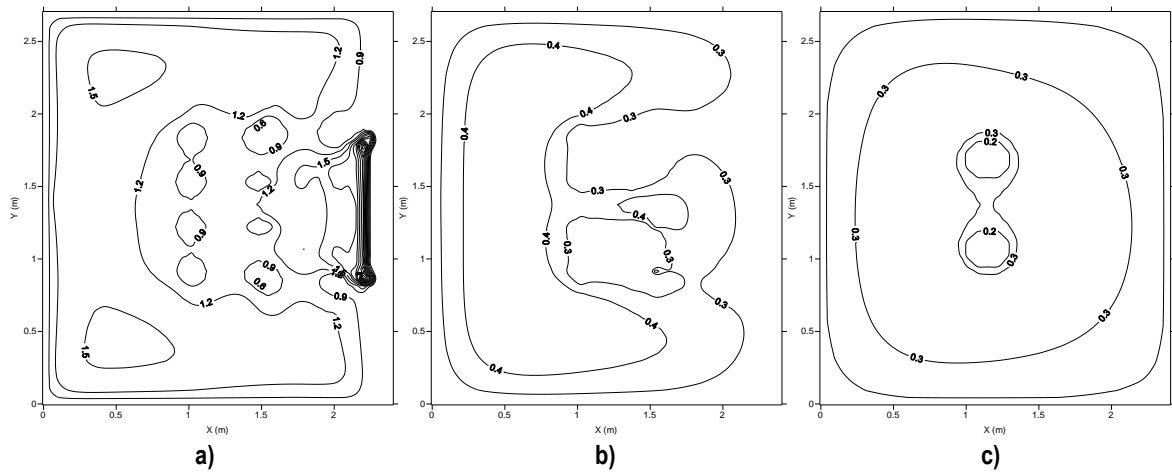


Figura 5.35 – Velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

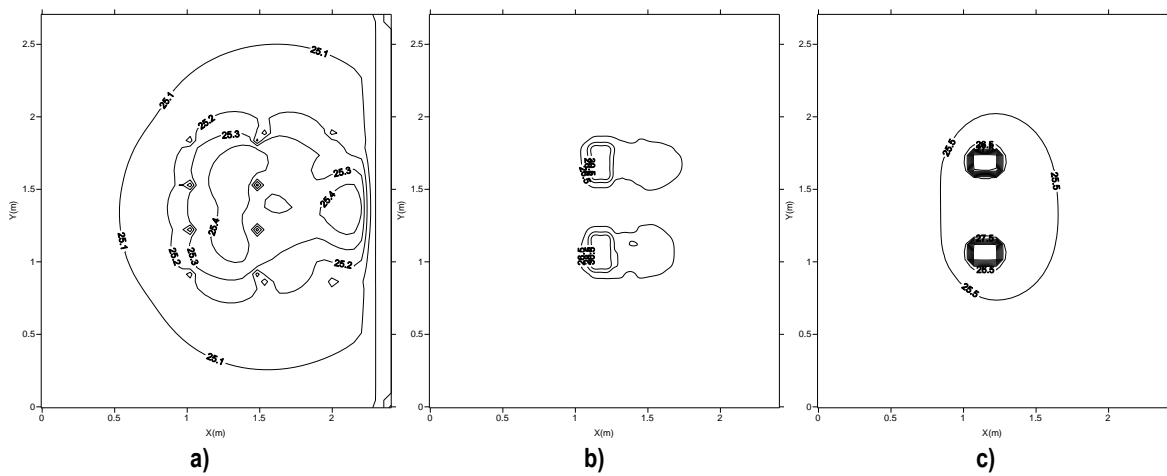


Figura 5.36 – Temperatura do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

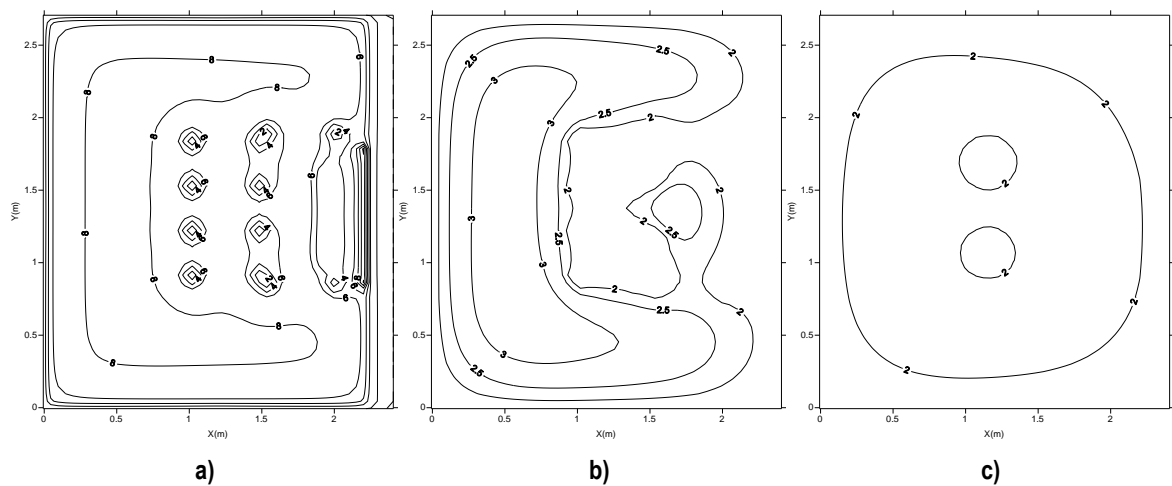


Figura 5.37 – Intensidade de Turbulência no plano horizontal XY localizado a $Z=0.07$ a), $Z=0.63$ b) e $Z=1.2$ c) acima do nível do chão.

A figura 5.38 a), b) e c) apresenta a simulação numérica do risco de resfriamento no plano XY, localizado à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respectivamente. Observa-se que o risco é superior na zona junto ao nível dos pés, sendo cerca de 12% na zona em redor dos ocupantes.

A concentração de CO_2 é apresentada na figura 5.39 a), b) e c), para o ocupante da direita (cota $Y=1,0$) e ocupante da esquerda (cota $Y=1,7$). Nesta situação a concentração de CO_2 em redor dos ocupantes é de 500mg/m^3 , sendo de maior concentração junto a zona de respiração.

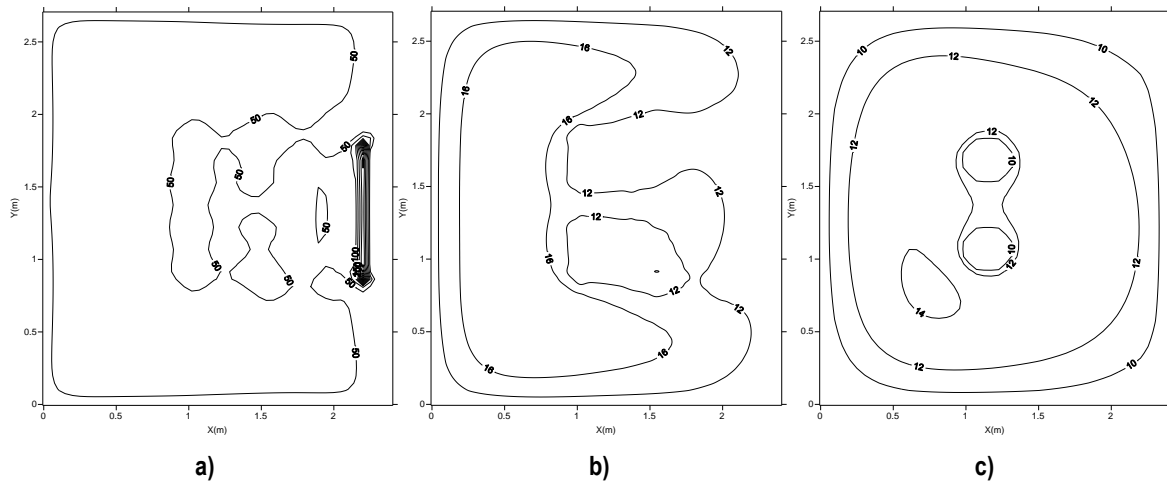


Figura 5.38 – Risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

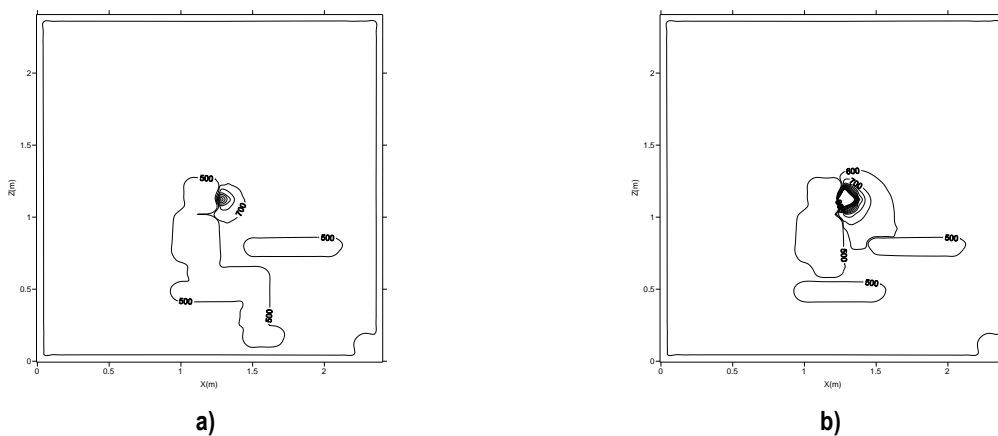


Figura 5.39 – Concentração de CO_2 localizado com dois ocupantes no plano $Y=1,0$ a) (ocupante da direita) e $Y=1,7$ b) (ocupante da esquerda).

5.2.1 Análise de conforto

Para efeitos de análise do conforto térmico, são verificados nesta secção os resultados numéricos sobre o fluxo da velocidade do ar em torno dos ocupantes, o desconforto térmico e a qualidade do ar interior, através do modelo numérico da dinâmica de fluidos computacional. O fluxo do ar em torno dos ocupantes é apresentado através das 25 secções do corpo humano pela velocidade do ar e pela temperatura do ar. O conforto térmico é apresentado pelo índice PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), sendo o desconforto térmico apresentado pela intensidade de turbulência e risco de resfriamento, e a qualidade do ar interior dada pela concentração de dióxido de carbono, na zona de respiração.

A figura 5.40 apresenta a velocidade do ar calculada numericamente nas 25 secções do corpo humano dos ocupantes e a figura 5.41 a temperatura do ar.

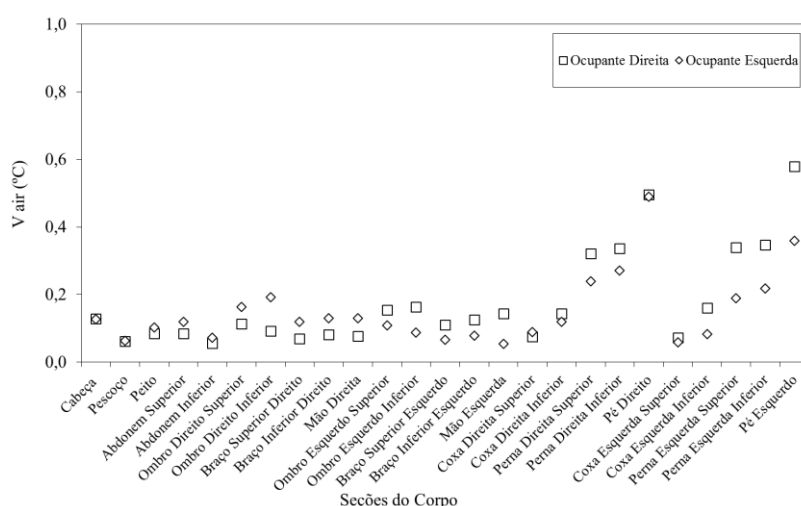


Figura 5.40 – Velocidade do ar, calculada numericamente nas 25 do corpo humano de dois ocupantes.

A velocidade em redor dos ocupantes é inferior a 0,6m/s, sendo que os dois ocupantes apresentam velocidades semelhantes. Na zona dos pés é onde existe maior velocidades do ar, diminuído na zona das pernas e coxas.

A temperatura de superfície da pele do corpo humano calculada numericamente, é apresentada na figura 5.42. A figura 5.43 é a temperatura media radiante dos dois ocupantes.

Na figura 5.41 a temperatura do ar varia entre os 25,5 e 28°C, sendo mais baixa na zona dos pés. Entre os dois ocupantes a temperatura é semelhante.

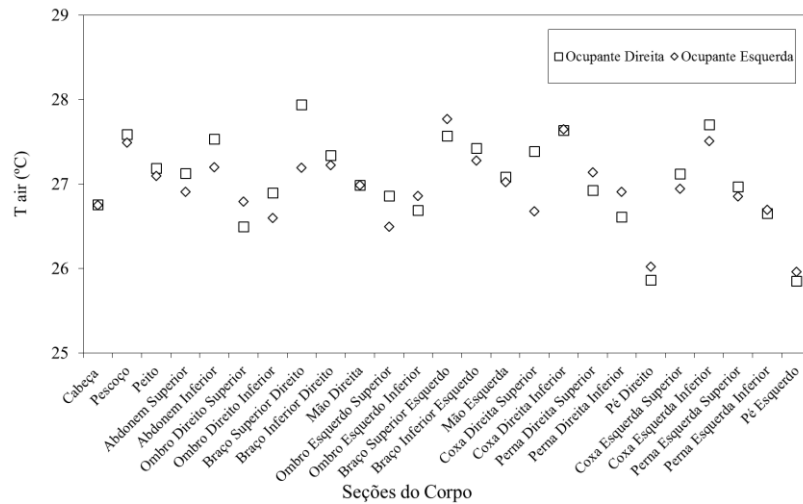


Figura 5.41 – Temperatura do ar, calculada numericamente nas 25 seções do corpo humano de dois ocupantes.

A temperatura de superfície dos dois ocupantes é semelhante, sendo que as zonas protegidas por roupa apresentam as temperaturas superiores. Com o aumento da temperatura de superfície do corpo humano, a temperatura circundante da câmara irá, através dos fluxos de ar ascendente aumentar a temperatura ambiente. A temperatura ambiente mais elevada localiza-se em torno dos ocupantes.

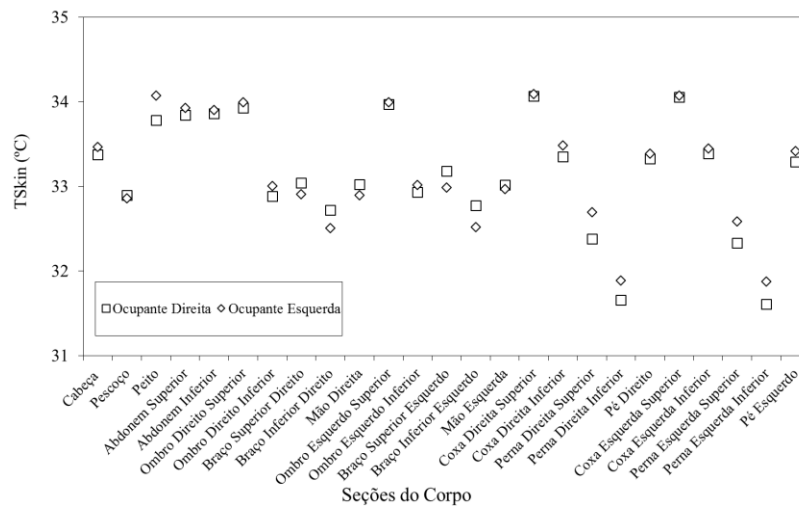


Figura 5.42 – Temperatura de superfície da pele do corpo, calculada numericamente, nas 25 seções do corpo humano de dois ocupantes.

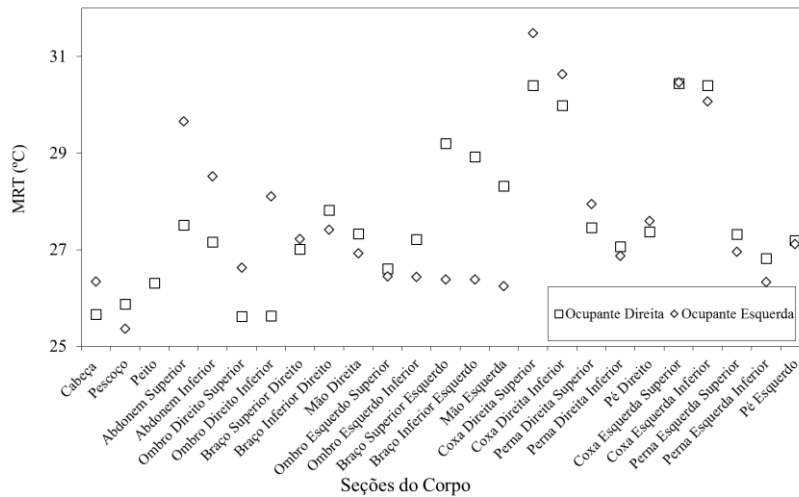


Figura 5.43 – Temperatura Média Radiante, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

Em relação a temperatura média radiante, apresentada na figura 5.43, os valores enquadram-se entre 25 a 31,5 °C, sendo que as zonas mais elevadas de temperatura se encontram na vizinhança do outro corpo humano, onde se realizam as trocas radiativas superiores entre corpos. As zonas do corpo humano expostas a trocas radiativas com a envolvente da câmara apresentam valores de temperatura inferior. Para efeitos de análise do desconforto térmico a figura 5.44 apresenta a intensidade de turbulência do ar e a figura 5.45 o risco de resfriamento do ar, calculado numericamente em torno das 25 secções do corpo humano para o ocupante da direita e da esquerda.

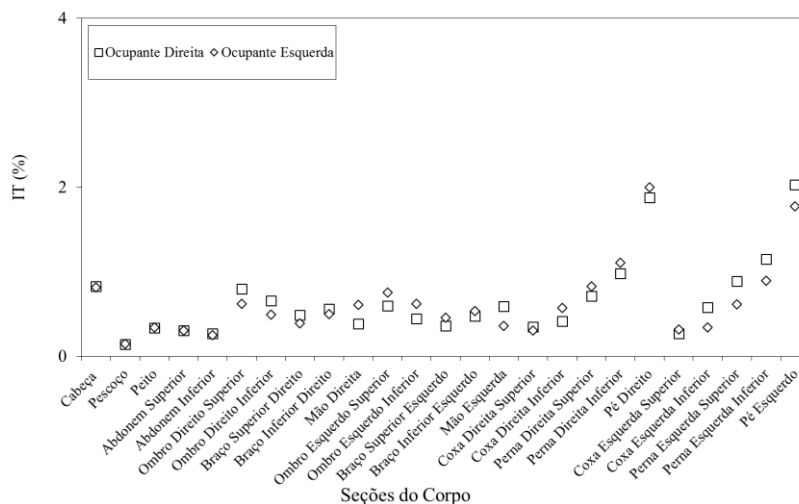


Figura 5.44 – Intensidade de Turbulência do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

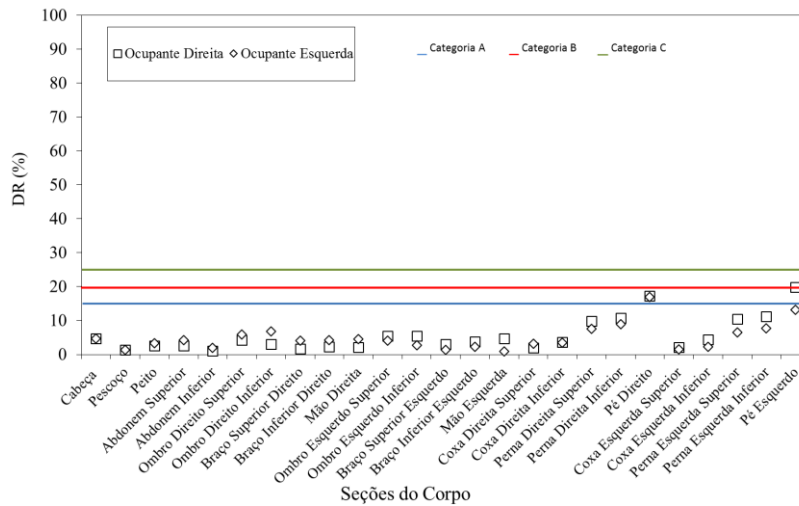


Figura 5.45 – Risco de resfriamento, calculada numericamente, nas 25 seções do corpo humano de dois ocupantes.

A intensidade de turbulência do ar apresenta valores semelhantes para os dois ocupantes, sendo inferior a 2%. A intensidade de turbulência é mais elevada junto a entrada de ar do jatos confluentes, ou seja junto aos pés e pernas inferiores dos ocupantes.

O risco de resfriamento para a situação apresentada com os dois ocupantes, observado na figura 5.45, apresenta os seus valores maioritariamente abaixo dos 14%, contudo existe na zona dos pés, um maior risco de resfriamento na ordem dos 20%, devido a proximidade com a entrada de ar do jato confluyente. Considera-se neste estudo como condição aceitável, um valor máximo de 20% de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico, que segundo a ISO 7730 é uma categoria C (superior).

Na tabela 5.5 são apresentados os resultados do Índice de Distribuição do ar (ADI), baseados no nível de conforto térmico, qualidade do ar e eficiência da ventilação, para o ocupante da direita e da esquerda.

Dados de análise	Ocupante Direita	Ocupante Esquerda
Temperatura de entrada (°C)	25	25
Temperatura média do ar em torno dos ocupantes (°C)	27,08	26,97
Percentagem de pessoas insatisfeitas c/ conforto térmico PPD (%)	15,44	18,55
Número de conforto térmico	0,682	0,599
Concentração de Dióxido de Carbono na zona respiração (mg/m ³)	2249,0	2282,89
Percentagem de pessoas insatisfeitas c/ qualidade do ar interior (%)	12,99	12,99
Taxa de ventilação (m ³ /h/ocupante)	43,63	43,63
Número de qualidade do ar	0,191	0,188
Índice de distribuição do ar	0,361	0,335

Tabela 5.5 – ADI Jatos confluentes com ocupantes

Procedendo a avaliação dos resultados através do índice de distribuição do ar, é possível verificar através da tabela que sendo a temperatura de entrada do ar ambiente de 25°C, a temperatura média do corpo humano é superior, como se tinha observado já anteriormente. Relativamente ao número de conforto térmico, que se relaciona diretamente com a eficiente remoção de calor da câmara, e a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas é baixo devido a temperatura ambiente considerada ser a ambiente,

Da mesma forma se verifica que o índice ADI apresenta valores baixos.

Embora a concentração de dióxido de carbono seja elevada na zona de respiração dos ocupantes, a taxa de renovação de ar apresenta valores superiores ao exigido de 35m³/h/ocupante.

5.3 Situação III - Jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Inverno

Nesta secção são apresentadas as simulações numéricas, referente a situação III com jatos confluentes com ocupantes e chão aquecido em período de Inverno. As simulações numéricas contemplam a velocidade do ar, temperatura, intensidade de turbulência e risco de resfriamento e visam a demonstração pormenorizada da tipologia do fluxo no interior da câmara, em torno dos ocupantes.

Na simulação numérica efetuada com ocupantes e chão aquecido em situação de Inverno, a temperatura de entrada do ar ambiente é de 16°C, sendo que a temperatura média do chão radiante é de 31°C.

A figura 5.46 a), b) e c) apresenta a simulação numérica da velocidade do ar no plano XY, localizada à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Nesta figura observa-se que a velocidade do ar mais elevada é próxima da entrada do jato confluyente junto ao chão (figura 5.46 a)). Na zona dos ocupantes a velocidade do ar é mais uniforme e apresenta valores na ordem dos 0,3 a 0,4m/s (figura 5.46 b) e c)).

Nesta situação o fluxo de ar ao embater nos ocupantes divide-se, sendo direcionado para a parte superior das secções do corpo, e contra a parede existente em frente a entrada de ar, criando uma recirculação do fluxo de ar.

A figura 5.47 a), b) e c) apresenta a simulação numérica da temperatura do ar no plano XY, localizada à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente, e a figura 5.48 representa no eixo XZ a temperatura em redor do ocupante da direita ($Y=1,0$) e o ocupante da esquerda ($Y=1,7$). A temperatura do ar nesta situação em redor do ocupante ronda os 25°C, sendo que na entrada do ar a temperatura ronda os 23°C.

A intensidade de turbulência é representada numericamente na figura 5.49, no plano XY, através da cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Os campos da intensidade de turbulência apresentam maior incidência na zona de entrada dos jatos confluentes. Na figura 5.48 b) e c) verifica-se que a intensidade de turbulência junto aos ocupantes é de cerca 2%.

A figura 5.50 a), b) e c) apresenta a simulação numérica do risco de resfriamento no plano XY, localizado à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Observa-se que o risco é superior na zona junto ao chão e a entrada de ar proveniente dos jatos confluentes, diminuindo para cerca de 10% na zona em redor dos ocupantes ao nível da cota $Z=0,63$ m.

A concentração de CO₂ é apresentada na figura 5.51 a), b) e c), para o ocupante da direita (cota Y=1,0) e ocupante da esquerda (cota Y=1,7). Nesta situação a concentração de CO₂ em redor dos ocupantes é de 500mg/m³., sendo de maior concentração junto a zona de respiração.

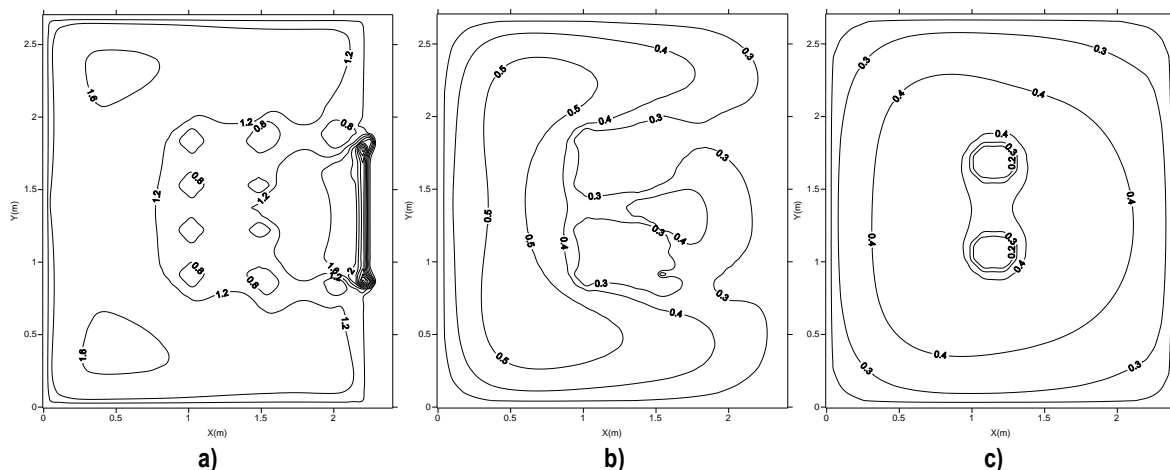


Figura 5.46 – Velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a Z=0.07 a), Z=0.63 b) e Z=1.2 c) acima do nível do chão.

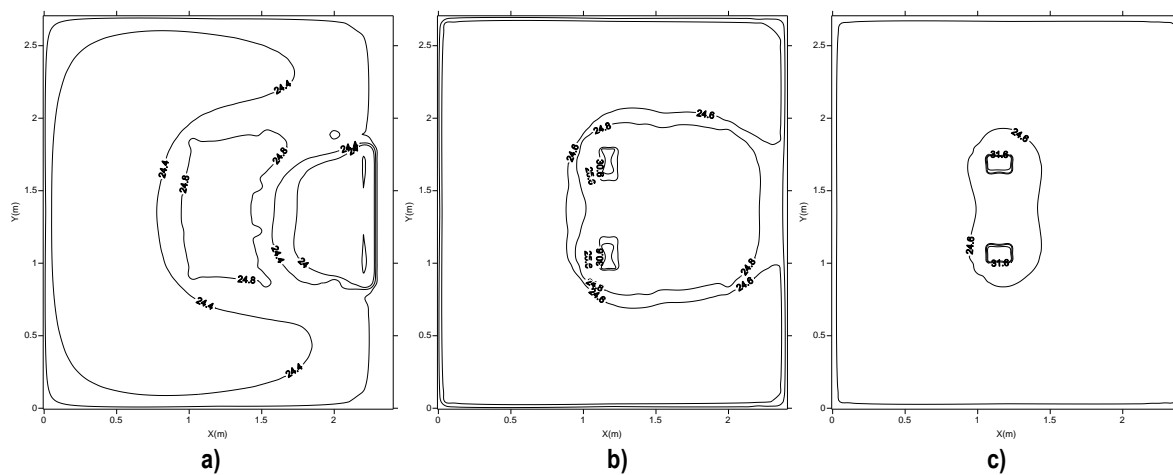


Figura 5.47 – Temperatura do ar no plano horizontal XY localizado a Z=0.07 a), Z=0.63 b) e Z=1.2 c) acima do nível do chão.

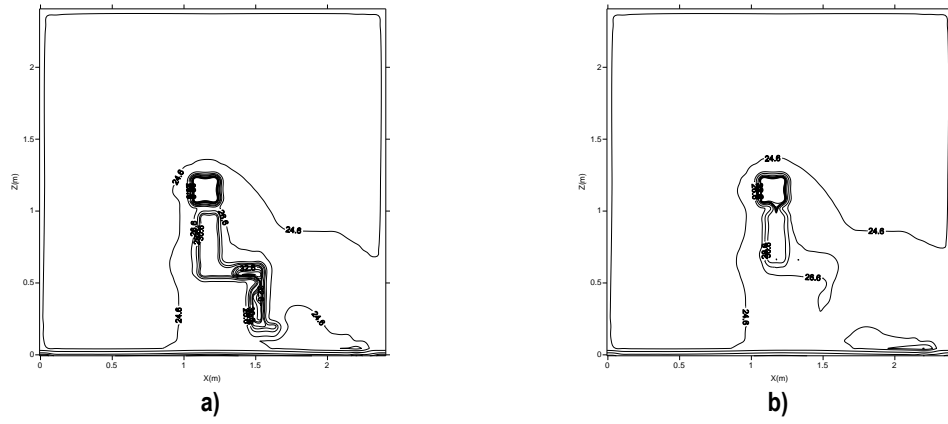


Figura 5.48 – Temperatura do ar no plano horizontal XZ localizado a $Y=1,0$ a), $Y=1,7$ b).

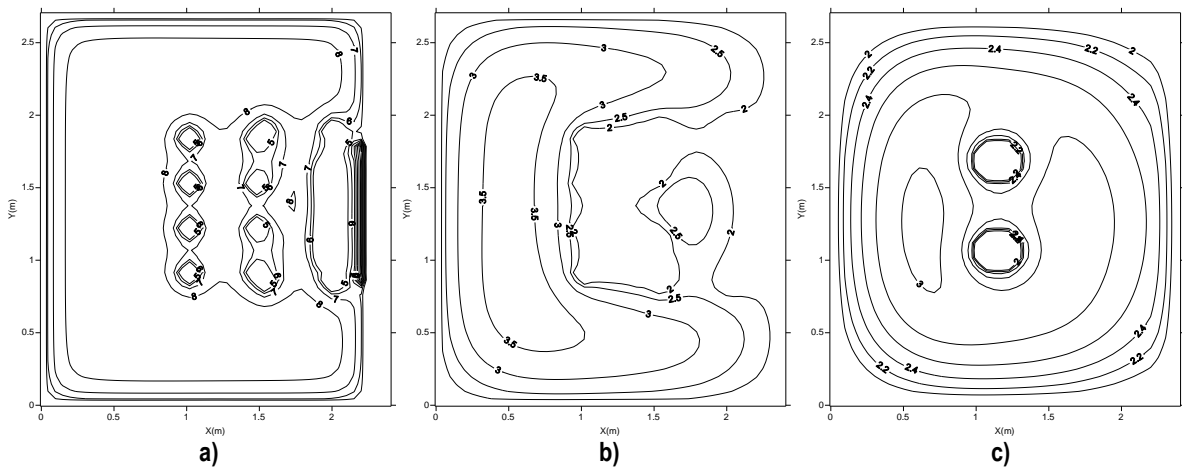


Figura 5.49 – Intensidade de Turbulência no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

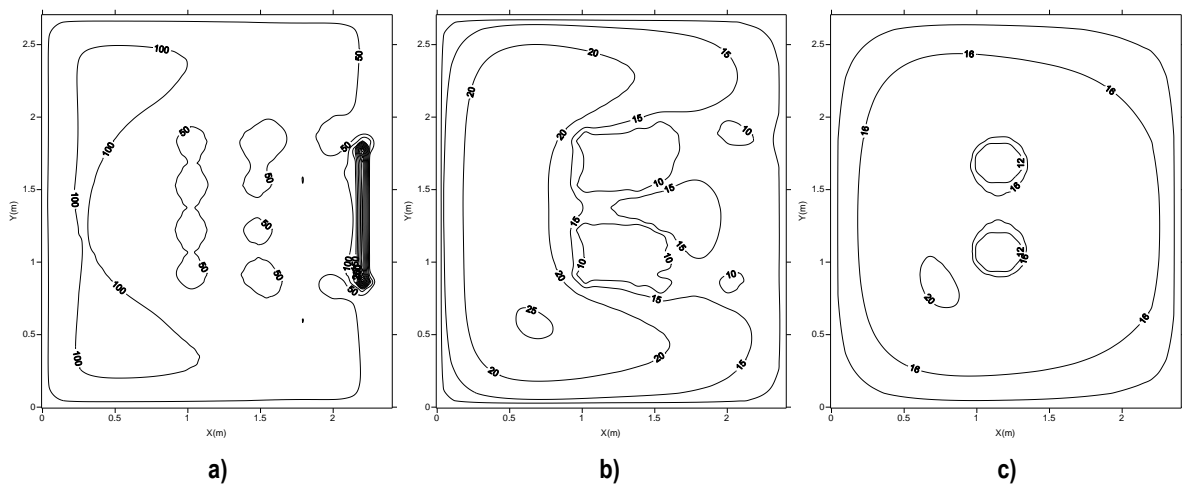


Figura 5.50 – Risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

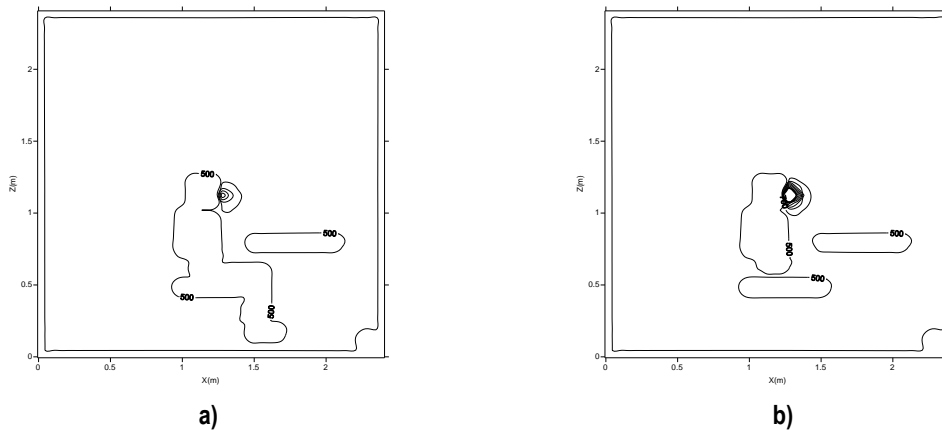


Figura 5.51 – Concentração de CO2 localizado com dois ocupantes no plano Y=1,0 a) e Y=1,7 b).

5.3.1 Análise de conforto

Nesta secção são apresentados os resultados numéricos sobre o fluxo de ar em torno dos ocupantes, o conforto térmico, desconforto térmico e a qualidade do ar interior, através do modelo numérico da dinâmica de fluidos computacional. O fluxo de ar em torno dos ocupantes são apresentados através das 25 secções do corpo humano pela velocidade do ar e pela temperatura do ar. O conforto térmico é apresentado pela Temperatura Média Radiante, o índice PMV e PPD, sendo o desconforto térmico a intensidade de turbulência e risco de resfriamento, e a qualidade do ar interior dado pela concentração de dióxido de carbono, na zona de respiração.

A figura 5.52 apresenta a velocidade do ar calculada numericamente nas 25 secções do corpo humano dos ocupantes e a figura 5.53 a temperatura do ar.

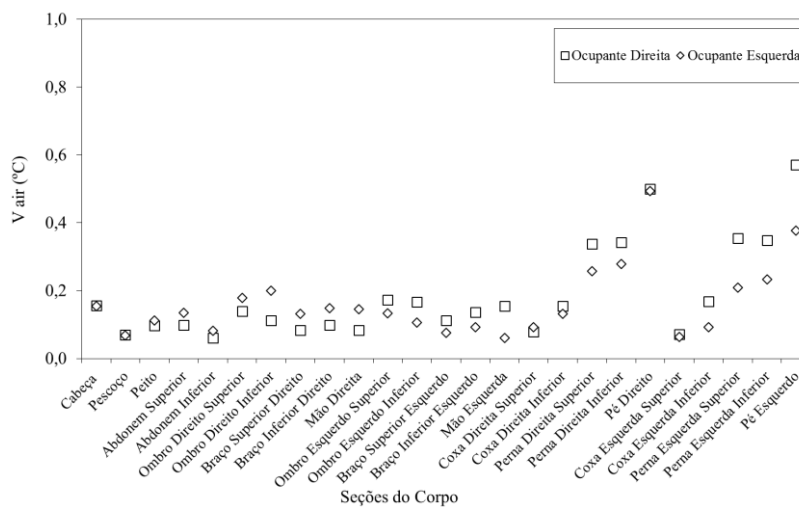


Figura 5.52 – Velocidade do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

A velocidade em redor dos ocupantes é inferior a 0,6m/s, sendo que os dois ocupantes apresentam velocidades semelhantes. Na zona dos pés é onde existe maior velocidades do ar, diminuído na zona das pernas e coxas.

A velocidade em redor dos ocupantes é inferior a 0,6m/s, sendo que os dois ocupantes apresentam velocidades semelhantes. Na zona dos pés é onde existem velocidades do ar mais elevadas e onde a temperatura ambiente é inferior, diminuído na zona das pernas e coxas.

A temperatura de superfície da pele do corpo humano calculada numericamente é apresentada na figura 5.53. A figura 5.54 representa a temperatura media radiante dos dois ocupantes.

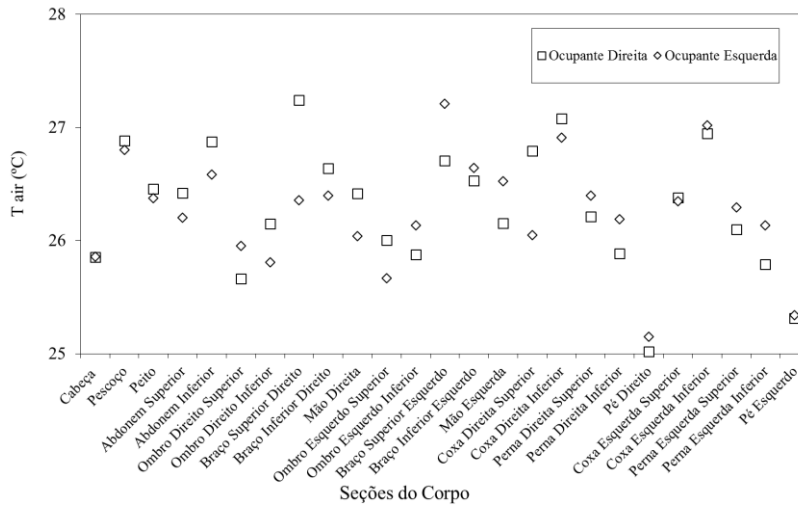


Figura 5.53 – Temperatura do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

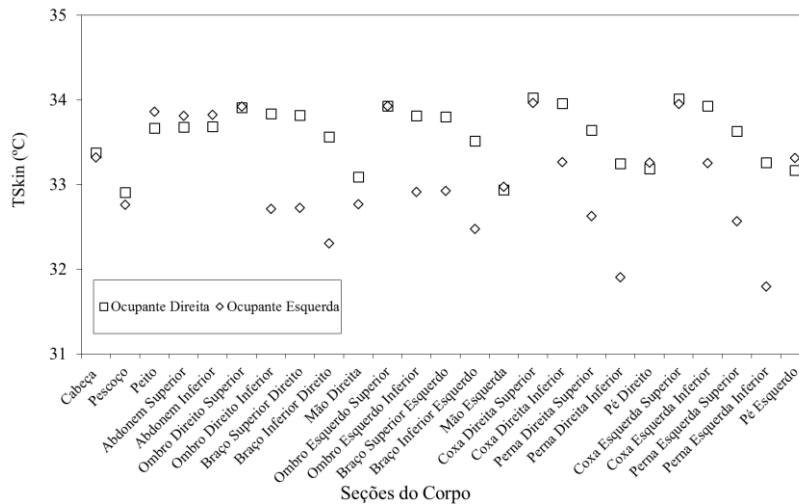


Figura 5.54 – Temperatura de superfície da pele do corpo, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

A temperatura de superfície dos dois ocupantes é semelhante, sendo que as zonas protegidas por roupa apresentam as temperaturas superiores. Com o aumento da temperatura de superfície do corpo humano, a temperatura circundante da câmara irá, através dos fluxos de ar ascendente aumentar a temperatura ambiente. A temperatura ambiente mais elevada localiza-se em torno dos ocupantes.

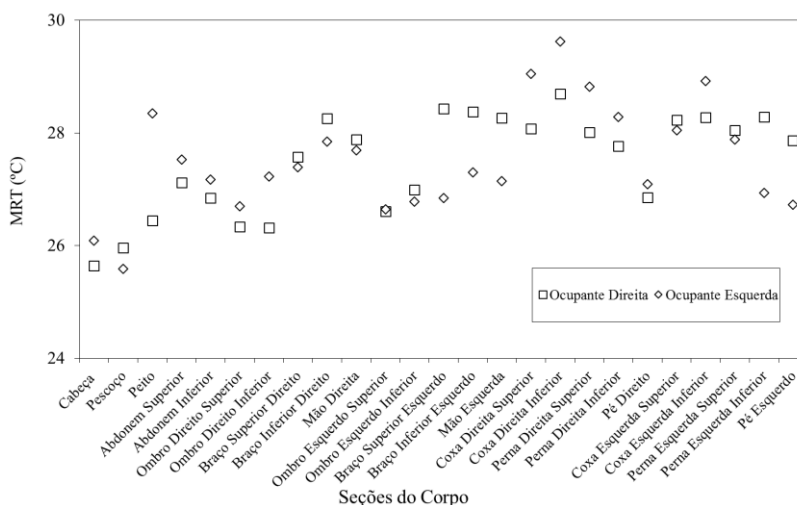


Figura 5.55 – Temperatura Média Radiante, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

Em relação a temperatura média radiante, apresentada na figura 5.55, os valores enquadram-se entre 25 a 30 °C, sendo que as zonas mais elevadas de temperatura se encontram na vizinhança do outro corpo humano, na zona das coxas, onde se realizam as trocas radiativas superiores entre corpos. As zonas do corpo humano expostas a trocas radiativas com a envólvecia da câmara apresentam valores de temperatura inferior.

A figura 5.56 apresenta a intensidade de turbulência do ar e a figura 5.57 o risco de resfriamento do ar, calculado numericamente em torno das 25 secções do corpo humano para o ocupante da direita e da esquerda

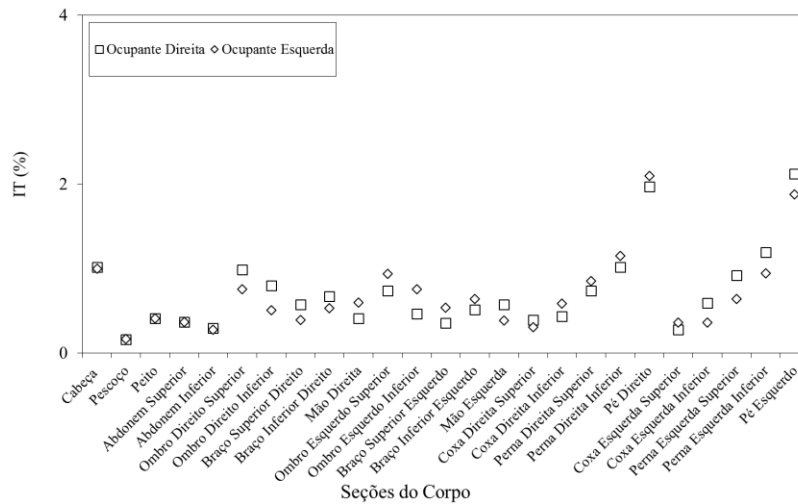


Figura 5.56 – Intensidade de Turbulência do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

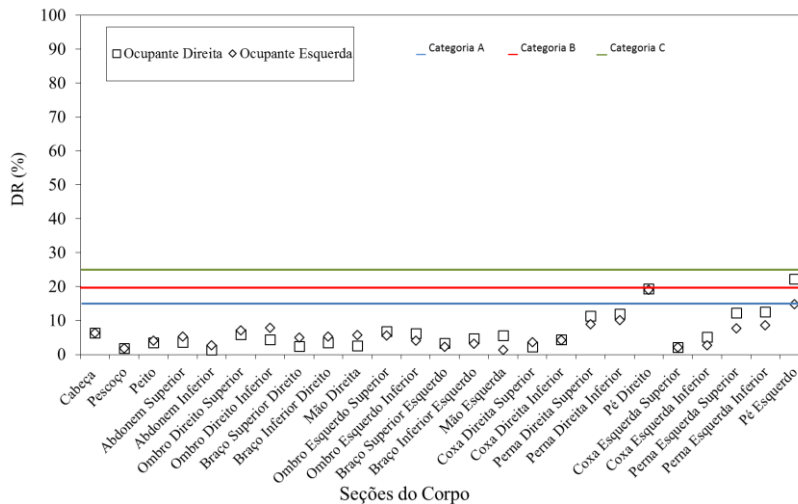


Figura 5.57 – Risco de resfriamento, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

A intensidade de turbulência do ar apresenta valores semelhantes para os dois ocupantes, sendo inferior a 2%. A intensidade de turbulência é mais elevada junto a entrada de ar do jatos confluentes, ou seja junto aos pés e pernas inferiores dos ocupantes.

O risco de resfriamento para a situação apresentada com os dois ocupantes, observado na figura 5.57, apresenta os seus valores maioritariamente abaixo dos 15%, contudo existe na zona dos pés, um maior risco de resfriamento na ordem dos 20%, devido a proximidade com a entrada de ar do jato confluyente.

Apesar do risco de resfriamento ser elevado na zona interior da camara, em redor dos ocupantes, este valor é inferior não causando desconfortos excessivos.

Considera-se neste estudo como condição aceitável, um valor máximo de 20% de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico, que segundo a ISO 7730 é uma categoria C (superior).

Na tabela 5.6 são apresentados os resultados do Índice de Distribuição do ar (ADI), baseados no nível de conforto térmico, qualidade do ar e eficiência da ventilação, para o ocupante da direita e da esquerda.

Dados de análise	Ocupante Direita	Ocupante Esquerda
Temperatura de entrada ar ambiente (°C)	16	16
Temperatura média do ar em torno dos ocupantes (°C)	26,32	26,26
Temperatura média de chão radiante (°C)	31	31
Percentagem de pessoas insatisfeitas c/ conforto térmico PPD (%)	20,47	13,782
Número de conforto térmico	4,03	6,031
Concentração de Dióxido de Carbono na zona respiração (mg/m ³)	1855,44	1883,16
Percentagem pessoas insatisfeitas com qualidade ar interior (%)	12,99	12,99
Taxa de ventilação (m ³ /h)	43,63	43,63
Número de qualidade do ar	0,193	0,189
Índice de distribuição do ar (ADI)	0,884	1,070

Tabela 5.6 – ADI Jatos confluentes com ocupantes e com chão radiante aquecido / Inverno

Procedendo a avaliação dos resultados através do índice de distribuição do ar, é possível verificar através da tabela que sendo a temperatura de entrada do ar ambiente de 16°C, a temperatura média do corpo humano é superior (26°C), como se tinha observado já anteriormente. Relativamente ao número de conforto térmico, que se relaciona diretamente com a eficiente remoção de calor da câmara, e a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas o valor médio é de 5, superior a situação sem qualquer tipo de aquecimento. Os valores do Índice ADI quanto mais elevado for, melhor será o conforto térmico.

A concentração de dióxido de carbono encontra-se nos padrões definidos pela qualidade, ou seja na zona de respiração dos ocupantes é de cerca 1800mg/m³.

A taxa de renovação de ar apresenta valores superiores ao exigido de 35m³/h/ocupante.

5.4 Situação IV - Jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Verão

Nesta secção são apresentadas as simulações numéricas, referente a situação IV com jatos confluentes com ocupantes e chão aquecido em período de Verão. As simulações numéricas contemplam a velocidade do ar, temperatura, intensidade de turbulência e risco de resfriamento e visam a demonstração pormenorizada da tipologia do fluxo no interior da câmara, em torno dos ocupantes.

Na simulação numérica efetuada com ocupantes e chão aquecido em situação de Verão, a temperatura de entrada do ar ambiente é de 28°C, sendo que a temperatura média do chão radiante é de 17°C.

A figura 5.58 a), b) e c) apresenta a simulação numérica da velocidade do ar no plano XY, localizada à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Nesta figura observa-se que a velocidade do ar mais elevada é próxima da entrada do jato confluyente junto ao chão (figura 5.58 a)). Na zona dos ocupantes a velocidade do ar é mais uniforme e apresenta valores na ordem dos 0,3 m/s (figura 5.58 b) e c)).

Nesta situação o fluxo de ar ao embater nos ocupantes divide-se, contornando os ocupantes, sendo direcionado para a parte superior das secções do corpo, e contra a parede existente em frente a entrada de ar, criando uma recirculação do fluxo de ar nas costas dos ocupantes.

A figura 5.59 a), b) e c) apresenta a simulação numérica da temperatura do ar no plano XY, localizada à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente, e a figura 5.60 representa no eixo XZ a temperatura em redor do ocupante da direita ($Y=1,0$) e o ocupante da esquerda ($Y=1,7$). A temperatura do ar nesta situação em redor do ocupante ronda os 26°C, sendo que na entrada do ar a temperatura ronda os 28°C.

A intensidade de turbulência é representada numericamente na figura 5.61, no plano XY, através da cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Os campos da intensidade de turbulência apresentam maior incidência na zona de entrada dos jatos confluentes, e na zona de recirculação atrás dos ocupantes. Na figura 5.61 b) e c) verifica-se que a intensidade de turbulência junto aos ocupantes é de cerca 2%.

A figura 5.62 a), b) e c) apresenta a simulação numérica do risco de resfriamento no plano XY, localizado à cota $Z=0,07$, $Z=0,63$ e $Z=1,2$ respetivamente. Observa-se que o risco é superior na zona junto ao chão e a entrada de ar proveniente dos jatos confluentes, assim como nos cantos da câmara,

devido a recirculação de ar, diminuindo para cerca de 12% na zona em redor dos ocupantes ao nível da cota $Z=0,63\text{m}$.

A concentração de CO_2 é apresentada na figura 5.51 a), b) e c), para o ocupante da direita (cota $Y=1,0$) e ocupante da esquerda (cota $Y=1,7$). Nesta situação a concentração de CO_2 em redor dos ocupantes é de 500mg/m^3 , sendo de maior concentração junto a zona de respiração.

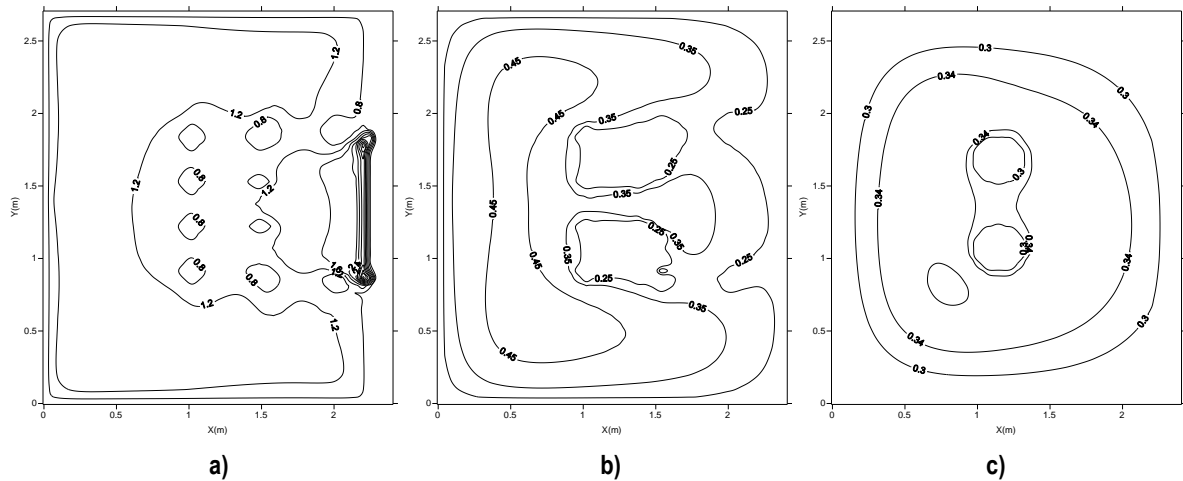


Figura 5.58 – Velocidade do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

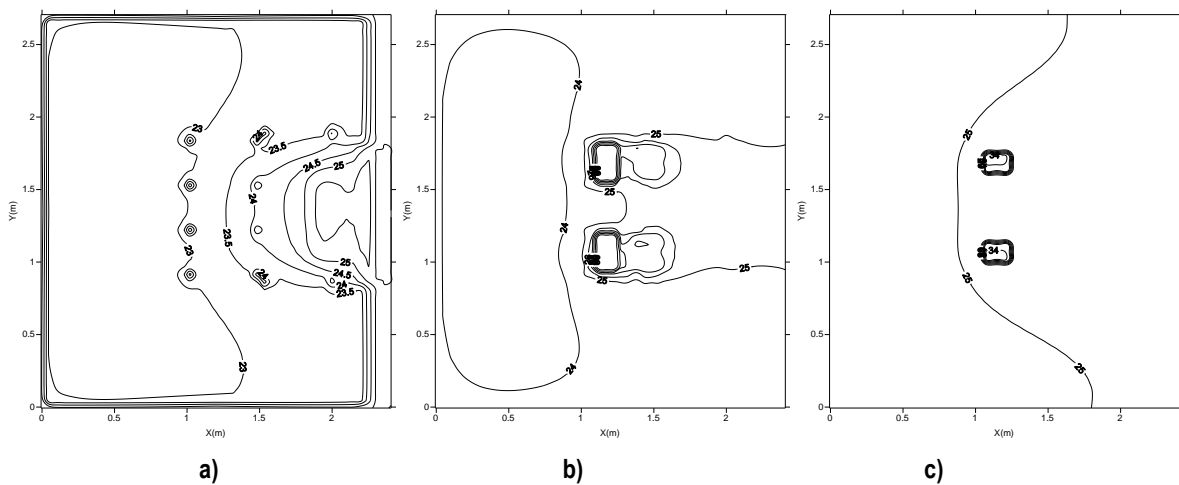


Figura 5.59 – Temperatura do ar no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

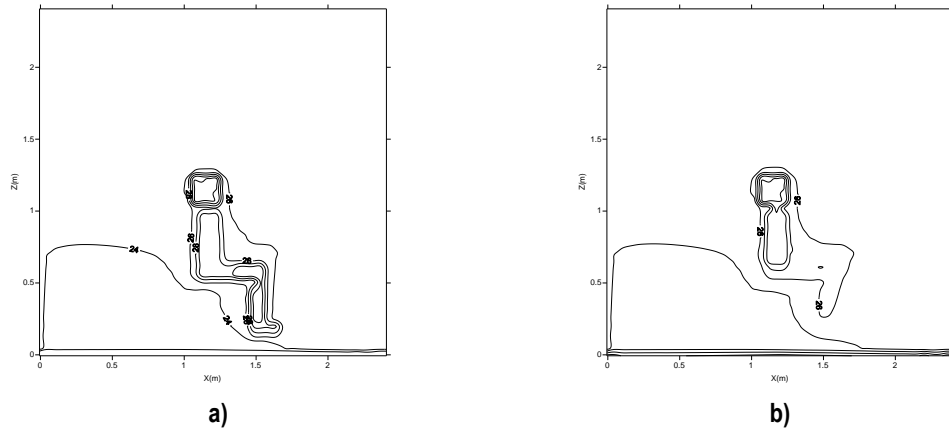


Figura 5.60 – Temperatura do ar no plano horizontal XZ localizado a $Y=1,0$ a), $Y=1,7$ b).

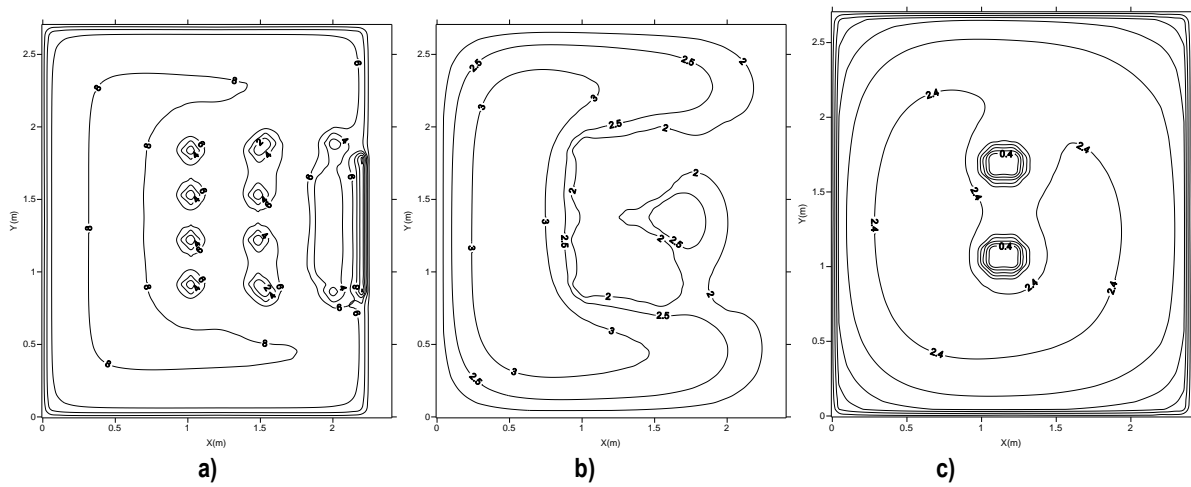


Figura 5.61 – Intensidade de Turbulência no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

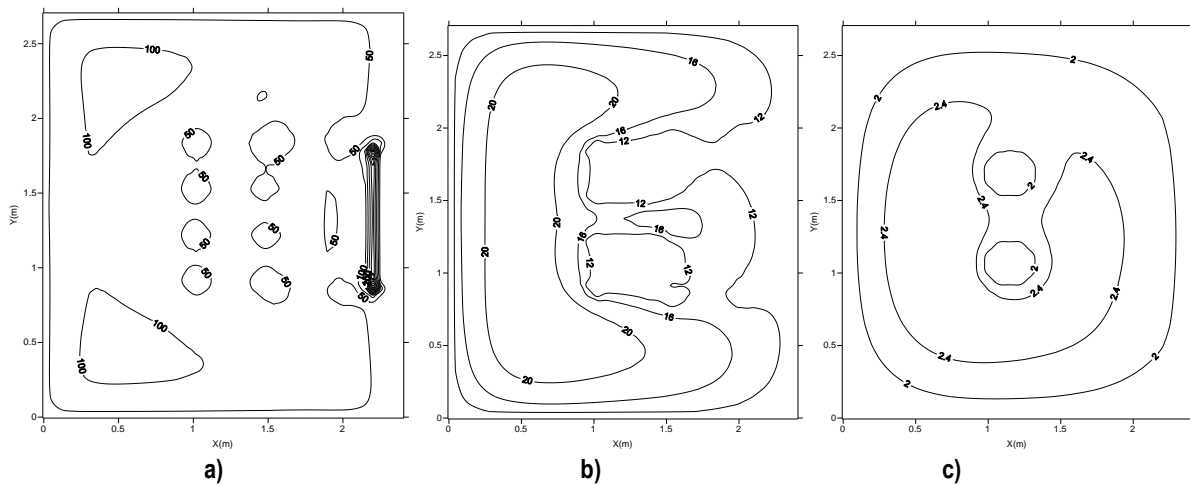


Figura 5.62 – Risco de resfriamento no plano horizontal XY localizado a $Z=0,07$ a), $Z=0,63$ b) e $Z=1,2$ c) acima do nível do chão.

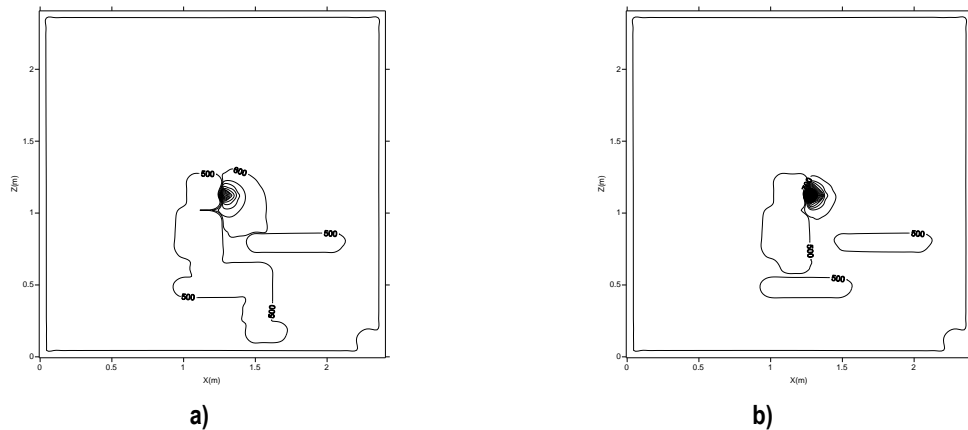


Figura 5.63 – Concentração de CO2 localizado com dois ocupantes no plano Y=1,0 a) e Y=1,7 b).

5.4.1 Análise de conforto

Os resultados numéricos sobre o fluxo de ar em torno dos ocupantes, são apresentados nesta secção através do modelo numérico da dinâmica de fluidos computacional, de forma a verificar o conforto térmico, desconforto térmico e a qualidade do ar interior. O fluxo de ar em torno dos ocupantes são apresentados através das 25 secções do corpo humano pela velocidade do ar e pela temperatura do ar. O conforto térmico é apresentado pela Temperatura Média Radiante, o índice PMV e PPD, sendo o desconforto térmico a intensidade de turbulência e risco de resfriamento, e a qualidade do ar interior dado pela concentração de dióxido de carbono, na zona de respiração.

A figura 5.64 apresenta a velocidade do ar calculada numericamente nas 25 secções do corpo humano dos ocupantes e a figura 5.65 a temperatura do ar.

A velocidade em redor dos ocupantes é inferior a 0,6m/s, sendo que os dois ocupantes apresentam velocidades semelhantes. Na zona dos pés é onde existe maior velocidades do ar, diminuído na zona das pernas e coxas.

A temperatura do ar ambiente varia entre 24 e 28°C, dentro da câmara, sendo inferior na zona de entrada de ar dos jatos confluentes.

A temperatura de superfície da pele do corpo humano calculada numericamente, é apresentada na figura 5.66. A figura 5.67 é a temperatura media radiante dos dois ocupantes.

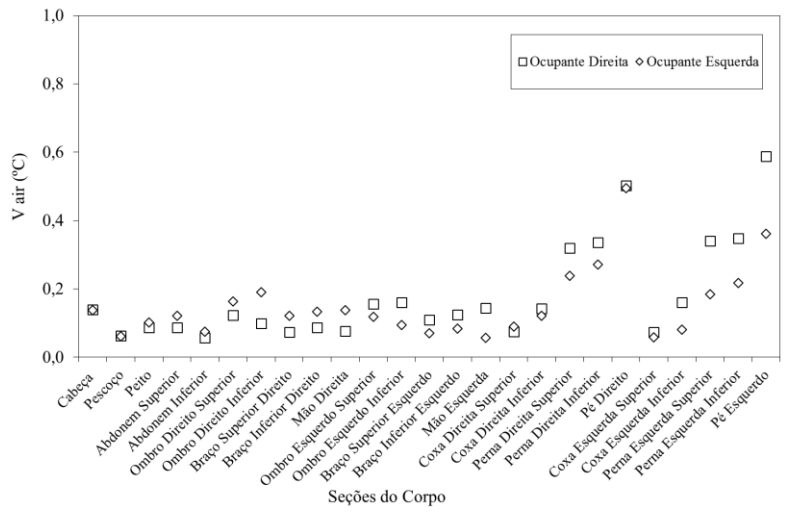


Figura 5.64 – Velocidade do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

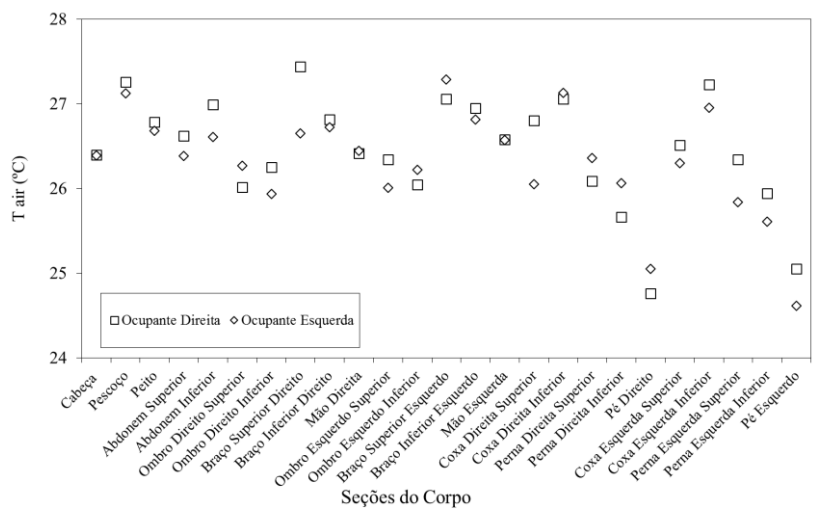


Figura 5.65 – Temperatura do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes. A temperatura de superfície da pele do corpo humano calculada numericamente é apresentada na figura 5.53. A figura 5.54 representa a temperatura media radiante dos dois ocupantes.

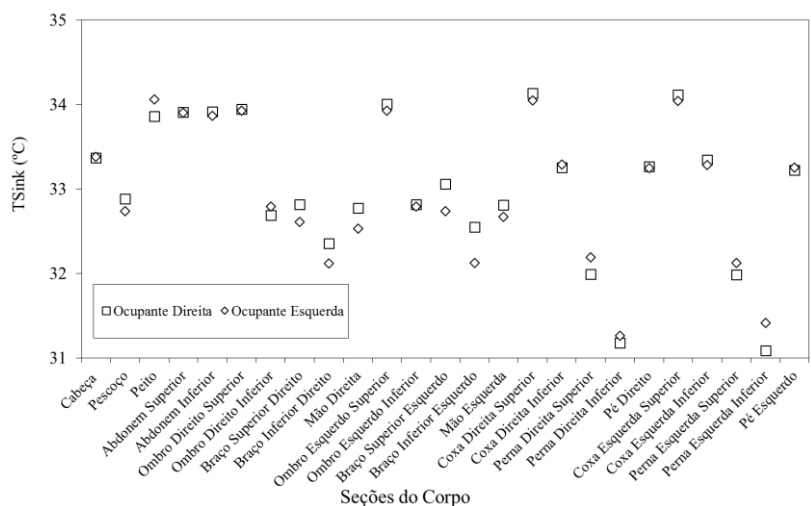


Figura 5.66 – Temperatura de superfície da pele do corpo, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

A temperatura de superfície dos dois ocupantes é semelhante, sendo que as zonas protegidas por roupa apresentam as temperaturas superiores. Com o aumento da temperatura de superfície do corpo humano, a temperatura circundante da câmara irá, através dos fluxos de ar ascendente aumentar a temperatura ambiente. A temperatura ambiente mais elevada localiza-se em torno dos ocupantes.

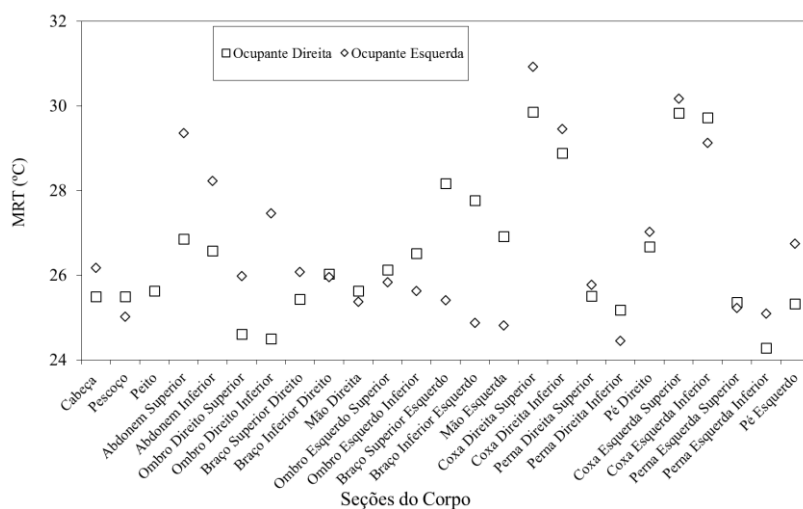


Figura 5.67 – Temperatura Média Radiante, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

Em relação a temperatura média radiante, apresentada na figura 5.67, os valores enquadram-se entre 24 a 31°C, sendo que as zonas mais elevadas de temperatura se encontram na vizinhança do outro corpo humano, na zona das coxas, onde se realizam as trocas radiativas superiores entre corpos. As zonas do

corpo humano expostas a trocas radiativas com a envólvecia da câmara apresentam valores de temperatura inferior.

A figura 5.68 apresenta a intensidade de turbulência do ar e a figura 5.69 o risco de resfriamento do ar, calculado numericamente em torno das 25 secções do corpo humano para o ocupante da direita e da esquerda

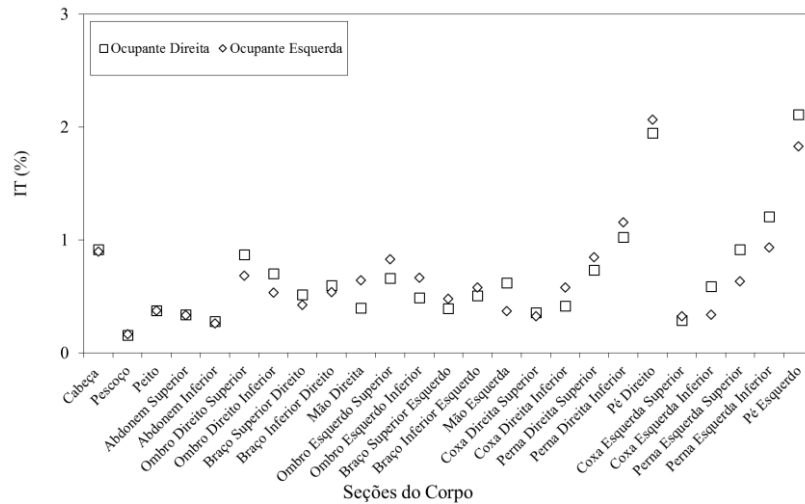


Figura 5.68 – Intensidade de Turbulência do ar, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

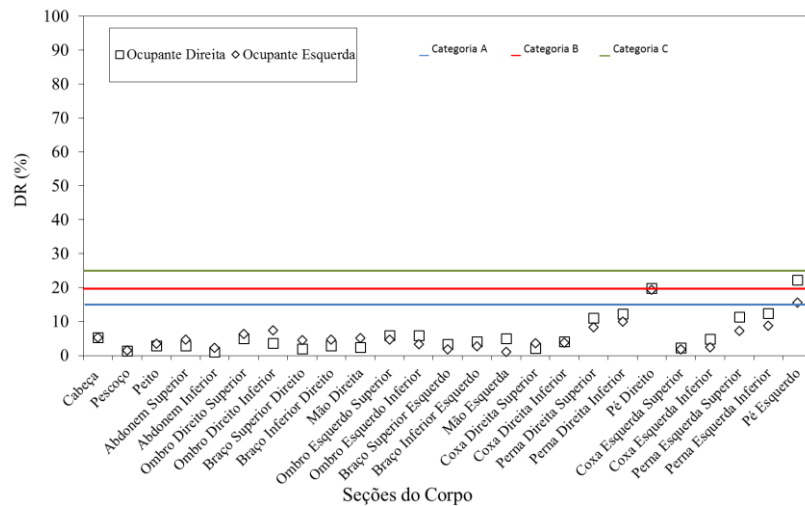


Figura 5.69 – Risco de resfriamento, calculada numericamente, nas 25 secções do corpo humano de dois ocupantes.

A intensidade de turbulência do ar apresenta valores semelhantes para os dois ocupantes, sendo inferior a 2%. A intensidade de turbulência é mais elevada junto a entrada de ar do jatos confluentes, ou seja junto aos pés e pernas inferiores dos ocupantes.

O risco de resfriamento para a situação apresentada com os dois ocupantes, observado na figura 5.69, apresenta os seus valores maioritariamente abaixo dos 15%, contudo existe na zona dos pés, um maior risco de resfriamento na ordem dos 20%, devido a proximidade com a entrada de ar do jato confluyente.

Apesar do risco de resfriamento ser elevado na zona interior da camara, em redor dos ocupantes, este valor é inferior não causando desconfortos excessivos.

Considera-se neste estudo como condição aceitável, um valor máximo de 20% de pessoas insatisfeitas com o conforto térmico, que segundo a ISO 7730 é uma categoria C (superior).

Na tabela 5.7 são apresentados os resultados do Índice de Distribuição do ar (ADI), baseados no nível de conforto térmico, qualidade do ar e eficiência da ventilação, para o ocupante da direita e da esquerda.

Dados de análise	Ocupante Direita	Ocupante Esquerda
Temperatura de entrada ar ambiente (°C)	28	28
Temperatura média do ar em torno dos ocupantes (°C)	26,54	26,39
Temperatura média de chão radiante (°C)	17	17
Percentagem de pessoas insatisfeitas c/ conforto térmico PPD (%)	10,11	14,21
Número de conforto térmico	19,62	12,66
Concentração de Dióxido de Carbono na zona respiração (mg/m ³)	2123,22	2156,62
Percentagem pessoas insatisfeitas com qualidade ar interior (%)	12,99	12,99
Taxa de ventilação (m ³ /h)	43,63	43,63
Número de qualidade do ar	0,191	0,187
Índice de distribuição do ar (ADI)	1,93	1,54

Tabela 5.7 – Tabela 5.8 – ADI Jatos confluentes com ocupantes e com chão radiante aquecido / Verão

Procedendo a avaliação dos resultados através do índice de distribuição do ar, é possível verificar através da tabela que sendo a temperatura de entrada do ar ambiente de 28°C, a temperatura média do corpo humano é superior (26,5°C), como se tinha observado já anteriormente. Relativamente ao número de conforto térmico, que se relaciona diretamente com a eficiente remoção de calor da câmara, e a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas apresenta um valor mais elevado do que na situação anterior. Da mesma forma se verifica que o índice ADI apresenta valores superiores, tendo esta condição valores de melhor conforto térmico.

A concentração de dióxido de carbono encontra-se em valores mais elevados que os 1800mg/m³, devido a temperatura do ar ambiente ser superior.

A taxa de renovação de ar apresenta valores superiores ao exigido de 35m³/h/ocupante.

6 Aplicação das energias renováveis

Definidos que estão as condições de conforto para ambiente com ocupantes em situação de Inverno e Verão, poderemos sugerir para estudos futuros, a determinação da fonte de energia renovável a aplicar de forma a manter os níveis de conforto pré-definidos.

Neste caso de forma a garantir a temperatura do chão radiante, em período de Inverno, poderá ser acoplado um sistema de caldeira a biomassa, em virtude de existir material orgânico em quantidade expressiva no nosso ecossistema. Este tipo de aquecimento apresenta vantagens além de baixo custo de aquisição, de ser um recurso renovável. A Caldeira permite aquecer a água que irá circular na tubagem embecida no chão, através da bomba de recirculação, permitindo regular a temperatura pretendida do chão e ambiente.

Para a situação de Verão, a busca de temperaturas mais baixa é uma prioridade. Nesta situação uma forma ecológica de aproveitar as energias renováveis e através da geotermia, que através da aplicação de uma bomba de recirculação, permite aproveitar independentemente das condições climáticas a temperatura estabilizada que se encontra no subsolo. A uma profundidade de aproximadamente 14m a temperatura do solo encontra-se a 15°C, normalmente constante durante todo o ano.

Neste tipo de sistemas a bomba de recirculação poderá ser alimentada através de um painel solar com acumulação por bateria, de forma a garantir o funcionamento em qualquer hora do dia/semana.

A aplicação destes sistemas em buscas das condições de conforto aqui estudadas irá permitir aferir qual o sistema mais eficiente e económico a utilizar nas condições de Verão e Inverno.

7 Análise de Resultados

No estudo desenvolvido foi analisado o nível de conforto térmico, o desconforto térmico e os níveis da qualidade do ar, utilizando a ventilação de entrada por jatos confluentes, localizados junto ao nível do chão em frente aos ocupantes numa câmara experimental. A simulação numérica foi feita sem e com ocupação, utilizando a dinâmica de fluidos acoplado ao modelo "Virtual Air Flow" e ao modelo "Human Thermal Comfort".

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que o fluxo de ar de entrada dos jatos confluentes atinge a parede oposta da câmara e criando uma fluxo ascendente com perda de capacidade.

A Accuracy dos resultados obtidos que se aproxima de 1, indica que existe uma boa concordância de valores entre o modelo experimental e numérico.

Quando o estudo é efetuado com ocupantes o fluxo de ar da entrada dos jatos, ao aproximar dos membros inferiores dos ocupantes submete-se a um desvio de contorno, criando recirculações de ar em redor do ocupante.

Na situação II do estudo realizado a velocidade máxima do ar em redor dos ocupantes é de 0,4 m/s para uma temperatura de entrada do ar a 25°C, sendo a temperatura média radiante de 25 a 31°C e a temperatura da superfície da pele dos dois ocupantes de 31 a 35°C. Para esta situação o risco de resfriamento encontra-se inserido na categoria C.

Para o estudo realizado na situação III, com ocupantes, chão radiante em período de Inverno, a temperatura do chão radiante é de 31°C, a velocidade do ar no máximo atinge 0,6 m/s, sendo a temperatura do ar entre 25 a 27°C, e a temperatura da pele dos ocupantes de 31 a 34°C. Neste caso o risco de resfriamento está definido na categoria C.

Para a situação IV em período de Verão com chão radiante com ocupantes, a temperatura do chão é de 17°C, a velocidade do ar no máximo atinge 0,6 m/s, sendo a temperatura do ar entre 24.5 e 27.5°C, e a temperatura da pele dos ocupantes de 31 a 34.5°C. Neste caso o risco de resfriamento está definido na categoria C.

Dados de análise	Jatos confluentes com ocupação		Jatos confluentes com ocupação e chão aquecido/Inverno		Jatos Confluentes com ocupação e chão aquecido/Verão	
Temperatura média do chão radiante (°C)	25	25	31	31	17	17
Percentagem de pessoas insatisfeitas c/ conforto térmico PPD (%)	15,44	18,55	20,47	13,78	10,11	14,21
Número de Conforto Térmico	0,682	0,599	4,03	6,031	19,62	12,66
Índice PMV	≈C	≈C	≈C	C	C	C
Risco de Resfriamento	C	C	C	C	C	C
Concentração de Dióxido de Carbono na zona respiração (mg/m ³)	2249,0	2282,89	1855,44	1883,16	2123,22	2156,62
Índice de Distribuição do ar (ADI)	0,361	0,335	0,884	1,070	1,93	1,54

Tabela 7.1 – Resumo ADI Jatos confluentes com ocupantes e com chão radiante aquecido Inverno e Verão

De uma análise geral verifica-se que dos dados obtidos os ocupantes apresentam uma velocidade do ar, temperatura do ar e temperatura da superfície da pele semelhantes. As velocidades de ar mais elevadas estão junto a entrada de ar dos jatos confluentes, que com ocupação se situa junto aos pés dos ocupantes.

Ao nível de conforto térmico verifica-se que o Índice PMV, se situa na categoria C, sendo a situação IV a que apresenta maior índice de ADI, consequentemente melhor conforto térmico.

Ao nível do risco de resfriamento a categoria é a C sendo que a zona dos pés é fortemente influenciada pela entrada do ar diretamente dos jatos e os ombros e a cabeça é influenciado pela recirculação de ar.

Finalmente, de acordo com os resultados obtidos, a concentração de dióxido de carbono na zona de respiração é aceitável para ambos os ocupantes.

8 Referências Bibliográficas

- Al-Sanea, S., Zedan, M.F., Al-Harbi, M.B., (2011) – *Heat transfer characteristics in air-conditioned rooms using mixing air-distribution system under mixed convection condition*. International Journal of Thermal Sciences 59: 247-259.
- Behne, M. (1999) – *Indoor air quality in rooms with cooled ceilings. Mixing ventilation or rather displacement ventilation?* Energy and buildings 30: 155-166.
- Bolashikov, Z.D., Melikov, A.K. (2009) – *Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens*. Building and environmental 44: 1378-1385.
- Catalina, T., Virgone, J., Kuznik, F., (2009) – *Evaluation of thermal comfort using combined CFD and Experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling*. Building and Environment 44: 1740-1750.
- Causone, F., Baldin, F., Olesen, W., Corgnati, S., (2010) – *Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: possibilities and limitations*. Energy and Buildings 42: 2338-2352.
- Chen, H.J., Moshfegh, B., Cehlin, M., (2012) – *Numerical investigation of the flow behavior of an isothermal impinging jet in a room*. Building and Environment 49: 154-166.
- Chen, H.J., Moshfegh, B., Cehlin, M., (2013) – *Investigation on the flow and the thermal behavior of impinging jet ventilation system in an office with difference heat loads*. Building and Environment 59: 127-144.
- Conceição, E. Z. E., Lúcio, M. M. J. R., Ruano, A.E.B., Crispim, E.M. (2009) - *Development of a temperature control model used in HVAC systems in school spaces in Mediterranean climate*. Building and Environment 44: 871-877.
- Conceição, E. Z. E., Lúcio, M. M. J. R., (2010) - *Evaluation of 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, E. Z. E., Lúcio, M. M. J. R., (2006) – *Modelação das trocas radiativas verificadas em indivíduos sentados em secretárias climatizadas*. Conferência Nacional de métodos numéricos em mecânica dos fluidos e termodinâmica. Faculdade de Ciência e tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- 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. (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., Lúcio, M. M. J. R., (2011) – *Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling system and subjected to uniform convective environment*. Applied Mathematical Modelling 35: 1292-1305.

- Conceição, E. Z. E., Lúcio, M.M.R., Rosa, S., Custódio, A., Andrade, R., Meira, M., (2010) – *Evaluation of comfort level in desk equipped with two personalized ventilation systems in slightly warm environments*. Building and Environment 45: 601-609.
- Conceição, E.Z.E., Lúcio, M.M.J.R., Awbi, H., (2012) – *Comfort and airflow evaluation in spaces equipped with mixing ventilation and cold radiant floor*. Artigo desenvolvido no âmbito de um projecto aprovado e financiado pela FCT e POCI 2010, financiado pela European Comunitary Fund FEDER.
- Decreto – Lei n.º 118 (2013), *que aprovou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, do Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril, que aprovou o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, e do Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril, que aprovou o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.*, Diário da República, I Série – A, n.º 159, 20 de Agosto.
- Fanger, P.O., (2001) – *Human requirements in future air-conditioned environments*. International Journal of Refrigeration 24: 148-153.
- Fanger, P.O., Toftum, J., (2002) – *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*. Energy and Buildings 34: 533-536.
- 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*.
- Jin, X., Zhang, X., Luo, Y., (2010) – *A Calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system*. Building and Environment 42: 1753-1758.
- Karamipناه, T., e Awbi, H.B., (2002) – *Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation*. Building and Environment 37: 1329-1342.
- Karamipناه, T., Awbi, H.B., Sandberg, M., Blomqvist, C., (2007) - *Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor level air supply system in classrooms*. Building e Environment 42: 647-655.
- Kim, T., Kato, S., Murakami, S., (2001) – *Indoor cooling/heating load analysis based on coupled simulation of convection, radiation and HVAC control*. Building and Environment 36: 901-908.
- Kim, T., Kato, S., Murakami, S., Rho, J., (2005) – *Study on indoor thermal environment of office space controlled by cooling panel system using field measurement and the numerical simulation*. Building and Environment 40: 301-310.
- Memon, R.A., Chirarattananon, S., Vangtook, P., (2008) – *Thermal Comfort assessment and application of radiant cooling: A case study*. Building and Environment 43: 1185-1196.
- Miriél, J., Serres, L., Trombe, A., (2002) – *Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions*. Applied Thermal Engineering 22: 1861-1873.
- Olesen, B. W., *Radiant floor heating in theory and practice*. ASHRAE Journal, vol. 44, no. 7, p.19-24
- Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Maestre, I., (2011) – *The map of energy flow in HVAC systems*. Applied energy 88: 5020-5031.
- Rabinovich, S. (2010) - *Evaluating measurement accuracy: a practical approach*. Springer New York Dordrecht Heidelberg, London.

Santiago, C.I.M., *Eco Ventilação: Desenvolvimento de uma ventilação mais ecológica*, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve.

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.

Yu, B.F., Hu., Z.B., Liu, M., Yang, H.L., Kong, Q.X., Liu, Y.H., (2009) – *Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health*. International Journal of refrigeration 32: 3-20.

Zhang, L., Liu, X., Jiang, Y., (2012) – *Simplified calculation for cooling/heating capacity, surface temperature distribution of radiant floor*. Energy and Buildings 55: 394-404.