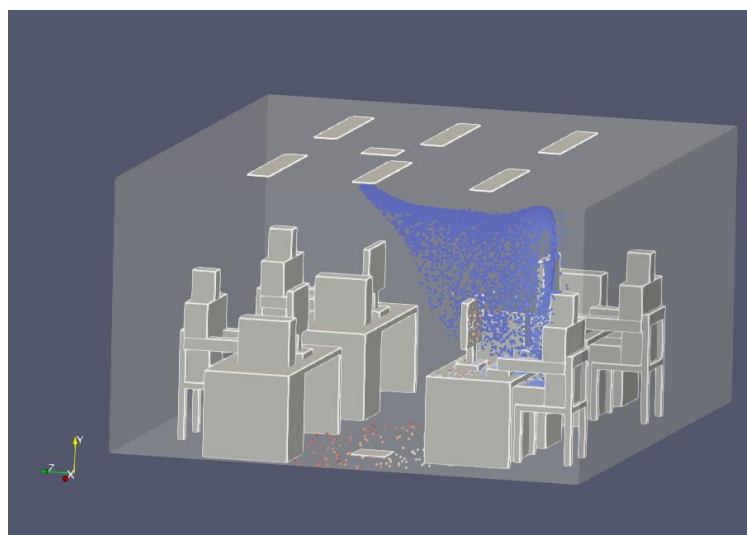


**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**



## **Construção de uma ferramenta de ambiente gráfico animado para simulação de propagação de gotículas**

**JÚNIOR ABDULAI ROMÃO MANÉ**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Doutor Nelson Pereira Caetano Marques

Júri:

Presidente: Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão

Vogal: Doutor José Maria Campos Silva André

Vogal: Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Construção de uma ferramenta de ambiente gráfico animado para simulação de propagação de gotículas**

**JÚNIOR ABDULAI ROMÃO MANÉ**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues  
Doutor Nelson Pereira Caetano Marques

Júri:

Presidente: Doutor Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão  
Vogal: Doutor José Maria Campos Silva André  
Vogal: Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

**Setembro 2022**



# Agradecimentos

O autor do trabalho gostaria de agradecer, em primeira instância, aos seus orientadores, o Doutor Nuno Domingues e o Doutor Nelson Marques por toda a ajuda prestada no desenvolvimento do trabalho, não só pelo fornecimento de todas as ferramentas técnico-científicas necessárias para o desenvolvimento do projeto, mas também pelo acompanhamento e disponibilidade demonstrados ao longo do trabalho. Ressalvar ainda a oportunidade concedida de poder participar num projeto de dimensão europeia, e de usufruir de todos os benefícios daí decorrentes.

Um agradecimento a todos os colaboradores da empresa FS DYNAMICS Portugal blueCAPE Lda., em especial ao Eng.º Bruno Santos pela incansável ajuda, disponibilidade e paciência, sempre demonstradas no desenvolvimento do trabalho, assim como pela transmissão de conhecimento precioso na área de CFD.

Por fim, uma palavra de apreço para com a empresa DesignBuilder software Ltd. por ter cedido uma licença de estudante para o desenvolvimento do trabalho.



# Resumo

Prever a disseminação de gotículas respiratórias pode ser um fator importante na prevenção da disseminação de doenças transmitidas pelo ar em diversos ambientes. Assim sendo, neste trabalho era pretendido desenvolver uma ferramenta animada que permitisse a simulação e análise da dispersão de gotículas respiratórias em diferentes ambientes. Fundamentalmente, a ferramenta era composta por 4 softwares interligados, onde para executar as referidas simulações foi necessário realizar 2 etapas, em primeira instância, foi necessário simular o escoamento de ar desenvolvido no interior da sala, e, posteriormente, procedeu-se à simulação do escoamento das partículas respiratórias nessa mesma sala.

Para criar o espaço físico a ser simulado, bem como para implementar as condições de fronteira inerentes à simulação, foi empregue o software *DesignBuilder*. Para efetuar as simulações do escoamento de ar, bem como para executar as simulações de escoamento de partículas, utilizou-se o software de CFD (Mecânica de Fluidos Computacional) *OpenFOAM*. Na etapa do pós-processamento dos resultados gerados nas simulações, foi utilizado o software *ParaView*, permitindo a melhor observação das linhas de corrente desenvolvidas no interior do espaço físico, bem como da distribuição das partículas. Para analisar os resultados das simulações, foram compilados uma série de scripts gerados pelo *ParaView*, sendo posteriormente exportados para folhas Excel, permitindo a elaboração de gráficos.

Por forma a avaliar o desempenho da ferramenta foram desenvolvidas uma série de simulações CFD, tanto de escoamento de ar, como de escoamento de partículas emitidas em diferentes regimes de respiração (espirro, tosse, respiração em repouso, situação de falar), simulados em modelos com configurações distintas e uma comparação entre elas foi estabelecida.

Verificou-se, portanto, que nos casos em que o ocupante espirrava, o sistema de ventilação foi mais eficiente na remoção de partículas, e no modelo 8, na totalidade dos casos, foi onde se verificou uma maior remoção das partículas por parte do sistema de ventilação.

Por oposição, o modelo 5 foi aquele onde o sistema de ventilação foi menos eficiente na remoção de partículas. Como era expectável, observou-se ainda que nos modelos sem ventilação (2 e 4), existia um maior risco de infeção para os ocupantes em comparação como os restantes modelos.

Os resultados das simulações mostraram que a ferramenta teve um bom desempenho, permitindo retirar algumas conclusões, tais como a eficiência do sistema de ventilação implementado em cada simulação, quais as superfícies dentro da sala que foram mais contaminadas, ou em qual dos ambientes simulados os ocupantes foram mais infetados.

Não obstante de se terem retirado todas as conclusões supracitadas, a ferramenta ainda se encontra na sua fase embrionária, sendo necessário melhorá-la em termos de automatismo entre os softwares e maior capacidade de discretizar os resultados do pós-processamento.

**Palavras-Chave:** Simulação CFD, Partículas Respiratórias, Escoamento de Ar, Escoamento de Partículas, Regimes de Respiração, Modelos CFD.



# Abstract

Predicting the spread of respiratory droplets can be an important factor in preventing the dissemination of airborne diseases in different environments. As such, in this work it is presented the initial creation of an animated tool that allows the simulation and analysis of respiratory droplets' dissemination in different environments. Fundamentally the tool created was composed of 4 interconnected software, and to execute the referred simulations it was necessary to perform 2 steps, first it's necessary to simulate the airflow developed inside the room, and subsequently the respiratory droplets' propagation. Firstly, to create the physical space to be simulated as well as to implement the CFD (Computational Fluid Dynamics) boundaries inherent to the simulation, *DesignBuilder* was operated.

Then, to start off the airflow simulation as well as to run the particle flow simulations *OpenFOAM* was employed. To perform the post-processing of the results generated in the simulations, *ParaView* was employed allowing the better observation of the streamlines developed inside the physical space as well as the particles' distribution. To obtain the output of the tool, it was compiled a series of scripts generated by *Paraview* that were disposed in an Excel spreadsheet, followed by the elaboration of charts which demonstrated the particles' behaviour inside the simulated models.

To evaluate the tool's performance a series of airflow and particle flow CFD simulations were performed in models with different settings and a comparison between them was established.

It was, therefore, verified that in cases where the occupant sneezed, the ventilation system was more efficient in removing particles, and in model 8, in all breathing regime cases, the ventilation system was more efficient in terms of particle removal efficiency. In opposition, model 5 was the one where the ventilation system was less efficient in removing particles. As expected, it was also observed that in the models without a ventilation system (2 and 4), there was a greater risk of infection for the occupants compared to the other models.

The results of the simulations showed that the tool performed well, thus allowing the withdrawal of some conclusions such as the ventilation system efficiency, which surfaces inside the room were most contaminated, or in which scenario the occupants were most infected.

Nevertheless, the tool's outcome is still rudimentary, as it is still required to upgrade it in terms of automatism between the software and greater ability to discretize post-processing results.

**Keywords:** CFD Simulation, Respiratory Droplets, Airflow, Particle flow, breathing regimes, CFD models.

# Índice

<b>Agradecimentos .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tabelas.....</b>	<b>xvi</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Estrutura do Trabalho.....	1
1.2. Enquadramento.....	1
1.3. Objetivo.....	2
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>4</b>
2.1. Dimensão da Partículas Respiratórias .....	4
2.2. Equações do Modelo CFD .....	5
2.3. Método de previsão da dispersão das partículas .....	5
2.4. Software CFD , modelo de turbulência e número de elementos da malha utilizados ...	7
2.5. Tipologia de Simulação CFD.....	9
2.6. Simulação do escoamento na região perto das paredes.....	9
2.7. Quadro-Síntese .....	10
2.8. Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	14
<b>3. Equações do Modelo CFD .....</b>	<b>15</b>
3.1. Equações Em Análise.....	15
3.1.1. Equação da continuidade.....	15
3.1.2. Equação do momento .....	16
3.1.3. Equação do momento – dinâmica das partículas.....	16
3.1.4. Equação da energia.....	17
3.1.5. Modelo de turbulência.....	18
<b>4. Modelo de Validação .....</b>	<b>21</b>
4.1. Softwares utilizados .....	21
4.2. Fatores condicionantes .....	22
4.2.1. Incerteza na localização dos pontos de medição de velocidade e de temperatura experimentais .....	22

4.2.2.	Incerteza da dimensão e localização exata dos elementos constituintes do modelo físico	23
4.2.3.	Comunicação com os autores do artigo.....	24
4.2.4.	Auxílio no desenvolvimento do software <i>blueCFD-Kernel</i> .....	25
4.3.	Modelação da Geometria e Condições de Fronteira.....	25
4.3.1.	Dimensões da sala e dos elementos constituintes.....	25
4.3.2.	Condições de fronteira .....	26
4.4.	Estudo de Validação do Modelo Numérico .....	28
4.4.1.	Diferenças entre modelos de turbulência <i>BCFDK</i> e <i>kEpsilon</i> .....	29
4.4.2.	<i>Modus Operandi</i> da Evolução do Estudo.....	30
4.4.3.	Evolução do Estudo a partir do Caso de Referência 1 .....	31
4.4.4.	Evolução do Estudo a partir do Caso de Referência 2 .....	38
4.4.5.	Evolução do Estudo a partir do Caso de Referência 3 .....	42
4.4.6.	Evolução do Estudo a partir dos Caso de Referência 4 e 5 .....	61
4.5.	Conclusões a Retirar do Estudo de Validação.....	69
4.5.1.	Aspetos Relacionados com o Artigo Científico .....	69
4.5.2.	Fenómenos Que Tornam A Análise Qualitativa .....	71
4.5.3.	Noções a reter para a realização dos casos de estudo do capítulo 4.....	73
<b>5.</b>	<b>Casos de Estudo .....</b>	<b>74</b>
5.1.	Modelo Base para criação das pastas <i>Sim.particleFoam</i> .....	74
5.2.	1º Modelo para Estudo do Escoamento de Partículas .....	76
5.3.	<i>Settings</i> Casos de Estudo de Escoamento de Partículas .....	78
5.3.1.	<i>Settings</i> das Simulações do Emissor a Falar.....	82
5.3.2.	<i>Settings</i> das Simulações do Emissor a Espirrar .....	84
5.3.3.	<i>Settings</i> das Simulações do Emissor a Tossir.....	85
5.3.4.	<i>Settings</i> das Simulações do Emissor em Respiração Normal.....	86
5.4.	Modelos CFD Analisados .....	88
5.4.1.	Modelo 1: Caso Standard .....	89
5.4.2.	Modelo 2: Sala Sem Sistema de Ventilação.....	91
5.4.3.	Modelo 3: Ar Condicionado no Teto .....	91
5.4.4.	Modelo 4: Radiador Instalado Numa Parede Lateral .....	93
5.4.5.	Modelo 5: Janelas Abertas a 10% e Porta Aberta a 10% .....	94
5.4.6.	Modelo 6: Janelas Abertas a 50% e Porta Aberta a 10% .....	97
5.4.7.	Modelo 7: Janelas Abertas a 10% e Porta 100% Fechada.....	98
5.4.8.	Modelo 8: Janelas Abertas a 50% e Porta 100% Fechada.....	100
5.5.	Resultados Obtidos.....	102
5.5.1.	Resultados Modelo 1 .....	103

5.5.2.	Resultados Modelo 2 .....	111
5.5.3.	Resultados Modelo 3 .....	114
5.5.4.	Resultados Modelo 4 .....	117
5.5.5.	Resultados Modelo 5 .....	120
5.5.6.	Resultados Modelo 6 .....	124
5.5.7.	Resultados Modelo 7 .....	128
5.5.8.	Resultados Modelo 8 .....	132
<b>6.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>136</b>
6.1.	Conclusões dos casos de estudo .....	136
6.2.	Trabalhos Futuros.....	138
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>140</b>
	<b>Apêndice A - Comparação de Gráficos dos Resultados Numéricos Vs Resultados Experimentais.....</b>	<b>144</b>
	<b>Apêndice B - Malhas dos Casos de Referência.....</b>	<b>152</b>
	<b>Apêndice C - Alterações Manuais via Edição de Ficheiros de Texto de Configuração dos Casos .....</b>	<b>159</b>
	<b>Apêndice D - Determinação da Dimensão e Localização das Geometrias do Modelo Físico, e da Localização dos Pontos de Medição de Velocidade e Temperatura .....</b>	<b>169</b>
	<b>Anexo A - Dados Fornecidos pelo Professor Q. Chen .....</b>	<b>177</b>

# Índice de Figuras

Figura 1. Representação 2D do Modelo Físico do Artigo [8] .....	23
Figura 2. Modelo Físico 3D do artigo [8] .....	24
Figura 3. Comparação Resultados Numéricos Vs Experimental conduzida no artigo [8] .....	28
Figura 4. Comparação Gráficos Resultados Numérico Vs Experimental: Modelo kEpsilon (Em Cima) Vs Modelo BCFDK (Em Baixo).....	30
Figura 5. Comparação Gráficos Experimental Vs Numérico do Caso 1 de Referência.....	32
Figura 6. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Ocupantes Com Potência (Em Cima) Vs Ocupantes Com Temperatura (Em Baixo).....	33
Figura 7. Comparação Corte de Secção Região dos Humanos: Com Potência (Esquerda) Vs Com Temperatura (Direita).....	34
Figura 8. Comparação Corte Secção Malha: Sem Refinação dos Ocupantes em Altura (Esquerda) Vs Com Refinação dos Ocupantes em Altura (Direita).....	35
Figura 9. Comparação Corte Secção Região Humanos: Com Refinação (Esquerda) Vs Sem Refinação (Direita).....	35
Figura 10. Y+ da Simulação Com Refinação em Redor dos Ocupantes.....	36
Figura 11. Delta T: Wall Functions OpenFOAM (Esquerda) VS Wall Functions Kernel (Direita) .....	37
Figura 12. Delta P: Wall Functions OpenFOAM (Esquerda) VS Wall Functions Kernel (Direita) .....	38
Figura 13. Delta T: Refinação Nível 1 Teto (Esquerda) Vs Refinação Nível 2 Teto (Direita)...	39
Figura 14. Delta P: Refinação Nível 1 Teto (Esquerda) Vs Refinação Nível 2 Teto (Direita)...	40
Figura 15. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 2 (Em Cima) Vs Caso de Referência 1 (Em Baixo).....	40
Figura 16. Resolução de Vórtices: Malha Base 5cm (esquerda) Vs Malha Base 10cm.....	41
Figura 17. Comparação dos Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 3 (Em Cima) Vs Caso de Referência 2 (Em Baixo).....	43
Figura 18. Delta T: Malha Base 5 cm Wall Functions OpenFOAM (Esquerda) Vs Wall Functions do Kernel (Direita) .....	44
Figura 19. Delta P: Malha Base 5 cm Wall Functions OpenFOAM (Esquerda) Vs Wall Functions do Kernel (Direita) .....	44
Figura 20. Comparação Y+ e U na Zona de Transição: Com Wall Functions OpenFOAM (Esquerda) Vs com Wall Functions Kernel (Direita).....	45

Figura 21. Corte de Secção: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita).....	46
Figura 22.Comparação Y+ e U: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita).....	47
Figura 23. Delta T: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita).....	48
Figura 24. Delta P: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita).....	48
Figura 25. Comparação do Gráfico Numérico Vs Experimental da Medição 7: Malha Refinações Nível 0 (Esquerda) VS Malha Com Refinação Nível 1 nas Paredes e Teto (Direita) .....	49
Figura 26. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Malha Sem Refinações: Malha Base 5 cm (Em Cima) Vs Malha Base 8,5 cm (Em Baixo) .....	50
Figura 27. Comparação Gráfico Numérico Vs Experimental Medição 1, Perfis de Temperatura (Esquerda para a Direita): Caso de Referência 1 Vs Caso de Referência 2 Vs Caso de Referência 3.....	50
Figura 28. Exemplo de Escoamento de um determinado fluido ao longo de uma placa.....	51
Figura 29. Geração de Malha Com Layers: Malha Base 8,5 cm (Imagens Cima) e Malha Base de 5 cm (Imagens de Baixo).....	52
Figura 30.Efeito de Adição de Layers na Temperatura do domínio: Simulação V0 (Esquerda) Vs Sem Layers (Direita).....	53
Figura 31. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Perfis de Temperatura, Malha Base 5 cm: Simulação com Layers (Em Cima) Vs Sem Layers (Em Baixo).....	53
Figura 32. Y+ nas superfícies das salas, Malha Base de 5cm: Com Layers (Em Cima) Vs Sem Layers (Em Baixo) .....	54
Figura 33. Fenómenos de Aglutinação de Células na Região dos Ocupantes: Malha de 5 cm de Base.....	57
Figura 34. Erros de Posicionamento dos Ocupantes no DesignBuilder .....	57
Figura 35. Reposicionamento dos Ocupantes no DesignBuilder .....	58
Figura 36. Geração de Malha Região dos Ocupantes após reposicionamento + inserção de Layers nos Ocupantes .....	58
Figura 37. Temperatura nos Ocupantes: V1 (Esquerda) Vs V0 (Direita) .....	59
Figura 38. Comparação Difusores Verticais: Simulação V1 (Esquerda) Vs Simulação V0 (Direita).....	60
Figura 39. Comparação Difusores Inclinados: Simulação V1 (Esquerda) Vs Simulação V0 (Direita).....	60

Figura 40. Comparação de Gráficos Numérico Vs Experimental: V1 (Em Cima) Vs V0 (Em Baixo).....	60
Figura 41. Aplicação de Layers no Chão + Difusores: Simulação V2.....	62
Figura 42. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: V2 (Em Cima) Vs V1 (Em Baixo) .....	63
Figura 43. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 4 (Em Cima) Vs Caso de Referência 3 (Em Baixo).....	64
Figura 44. Comparação de V1, V2, V3 (Em cima da Esquerda para a Direita), V4, V5 e V6 (Em baixo, da Esquerda para a Direita) .....	66
Figura 45. Comparação Numérico Vs Experimental de V1, V2, V3, V4, V5 e V6: Perfis de Velocidade (Esquerda) e Perfis de Temperatura (Direita) .....	67
Figura 46. Comparação Malha Junto ao chão e difusores (Da Esquerda Para a Direita): V3.5, V2 e V1 .....	68
Figura 47. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 5 (Em Cima) Vs Caso de Referência 4 (Em Baixo).....	68
Figura 48. Comparação Gráfico Numérico Vs Experimental, Perfil de Velocidades V3.5, Medição 5: Discrepância de medições $\pm 5\text{cm}$ .....	70
Figura 49. Comparação Fenómeno de Alargamento do centro Vórtice – Medição 5: Simulação V3.5 (Esquerda) Vs Simulação V7 (Direita).....	71
Figura 50. Fenómeno de Alargamento de Vórtice: Simulação V3.5 (Esquerda) Vs Simulação V7 (Direita).....	72
Figura 51. Comparação de Gráficos Numérico Vs Experimental: Modelo 0 (Em Cima) Vs Caso de Referência 5 (Em Baixo).....	76
Figura 52. Configurações do Modelo 1 (Esquerda) e Ocupantes Mais Complexos (Direita).....	77
Figura 53. Localização do Cone de Injeção: Posição Certa (Esquerda) e Posição Utilizada nas Simulações (Direita).....	82
Figura 54. Elementos Comuns Constituintes do Modelo 1 a 8 (Da Esquerda para a Direita): Cadeira, Mesa, Monitor, Teclado, Torre.....	89
Figura 55. Configurações do Modelo 2.....	91
Figura 56. Configurações do Modelo 3 (Esquerda), com Ar Condicionado (À Direita em Cima) e Janela (À Direita em Baixo), em destaque .....	92
Figura 57. Configurações do Modelo 4 (Esquerda), e Radiador (Direita) em destaque .....	94
Figura 58. Configurações do Modelo 5.....	95
Figura 59. Configurações do Modelo 6.....	97
Figura 60. Configurações do Modelo 7.....	99
Figura 61. Configurações Modelo 8.....	100
Figura 62. Exemplo de Comportamento das Partículas ao Longo de Cada Simulação .....	102

Figura 63. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Falar .....	103
Figura 64. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Falar .....	103
Figura 65. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Espirrar .....	105
Figura 66. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Espirrar.....	105
Figura 67. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Tossir .....	106
Figura 68. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Tossir.....	106
Figura 69. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Respiração Normal .....	107
Figura 70. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Respiração Normal.....	107
Figura 71. Conclusões Relevantes Retiradas do Modelo 1 para os 4 regimes de respiração: (Em cima da Esquerda para a Direita) Falar e Espirrar, (Em Baixo da Esquerda para a Direita), Tossir e Respiração Normal .....	108
Figura 72. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 1.....	110
Figura 73. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 1: Parte 2 .....	110
Figura 74. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 2.....	111
Figura 75. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 2 .....	112
Figura 76. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 2 .....	112
Figura 77. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 2 .....	113
Figura 78. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 2.....	113
Figura 79. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 3 .....	114
Figura 80. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 3 .....	115
Figura 81. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 3 .....	115
Figura 82. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 3 .....	116
Figura 83. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 3.....	116
Figura 84. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 4.....	117
Figura 85. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 4 .....	118
Figura 86. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 4 .....	118
Figura 87. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 4 .....	119
Figura 88. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 4.....	119
Figura 89. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 5.....	120

Figura 90. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 5 .....	121
Figura 91. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 5 .....	122
Figura 92. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal- Modelo 5 .....	122
Figura 93. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 5.....	123
Figura 94. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 6.....	124
Figura 95. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 6 .....	125
Figura 96. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 6 .....	125
Figura 97. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 6 .....	126
Figura 98. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 6.....	127
Figura 99. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 7.....	128
Figura 100. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 7 .....	128
Figura 101. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 7 .....	129
Figura 102. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 7 .....	130
Figura 103. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 7.....	131
Figura 104. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 8.....	132
Figura 105. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 8 .....	132
Figura 106. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 8 .....	133
Figura 107. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 8 .....	134
Figura 108. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 8.....	134

# Índice de Tabelas

Tabela 1: Quadro-Síntese 1 (Parte 1 de 2) .....	10
Tabela 2: Quadro Síntese 1 (Parte 2 de 2).....	11
Tabela 3: Quadro-Síntese 2 (Parte 1 de 2) .....	12
Tabela 4: Quadro-Síntese 2 (Parte 2 de 2) .....	13
Tabela 5: Localização Pontos de Medição de Velocidade/Temperatura no Interior do Modelo	23
Tabela 6: Dimensões de Atravancamento do Modelo Físico.....	26
Tabela 7: Dimensões dos Elementos Constituintes do Modelo Físico.....	26
Tabela 8: Condições de Fronteira a Implementar no Modelo Físico .....	26
Tabela 9: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Extrator de Ar .....	27
Tabela 10: Características Malha: Caso de Referência 1 .....	31
Tabela 11. Características da Malha: Caso de Referência 2 .....	39
Tabela 12: Características da Malha: Caso de Referência 3 .....	42
Tabela 13: Tentativas de Inserção de Layers nos Difusores, para simulação V2 .....	62
Tabela 14: Características da Malha: Caso de Referência 4 .....	63
Tabela 15: Simulações de Melhoria de Aplicação de Layers.....	65
Tabela 16: Características da Malha: Caso de Referência 5 .....	69
Tabela 17: Características da Malha: Modelo 0.....	75
Tabela 18: Características a Implementar no ficheiro kinematicCloudProperties .....	79
Tabela 19: Características a Implementar: Regime de Respiração de Falar (Parte 1) .....	82
Tabela 20: Características a Implementar: Regime de Respiração de Falar (Parte 2) .....	83
Tabela 21: Características a Implementar: Regime de Respiração de Espirrar (Parte 1).....	84
Tabela 22: Características a Implementar: Regime de Respiração de Espirrar (Parte 2).....	84
Tabela 23: Características a Implementar: Regime de Respiração de Tossir (Parte 1).....	85
Tabela 24: Características a Implementar: Regime de Respiração de Tossir (Parte 2).....	86
Tabela 25: Características a Implementar: Regime de Respiração Normal .....	87
Tabela 26: Modelos CFD criados e Respetiva Nomenclatura .....	88
Tabela 27: Características da Malha: Modelo 1 .....	89
Tabela 28: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 1.....	90
Tabela 29: Características da Malha: Modelo 2.....	91
Tabela 30: Características da Malha: Modelo 3.....	92
Tabela 31: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 3.....	92
Tabela 32: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 3.....	93
Tabela 33: Características da Malha: Modelo 4.....	94

Tabela 34: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 4.....	94
Tabela 35: Características da Malha: Modelo 5.....	95
Tabela 36: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 5.....	96
Tabela 37: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 5.....	96
Tabela 38: Características da Malha: Modelo 6.....	97
Tabela 39: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 6.....	98
Tabela 40: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 6.....	98
Tabela 41: Características da Malha: Modelo 7.....	99
Tabela 42: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 7.....	99
Tabela 43: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 7.....	99
Tabela 44: Características da Malha: Modelo 8.....	101
Tabela 45: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 8.....	101
Tabela 46: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 8.....	101



# 1. Introdução

## 1.1. Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em 6 capítulos, constando no epílogo do documento os capítulos adicionais dedicados às referências bibliográficas, apêndices e anexos. No capítulo 1, é possível ler a introdução do trabalho, verificando o seu objetivo e respetivo enquadramento teórico. No capítulo 2 é apresentada de forma sucinta, a revisão bibliográfica efetuada aquando da elaboração do trabalho. No capítulo 3 encontram-se descritas as equações do modelo físico CFD que foram utilizadas no desenvolvimento da ferramenta.

No capítulo 4 é descrita toda a sequência de simulações CFD que foram efetuadas para se obter a validação do modelo CFD. No capítulo 5 encontram-se exibidas todas as etapas percorridas para a criação e simulação da dispersão de partículas nos diversos modelos, assim como toda a análise efetuada relativamente aos resultados obtidos nas simulações. Por fim, no capítulo 6 encontram-se referidas as conclusões obtidas no trabalho, assim como uma menção a eventuais trabalhos futuros.

## 1.2. Enquadramento

Este trabalho encontra-se inserido no projeto PAFSE (*partnerships for science and education*) financiado pela União Europeia, via programa *Horizon 2020*, onde várias Universidades europeias estão envolvidas, sendo uma delas, o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Sucintamente, é requerido a cada uma das Universidades que desenvolvam uma série de cenários educacionais a serem abordados em escolas do 3º Ciclo, que permitam consciencializar os alunos para problemas de saúde pública, nomeadamente fatores e comportamento de risco, e o papel que os alunos poderão desempenhar na sua comunidade para a mitigação de tais problemas. [1]

Um dos problemas de saúde pública a ser abordado num dos cenários educacionais desenvolvidos pelo ISEL, foca-se nas doenças que se propagam por via aérea. Para abordar este tema, pretende-se desenvolver esta ferramenta para que os alunos consigam estudar, de forma simples e prática, o processo de escoamento de partículas em diversos

ambientes. Este trabalho foi essencialmente motivado pela recente crise pandémica do vírus Sars-Cov2 (COVID-19), uma vez que ainda é incerto a forma como o vírus se propaga, embora na comunidade científica seja comumente defendido que este se transmite essencialmente pelo ar. [2] [3] [4]

Nesse sentido, nos primeiros anos da pandemia, a diretriz de combate adotada pelas organizações de saúde de cada país passou, fundamentalmente, pelo confinamento das populações, de forma a restringir o contacto entre as mesmas, e em determinados países, como Portugal, em locais fechados foi mesmo obrigatório o uso de máscaras de maneira a mitigar a propagação do vírus. [5]

Por conseguinte, os espaços físicos em estudo neste trabalho são locais fechados, onde as medidas restritivas adotadas nos primeiros anos da pandemia se fizeram sentir de forma mais rigorosa.

Com os avanços tecnológicos alcançados atualmente, faz todo o sentido a implementação de uma ferramenta como a de simulação CFD (Mecânica dos Fluidos Computacional), que permite simular e prever a dispersão de partículas respiratórias, e com isto, identificar por exemplo, locais com maior propensão para a disseminação de doenças respiratórias entre indivíduos, propondo alterações aos projetos dos sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e da QAI (Qualidade do Ar Interior), por forma a reduzir contágios nestes locais, ou a identificação de quais os sistemas de ventilação mais eficientes ao nível da remoção de partículas, dos espaços analisados.

### **1.3. Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de ambiente gráfico animado que permita analisar e simular a dispersão de gotículas de ar de respiração emitidas em condições normais (situações em que uma pessoa fala, e respira estando em repouso), de espirro, ou de tosse, por parte de um indivíduo em ambientes com diversas configurações.

Ter-se-ão em conta vários fatores para o desenvolvimento desta ferramenta, tais como os elementos inerentes ao espaço simulado (janelas, portas, ocupantes, etc...), e a influência dos sistemas de ventilação. A ferramenta será criada utilizando uma metodologia CFD (Mecânica dos Fluidos Computacional) e pretende-se, em primeira instância, validar a criação de um modelo CFD simplificado, através de um estudo obtido via revisão bibliográfica, que possua uma base credível de resultados experimentais.

Após validação, pretende-se aprofundar a aplicação da ferramenta, incrementando o número de geometrias e configurações a analisar a partir do modelo CFD inicial simplificado, procurando retirar várias conclusões acerca do processo de dispersão de partículas e dos impactos para a saúde pública que incorrem deste processo.

Inicialmente, pretende-se, por exemplo, perceber a influência que os sistemas de ventilação, bem como os diferentes regimes de respiração, e ainda os elementos inerentes aos ambientes simulados (mesas, cadeiras, janelas, portas, etc...) terão, na dispersão das partículas respiratórias. Posteriormente, tendo em conta esta informação, em cada ambiente simulado ir-se-ão deduzir algumas conclusões, tais como o nível de infecciosidade nos humanos, ou a eficiência de remoção de partículas por parte do sistema de ventilação presente em cada ambiente simulado, quer seja este natural (com janelas e/ou portas), ou mecânico (sistema de ventilação de ar forçado), permitindo assim, inferir sobre eventuais riscos para a saúde pública decorrentes da dispersão de partículas nos ambientes simulados.

## 2. Revisão Bibliográfica

No decurso da revisão bibliográfica efetuada, verificou-se que existia uma extensão considerável de trabalhos diretamente relacionados com a criação de metodologias CFD, com vista à simulação da dispersão de partículas respiratórias em espaços fechados. Não obstante, muitos dos artigos analisados não possuíam resultados experimentais que corroborassem os resultados numéricos obtidos nas simulações, pelo que se teve em atenção de selecionar o mínimo de artigos deste tipo, procurando incorporar na revisão bibliográfica estudos numéricos que fossem validados por resultados experimentais.

### 2.1. Dimensão da Partículas Respiratórias

Um dos principais fatores aquando do desenvolvimento da metodologia CFD a aplicar nestes estudos, prende-se com a dimensão da partícula respiratória que será simulada, e os fenómenos físicos inerentes à sua dispersão. Em 2 trabalhos especificamente desenvolvidos na tentativa de determinar a dimensão média das partículas respiratórias emitidas pelos seres humanos, concluiu-se que, em [6], um estudo realizado por Yang, Lee, Chen, Wu e Yu, em que foram testados diferentes grupos etários, as partículas respiratórias emitidas teriam dimensões compreendidas entre 4 a 7  $\mu m$ , e em [7], num estudo realizado por Duguid, verificou-se que as partículas respiratórias teriam dimensões compreendidas entre 1 a 2000  $\mu m$  numa fase inicial, dependendo do regime de respiração (espirro ou tosse), onde alguns instantes após a emissão, as partículas fragmentavam-se em núcleos com dimensões variáveis entre 1/3 a 1/5 do núcleo que lhes deu origem.

Noutros estudos, como por exemplo, no trabalho desenvolvido por Zhang e Chien [8], que procurava determinar o transporte e a distribuição de partículas respiratórias em salas com ventilação, as partículas simuladas possuíam dimensões de 0.7  $\mu m$ . Chao, Wan, e Sze To [9], na tentativa de simular o transporte e remoção de partículas respiratórias numa ala hospitalar, utilizaram partículas com diferentes dimensões (1.5, 12, 28, 45, 87.5 e 137.5  $\mu m$ ). Wang, Qian, Zhou e Zheng [10], na tentativa de otimizar um sistema de corrente de ar para restringir as partículas respiratórias contaminadas, simularam partículas com dimensões de 10  $\mu m$ .

Como se verifica na análise destes artigos, ainda não se reuniu um consenso na comunidade científica relativamente ao tamanho exato das partículas respiratórias.

## **2.2. Equações do Modelo CFD**

Ainda em relação à metodologia CFD, por forma a simular o escoamento de ar nos espaços simulados, todos os artigos analisados utilizaram a metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). A exceção à regra, ocorreu no estudo desenvolvido por Béghien, Jiang, e Chen [11], onde, na tentativa de estudar a dispersão de partículas no interior de uma sala, utilizaram a metodologia *Large Eddy Simulations (LES)*.

A abordagem *LES* é mais precisa do que a RANS, porque apresenta uma escala na grelha de simulação, 1 a 2 ordens de grandeza superior à escala utilizada em RANS (escala de Kolmogorov), e porque consegue simultaneamente, simular com precisão o escoamento variável e incerto, ao passo que a metodologia RANS, necessita de um modelo externo que simule a ocorrência destas flutuações. [11]

Tal se verifica, por exemplo, no estudo conduzido por Zhang e Chien [8], ou no estudo realizado por Gomez-Flores, Hwang, Ilyas e Kim [12], em que utilizaram um modelo baseado na curva Gaussiana de distribuição probabilística (*DRW- Discrete Random Walk*). Como o *LES* necessita de mais tempo e recursos para apresentar resultados, face a natureza dos estudos efetuados, os investigadores dos artigos acima mencionados optaram pela utilização da abordagem RANS.

## **2.3. Método de previsão da dispersão das partículas**

Relativamente à simulação da trajetórias de partículas, o modelo CFD necessita de ter implementado um método que consiga prever a dispersão das partículas. Na grande maioria dos casos são utilizados 2 métodos, o lagrangeano e o euleriano. O método Euleriano assume que as partículas ao serem emitidas formam um conglomerado, determinando-se assim, a dispersão da concentração das partículas, tal como Seepana e Lai [13], verificaram no seu estudo que procurava simular a exposição dos indivíduos a espirros emitidos por coabitantes do mesmo espaço.

Já o método lagrangeano permite prever, com precisão, a trajetória individual de cada partícula, por via da resolução da equação do momento, que será posteriormente escrutinada no capítulo 3, mas que fundamentalmente considera a intensidade das forças gravíticas e de resistência do ar, como sendo as principais causadoras dos movimentos perpetrados pelas partículas respiratórias. [8] [14] [15]

Na bibliografia recolhida, estas forças são sempre tidas em conta. Outras forças, embora sem a mesma consistência, são mencionadas em diversos estudos, como por exemplo, no estudo conduzido por King, Noakes, Sleigh, e Camargo-Valero [16], que pretendia verificar a deposição de partículas respiratórias num quarto de hospital com 1 ou 2 camas. Neste estudo, para além de considerarem as 2 forças já mencionadas, os investigadores assumiram também a força advinda do movimento browniano. Outros estudos realizados neste âmbito assumiram esta particularidade. [8] [17] [18] [19] [20]

Outro fenómeno considerado no balanço da equação do momento para análise da dispersão das partículas, é o efeito de *Soret*, embora apareça na bibliografia recolhida com menos frequência (apenas considerado em [8] [20] e [21]). Ambos os fenómenos, browniano e efeito de *Soret*, são tidos em conta apenas quando as dimensões das partículas em análise são inferiores a  $10\ \mu\text{m}$ . Todos os estudos em que tal não acontece, apenas são consideradas as forças gravítica e de resistência do ar.

Em relação à frequência de utilização dos métodos acima referidos, como via de previsão da trajetória de partículas, o método lagrangeano é o mais recorrentemente utilizado nos artigos analisados. Zhou, e Ji [21], utilizaram o método lagrangeano para prever a distribuição de aerossóis emitidos por indivíduos numa clínica, tendo obtido uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, ao nível da percentagem de concentração de partículas em diferentes locais de medição do espaço de estudo.

Também Park e Chang [20], que pretendiam determinar o conforto térmico e a dispersão de partículas respiratórias emitidas numa sala ventilada com um sistema de cortina de ar, utilizaram o método lagrangeano, e obtiveram boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos, ao nível da concentração de partículas em diferentes locais de medição, assim como da velocidade e temperatura do ar.

O que se verificou também em alguns estudos, foi a utilização de ambos os métodos, neste caso, o modelo euleriano-lagrangeano que permitia, simultaneamente, simular a concentração das partículas, assim como a trajetória das mesmas, tal como Romano, Marocco, Gustén e Joppolo, [22] implementaram no seu estudo, que pretendia analisar a capacidade de controlo da concentração de partículas respiratórias no interior

de um bloco operatório por parte do sistema de ventilação aí implementado. Também neste caso, se verificou uma boa correlação entre os resultados experimentais e numéricos, ao nível da temperatura e velocidade do ar, bem como ao nível da concentração de partículas.

Outro método recente de determinação da trajetória das partículas, e ainda em desenvolvimento, é o método das cadeias de Markov, que é baseado num modelo probabilístico, e que surge na tentativa de implementar um método de previsão de trajetória de partículas, que consuma menos tempo na resolução das iterações. [23]

Tal fenómeno se verificou no estudo realizado por Chen, Liu, Lin e Chen [23], em que se comparou a velocidade de convergência de resultados dos 3 métodos de previsão de trajetória de partículas já mencionados, para 4 casos com condições exógenas diferentes. O método das cadeias de Markov foi aquele cujos resultados foram obtidos em menos tempo, não obstante que para intervalos de tempo superiores a 1 segundo em cada iteração, tenha apresentado resultados imprecisos, e por esse motivo, necessite ainda de maior aprofundamento sobre a sua real aplicabilidade prática.

## **2.4. Software CFD , modelo de turbulência e número de elementos da malha utilizados**

Em relação ao software CFD de simulação, e ao modelo de turbulência utilizados neste tipo de estudos, nos artigos analisados é quase unânime a utilização do FLUENT, e do modelo RNG (*Renormalization Group*)  $k - \varepsilon$ , ou *standard*  $k - \varepsilon$ , respetivamente.

Gupta, Lin, e Chen [24], na sua avaliação da dispersão de partículas emitidas em diferentes regimes de respiração (tosse, espirro, situação de repouso), numa cabine de avião, usaram o FLUENT 2005, utilizando esquemas de discretização *upwind* de 2ª ordem, exceto para o termo de pressão, que foi discretizado baseado no esquema PRESTO. As equações de pressão e de momento foram englobadas e corridas utilizando o método SIMPLE.

Já o modelo de turbulência utilizado neste estudo foi o RNG  $k - \varepsilon$ , obtendo resultados esperados ao nível do percurso percorrido das partículas, embora não tivessem comparado estes resultados com dados experimentais, ou outros estudos idênticos. No trabalho realizado por Wang, Qian, Zhou e Zheng [10], já mencionado anteriormente, e cuja volumetria da sala era  $9 \times 9 \times 9$  [ $m^3$ ], foi utilizado o FLUENT 17.0, utilizando

novamente, esquemas de discretização *upwind* de 2ª ordem, assim como o método SIMPLE, onde a malha utilizada na simulação de referência possuía 4.794.242 células, após se ter efetuado um teste de dependência de elementos. Também o modelo de turbulência RNG  $k - \epsilon$ , foi utilizado para determinar a distribuição do ar na sala onde se testou a utilização de uma cortina de ar. Verificou-se nos testes de validação com resultados experimentais, uma boa correlação ao nível da concentração de partículas nas diferentes secções da sala.

No estudo também já mencionado, e realizado por Seepana e Lai [13], que procurava simular a exposição dos indivíduos a espirros emitidos por coabitantes do mesmo espaço, cuja volumetria da câmara era  $2,3 \times 2,3 \times 2,3 [m^3]$ , utilizou-se o FLUENT (6.3.26), em que a malha de referência utilizada nas simulações, após a realização de um teste de dependência de elementos, possuía cerca de 936.196 células.

Neste caso, os termos convectivos foram discretizados através de esquemas *upwind* de 2ª ordem. Já os termos de difusão foram discretizados através de esquemas de diferenciação central. Mais uma vez, foi utilizado o algoritmo SIMPLE para agregar os campos de velocidade e de pressão. Também aqui se utilizou o modelo de turbulência RNG  $k - \epsilon$ .

Verificou-se uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, ao nível da concentração de partículas nos locais de medição. Uma exceção à tendência acima observada, foi a abordagem utilizada por Park e Chang [20], na sua investigação já mencionada, que pretendia determinar o conforto térmico e o transporte de partículas respiratórias emitidas numa sala ventilada, com dimensões de  $4,01 \times 6,76 \times 2,7 [m^3]$ , utilizando um sistema de cortina de ar. Neste caso, utilizaram o software de simulação STAR-CCM+, em que a malha utilizada, após verificação por intermédio de um teste de dependência de elementos, possuía  $1,9 \times 10^6$  células.

Tal como nos estudos anteriormente referidos, utilizou-se o algoritmo SIMPLE de forma a agregar os campos de pressão e de velocidade, assim como esquemas de discretização *upwind* de 2ª ordem. Outra exceção neste trabalho, face à tendência verificada na bibliografia recolhida, foi a utilização do modelo de turbulência *realizable*  $k - \epsilon$ . Este modelo é mais eficaz no cálculo do escoamento de ar e da transferência de calor em ambientes fechados e ventilados, com condições interiores complexas. [20] O que se verificou neste estudo, foi uma boa correlação de resultados entre as simulações numéricas e os dados experimentais, no que diz respeito à velocidade e temperatura do ar, assim como da concentração de partículas nos locais de medição.

## **2.5. Tipologia de Simulação CFD**

Relativamente à metodologia CFD utilizada na bibliografia recolhida, é ainda necessário ressaltar o tipo de simulação que é assumido consoante a interação das partículas respiratórias com o escoamento, isto é, se a simulação é de 1 via, 2 vias, ou 3 vias. Em quase toda a bibliografia recolhida, as simulações são de 1 via, ou seja, o escoamento de ar no interior dos espaços influencia a dispersão das partículas, mas o contrário não se verifica, isto é, há uma quantidade de movimento a ser trocada entre as partículas e o meio, mas em relação à quantidade global de ar no interior dos espaços simulados, esta quantidade de movimento trocada é ínfima, e por isso desprezável.

A exceção à regra, foi verificada no estudo conduzido por Aliabadi, Rogak, Green e Bartlett [19], que pretendia, através da simulação CFD, analisar a dispersão e fenómenos de transferência de massa e energia com o meio, por parte das partículas respiratórias.

Neste estudo, a volumetria do espaço simulado foi apenas metade de uma sala com reduzidas dimensões ( $1 \times 2 \times 2 [m^3]$ ), em que se assumiu, especificamente, que a quantidade de movimento trocada pelas partículas com o ar seria relevante para os resultados obtidos na simulação. O que se verificou neste estudo, é que o percurso das partículas, e a respetiva trajetória, está dependente da dimensão das mesmas uma vez que terão maior momento inicial, e com isto, conseguirão trocar maior quantidade de movimento com o meio e percorrer maiores distâncias. Verificou-se ainda, que a distância percorrida pelas partículas está também dependente da humidade relativa do meio, onde quanto maior for este parâmetro, mais difícil é a troca de energia com o meio gasoso (ar ambiente).

## **2.6. Simulação do escoamento na região perto das paredes**

Outro aspeto que importa salientar, é a forma como os investigadores da bibliografia recolhida analisaram o escoamento das partículas nas regiões perto das paredes. Este fenómeno, por vezes influenciou a veracidade dos resultados, como por exemplo, no estudo já mencionado realizado por Zhang e Chien [8] em que verificaram que o modelo de turbulência sobrestimou a frequência da colisão das partículas com a região da fronteira das paredes. Este problema foi observado na maioria dos trabalhos desenvolvidos. Para colmatar esta situação, os autores recorreram a diversas soluções.

No trabalho desenvolvido por Lai, Wang e Chen [25], que pretendia estudar, ao nível experimental e numérico a dispersão das partículas respiratórias no interior de uma sala de duas zonas, implementaram, *à priori*, funções de parede baseada na lei logarítmica da parede, nas regiões de fronteira das paredes da sala. [26] A mesma solução foi implementada por Zhang e Chien [8], assim como por Park e Chang [20], ou Romano, Marocco, Gustén e Joppolo, [22]. Esta solução teve a particularidade de apenas ter sido possível de ser aplicada porque se verificou que o N° de Reynolds nas regiões de fronteira das paredes era reduzido, sendo o escoamento nessas regiões, laminar.

Outros autores, como por exemplo, Wang, Qian, Zhou e Zheng [10], apenas aplicaram condições de fronteira “*non-slip*”, nas paredes. O efeito pretendido era que após o contacto das partículas com as regiões de fronteira das paredes, estas ficariam agregadas, e não seriam restituídas ao escoamento.

## 2.7. Quadro-Síntese

Nas Tabelas 1 a 4 encontram-se representados os principais parâmetros a ressaltar dos artigos mencionados na revisão bibliográfica, e que serão tidos em conta aquando da implementação da ferramenta.

Tabela 1: Quadro-Síntese 1 (Parte 1 de 2)

1º Autor/Artigo	Ano	Espaço Físico Em Estudo	Volumetria [m]	Código CFD	Tipo de Partículas	Valores Experimentais
Yang [6]	2007	-	-	-	-	-
Duguid [7]	1946	-	-	-	-	-
Zhang [8]	2006	Sala Ventilada	4,91X2,44X 4,31	FLUENT	Partículas Respiratórias	Sim
Chao [9]	2008	Ala Hospitalar	5,9 X 6,6 X 2,35	FLUENT (2005)	Partículas Respiratórias	Sim
Wang [10]	2020	Sala Ventilada	9 X 9 X 4	FLUENT 17.0	Partículas Respiratórias	Sim
Béghein [11]	2005	Sala Isolada	16 in X 16 in X 16 in	-	Vidro oco Milho Cobre	Sim

Gomez- Flores [12]	2021	Sala Ventilada	4X4X3	Não refere	Partículas Respiratórias	Não
Seepana [13]	2012	Câmara Ventilada	2,3 X 2,3 X 2,3	FLUENT 6.3.26	Partículas Respiratórias	Sim
King [16]	2013	-Sala Ventilada; -Sala Hospitalar;	4,26 X 3,36 X 2,26	FLUENT 12.0	Partículas Respiratórias	Sim

Tabela 2: Quadro Síntese 1 (Parte 2 de 2)

1º Autor/Artigo	Ano	Dimensão Partículas [ $\mu\text{m}$ ]	Forças Externas Analisadas	Tipo Simulação	Método Previsão Trajetória Partículas	Modelo de Turbulência
Yang [6]	2007	4 a 7	-	-	-	-
Duguid [7]	1946	1 a 2000	-	-	-	-
Zhang [8]	2006	0,7	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Brownian</i> <i>Thermophoretic</i>	1 via	Lagrangeano	Standard $k - \epsilon$
Chao [9]	2008	1,5, 12, 28, 45, 87,5 e 137,5	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Brownian</i> <i>Thermophoretic</i>	1 via	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$
Wang [10]	2020	10	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Buoyancy</i>	1 via	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$
Béghein [11]	2005	46,5 e 87	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Buoyancy</i>	-	-	<i>Large Eddy Simulations (LES)</i>
Gomez- Flores [12]	2021	1,5, 40 mm (Conjunto)	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Brownian</i>	-	-	<i>LES</i>
Seepana [13]	2012	0,1 (Conjuntos)	-	1 via	Euleriano ( <i>drif-flux</i> )	RNG $k - \epsilon$
King [16]	2013	2,5	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Brownian</i>	1 Via	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$ RSM

Tabela 3: Quadro-Síntese 2 (Parte 1 de 2)

1º Autor/Artigo	Ano	Espaço Físico Em Estudo	Volumetria [m]	Código CFD	Tipo de Partículas	Valores Experimentais
Kang [17]	2015	Sala Ventilada	4,8X5,4X2,6	Não Refere	Partículas Respiratórias	Não
Liu [18]	2020	Restaurante	-	-	Partículas Respiratórias	-
Aliabadi [19]	2010	Sala Ventilada	1 X 2 X 2 [Apenas metade da sala]	FLUENT 6.3.26	Partículas Respiratórias	Não
Park [20]	2019	Sala Ventilada	4,01 X 6,76 X 2,7	STAR-CCM+	Partículas Respiratórias	Sim
Zhou [21]	2020	Consultório Médico	6,53 X 3,07 X 2,08	FLUENT 16.0 ICEM	Partículas Respiratórias	Sim
Romano [22]	2015	Bloco Operatório	7 X 7 X 3	FLUENT 14.5.7	Partículas Respiratórias	Sim
Chen [23]	2015	Salas Ventiladas, cabine de avião	2,44X2,44X2,44 4X2,1X2,4 2,6X1,3X1,8	FLUENT 12.1	Partículas Respiratórias	Não
Gupta [24]	2011	Avião c/ Passageiros	Não refere	FLUENT	Partículas Respiratórias	Não
Lai [25]	2008	Sala Com Duas Câmaras	Zona 1: 0,4X0,4X0,4 Zona 2: 0,4X0,4X0,4	FLUENT 2005	Partículas Respiratórias	Sim

Tabela 4: Quadro-Síntese 2 (Parte 2 de 2)

1° Autor/Artigo	Ano	Dimensão Partículas [ $\mu m$ ]	Forças Externas Analisadas	Tipo Simulação	Método Previsão Trajetória Partículas	Modelo de Turbulência
Kang [17]	2015	10	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Brownian</i>	1 via	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$
Liu [18]	2020	-	-	-	-	-
Aliabadi [19]	2010	1 a 500	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Brownian</i>	2 Vias	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$
Park [20]	2019	8,35	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Thermophoretic</i> <i>Brownian</i> <i>Buoyancy</i>	1 via	Lagrangeano	Standard $k - \epsilon$
Zhou [21]	2020	1, 20, 30 e 50	<i>Drag</i> <i>Gravity</i> <i>Lift</i> <i>Thermophoretic</i>	1 via	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$
Romano [22]	2015	0,5 a 10	<i>Drag</i> <i>Gravity</i>	1 via	Euleriano-Lagrangeano	Standard $k - \epsilon$
Chen [23]	2015	1 2 3	<i>Drag</i> <i>Gravity</i>	1 via	Euleriano Lagrangeano Cadeias de Markov	RNG $k - \epsilon$
Gupta [24]	2011	0,4 , 8,5 e 30	-	1 via	Lagrangeano	RNG $k - \epsilon$
Lai [25]	2008	< 100	<i>Drag</i> <i>Gravity</i>	-	Euleriano ( <i>drift-flux</i> )	RNG $k - \epsilon$

## 2.8. Conclusões da Revisão Bibliográfica

Como se observou através da revisão bibliográfica, existem diversos estudos CFD realizados no âmbito da simulação de partículas respiratórias. As maiores divergências encontradas na pesquisa acerca dos parâmetros a implementar neste tipo de simulações, centram-se na questão da dimensão da partícula respiratória. Ainda assim, verificou-se sempre o mesmo *modus operandi* para efetuar as simulações: Em primeira instância, procedeu-se à simulação do escoamento de ar no interior do espaço físico, e só depois se efetuou a simulação da dispersão de partículas.

No entanto, existem algumas características associadas à partícula respiratória, como por exemplo, a velocidade e o ângulo de emissão das partículas, que são parâmetros cruciais para se conseguir simular, fidedignamente, os regimes de respiração, e que em nenhum dos artigos da pesquisa bibliográfica supracitada foram referidos. Como tal, foi necessário conduzir uma investigação adicional para se determinar estes parâmetros, que serão abordados em maior detalhe no capítulo 5.

## 3. Equações do Modelo CFD

Neste trabalho, tal como referido no capítulo 1, pretendia-se estudar através da simulação CFD, a dispersão de partículas respiratórias pelo ar no interior de ambientes com diferentes configurações, analisando posteriormente, diversos fatores que influenciam este fenómeno, quer sejam o regime de respiração, o sistema de ventilação presente no ambiente simulado, ou os elementos inerentes ao espaço. Como se utilizou uma metodologia CFD, no capítulo 3 encontram-se descritas as equações da mecânica de fluidos executadas neste modelo, assim como o modelo de turbulência geralmente utilizado neste tipo de simulações.

### 3.1. Equações Em Análise

Tendo em conta a natureza do trabalho, e considerando o anteriormente referido, à semelhança do que se verifica nos trabalhos relacionados com simulação CFD, o modelo simulado baseia-se em 3 equações fundamentais – Continuidade, Momento e Energia, sendo também necessário considerar as questões de turbulência e da dinâmica das partículas. Neste capítulo, apenas se encontram exibidas as equações na sua forma geral. Deduções destas equações podem ser observadas na bibliografia presente no capítulo das referências bibliográficas que se encontra no epílogo do trabalho.

#### 3.1.1. Equação da continuidade

A equação da conservação da massa, tal como referido em [14] pode ser expressa, na forma conservativa, da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = s_m \quad (1)$$

Em que  $t$  representa o tempo;  $p$  representa a pressão estática;  $\rho$  a densidade do fluido;  $s_m$  os possíveis termos de fonte de massa;  $\vec{V}$  a velocidade vetorial do fluido;  $\nabla$  o operador diferencial “*nabla*” que neste caso, representa a derivada do campo da velocidade  $\vec{V}$ , ao longo do vetor.

### 3.1.2. Equação do momento

A equação do momento, tal como referida em [14], na direção  $x$  do sistema cartesiano, pode ser descrita na forma conservativa, da seguinte maneira:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

Em que  $t$  representa o tempo;  $p$  representa a pressão estática;  $\rho$  a densidade do fluido;  $u$  representa a componente da velocidade na direção  $x$ ;  $\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}$  e  $\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$  os componentes do tensor de tensões na direção  $x$ ;  $\vec{V}$  a velocidade vetorial do fluido;  $\nabla$  o operador diferencial “nabla” que neste caso, representa a derivada do campo da velocidade  $\vec{V}$ , ao longo do vetor;  $f_x$  o conjunto de forças aplicadas diretamente na massa volumétrica do fluido, que neste caso, é a força gravítica sobre o escoamento, na direção  $x$ .

### 3.1.3. Equação do momento – dinâmica das partículas

O método lagrangeano de previsão da trajetória das partículas, calcula estes percursos através da resolução da equação do momento. Na equação, considera forças externas que influenciam diretamente o movimento das partículas. Tendo em conta o que foi referido, e o que se encontra em [8], a equação do momento pode assumir a seguinte disposição:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_a \quad (3)$$

Em que  $t$  representa o tempo;  $\vec{u}_p$  representa a velocidade vetorial da partícula;  $\vec{u}$  a velocidade vetorial do escoamento de ar;  $\rho_p$  representa a densidade da partícula;  $\rho$  representa a densidade do ar;  $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$  representa o termo associado à força de resistência do ar, em que  $F_D$  representa o inverso do tempo de relaxação ( $s^{-1}$ );  $\frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$  representa os termos de impulsão natural e de força gravítica;  $\vec{F}_a$  representa todas as forças externas adicionais que podem ter relevância (ex: movimento browniano ou efeito de termoforese).

Neste caso, a força mais relevante é a de resistência do ar, que segue a lei de Stokes. Como tal, a força de resistência do ar é calculada da seguinte maneira, tal como expresso em [8]:

$$\vec{F}_{drag} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c} ((\vec{u} - \vec{u}_p)) \quad (4)$$

$\mu$  representa a viscosidade do fluido;  $d_p$  o diâmetro da partícula;  $C_c$  representa o fator de correção de Cunningham e é calculado da seguinte maneira, tal como referido em [8]:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1,257 + 0,4e^{-1(1,1d_p/2\lambda)}) \quad (5)$$

### 3.1.4. Equação da energia

A equação da energia, tal como referida em [14], na direção  $x$  do sistema cartesiano, pode ser descrita na forma conservativa, da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{v^2}{2} \vec{V} \right) \right] = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \rho u f_x \quad (6)$$

Em que  $t$  representa o tempo;  $p$  representa a pressão estática;  $\rho$  a densidade do fluido;  $u$  representa a componente da velocidade na direção  $x$ ;  $e$  representa a energia interna por unidade de massa do fluido, e  $\frac{v^2}{2}$  a energia cinética por unidade de massa, onde a energia total do fluido é obtida através de  $e + \frac{v^2}{2}$ ;  $\vec{V}$  a velocidade vetorial do fluido;  $\rho \dot{q}$  representa o aquecimento volumétrico do fluido devido a fenómenos de emissão/absorção de radiação, que no âmbito do projeto, são fenómenos desprezáveis, em que  $\dot{q}$  representa a taxa de aquecimento volumétrico por unidade de massa;  $\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$  representa o calor transferido por condução na direção  $x$ , onde  $k$  é a condutividade térmica do fluido;  $\frac{\partial (up)}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y}$  e  $\frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z}$ , representam a energia sob a forma de trabalho realizada no fluido devido as forças superficiais de tensão normal e tensão de corte;  $\rho u f_x$  representa a energia sob a forma de trabalho realizada no fluido devido às forças aplicadas diretamente na massa volumétrica do fluido, que neste caso, é a força gravítica, representada por  $f_x$ .

### 3.1.5. Modelo de turbulência

Por forma a solucionar os problemas relacionados com a turbulência neste projeto, foi necessário utilizar um modelo de turbulência que conseguisse replicar, de forma aproximada, as flutuações que este fenómeno iria provocar no escoamento. Como algumas destas flutuações podem ocorrer a pequeníssima escala, os custos computacionais de simulação resultantes da direta resolução das equações acima mencionadas seriam elevadíssimos.

Como tal, atualmente utilizam-se várias estratégias, e mais concretamente, diferentes modelos de turbulência que reduzem significativamente os custos de simulação destes fenómenos. Para a realização deste trabalho, não existia a obrigação de utilizar um modelo de turbulência específico, pelo que nesta secção ir-se-á abordar o processo de cálculo de um dos possíveis modelos de turbulência a utilizar, em que a estratégia de cálculo de todos os outros modelos, é análoga à referida.

#### 3.1.5.1. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

Como já foi referido, existem diversas estratégias de simplificação de cálculo dos fenómenos de turbulência, em que uma delas passa pelo cálculo de apenas o valor médio no tempo das variáveis associadas às equações fundamentais acima descritas (velocidade, pressão e temperatura). [27]

Este método propõem, em primeira instância, decompor as variáveis acima referidas numa componente de valor médio de tempo, e numa componente flutuante, e de seguida, substituir estas decomposições nas equações originais, e por fim, obter o valor médio das equações. Se  $\phi$  representar uma qualquer variável associada a este processo, segundo o método de *time-averaging*  $\phi = \bar{\phi} + \phi'$ , em que  $\bar{\phi}$  representa a componente do valor médio, e  $\phi'$  a componente flutuante. [27]

Esta estratégia de cálculo é denominada de *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS). Tendo em conta o acima referido, os campos da velocidade ( $v$ ), pressão ( $p$ ) e temperatura ( $T$ ) podem ser decompostos assumindo a seguinte disposição, referida em [27]:

$$v = \bar{v} + v' \quad (7.1)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (7.2)$$

$$T = \bar{T} + T' \quad (7.3)$$

Assumindo a equação do momento, (ou de *Navier-Stokes*), substituindo as decomposições na equação obtém-se a seguinte configuração em valor médio, resultante da aplicação da estratégia *time-averaging*:

$$\frac{\partial}{\partial t} |\rho \bar{v}| + \nabla \cdot \{\rho \bar{v} \bar{v}\} = -\nabla \bar{p} + [\nabla \cdot (\bar{\tau} - \rho \overline{v'v'})] + \bar{f}_b \quad (8)$$

A equação (8) é muito semelhante à equação original, só que neste caso é introduzido o termo referente as componentes flutuantes ( $-\rho \overline{v'v'}$ ). Por outras palavras, o efeito da turbulência no campo do escoamento. Os componentes deste termo formam um tensor denominado de tensor de tensões de Reynolds, ou *Reynolds stress Tensor*. A tentativa de calcular as tensões de Reynolds através das equações originais só levaria ao surgimento de novas variáveis aumentando a complexidade do problema. [27]

Como tal, é necessário encontrar uma estratégia para expressar as componentes das tensões de Reynolds de forma mais simplificada. Uma das abordagens utilizadas, e que serve de base para a formulação de vários modelos de turbulência, é a aproximação de Boussinesq, que fundamentalmente assume que as tensões de Reynolds são diretamente proporcionais aos gradientes de velocidade média, resultando na seguinte modelação para o tensor das tensões de Reynolds: [27]

$$-\rho \overline{v'v'} = \mu_t \{\nabla v + (\nabla v)^T\} - \frac{2}{3} [\rho k + \mu_t (\nabla \cdot v)] \mathbf{I} \quad (9)$$

Com isto, é possível representar as tensões de Reynolds através de 2 novas variáveis, sendo essas, a viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , que é calculada de diferentes maneiras pelos vários modelos de turbulência, e a energia cinética turbulenta,  $k$ , que assume a seguinte configuração:

$$k = \frac{1}{2} \overline{v' \cdot v'} \quad (10)$$

### 3.1.5.2. Standard k- $\epsilon$ Turbulence Model

Como referido, os diversos modelos de turbulência baseiam-se na aproximação de Boussinesq por forma a calcular a viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , em termos de velocidade ( $\sqrt{k}$ ) e de escala de comprimento ( $l$ ), tal que: [27]

$$\mu_t = \rho l \sqrt{k} \quad (11)$$

O modelo standard  $k - \varepsilon$  de Jones e Launder prevê que a viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , possa ser calculada através da seguinte fórmula: [27]

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

Em que  $\varepsilon$  representa a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta;  $C_\mu$  representa um coeficiente empírico que frequentemente assume o valor constante de 0,09.

As seguintes equações são utilizadas neste modelo para o cálculo de  $k$  e  $\varepsilon$ , respetivamente: [27]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho v k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \underbrace{P_k - \rho \varepsilon}_{S^k} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right) + \underbrace{C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}}_{S^\varepsilon} \quad (14)$$

Em que o número turbulento de Prandtl,  $Pr_t = 0,9$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ;  $P_k$  representa a produção de energia cinética turbulenta.

## 4. Modelo de Validação

Neste capítulo, pretende-se retratar todos os procedimentos adotados na criação e simulação CFD de um modelo real baseado num dos artigos científicos selecionados na revisão bibliográfica. O objetivo final seria obter a validação do modelo CFD recriado através da comparação dos resultados numéricos obtidos, com os resultados experimentais presentes no artigo selecionado.

O artigo em questão, é o [8] da revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2, cujos autores procuravam estudar a dispersão de partículas com uma determinada dimensão ( $\{0.31;0.45\} \mu m$ ), no interior de espaços fechados com sistemas de ventilação, utilizando para esse efeito, o modelo lagrangeano de previsão da trajetória de partículas, anteriormente mencionado no capítulo 2.

Adicionalmente, os autores do artigo [8] pretendiam avaliar a eficácia de remoção das partículas da sala por parte dos sistemas de ventilação, tendo, para esse efeito, realizado uma série de análises experimentais numa sala com 3 tipos de sistemas de ventilação: um com fornecimento de ar pelo teto, outro com fornecimento de ar pelas paredes laterais, e um com fornecimento de ar pelo chão (*UFAD- Under Floor Air Distribution*). O último sistema (*UFAD*) foi o que obteve, segundo os autores, os melhores resultados ao nível da remoção de partículas, e, por conseguinte, foi o sistema de ventilação incorporado no respetivo modelo para recriação, simulação e posterior comparação com os resultados experimentais.

Para efetuarem a validação dos resultados numéricos, os autores realizaram medições de velocidade e de temperatura na direção da altura da sala, tal como referido em 4.2.1, e utilizaram os perfis de temperatura e de velocidade do ar obtidos em cada medição, para efeitos de comparação com os resultados experimentais. No artigo [8], é ainda feita referência ao número de células da malha final gerada, que continha cerca de 389338 células.

### 4.1. Softwares utilizados

- A criação do modelo físico a simular, bem como a introdução das condições de fronteira, foi realizada através do software *DesignBuilder* versão *7.1.0.098 Beta-Student*, que serviu de interface gráfico com que o utilizador interagiu diretamente.

- Para efeitos de melhor visualização e perceção dos resultados obtidos, quer ao nível da geração de malha, quer ao nível dos resultados das simulações em si, utilizou-se o software *ParaView Versão 5.6.2 64-bit*.
- Para geração de malha e resolução das simulações computacionais, foi utilizado o software de CFD *OpenFOAM versão 8.x*;
- Uma vez que o *OpenFOAM* é um software desenvolvido para trabalhar, maioritariamente no sistema operativo *Linux*, foi necessário recorrer-se à utilização do programa *blueCFD-Core 2020*, desenvolvido pela empresa *FS Dynamics Portugal blueCAPE Lda*, que providencia o *OpenFOAM* no sistema operativo *Windows*.
- Foi necessária, ainda, a utilização de um *middleware* entre o *DesignBuilder* e o *OpenFOAM*, também desenvolvido pela empresa *FS Dynamics Portugal blueCAPE Lda*, designado de *blueCFD-Kernel 2.6*.
- O computador utilizado para realizar as simulações foi o *Intel ® Core™ i7-10700k CPU @ 3.80 GHz, 80 GB RAM*.

## 4.2. Fatores condicionantes

Antes de se se apresentar a evolução conduzida durante o estudo de validação, é necessário mencionar 3 aspetos cruciais que tiveram influência, tanto na forma como o trabalho foi conduzido, como nos resultados obtidos ao longo do estudo.

### 4.2.1. Incerteza na localização dos pontos de medição de velocidade e de temperatura experimentais

Como se referiu, os autores do artigo [8] utilizaram vários pontos de medição de temperatura e da velocidade do ar ao longo da sala, em que cada monitorização foi efetuada em relação à altura da mesma. A disposição destes pontos na sala, pode ser observada na Figura 1.

A localização, em relação ao referencial cartesiano, de cada um dos pontos de medição da Figura 1, encontra-se representada na Tabela 5. Porém, as localizações que se apresentam na Tabela 5, não foram referenciadas no artigo, e por esse motivo, foram aferidas somente através da Figura 1, e recorrendo-se ao software *Engauge Digitizer*, cujos procedimentos de utilização podem ser observados no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice D.2.

Este aspeto é de especial relevância, porque sem o conhecimento exato dos locais de medição dos perfis de temperatura e de velocidade experimentais, não é possível afirmar, convictamente, que os perfis de temperatura e de velocidade das simulações foram obtidos, exatamente, nos mesmos locais onde se efetuaram as medições experimentais.

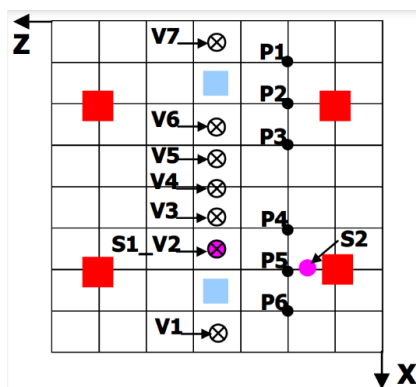


Figura 1. Representação 2D do Modelo Físico do Artigo [8]

Tabela 5: Localização Pontos de Medição de Velocidade/Temperatura no Interior do Modelo

Pontos *	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Eixo X [m]	4,5	3,3	2,8	2,4	2,0	1,5	0,3
Eixo Z [m]	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1

\* Os pontos de medição de velocidade e de temperatura encontram-se identificados como sendo V1 a V7. As medições foram sempre efetuadas na direção da altura da sala [Eixo Y], em que os resultados dos gráficos que serão apresentados posteriormente, foram obtidos em relação a um intervalo de comprimento [0;2,4] [m], sendo 2,4 metros, a altura da sala.

É de referir que na Figura 1, cada quadrícula representa 0,6 m de lado, tal como referido em [8], e a partir desta informação obteve-se os valores da Tabela 5.

#### 4.2.2. Incerteza da dimensão e localização exata dos elementos constituintes do modelo físico

Outro fator que condicionou a realização do estudo de validação, está relacionado com a não indicação por parte dos autores do artigo [8], quer das dimensões de todos os elementos inerentes ao modelo físico, quer das localizações exatas dos mesmos. Apenas foi feita referência às dimensões de atravancamento da sala.



Os dados fornecidos pelo professor Q. Chen, são possíveis de serem observados no capítulo dos anexos, em concreto, no Anexo A.

Ainda assim, é necessário referir que nos dados fornecidos pelo professor Q. Chen, encontravam-se mencionadas as temperaturas absolutas em *Celsius*, registadas nos pontos de medição mencionados em 4.2.1., e como tal, a comparação dos resultados numéricos e experimentais observada ao longo do capítulo 4, para as temperaturas, foi efetuada com base nestes dados, e não na temperatura normalizada que os autores utilizaram na sua comparação de resultados numéricos Vs experimentais, cujos gráficos são visíveis na Figura 3 em 4.4.

#### **4.2.4. Auxílio no desenvolvimento do software *blueCFD-Kernel***

É necessário referir também que este trabalho serviu de apoio ao desenvolvimento do *middleware* criado pela empresa *FS Dynamics Portugal blueCAPE Lda*. Este software permite a tradução dos dados introduzidos no interface gráfico *DesignBuilder*, para o software de CFD *OpenFOAM*, tendo por base o *modus operandi* da lógica de encadeamento de resolução de casos CFD, e a experiência do Eng.º de software.

Como tal, é um programa que está afeto a erros, que neste trabalho foram sendo descortinados e solucionados pelo Eng.º de software da *FS Dynamics Portugal blueCAPE Lda*, Bruno Santos, à medida que se foram efetuando as simulações.

Este aspeto é de vital importância, porque em certos momentos, tal como é possível verificar, adiante, no subcapítulo 4.4.1, a perceção e resolução dos problemas relacionados com o *middleware*, foi complexa, pelo que constituiu, simultaneamente, numa condicionante e num desafio positivo para a realização do trabalho.

### **4.3. Modelação da Geometria e Condições de Fronteira**

Neste capítulo apresentam-se as dimensões dos elementos constituintes do modelo físico, assim como as condições de fronteira a implementar nas simulações.

#### **4.3.1. Dimensões da sala e dos elementos constituintes**

No artigo [8], tal como referido em 4.2.2, apenas eram mencionadas as dimensões de atravancamento da sala, que podem ser observadas na Tabela 6. Na Figura 2 é possível analisar os elementos inerentes à sala, que era composta por 2 difusores de ar localizados

no chão, uma unidade extratora e 6 lâmpadas, ambas localizadas no teto, e ainda por 4 paralelepípedos retangulares que pretendiam simular os seres humanos no interior da sala.

Tabela 6: Dimensões de Atravancamento do Modelo Físico

Dimensão	Eixo X [m]	Eixo Y (altura) [m]	Eixo Z [m]
Modelo Físico	4.8	2.4	4.2

Tal como mencionado em 4.2.2, para se obter as restantes dimensões dos elementos constituintes do modelo físico, assim como a sua posição exata, utilizou-se o software *Engauge Digitizer*, cujo procedimento de utilização pode ser observado no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice D.1. Com isto, as dimensões dos elementos que compõem o modelo físico podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7: Dimensões dos Elementos Constituintes do Modelo Físico

Dimensão do Elemento	Eixo X [m]	Eixo Y (altura) [m]	Eixo Z [m]
Difusores	0,3	-	0,3
Extrator	0,3	-	0,3
Lâmpadas	1,2	-	0,2
Simuladores de Humanos	0,4	1,1	0,35

### 4.3.2. Condições de fronteira

As condições de fronteira a implementar no modelo físico, referidas no artigo [8], podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8: Condições de Fronteira a Implementar no Modelo Físico

Superfície	Temperatura Superfície [°C]	Potência [W]	Caudal de Ar [ $m^3/s$ ]
Parede Norte (+X)	24,9	-	-
Parede Sul (-X)	25,0	-	-
Parede Este (+Z)	25,5	-	-
Parede Oeste (-Z)	25,3	-	-
Teto (+Y)	25,7	-	-
Chão (-Y)	24,0	-	-
Lâmpadas (Individual)	-	64	-
Pessoas (Individual)	31,6	100	-
* Difusor (+X)	20,4	-	0,0472
* Difusor (-X)	19,9	-	0,0472
** Extrator (+Y)	-	-	0,0944

\* É de referir que no artigo [8], apenas era indicado o caudal total que ambos os difusores em conjunto deveriam fornecer à sala ( $0,0944 \text{ m}^3/\text{s}$ ), pelo que se assumiu que cada um dos difusores forneceria metade deste valor ( $0,0472 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

\* Também era indicado que o ângulo de saída de ar no difusor na direção +X era de  $90^\circ$  com a horizontal, e do difusor na direção -X, de  $75^\circ$  com a horizontal, onde a intensidade turbulenta do ar injetado, deveria ser da ordem dos 10% para o difusor na direção +X, e de 15% para o difusor na direção -X.

\*\* Para o extrator, apenas era referido que todo o ar que era injetado na sala, pelos fornecedores de ar, deveria ser removido por este equipamento.

Não obstante, é necessário referir que para se simular as condições de fronteira implementadas no *DesignBuilder* para o extrator, ou seja, o caudal de ar a ser extraído do modelo simulado, foi necessário implementar, manualmente, outras condições de fronteira, através da edição dos ficheiros de texto de configuração dos casos, que foram depois simulados com o *OpenFOAM*, via linha de comandos.

As condições de fronteira, manualmente implementadas, encontram-se ilustradas na Tabela 9. O procedimento adotado para se efetuar esta alteração, pode ser observado no capítulo dos apêndices, em concreto, apêndice C.8.

Tabela 9: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Extrator de Ar

Elemento	Condições de Fronteira Manualmente Implementadas		
	Pressão	Velocidade	Temperatura
Extrator	Pressão Manométrica = 0 Pa	$V_{inlet} = 0 \text{ m/s}$ $V_{outlet} = \text{Gradiente } 0$	$T_{inlet} = 20^\circ\text{C}$ $T_{outlet} = \text{Gradiente } 0$

Na Tabela 9 encontram-se ilustradas as condições de fronteira definidas, manualmente, para o extrator, onde neste local se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa, em que a velocidade de saída deveria ser a simulada (Gradiente 0), e à entrada definiu-se que a velocidade deveria ser 0 m/s por forma a garantir que não existia ar a entrar no extrator (apenas remoção de ar da sala), no entanto o *OpenFOAM* nem sempre conseguiu obedecer a este critério, existindo por vezes uma recirculação residual, e por isso, desprezável.

Para complementar, definiu-se ainda que a temperatura de ar extraído seria a simulada (Gradiente 0), e caso houvesse recirculação de ar (ainda que residual), o ar de retorno na extração deveria ter uma temperatura de 20°C.

É de notar também que o *DesignBuilder* apenas permitia a introdução do fluxo de calor em  $W/m^2$  para a condição de fronteira das lâmpadas, pelo que se teve de equivaler os 64 W de potência das lâmpadas, indicado na Tabela 8, em  $W/m^2$ . Para esse efeito, foi necessário considerar a área das lâmpadas, e resolver a equação (15), tendo-se obtido o valor de  $\dot{\phi}_{Lâmpadas} \approx 266,67 W/m^2$ .

$$\dot{\phi}_{Lâmpadas} = \frac{Q_{Lâmpadas}}{A_{Lâmpadas}} \quad (15)$$

Por último, em relação às condições de fronteira é necessário referir que o modelo de turbulência utilizado pelo autores do artigo [8] foi o *standard k-ε*, tal como mencionado no Quadro-Síntese 1 da Tabela 2.

#### 4.4. Estudo de Validação do Modelo Numérico

Neste subcapítulo encontram-se demonstradas as várias etapas percorridas desde a simulação de escoamento de ar inicial, até ao momento em que se atingiu uma correlação considerada satisfatória entre os resultados numéricos e experimentais. Esta verificação de resultados foi feita com base na comparação de resultados numéricos Vs experimentais efetuada pelos autores do artigo [8], possível de ser analisada nos gráficos da Figura 3 abaixo ilustrada.

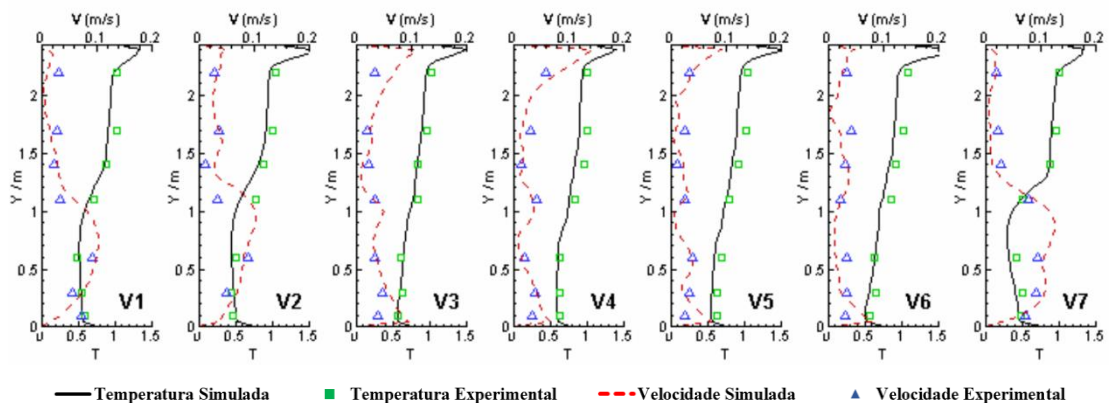


Figura 3. Comparação Resultados Numéricos Vs Experimental conduzida no artigo [8]

É de referir que se utilizou a estrutura da Figura 3 para apresentar as comparações obtidas nos estudos do capítulo 3, não obstante de a escala de velocidades não ser a mesma. Pelas razões indicadas em 4.2.3, comparou-se as temperaturas absolutas em *Celsius*, e não em valores normalizados, como se observa na Figura 3.

#### 4.4.1. Diferenças entre modelos de turbulência *BCFDK* e *kEpsilon*

Em primeira instância, é necessário referir que até ao primeiro estudo em que se obteve resultados considerados próximos do que se pretendia obter, realizaram-se cerca de 98 simulações, onde por mais alterações que fossem efetuadas aquando da geração de malha e/ou implementação das condições de fronteira, os resultados numéricos obtidos eram todos muito semelhantes e bastante díspares dos resultados experimentais.

Tal fenómeno se deveu ao facto de nestas simulações, o *middleware blueCFD-Kernel*, desenvolvido pela empresa *FS Dynamics Portugal blueCAPE Lda*, estar a utilizar um modelo de turbulência incongruente, o *BuoyantkEpsilonBCFDK*.

Fundamentalmente, este é um modelo de turbulência que gera termos de fonte ao serem verificadas variações de temperatura associadas às variações de densidade ocorridas por fenómenos de impulsão natural, o que por si só, induz turbulência no domínio, que neste caso estava a ser sobrestimada, uma vez que a viscosidade turbulenta  $\mu_t$ , não permitia uma normal penetração do escoamento desenvolvido pelos difusores, no interior do domínio.

O fenómeno também pode ser explicado matematicamente, uma vez que as equações do modelo de turbulência  $k - \epsilon$ , que são resolvidas pelo *solver* do *OpenFOAM*, já têm em consideração as variações de densidade, que indiretamente consideram as variações de temperatura, e é o facto de os termos de fonte que estão a ser gerados pelo modelo *BuoyantkEpsilonBCFDK*, referentes ao fenómeno de impulsão natural, que provoca a sobrestimação da turbulência, evidenciada nos resultados observados.

Para fazer face a este problema, foi utilizado outro modelo de turbulência, o *kEpsilon*, que já não tem em consideração estas variações de temperatura, e como tal, já não gera termos de fonte, logo, o fenómeno de sobrestimação da turbulência não se verifica. A comparação dos gráficos dos perfis de temperatura e velocidade obtidos através dos resultados numéricos Vs experimentais, com implementação do modelo de turbulência *BuoyantkEpsilonBCFDK*, e com o modelo *kEpsilon*, pode ser observada na Figura 4.

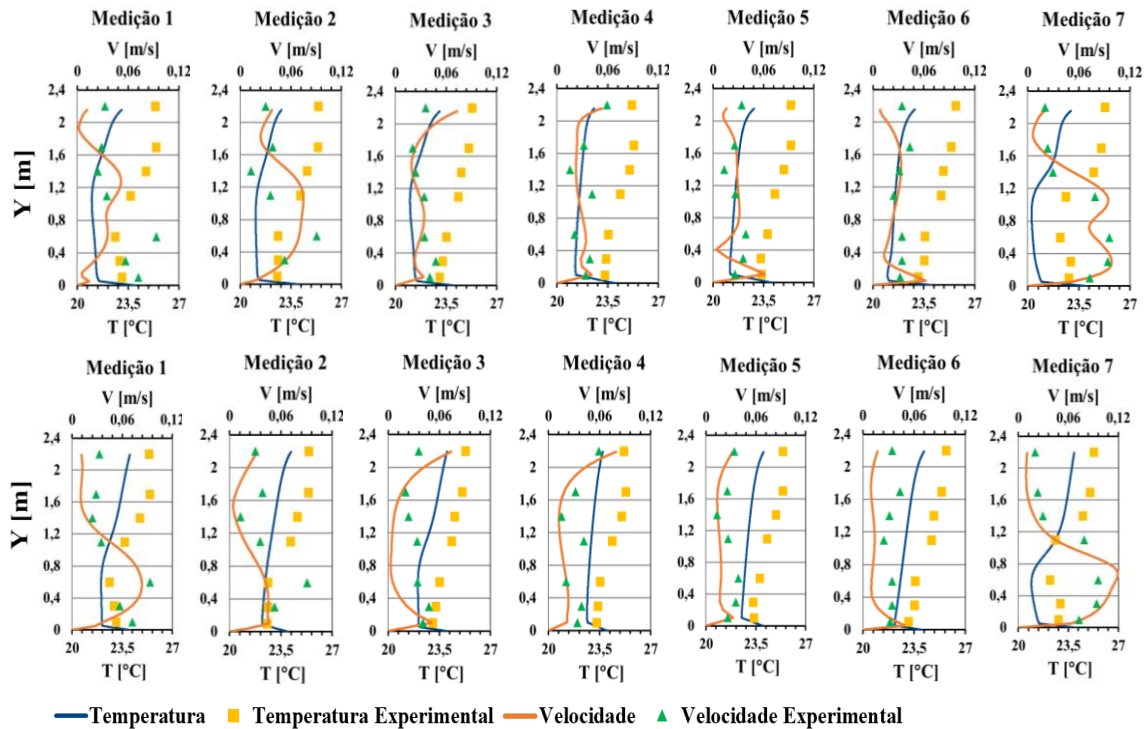


Figura 4. Comparação Gráficos Resultados Numérico Vs Experimental: Modelo *kEpsilon* (Em Cima) Vs Modelo BCFDK (Em Baixo)

Como se observa, verificou-se uma melhoria substantiva dos resultados ao nível dos perfis de velocidade quando se utiliza o modelo de turbulência *kEpsilon*, principalmente nas medições que ocorreram no centro da sala (medição 2 a 6), onde aqui se verificou uma clara aproximação entre os resultados numéricos e experimentais. Os procedimentos necessários para se alterar o modelo de turbulência das simulações, em *OpenFOAM*, podem ser observados no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice C.1.

#### 4.4.2. *Modus Operandi* da Evolução do Estudo

A partir do 1º caso de simulação com o modelo *kEpsilon*, até à obtenção do caso onde se verificou a melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais, foram efetuadas, aproximadamente, 44 simulações, cada uma com um tempo médio para a convergência de cerca de 6 a 7 horas.

Entre as várias simulações mencionadas, foram assinalados 5 casos de referência cujas análises acerca do que se observou em cada um deles, permitiu proceder às alterações necessárias até se atingir a aproximação satisfatória entre os resultados

numéricos e experimentais. O *modus operandi* nesta secção do trabalho será explicar os procedimentos que se tomaram entre cada caso de referência. As malhas geradas para os 5 casos de referência podem ser observadas com maior detalhe no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice B.

### 4.4.3. Evolução do Estudo a partir do Caso de Referência 1

Neste subcapítulo será apresentada a evolução do estudo de validação, a partir do 1º caso de referência.

#### 4.4.3.1. 1ª Simulação com Modelo de Turbulência *kEpsilon*

Como já foi referido, as diversas malhas utilizadas neste projeto foram geradas através do *OpenFOAM 8.x*, em que a malha do caso de referência 1, a 1ª simulação com a implementação do modelo de turbulência *kEpsilon*, tinha as características indicadas na Tabela 10. É de referir também que as células que compoñham as malhas assumiam uma geometria prismática.

Tabela 10: Características Malha: Caso de Referência 1

Malha Base [cm]	Nível Refinação Superfície			Caixas de Refinação	Nº Células	Nº Iterações Até Convergir
	0	1	2	Nível 1		
10	Paredes Laterais Chão	Difusores Humanos	Teto Lâmpadas Extrator	Difusor Extrator	190634	10000

Escolheu-se, inicialmente, uma malha base de 10 cm, devido ao facto de as lâmpadas terem em largura uma dimensão reduzida (20 cm) face à malha base de *default* do *DesignBuilder* (30 cm), e como tal, haveria o risco da malha não ser gerada eficientemente nessa região.

Para reforçar este aspeto, refinou-se a malha a nível 2 na região onde estavam inseridas as lâmpadas. O mesmo nível de refinação foi aplicado em todos os elementos que se encontravam nesta região.

O refinamento de um nível para outro superior consiste em dividir uma célula em 2, nos 3 eixos cartesianos, X, Y e Z, respetivamente, por forma a que os fenómenos físicos sejam estimados com maior precisão, o que por si só, implica custos computacionais adicionais. A comparação dos resultados deste caso com os resultados experimentais, pode ser observada nos gráficos da Figura 5.

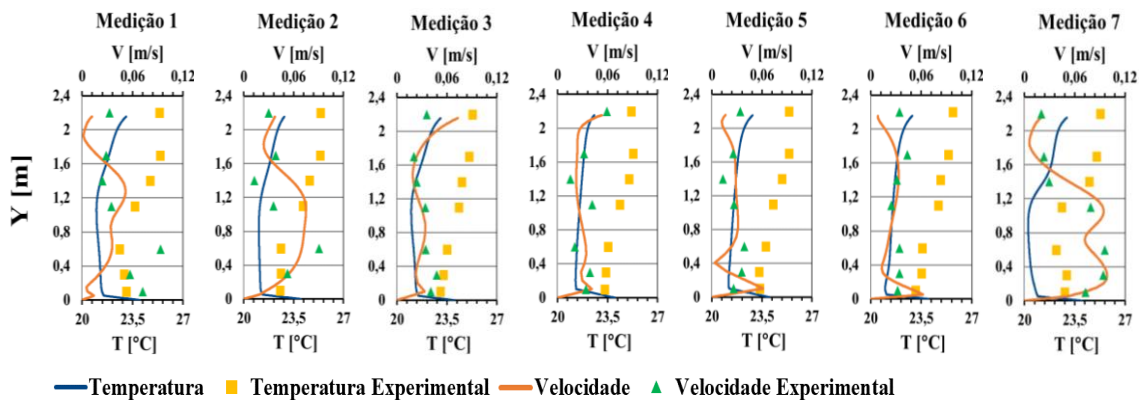


Figura 5. Comparação Gráficos Experimental Vs Numérico do Caso 1 de Referência

Como já foi mencionado, este foi o 1º caso onde se obtiveram aproximações significativas aos resultados experimentais, não obstante, os resultados numéricos tenham ficado aquém do esperado, principalmente ao nível dos perfis de temperatura, pelo que foi necessário aferir como se poderia proceder para se obter uma melhor correlação entre resultados numéricos e experimentais.

#### 4.4.3.2. Implementação da condição de fronteira de potência nos ocupantes

A 1ª alteração efetuada no sentido de resolver o problema mencionado no subcapítulo anterior, foi a implementação da condição de fronteira de potência nos ocupantes. Inicialmente, fixou-se a temperatura referida para os ocupantes (31,6°C) no artigo [8], onde nesta simulação passou a ser definida a potência, também referida no artigo [8] (100 W), para os ocupantes.

A razão pelo qual, logo à partida, não se implementaram ambas as condições de fronteira indicadas para os ocupantes (potência e temperatura), foi porque o *DesignBuilder* apenas permitia a introdução de uma condição de fronteira, e nesse sentido, testou-se em primeira instância a temperatura dos ocupantes. A comparação dos gráficos numérico Vs experimental de ambas as simulações, encontra-se ilustrada na Figura 6.

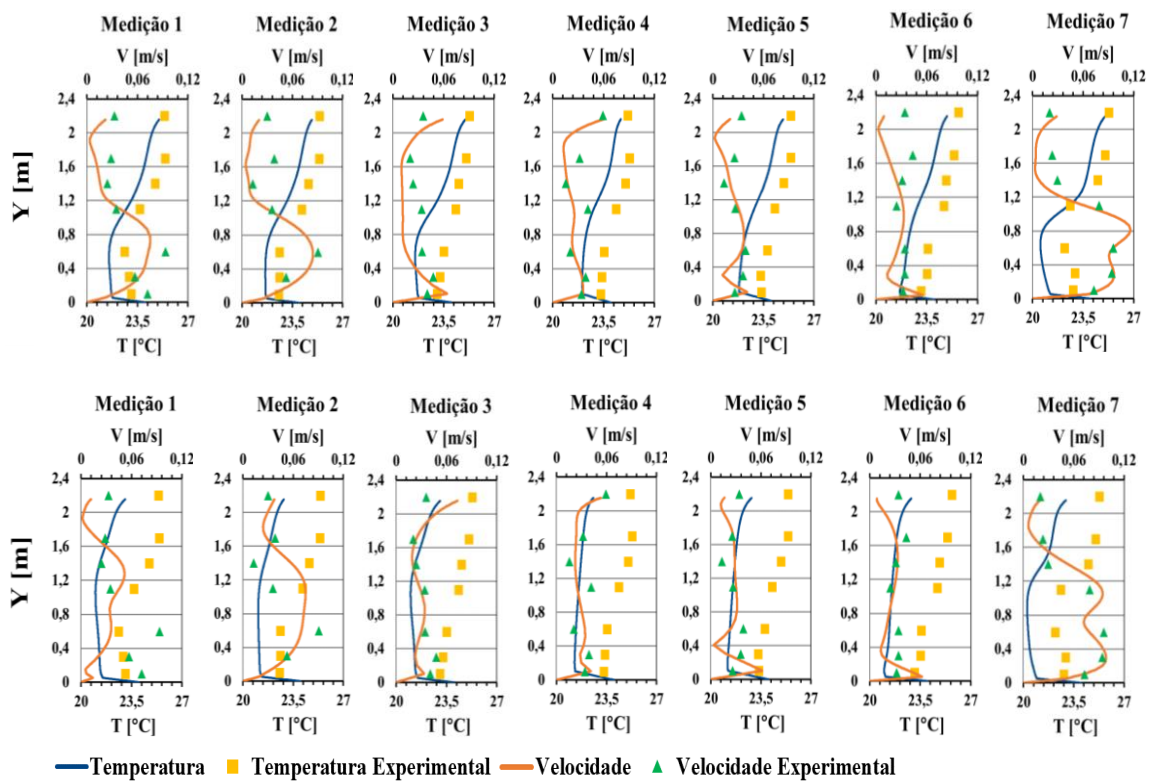


Figura 6. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Ocupantes Com Potência (Em Cima) Vs Ocupantes Com Temperatura (Em Baixo)

Como se observa, houve uma aproximação dos perfis de temperatura em quase todas as medições na simulação em que a condição de fronteira definida para os ocupantes foi a potência.

Isto se deveu ao facto de como os humanos, nesta situação libertam mais calor, estão por sua vez a originar maiores gradientes de temperatura na sala, fazendo com que a velocidade do ar seja maior e não exista estagnação de ar quente na região do teto, em comparação com a situação em que os humanos têm definida a sua temperatura, e onde as velocidades são mais baixas, algo que é refletido nos perfis de velocidade observados na Figura 6, para este caso.

Nas imagens da Figura 7, obtidas através do *ParaView*, que representam um corte de secção na sala no local onde estão 2 humanos, é possível observar o fenómeno acima descrito.

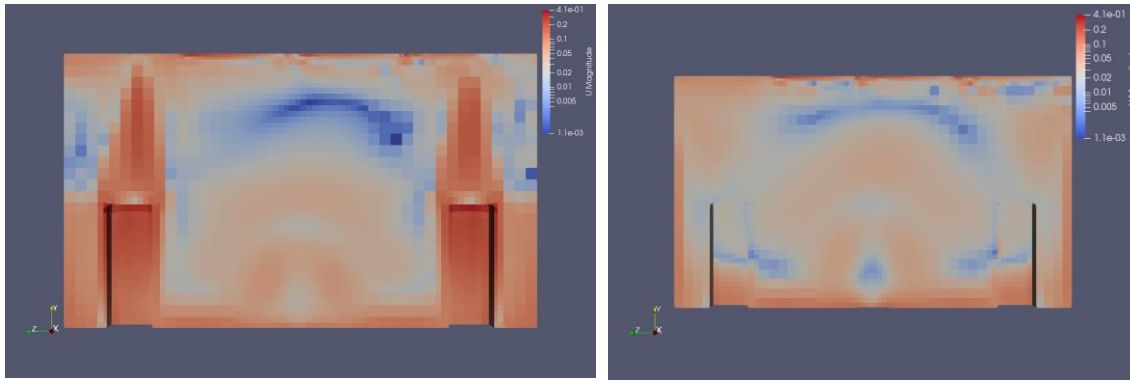


Figura 7. Comparação Corte de Secção Região dos Humanos: Com Potência (Esquerda) Vs Com Temperatura (Direita)

Como se pode constatar, as velocidades no interior do domínio são superiores quando os humanos são definidos com potência. Este fenómeno é especialmente evidente na região em torno dos ocupantes, onde a velocidade do ar (0,4 m/s) é quase 4 vezes superior em comparação com a situação em que os ocupantes estão definidos com temperatura (0,1 m/s).

#### 4.4.3.3. Refinações Adicionais na Região dos Ocupantes

Na tentativa de descortinar melhor as plumas de calor libertadas pelos humanos, refinaram-se as superfícies dos mesmos, até 22 cm em termos de largura, e até ao teto, em termos de comprimento. Como se observa na imagem da esquerda da Figura 7, apesar dos ocupantes terem uma pluma de calor a ser libertada, esta é ainda um pouco grosseira, daí a necessidade de se refinar esta região.

Este procedimento foi necessário ser efetuado manualmente, uma vez que no *DesignBuilder* apenas era possível definir a distância das células refinadas às superfícies dos ocupantes. O procedimento para se efetuar esta alteração é possível de ser observado no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice C.3. A diferença entre as malhas, com e sem refinação em torno dos ocupantes, pode ser observada nas imagens da Figura 8.

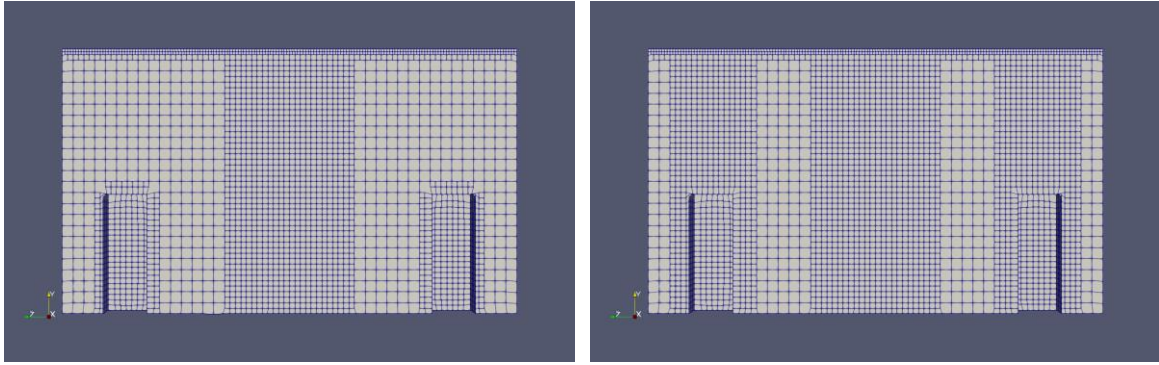


Figura 8. Comparação Corte Secção Malha: Sem Refinação dos Ocupantes em Altura (Esquerda) Vs Com Refinação dos Ocupantes em Altura (Direita)

O que se observou na comparação de gráficos numérico Vs experimental é que não existia uma diferença qualitativa entre as simulações com ou sem refinação, ainda que no *ParaView* se tenha observado uma melhoria ao nível da mistura do ar quente no interior da sala, como se observa nas imagens da Figura 9.

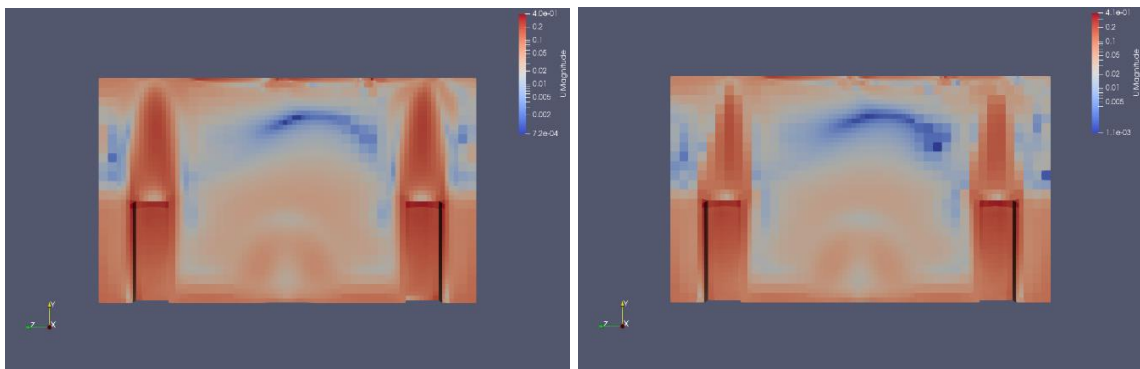


Figura 9. Comparação Corte Secção Região Humanos: Com Refinação (Esquerda) Vs Sem Refinação (Direita)

Como se verifica, a mistura do calor no interior da sala é mais desenvolvida na imagem da esquerda do que na direita, o que permitiu afirmar que embora na prática, a comparação das duas simulações com os resultados experimentais, não tenha evidenciado grandes diferenças, a refinação nos humanos deveria ser um aspeto a ter em conta nos estudos subsequentes. A comparação dos gráficos numérico Vs experimental de ambas as simulações, pode ser observada no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice A.1.

#### 4.4.3.4. Implementação de Modelos de Tratamento de parede do *OpenFOAM*

Um 2º aspeto que foi testado foi a utilização de diferentes modelos de tratamento de parede. Procedeu-se a esta alteração para despistar se o modelo de tratamento de parede operacional (*Wall Functions* do *Kernel*) estaria ou não, a interferir com os resultados das simulações. Isto se deveu ao facto de o modelo de tratamento de parede do *Kernel* ter definida uma condição de fronteira nas paredes onde se assume que o regime do escoamento é sempre turbulento junto à parede, mesmo quando o escoamento desenvolvido nessa região é laminar.

Tal fenómeno foi observado nas simulações com e sem refinações em redor dos ocupantes. Este pormenor pode ser explicado através da análise do parâmetro adimensional  $y^+$  da simulação.

Através da lei de parede, é comumente assumido que para valores de  $y^+$  inferiores a 10, o escoamento é laminar, para valores entre 10 e 30, o escoamento é de transição, e para valores superiores a 30 o escoamento é turbulento. Nas imagens da Figura 10 é possível observar as zonas do domínio cujo  $y^+$  variava entre 0 e 45, isto para perceber se existiam regiões com  $y^+$  onde o escoamento era puramente laminar. É de referir ainda que os valores observados são referentes às fronteiras do domínio, uma vez que o parâmetro  $y^+$  apenas é aplicável nas superfícies e não no interior do domínio.

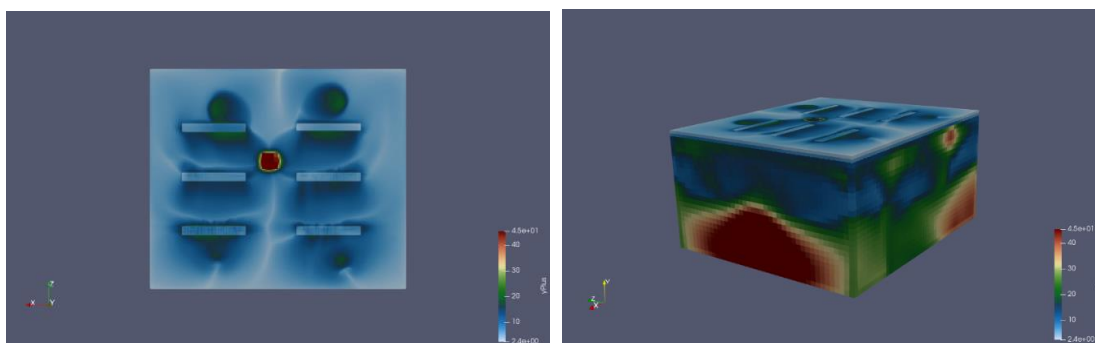


Figura 10.  $y^+$  da Simulação Com Refinação em Redor dos Ocupantes

Como se observa, a maior parte da região do teto, assim como a região cimeira da sala possuem um  $y^+$  inferior a 10, o que permite afirmar que o escoamento nestas regiões era maioritariamente laminar, incluindo zonas do regime transitório, e como tal, a referida função de tratamento de parede em vigor não seria a mais indicada para se reproduzir resultados condizentes com a realidade. Por esse motivo, simulou-se este mesmo caso com funções de tratamento de parede do próprio *OpenFOAM*.

Estas funções tinham a particularidade de aplicarem um tratamento de parede em função do  $y^+$  estar ou não enquadrado no regime laminar, sendo que acima de um valor de  $y^+ = 11,53$ , o tratamento de parede efetuado é enquadrado para o escoamento turbulento [26]. A substituição das funções de tratamento de parede foi realizada manualmente, e o procedimento para se efetuar esta alteração é possível de ser observado no capítulo dos apêndices, em concreto, apêndice C.4.

O que se verificou em termos de comparação dos gráficos numérico Vs experimental de ambas as simulações (com e sem *Wall Functions* do *OpenFOAM*), é que os resultados não variaram significativamente entre as simulações. A comparação entre os resultados obtidos nas referidas simulações pode ser observada no capítulo dos apêndices, em concreto, apêndice A.2.

Porém, através de 2 parâmetros que caracterizavam a variação de pressão e de temperatura no domínio,  $\Delta P$  e  $\Delta T$ , respetivamente, onde  $\Delta P = P_{simulação} - P_{média} [Pa]$ , e  $\Delta T = T_{simulação} - T_{média} [^{\circ}C]$ , conseguiu-se detetar algumas instabilidades do escoamento no interior da sala, em que quanto mais próximo de 0 se encontrassem  $\Delta P$  e  $\Delta T$ , menor seriam as instabilidades.

Verificou-se que com *Wall Functions* do *OpenFOAM*, os resultados apresentavam-se mais estáveis na região do teto, tal como é possível observar nas imagens das Figuras 11 e 12. É de salientar que os valores observados nestas figuras se referem às células adjacentes às fronteiras pertencentes ao interior do domínio, e não aos valores da face, como se verifica nas imagens da Figura 10, para o parâmetro  $y^+$ .

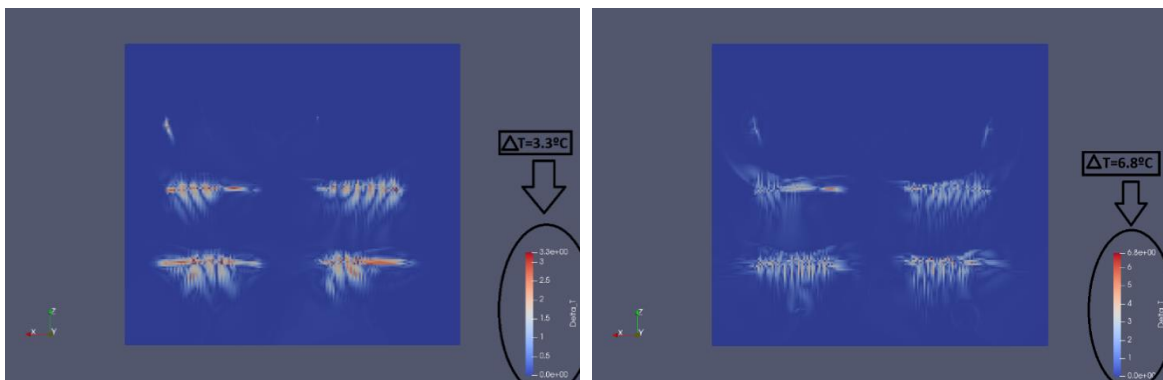


Figura 11. Delta T: *Wall Functions OpenFOAM* (Esquerda) VS *Wall Functions Kernel* (Direita)

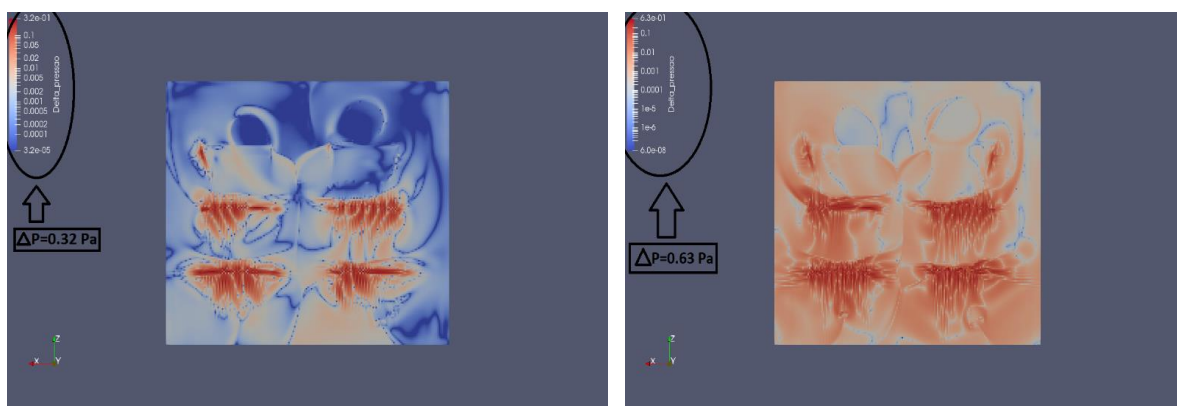


Figura 12. Delta P: *Wall Functions OpenFOAM* (Esquerda) VS *Wall Functions Kernel* (Direita)

Como se observa, tanto o  $\Delta P$  como o  $\Delta T$  reduziram para próximo de metade nas simulações com *Wall Functions* do *OpenFOAM*, o que permitiu concluir que a utilização de funções de tratamento de parede desadequadas poderia ser uma das causas das instabilidades observadas no escoamento, ainda que não traduzido de forma direta aquando da comparação dos gráficos numérico Vs experimental de ambos os casos.

#### 4.4.4. Evolução do Estudo a partir do Caso de Referência 2

O caso identificado como sendo o 2º de referência, ou seja, aquele que depois do 1º caso de referência evidenciou aproximações significativas aos resultados experimentais observados no artigo [8], surgiu na continuação do desenvolvimento da simulação anteriormente referida.

Na tentativa de reduzir ainda mais as instabilidades que se observaram na região do teto, procurou-se reduzir a refinação então vigente nesta região (nível 2) para um nível inferior (nível 1). O objetivo desta alteração era tornar a malha mais grosseira no teto, aproximando-a da malha do artigo [8], por forma a que na simulação fossem detetados menos detalhes na região das lâmpadas, onde se estavam a verificar as instabilidades.

Isto é, ao ter uma malha mais refinada, a transferência de calor das lâmpadas para o domínio é processada de forma mais detalhada, e como tal, a elevada temperatura das lâmpadas iria sobressair nos resultados das simulações por aumento do  $\Delta P$  e  $\Delta T$  no teto, levando ao aparecimento das instabilidades nesta região.

Correu-se esta simulação com o tratamento de parede do *Kernel*, já que para uma malha base grosseira de 10 cm, aliada a um nível de refinação inferior no teto (nível 1), o escoamento perto desta zona seria necessariamente turbulento, e como tal, não haveria

grandes diferenças entre utilizar um tratamento de parede que assumisse a transição entre escoamento laminar e turbulento, ou uma função que assumisse um escoamento sempre turbulento. As características da malha do 2º caso de referência são possíveis de serem observadas na Tabela 11.

Tabela 11. Características da Malha: Caso de Referência 2

Malha Base [cm]	Nível Refinação Superfície		Caixas de Refinação	Nº Células	Nº Iterações Até Convergir
	0	1	Nível 1		
10	Paredes Laterais Chão	Difusores Humanos Teto Lâmpadas Extrator	Difusor Extrator	155613	10000

Tendo em conta o acima referido, reduziu-se simultaneamente, o nível de refinação no teto, e dos objetos que aí se encontravam (lâmpadas e extrator). Como era expectável, as instabilidades reduziram significativamente na região do teto, como é possível de observar nas imagens das Figuras 13 e 14.

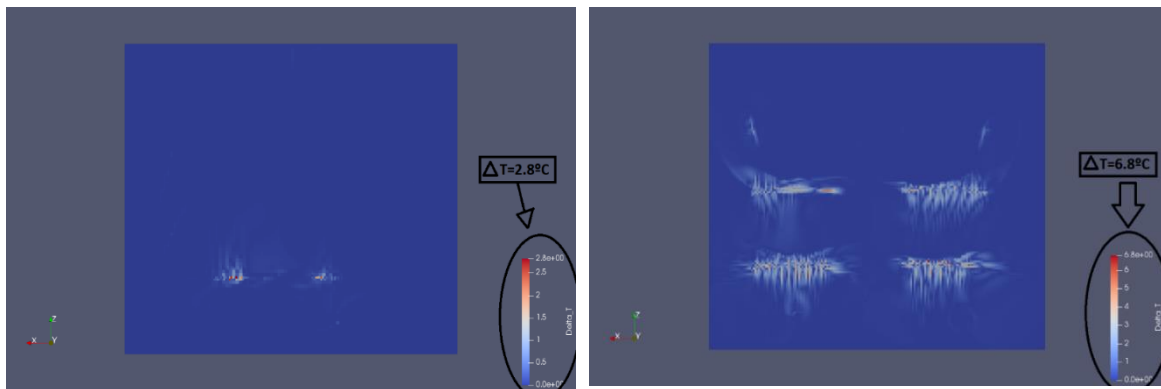


Figura 13. Delta T: Refinação Nível 1 Teto (Esquerda) Vs Refinação Nível 2 Teto (Direita)

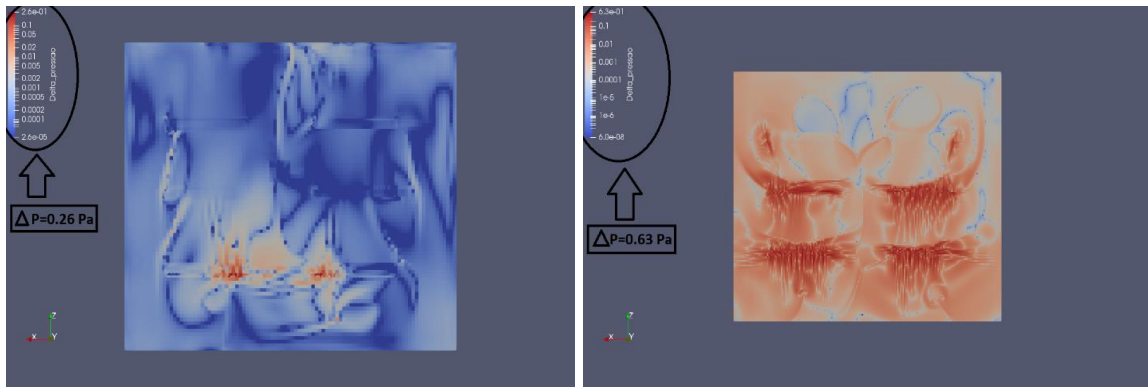


Figura 14. Delta P: Refinação Nível 1 Teto (Esquerda) Vs Refinação Nível 2 Teto (Direita)

Como se verifica, o  $\Delta P$  e o  $\Delta T$  diminuiram significativamente apenas por redução da refinação da malha no teto, ( $\Delta P$  reduziu de 0,63 para 0,26 Pa e  $\Delta T$  de 6,8°C para 2,8°C), o que resultou numa melhoria significativa a nível qualitativo aquando da comparação dos gráficos numérico Vs experimental com a 1ª simulação de referência, tal como pode ser observado nos gráficos da Figura 15.

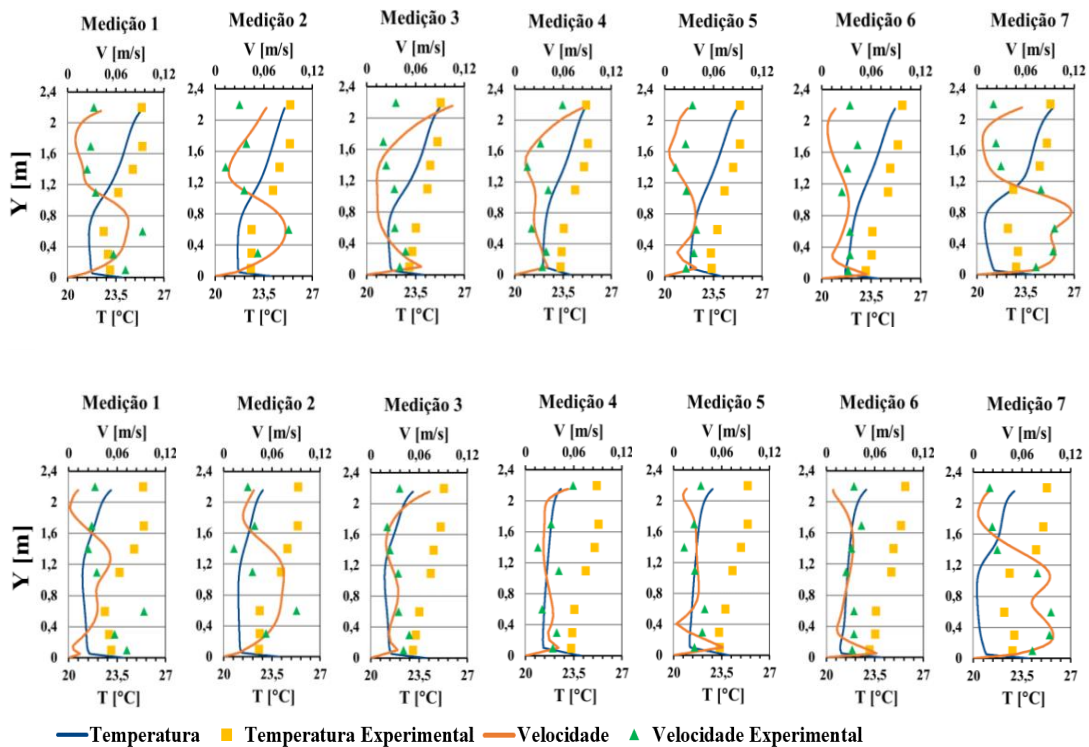


Figura 15. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 2 (Em Cima) Vs Caso de Referência 1 (Em Baixo)

Comparando ambos os casos de referência e observando os perfis de temperatura, verificou-se uma aproximação clara aos resultados experimentais no 2º caso de referência. Em termos dos perfis de velocidade, apesar de nem todas as medições

apresentarem diferenças significativas, é possível afirmar que se obteve melhorias, em concreto, na região cimeira da sala (a partir dos 1,5 metros de altura) nas medições 2, 5 e 7, onde se observa uma maior velocidade do ar nesta região, justamente porque o calor difundido pelas lâmpadas já não é tão intenso, e como tal, permite que o ar emitido pelos difusores circule mais facilmente nesta região, aumentando a velocidade do escoamento.

#### 4.4.4.1. Refinação da Malha Base de 10 cm para 5 cm

No seguimento desta simulação procedeu-se a mais uma alteração, onde se reduziu a malha base para 5 cm. Eram múltiplas as pretensões com esta alteração. Por um lado, procurou-se tornar o escoamento mais uniforme por forma a que a difusão do mesmo desde a região dos ocupantes, que possuíam uma refinação extra, até às paredes fosse conduzida de forma mais detalhada, uma vez que com uma malha base de 10 cm se verificaram certos detalhes no escoamento que tinham pouca resolução, como por exemplo, vórtices desenvolvidos em torno dos difusores de ar. Este fenómeno poderia ser uma condicionante dos resultados que se estavam a obter, e como tal, utilizou-se a estratégia da refinação para tentar colmatar a situação descrita. A evidência da pouca resolução dos vórtices na malha grosseira de 10 cm, pode ser observada nas imagens da Figura 16.

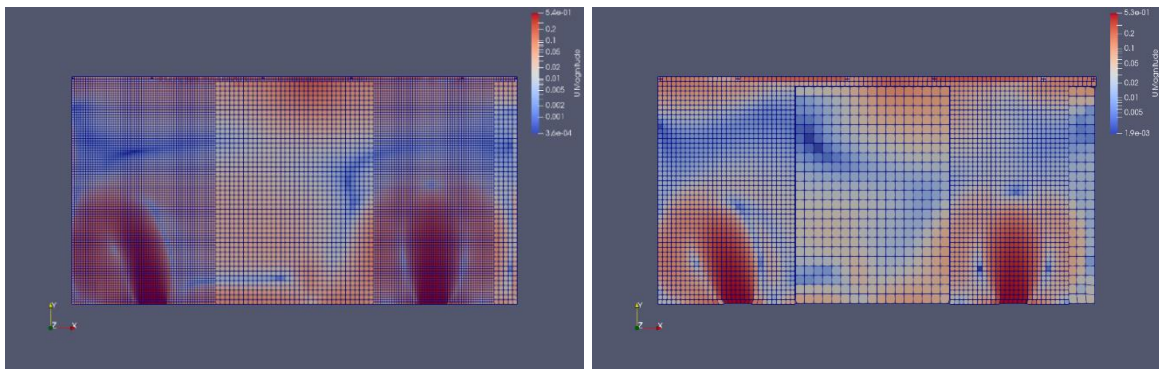


Figura 16. Resolução de Vórtices: Malha Base 5cm (esquerda) Vs Malha Base 10cm

Através do corte de secção observado, verifica-se que a resolução dos vórtices na malha base de 5 cm é bastante superior quando comparado com uma malha base de 10 cm, onde no 1º caso, a malha não introduz tantas interferências no escoamento.

Ainda assim, não se verificaram melhorias significativas neste caso quando comparado com o 2º caso de referência, pelo contrário, observou-se um aumento excessivo da velocidade máxima do escoamento no interior da sala, principalmente nas medições 1 e 7, que, por conseguinte, resultaram a nível qualitativo, em resultados mais

distantes dos experimentais. A comparação dos gráficos numérico Vs experimental é possível de ser observada no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice A.3.

#### 4.4.5. Evolução do Estudo a partir do Caso de Referência 3

A simulação posterior a anteriormente referida é, simultaneamente, o 3º caso de referência, onde se eliminou a caixa de refinação a envolver os difusores e o extrator de ar, e se refinou a malha na região das paredes (nível 0 para nível 1). Por um lado, ao eliminar a caixa de refinação dos difusores, procurou-se tornar a simulação ainda mais uniforme do que quando se reduziu apenas a malha base para 5 cm.

Ou seja, pretendia-se que o escoamento em volta dos difusores e do extrator fosse difundido entre células de dimensões mais próximas. O escoamento de ar em redor dos difusores era uma zona crítica, por se tratar de uma região onde se desenvolviam vórtices e o ar se dissipava a partir deste local a maior velocidade para o restante domínio da sala, e como tal, entendeu-se que a escoamento de ar nesta região deveria ser processado de forma mais uniforme. A refinação das paredes surgiu na tentativa de obter uma melhor transferência de calor junto às paredes. As características da malha do 3º caso de referência são possíveis de serem observadas na Tabela 12.

Tabela 12: Características da Malha: Caso de Referência 3

Malha Base [cm]	Nível Refinação Superfície		Nº Células	Nº Iterações Até Convergir
	0	1		
5	Chão	Difusores Humanos Teto Lâmpadas Extrator Paredes Laterais	901014	10000

Esta malha, tal como as malhas de base de 5 cm, tinham a nuance de possuir um custo computacional bastante superior às simulações com malha base de 10 cm, uma vez que o tempo até à convergência era cerca de 5 a 6 horas superior.

O que se verificou na comparação dos gráficos numérico Vs experimental entre o 2º e o 3º casos de referência, foram algumas melhorias significativas principalmente nas medições 4 e 5, onde, em algumas regiões como a zona intermédia da sala  $\{Y=[0,2;1,5](m)\}$ , a velocidade do escoamento já era superior, e mais aproximada dos resultados experimentais.

Este aspeto permitiu deduzir que o facto de o escoamento em torno dos difusores ser difundido de forma mais uniforme (por redução da refinação da malha nestas regiões), auxiliou nos resultados obtidos na simulação.

Tais observações podem ser escrutinadas na Figura 17. É de referir que, excecionalmente, a escala de velocidades da medição 7 do caso de referência 3 se apresenta até 0,15 m/s, uma vez que a velocidade máxima registada neste caso superou os 0,12 m/s, valor máximo da escala estabelecida para a velocidade do ar nos anteriores gráficos representados.

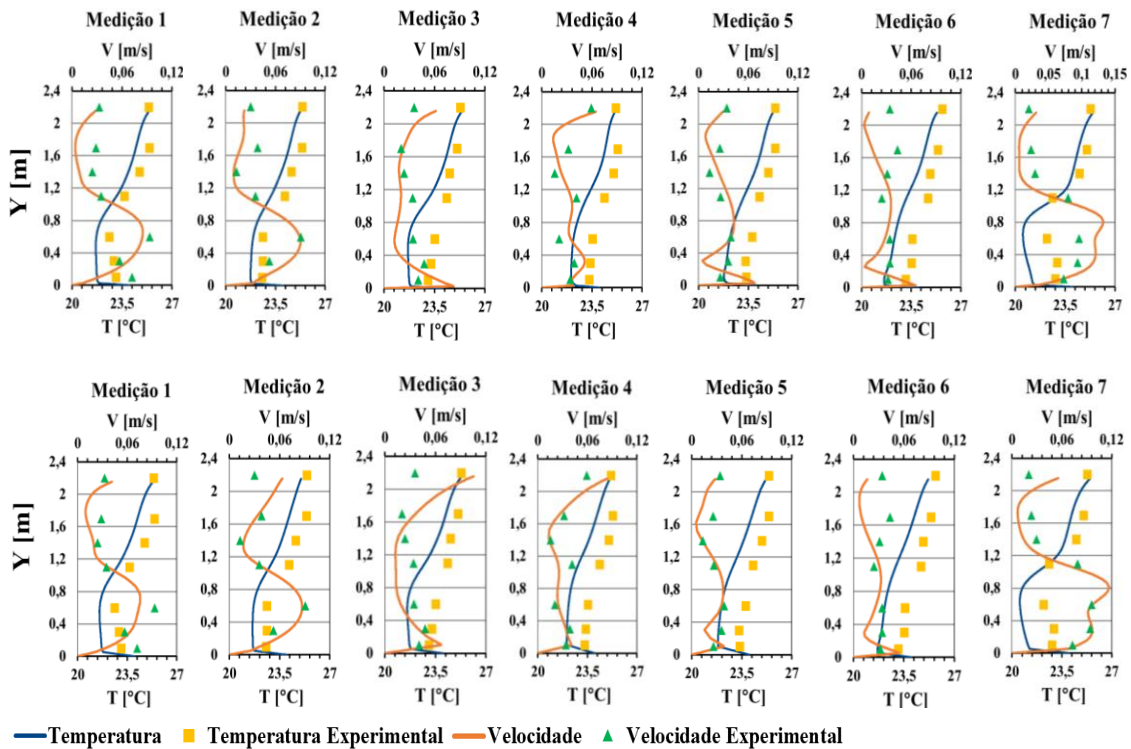


Figura 17. Comparação dos Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 3 (Em Cima) Vs Caso de Referência 2 (Em Baixo)

No entanto, nesta simulação, tal como nas simulações realizadas para uma malha base de 5 cm, as instabilidades voltaram a ser evidentes na região do teto, isto porque como a malha é mais refinada nesta região, em comparação com a malha de 10 cm, as

funções de tratamento de parede do *Kernel* poderiam, novamente, não ser as mais adequadas.

#### 4.4.5.1. Implementação de *Wall Functions* do *OpenFOAM* na Malha Base 5 cm

Tendo em conta as conclusões deduzidas da simulação transata, a malha da simulação posterior detinha características idênticas às da malha do 3º caso de referência, mas desta feita, com a implementação das *Wall Functions* do *OpenFOAM*, por forma a que o tratamento de parede fosse mais adequado ao tipo de escoamento desenvolvido junto às paredes, desta feita para uma malha base de 5 cm. Nas imagens das Figuras 18 e 19, é possível comparar as instabilidades no escoamento na região perto do teto, para as simulações com *Wall Functions* do *Kernel* e do *OpenFOAM*.

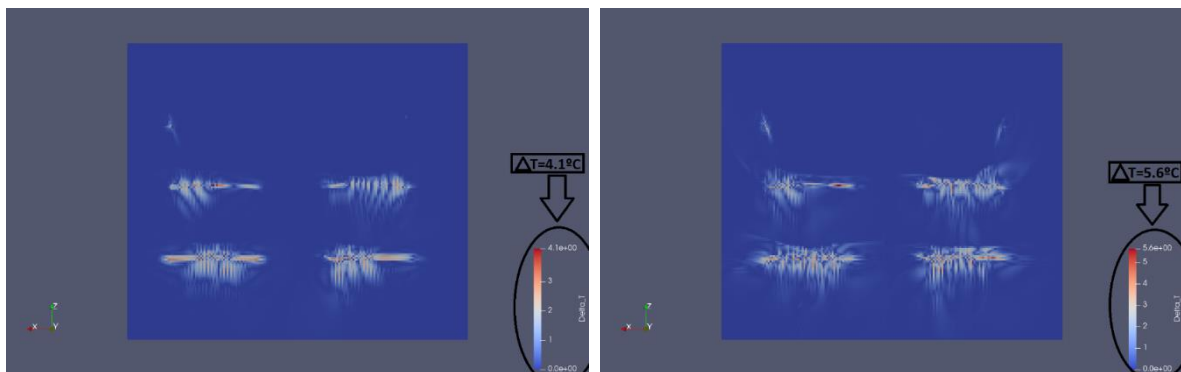


Figura 18. Delta T: Malha Base 5 cm *Wall Functions OpenFOAM* (Esquerda) Vs *Wall Functions* do *Kernel* (Direita)

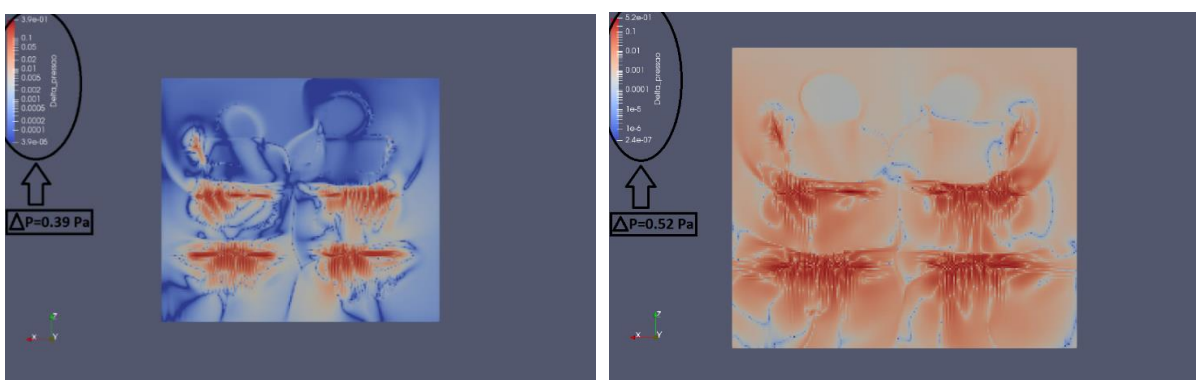


Figura 19. Delta P: Malha Base 5 cm *Wall Functions OpenFOAM* (Esquerda) Vs *Wall Functions* do *Kernel* (Direita)

Como se observa, ao aplicar-se as funções de tratamento de parede do *OpenFOAM* na simulação com malha base de 5cm, verificou-se uma redução das instabilidades na região do teto ( $\Delta P$  reduziu de 0,52 para 0,39 Pa e  $\Delta T$  de 5,6°C para 4,1°C). Ainda assim, as reduções não são tão assinaláveis como quando se efetuou o mesmo estudo para uma malha base de 10 cm, algo que foi evidenciado quando se comparou os gráficos numérico Vs experimental das últimas 2 simulações analisadas, onde não se verificaram alterações significativas entre um caso face ao outro. A comparação dos gráficos numérico Vs experimental das 2 últimas simulações referidas é possível de ser observada no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice A.4.

Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de nas regiões perto da parede onde o escoamento é essencialmente de transição ( $y^+$  entre 10 e 30), mesmo as *Wall Functions* do *OpenFOAM* não são as mais adequadas para reproduzir este tipo de escoamento, uma vez que apenas permitem um tratamento de parede para escoamentos turbulentos ou laminares, nunca de transição. Este fenómeno pode ser evidenciado nas imagens da Figura 20.

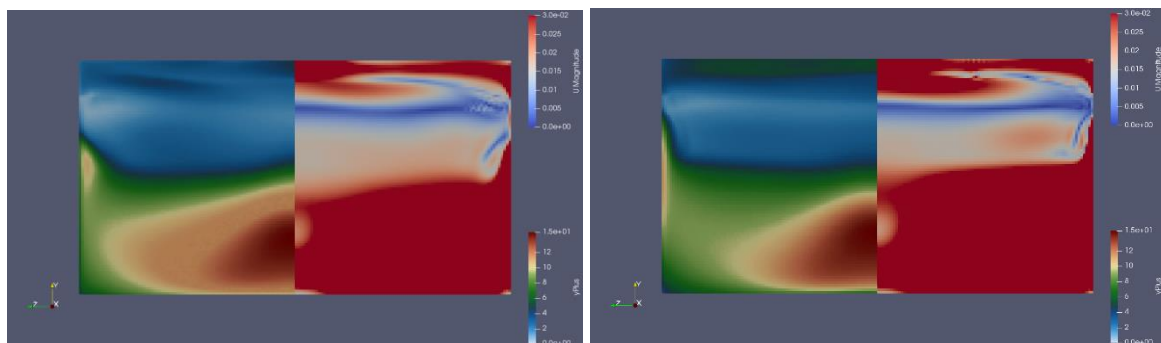


Figura 20. Comparação  $Y^+$  e  $U$  na Zona de Transição: Com *Wall Functions OpenFOAM* (Esquerda) Vs com *Wall Functions Kernel* (Direita)

Nas imagens da Figura 20 podemos observar um corte de secção da sala na parede perpendicular à região onde estão localizados os difusores. Observa-se também que cada imagem se encontra dividida, onde a fração da esquerda representa o  $Y^+$  desse lado da sala (lado esquerdo), e a fração da direita representa a velocidade do ar (lado direito da sala). O objetivo desta disposição seria visualizar de que forma é que na transição entre frações, o  $y^+$  se correlaciona com a velocidade.

Ao analisar-se as imagens, verificou-se que o escoamento na metade inferior da sala onde os difusores têm uma forte influência na forma como o ar se difunde, encontra-se na região de transição (região avermelhada do lado esquerdo da imagem,  $y^+ \approx 15$ ).

Como tal, tanto as *Wall Functions* do *OpenFOAM* (imagem da esquerda), como as *Wall Functions* do *Kernel* (imagens da direita), por não possuírem tratamentos de parede adequados para um regime de transição, estavam a sobrestimar a velocidade nestas regiões, calculando valores típicos de regime turbulento ( $U > 0,02$  m/s), e por esse motivo é que se verificaram as instabilidades no escoamento, principalmente observadas através do cálculo do  $\Delta P$  e do  $\Delta T$  na região do teto, evidenciadas nas Figuras 18 e 19.

#### 4.4.5.2. Simulação de Malha Base 5 cm: Refinações Nível 0

Seguindo esta linha de raciocínio, e uma vez que a refinação junto às superfícies não estava a produzir os efeitos desejados, pelo contrário, aumentava a instabilidade do escoamento, decidiu-se simular um caso em que a malha base seria de 5 cm, mas sem qualquer refinação adicional no domínio, ou seja, a malha seria toda uniforme.

Adicionalmente, esta nova malha ir-se-ia assemelhar mais à malha do artigo [8] em comparação com as simulações onde as malhas possuíam refinações adicionais (de nível 1 ou 2). Adicionalmente, com esta alteração os custos computacionais seriam inferiores quando em comparação com as simulações anteriores. A análise dos resultados desta simulação foi efetuada através da observação das imagens das Figuras 21, 22, 23 e 24.

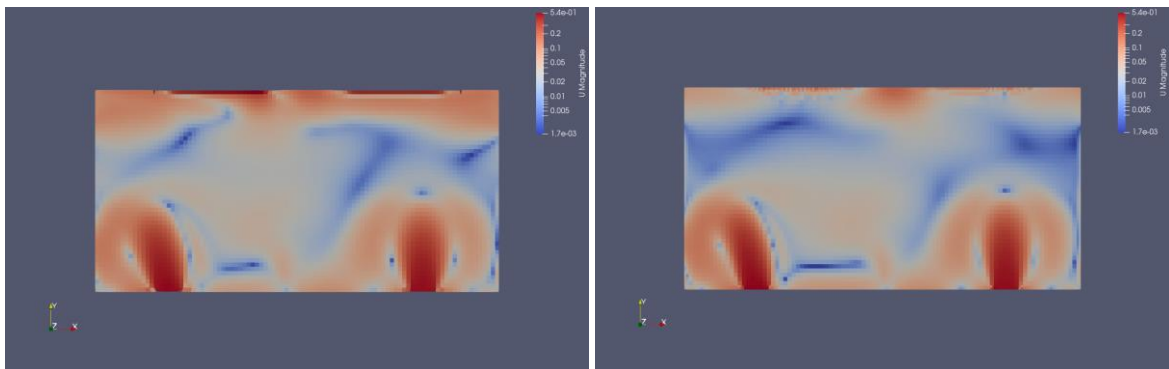


Figura 21. Corte de Secção: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita)

Na comparação de imagens da Figura 21, observa-se que o jato inclinado da simulação com refinação nas paredes (imagem da direita) não segue uma tendência natural de difusão e dissipação no topo, cujos fenómenos são observados no mesmo jato da simulação sem refinações (imagem da esquerda).

Presencia-se um fenómeno de arrasto artificial do ar para junto da parede no difusor inclinado, na simulação com refinações, justificando o facto deste jato ter um

formato mais estreito, quando comparado com o mesmo jato da simulação sem refinações.

Este fenómeno é explicado pelo fenómeno que foi referido na análise anterior, isto é, deveu-se ao facto de o escoamento nesta região se encontrar, essencialmente na zona de transição, e como tal, as funções de tratamento de parede sobrestimaram a velocidade nestas regiões para valores próximos do regime turbulento, provocando o efeito de arrasto/sucção do escoamento para junto da parede. A sobrestimação de velocidades pode ser observada com maior detalhe nas imagens da Figura 22.

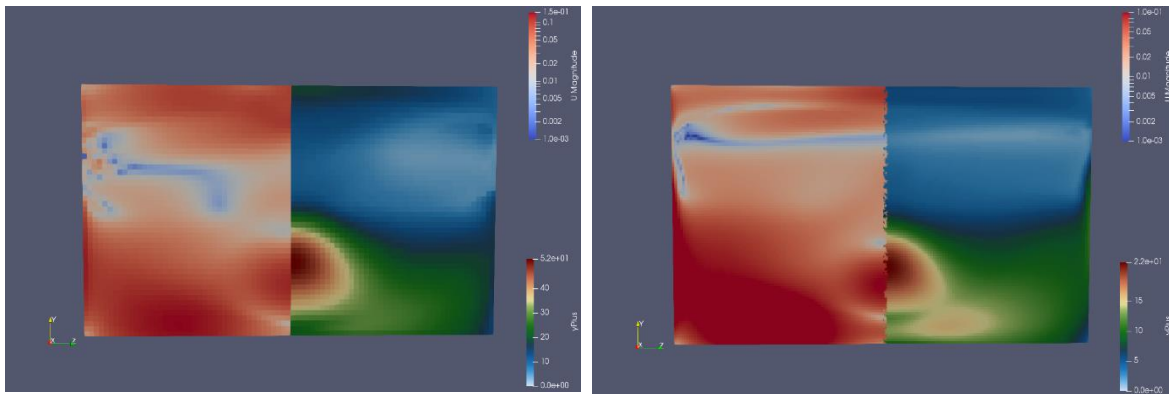


Figura 22. Comparação Y+ e U: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita)

A tipologia do corte de secção observado nas imagens da Figura 22 é análogo ao ilustrado na Figura 20, de maneira a se poder analisar o escoamento junto à parede perpendicular e adjacente ao escoamento do jato inclinado.

Em primeira instância, o que se observou em ambas as simulações, foi uma velocidade idêntica para o escoamento do ar na região inferior da sala próxima da parede perpendicular ao jato inclinado ( $U \approx 0,1 \text{ m/s}$ ).

Neste caso, o que importava sublinhar é que enquanto na simulação sem refinações o  $y+$  nesta região estava próximo de 50, ou seja, o escoamento era turbulento, na simulação com refinações nível 1, o  $y+$  estava próximo de 22, logo, o escoamento era de transição, e como tal, a velocidade de 0,1 m/s seria uma sobrestimação.

Como já foi referido, estas instabilidades foram evidenciadas através da análise do  $\Delta P$  e do  $\Delta T$  na região do teto, algo que pôde ser observado nas simulações acima referidas, através das imagens das Figuras 23 e 24.

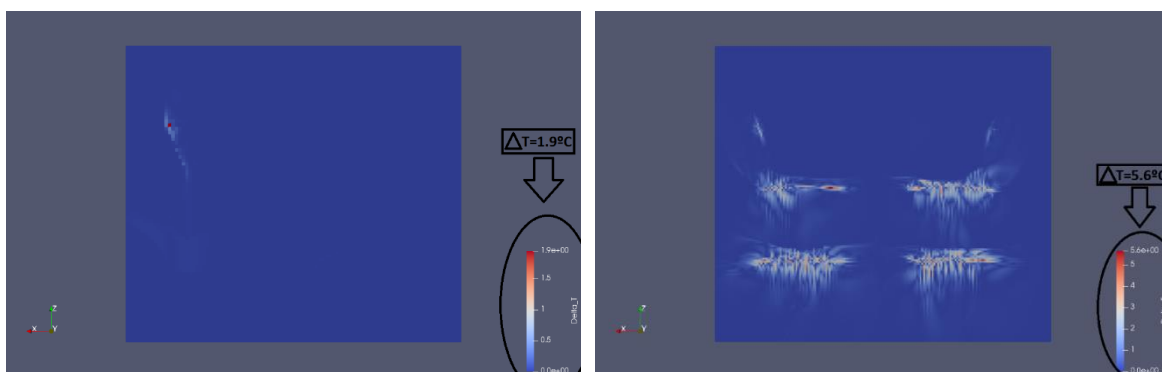


Figura 23. Delta T: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita)

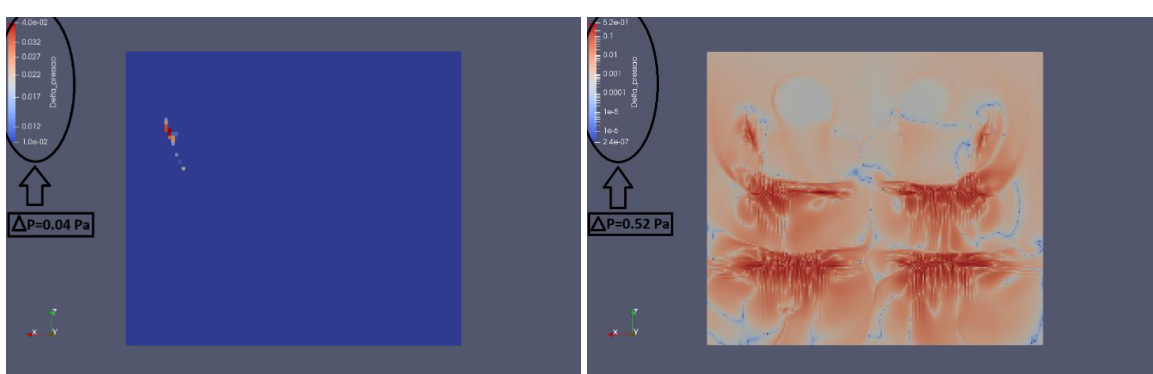
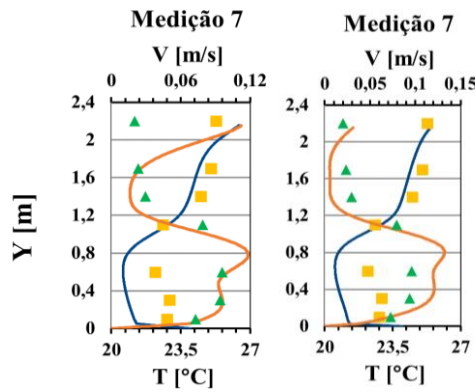


Figura 24. Delta P: Malha Sem Refinações (Esquerda) Vs Malha Com Refinação Nível 1 Paredes e Teto (Direita)

Como se observa, as instabilidades reduziram bastante na simulação sem refinações. ( $\Delta P$  reduziu de 0,52 para 0,04 Pa e  $\Delta T$  de 5,6°C para 1,9°C). É de realçar que esta foi a simulação para uma malha base de 5 cm onde as instabilidades no escoamento reduziram em maior escala. Como se tinha verificado até então, a aplicação das funções de tratamento de parede mencionadas, por si só não tinham conseguido diminuir as perturbações no domínio ao nível daquilo que se conseguiu por redução da refinação na malha.

Em termos de comparação dos gráficos numérico Vs experimental, não se observou uma melhoria substantiva, embora na medição 7 a velocidade máxima do ar na região inferior da sala tenha diminuído para valores próximos dos resultados experimentais, tal como se observa na Figura 25, muito embora tanto nessa medição, como nas restantes, a velocidade do ar na região superior da sala tenha aumentado consideravelmente. A comparação dos gráficos numérico Vs experimental de todas as medições de ambas as simulações, é possível de ser observada no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice A.5.



—Temperatura    ■ Temperatura Experimental    —Velocidade    ▲ Velocidade Experimental

Figura 25. Comparação do Gráfico Numérico Vs Experimental da Medição 7: Malha Refinações Nível 0 (Esquerda) VS Malha Com Refinação Nível 1 nas Paredes e Teto

Este pormenor deveu-se ao facto de na região superior da sala, principalmente na zona do teto, o escoamento se encontrar essencialmente na zona de transição, e as velocidades nessa região terem sido sobrestimadas. Este fenómeno pode ser observado na imagem esquerda da Figura 22, ao centro, junto ao teto.

#### 4.4.5.3. Simulação de Malha Base 8,5 cm: Refinações Nível 0

Para fazer face ao fenómeno acima referido, na simulação seguinte procurou-se tornar a malha base mais grosseira, alterando-a para 8,5 cm por forma a aproximar o escoamento do regime turbulento na região cimeira da sala, permitindo que as funções de tratamento de parede disponíveis já fossem mais adequadas para o processamento do escoamento desenvolvido nessas regiões. A visualização da malha gerada é possível de ser observada no capítulo dos apêndices, em concreto, apêndice B.

O que se observou nos resultados desta simulação foi que embora na medição 5, visível na Figura 26, o perfil de velocidade era praticamente idêntico ao obtido nos resultados experimentais, todas as outras medições eram muito díspares dos resultados experimentais.

O que se retirou desta simulação foi apenas que na região da medição 5 o escoamento deveria ter um comportamento típico do observado nesta malha, não obstante de as restantes medições estarem pouco correlacionadas com os resultados experimentais, evidenciando o desequilíbrio de forças ainda existente nesta simulação.

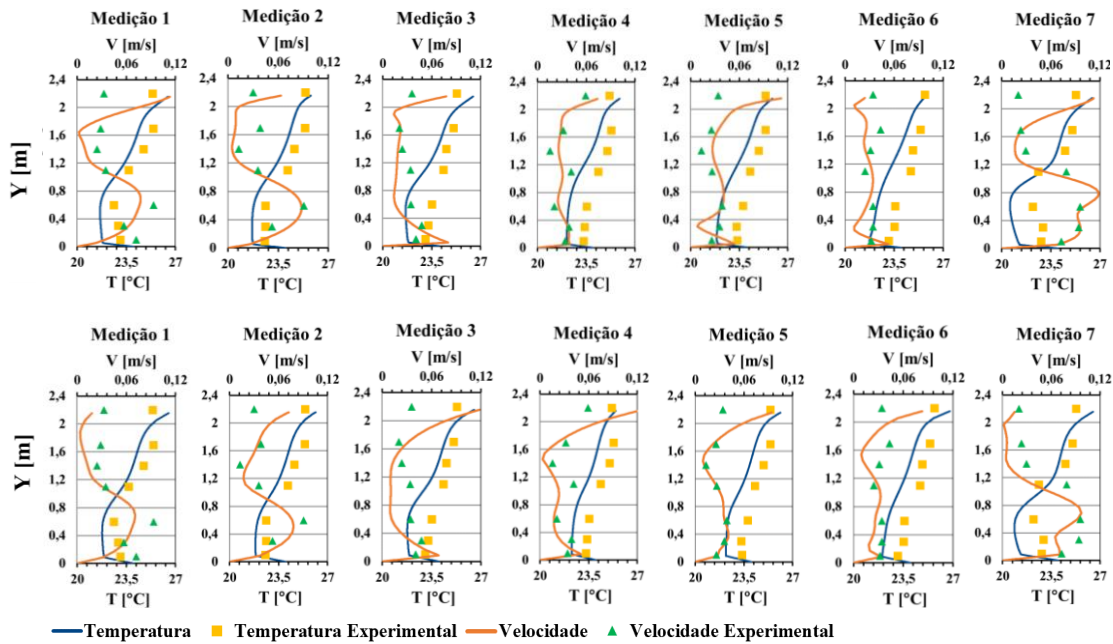


Figura 26. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Malha Sem Refinações: Malha Base 5 cm (Em Cima) Vs Malha Base 8,5 cm (Em Baixo)

A partir deste momento, passou a dar-se mais importância à análise dos perfis de temperatura obtidos nas simulações, uma vez que os perfis de velocidades que se vinham a obter já eram bastante próximos dos resultados experimentais do artigo [8], e eram aproximadamente constantes em todas as simulações, independentemente das várias alterações que foram sendo implementadas.

Como se pode analisar em maior detalhe nas imagens da Figura 27, o perfil de temperatura da medição 1 das 3 primeiras simulações de referência tinha entre 1 a 2°C de diferença em relação ao perfil de temperatura dos resultados experimentais.

A medição 1 é representativa do que se observou nas restantes medições, e sendo a temperatura um parâmetro vital para a correta obtenção do escoamento de ar nas simulações, a validação do modelo CFD não poderia ser efetuada sem uma aproximação dos respetivos perfis.

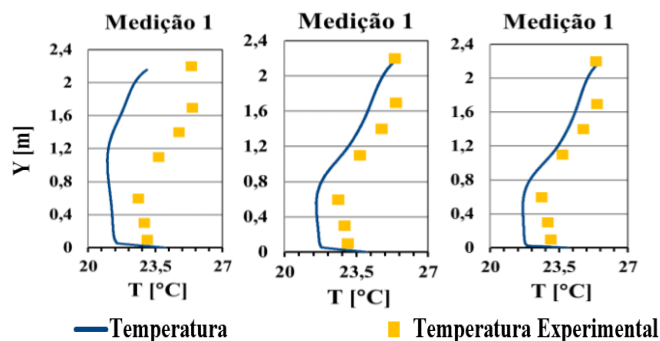


Figura 27. Comparação Gráfico Numérico Vs Experimental Medição 1, Perfis de Temperatura (Esquerda para a Direita): Caso de Referência 1 Vs Caso de Referência 2 Vs Caso de Referência 3

#### 4.4.5.4. 1ª Simulação Com *Layers*: Malhas Base de 5 e 8,5 cm

A primeira estratégia delineada para melhorar os perfis de temperatura no interior da sala, foi a introdução de uma camada adicional de células finas na malha, na região imediatamente adjacente à superfície das paredes, teto, e chão da sala, assim como na região do extrator, difusores de ar, e lâmpadas.

Esta camada de células, também designada de *layer*, tinha como finalidade extrair mais energia/calor destas superfícies para o interior do domínio, já que com a geometria das células das regiões adjacentes às superfícies mencionadas (células prismáticas de 5 cm de lado) a estimação do calor extraído para o domínio poderia não estar a ser realizada de forma precisa, condicionado assim, os resultados das simulações.

O efeito pretendido com a adição de *Layers* pode ser analisado e explicado com referência à imagem da Figura 28. [28]

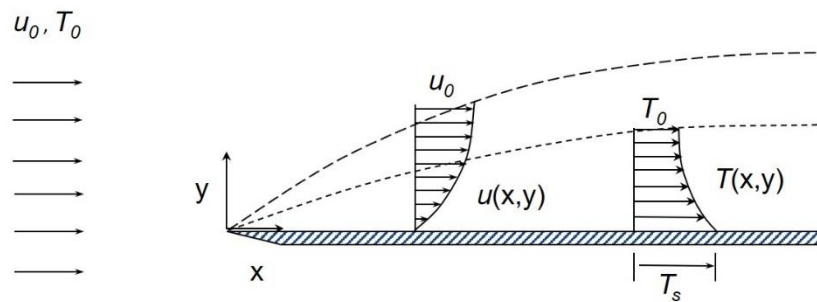


Figura 28. Exemplo de Escoamento de um determinado fluido ao longo de uma placa

O que se observa na Figura 28 é o escoamento de um determinado fluido e os respetivos perfis de velocidade e temperatura ao longo de uma placa com uma temperatura na superfície,  $T_s$ , na direção positiva de  $x$ , com velocidade e temperatura uniformes  $u_0$  e  $T_0$ , respetivamente.

Se se supuser que a placa pode representar uma das paredes da sala, o que se verifica nas simulações é que se a célula imediatamente adjacente a uma destas superfícies for demasiado volumosa, o centro da célula irá estimar uma temperatura média próxima do valor de  $T_0$  para estas regiões, mas que na verdade não representa a realidade do escoamento desenvolvido nessa região específica, cujo valor de temperatura média é bastante superior a  $T_0$ , como se pode observar no perfil de temperaturas da Figura 28.

Como tal, a célula nestas regiões tem de ser o mais fina possível tanto que a temperatura média estimada seja mais fidedigna, e consecutivamente, a transferência de

calor destas regiões para o interior do domínio seja efetuada de forma mais eficiente. O mesmo raciocínio se aplica para o parâmetro da velocidade, só que neste caso, quanto mais próximo o escoamento se desenvolver perto da parede, menor será a sua velocidade.

Ainda assim, esta *layer* não deve ser excessivamente fina, já que se tal se suceder, a informação transmitida de uma célula com esta espessura, para outra com espessura muito superior, será irrelevante a nível macroscópico para o escoamento desenvolvido no domínio, pelo que se encontrou um meio termo para o estabelecimento desta nova camada, tendo as *layers* 1 cm de espessura.

O procedimento para se efetuar a inserção de *layers* é possível de ser observado no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice C.5. A adição de *layers* na malha foi realizada inicialmente nas duas simulações anteriormente referidas, com malhas base de 5 cm e 8,5 cm, ambas com refinação nível 0.

É de referir que para efeitos de facilitação de leitura, a 1ª simulação com *layers* para a malha base de 5 cm passou a ser designada de V0. A geração de malha obtida para ambos os casos pode ser observada nas imagens da Figura 29.

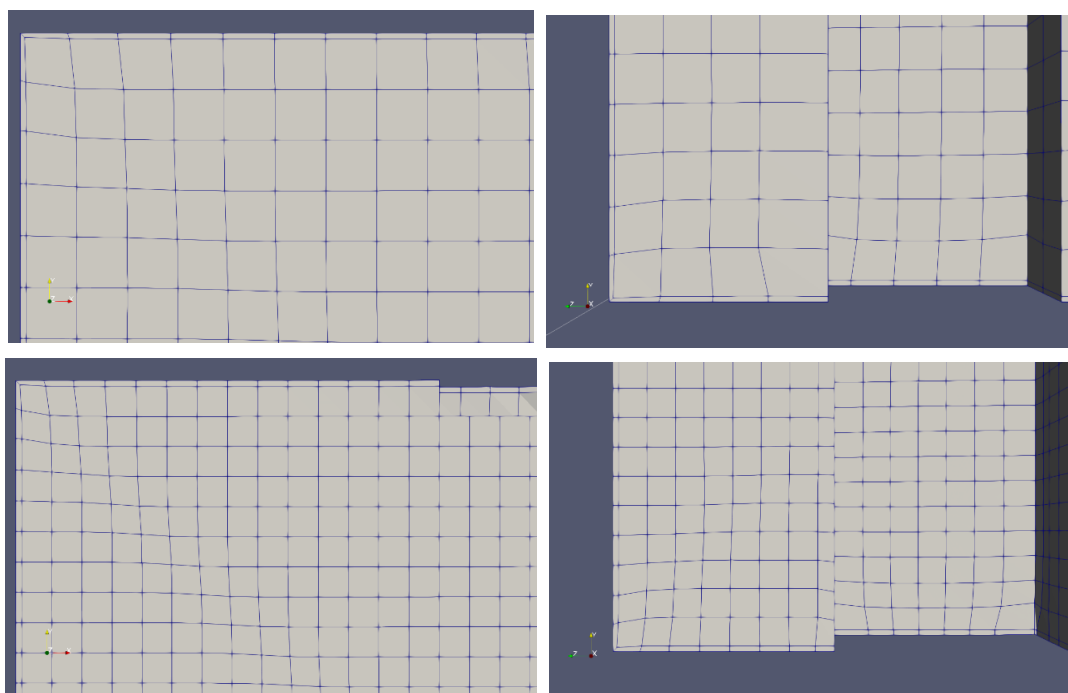


Figura 29. Geração de Malha Com *Layers*: Malha Base 8,5 cm (Imagens Cima) e Malha Base de 5 cm (Imagens de Baixo)

Analisando agora as simulações ao nível da temperatura no interior do domínio, e comparando a simulação V0 com o caso homólogo, mas sem *layers*, através das imagens da Figura 30 verifica-se que a temperatura aumentou no interior da sala na simulação V0,

tal como se pretendia. O fenómeno verificou-se em igual medida para a malha base de 8,5 cm.

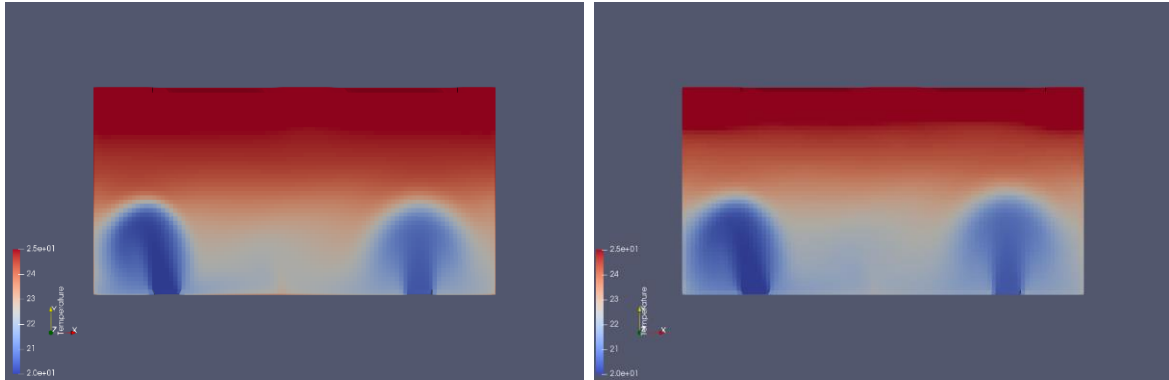


Figura 30. Efeito de Adição de *Layers* na Temperatura do domínio: Simulação V0 (Esquerda) Vs Sem *Layers* (Direita)

Como se pode observar no corte de secção da Figura 30, para o mesmo intervalo de temperaturas, a simulação V0 apresenta uma maior região da sala com temperaturas mais elevadas do intervalo definido, o que indicia que a temperatura no interior do domínio aumentou, algo evidenciado a nível qualitativo, aquando da comparação dos gráficos numérico Vs experimental, ao nível dos perfis de temperatura, representados na Figura 31.

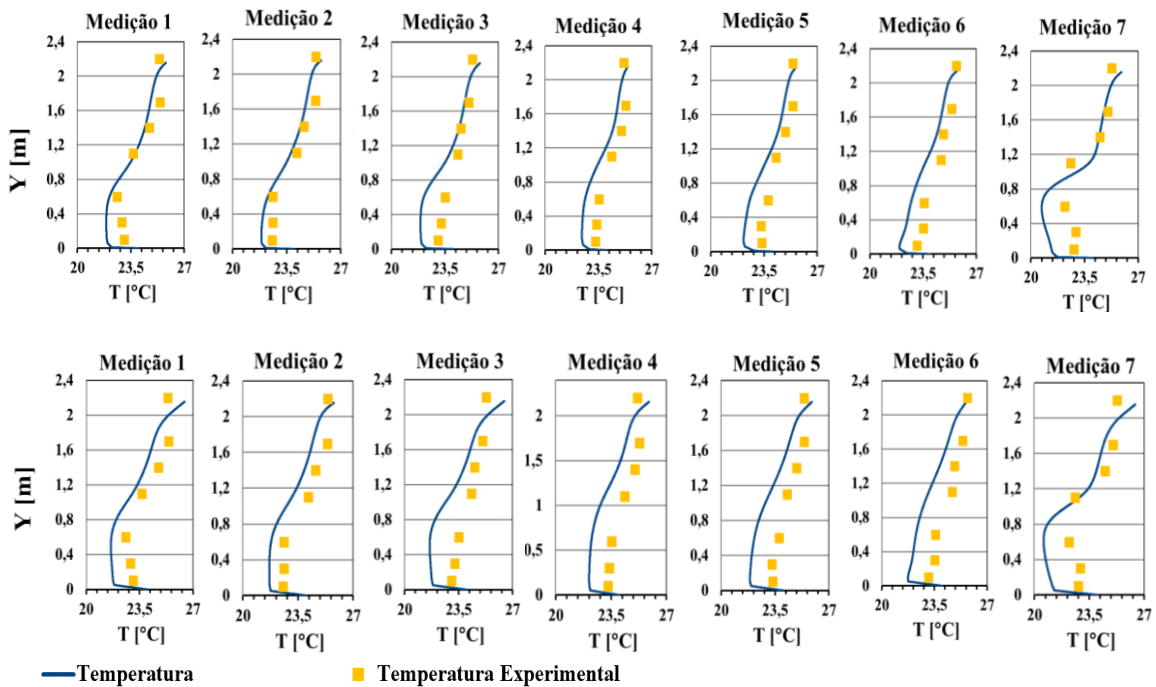


Figura 31. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Perfis de Temperatura, Malha Base 5 cm: Simulação com *Layers* (Em Cima) Vs Sem *Layers* (Em Baixo)

Como foi mencionado, a inserção de *layers* iria provocar uma redução de velocidade no escoamento junto às superfícies das paredes, e como tal, aproximar o escoamento nestas regiões ao regime laminar, implicando um  $y^+$  inferior a 10, algo que se verificou nos resultados das simulações.

Este fenómeno é possível de ser observado através das imagens da Figura 32, cujos ficheiros de onde foram retiradas estas informações correspondem aos relatórios produzidos pelo *Kernel* dos resultados dos diversos parâmetros obtidos nas simulações. As imagens da Figura 32 dizem respeito ao  $y^+$  obtido nas simulações de malha base de 5 cm, com e sem *layers*.

```

patch ID_Block1_Zone2_Surface_1_Region y+ : min = 1.3286515, max = 12.482805, average = 4.2036884
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Region y+ : min = 0.71427104, max = 18.53919, average = 3.5014002
patch ID_Block1_Zone2_Surface_3_Region y+ : min = 0.96100152, max = 7.2391365, average = 3.5164788
patch ID_Block1_Zone2_Surface_4_Region y+ : min = 0.88444993, max = 5.6644334, average = 3.5207876
patch ID_Block1_Zone2_Surface_5_Region y+ : min = 0.84226543, max = 5.6932596, average = 3.2048895
patch ID_Block1_Zone2_Surface_6_Region y+ : min = 0.96983009, max = 5.4685922, average = 3.3728283
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_1 y+ : min = 6.2795808, max = 10.824526, average = 8.182058
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_2 y+ : min = 6.718046, max = 12.885275, average = 8.3462315
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_3 y+ : min = 5.8526328, max = 9.9744527, average = 7.7740753
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_4 y+ : min = 6.661892, max = 10.78001, average = 8.5984953
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_5 y+ : min = 5.1652473, max = 10.508616, average = 7.4739617
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_6 y+ : min = 5.0475267, max = 9.1566532, average = 7.1530106

patch ID_Block1_Zone2_Surface_1_Region y+ : min = 8.0768678, max = 75.439565, average = 24.536372
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Region y+ : min = 8.5271213, max = 95.548119, average = 26.324491
patch ID_Block1_Zone2_Surface_3_Region y+ : min = 3.4283923, max = 52.092165, average = 17.096453
patch ID_Block1_Zone2_Surface_4_Region y+ : min = 3.6140196, max = 20.64108, average = 11.667363
patch ID_Block1_Zone2_Surface_5_Region y+ : min = 3.8192789, max = 34.330535, average = 14.590639
patch ID_Block1_Zone2_Surface_6_Region y+ : min = 3.9171492, max = 26.438519, average = 13.041182
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_1 y+ : min = 7.5466219, max = 15.192847, average = 13.139933
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_2 y+ : min = 9.4338467, max = 16.00781, average = 14.504162
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_3 y+ : min = 5.2382647, max = 11.296326, average = 10.01327
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_4 y+ : min = 9.1800956, max = 13.928661, average = 12.949977
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_5 y+ : min = 8.9137443, max = 17.65921, average = 14.92513
patch ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_6 y+ : min = 5.5672514, max = 14.773509, average = 11.87647

```

Figura 32.  $y^+$  nas superfícies das salas, Malha Base de 5cm: Com *Layers* (Em Cima) Vs Sem *Layers* (Em Baixo)

Como se pode observar em ambas as imagens, as superfícies das paredes estão identificadas como sendo as *surfaces\_[123456]\_Region*, e as superfícies das lâmpadas como *surface\_2\_Flux\_[123456]*. Em ambas as imagens encontram-se os valores mínimo, médio e máximo de  $y^+$  nas regiões mencionadas.

Ao comparar as 2 ilustrações, é possível referir que nas regiões onde foram aplicadas *layers*, o  $y^+$  reduziu consideravelmente em comparação com a simulação sem *layers*, estando o escoamento desenvolvido em redor destas superfícies, próximo do regime laminar.

Não obstante, na simulação V0 (com *layers*), verificou-se que nalgumas regiões (teto e chão – *surfaces 1 e 2*) o escoamento desenvolvido encontrava-se na zona de

transição, pelo que para estes casos não havia grandes alternativas para fazer face a esta situação, já que como se referiu, neste trabalho apenas existam 2 tipos de tratamento de parede disponíveis, onde nenhum conseguia estimar, fidedignamente, os diversos parâmetros da simulação para um escoamento na zona de transição.

#### **4.4.5.5. Simulação Com *Layers* e *Wall Functions* do *OpenFOAM*: Malhas Base de 5 e 8,5 cm**

Ainda assim, tendo-se reduzido o  $y^+$  para próximo da zona laminar em muitas das regiões em redor das superfícies da sala, procurou-se novamente nas simulações seguintes para as malhas base de 5 e 8,5 cm, aplicar as funções de tratamento de parede do *OpenFOAM* para averiguar se, tendo agora melhor distribuição de calor no interior da sala devido a inserção de *layers*, ao aplicar-se o tratamento de parede adequado para as diversas superfícies onde agora, também por efeito de adição de *layers* o escoamento aí desenvolvido era essencialmente laminar, se verificaria alguma melhoria a nível qualitativo na comparação de gráficos numérico Vs experimental.

O que se obteve foi que, novamente a nível qualitativo, não houve alterações significativas na comparação dos gráficos numérico Vs experimental. Esta comparação pode ser observada mais detalhadamente no capítulo dos apêndices, em concreto, apêndice A.6.

#### **4.4.5.6. Simulação V1**

Numa tentativa de aproximar ainda mais os resultados numéricos aos resultados experimentais, inseriu-se também na malha base de 5 cm *layers* nos ocupantes. Para efeitos de facilitação da leitura, esta simulação passou a designar-se V1.

Com esta alteração, era expectável que a transferência de calor dos humanos para o domínio fosse feita de forma mais precisa, induzindo um aquecimento adicional no domínio, o que por sua vez contribuiria para uma melhor mistura de ar na sala, melhorando consecutivamente, os resultados das simulações.

É de referir ainda que a aplicação de *layers* nos ocupantes seria um processo fulcral, uma vez que a condição de fronteira que está a ser definida é uma potência (100 W). Este facto é relevante, porque como se verificou no caso da aplicação de *layers* nas superfícies da parede onde a temperatura era a condição de fronteira definida, os centros das células adjacentes a estas regiões subestimaram o valor médio de temperatura.

Ora, no caso onde a condição de fronteira definida nos ocupantes é a potência, em que a temperatura é um valor obtido por interpolação a partir do valor de potência, ainda se torna mais vital a inserção de *layers* em redor dos ocupantes por forma a obter um valor de temperatura médio mais preciso nestas regiões, tornando a transferência de calor dos humanos para o domínio, mais realista.

É necessário referir também que a partir deste momento se descartaram as simulações com malha base de 8,5 cm. O objetivo principal de utilizar esta malha era diminuir as instabilidades nas simulações ao tornar a malha mais grosseira nas regiões das paredes, fazendo com o escoamento aí desenvolvido fosse necessariamente turbulento, reduzindo com isto, as impercisões advindas da aplicação das funções de tratamento de parede disponíveis para este projeto.

Isto foi algo que se verificou em certa medida ao nível do domínio, mas qualitativamente, o que se observou na comparação dos gráficos numérico Vs experimental entre ambas as simulações, foi que a partir do momento em que se inseriu *layers*, os resultados melhoraram na sua generalidade para a malha base de 5 cm, onde os perfis de velocidade e de temperatura se aproximaram mais dos valores experimentais quando comparado com o que se obteve na simulação com malha base de 8,5 cm.

Como tal, decidiu-se descartar esta malha pois não se estava a obter uma vantagem prática na sua utilização em detrimento de uma mais refinada, que seria mais precisa nos cálculos da simulação nas regiões próximas da maioria das fronteiras, especialmente das geometrias mais pequenas, como as lâmpadas e os ocupantes.

A comparação numérico Vs experimental das simulações com *layers* para as malhas base de 5 e 8,5 cm, é possível de ser observada com maior detalhe no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice A.7, onde, tal como se referiu, existem ligeiras melhorias a nível qualitativo nos resultados obtidos para a simulação de malha base de 5 cm.

Em primeira instância, para se aplicar *layers* nos ocupantes foi necessário reajustar as posições dos mesmos no *DesignBuilder*, já que em certas situações, em locais onde só um vértice da célula deveria ser associado à aresta da geometria dos humanos, verificou-se que 2 dos vértices da célula ficaram associados à mesma aresta da geometria, originando um aglutinamento na célula, algo que é possível verificar nas imagens da Figura 33.

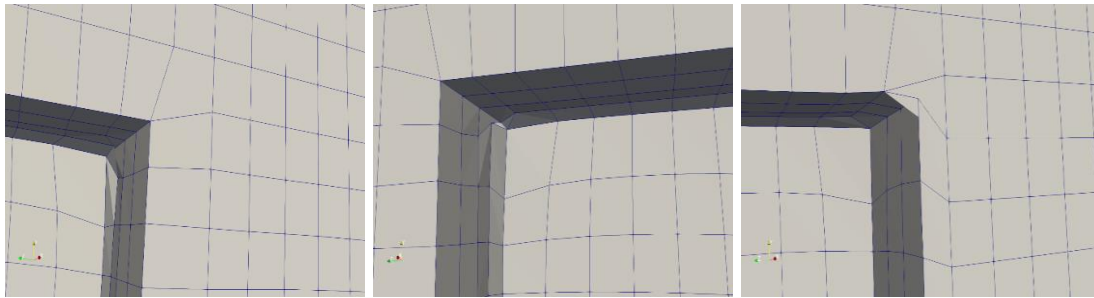


Figura 33. Fenómenos de Aglutinação de Células na Região dos Ocupantes: Malha de 5 cm de Base

Esta junção deve-se essencialmente ao facto de como a célula tem uma face de 5 cm de lado, se a aresta da geometria dos humanos passar numa região intermédia da face, ou seja, senão estiver próxima o suficiente de apenas um dos lados da face, o gerador de malha terá dificuldades em perceber qual dos vértices daquela face deverá ser associado àquela aresta, e como tal, associa ambos os vértices, levando ao aglutinamento das células. Este fenómeno pode ser observado mais detalhadamente através das imagens da Figura 34.

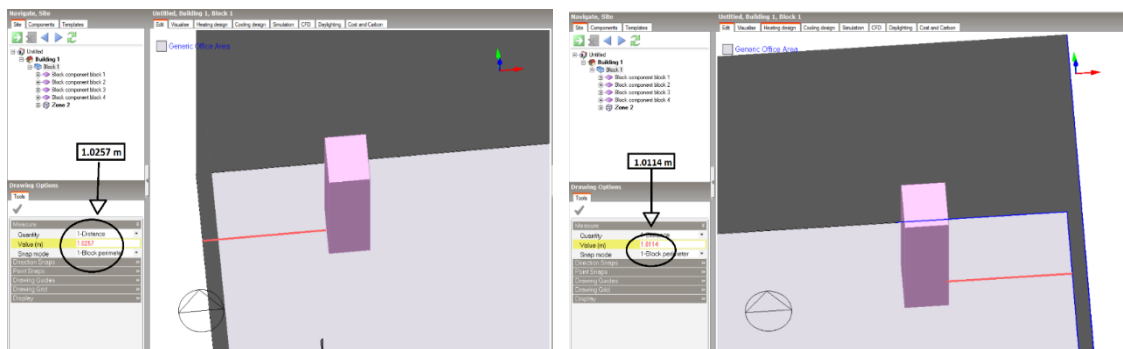


Figura 34. Erros de Posicionamento dos Ocupantes no *DesignBuilder*

Como se pode observar nas imagens que representam a distância à parede da frente de 2 ocupantes distintos, ambas as distâncias não são próximas de um múltiplo de 5 (1,2057 m na imagem da esquerda, e 1,0114 m na imagem da direita), e como tal, o gerador de malha ver-se-á confrontado com os problemas acima referidos.

É de referir que esta situação ocorreu em todos os ocupantes, pelo que se teve de proceder à alteração da posição na sala dos 4 humanos. Esta situação ocorreu também devido à não indicação da localização exata dos humanos na sala por parte dos autores do artigo [8], assim como dos restantes objetos inerentes à sala, pelo que se teve de inferir uma aproximação para estas localizações, através da imagem da Figura 2.

Este foi um problema que só nesta fase foi descortinado o que levou, simultaneamente, ao reposicionamento na sala, das lâmpadas, do extrator e dos difusores de ar. O resultado do reposicionamento dos ocupantes na sala é ilustrado nas imagens da Figura 35.

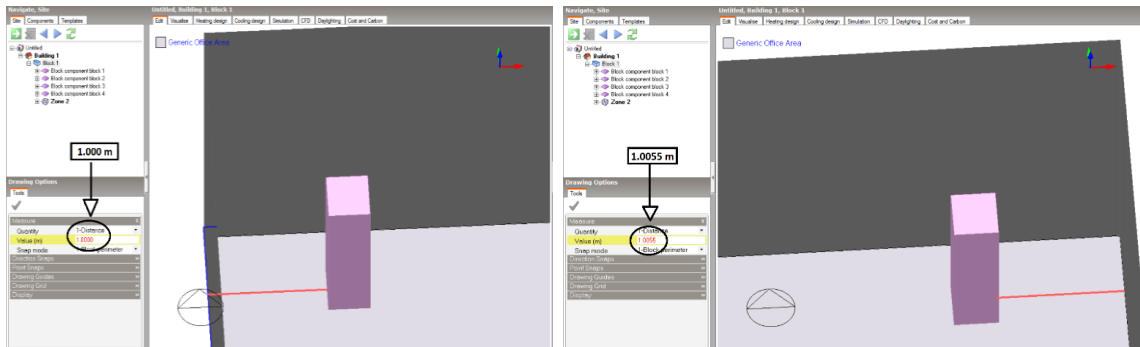


Figura 35. Reposicionamento dos Ocupantes no *DesignBuilder*

Como se pode observar, para os mesmos ocupantes da Figura 35, as distâncias à parede ficaram muito mais próximas de um múltiplo de 5 (1 metro exato na imagem da esquerda, 1,0055 m na imagem da direita), o que permitiu ao gerador de malha definir claramente qual seria o vértice da face da célula associado à aresta de cada um dos ocupantes. Tendo-se efetuado estas alterações, a malha resultante com inserção de *layers* em redor dos humanos, é possível de ser observada nas imagens da Figura 36.

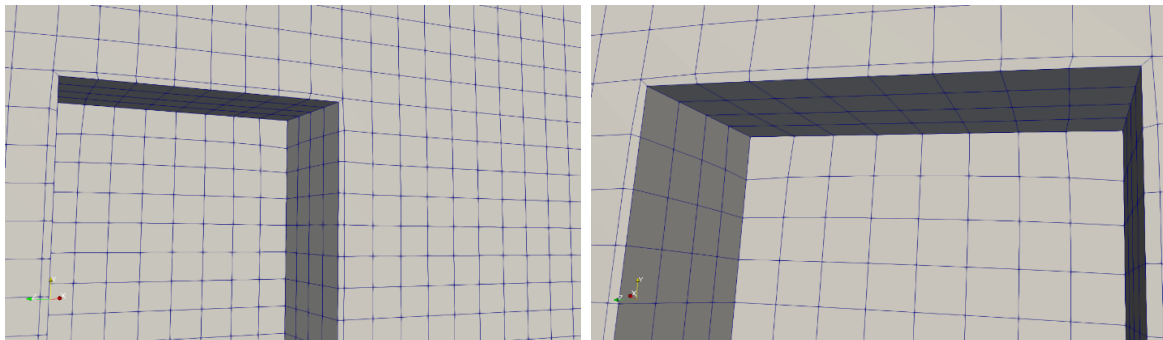


Figura 36. Geração de Malha Região dos Ocupantes após reposicionamento + inserção de *Layers* nos Ocupantes

Como se observa, a malha foi gerada corretamente nas regiões onde anteriormente se observavam aglutinações de células, e as *layers* foram inseridas com sucesso. Como era expectável, a transferência de calor dos ocupantes para o domínio processou-se de forma mais precisa na simulação V1, tal como é possível verificar através das imagens da Figura 37.

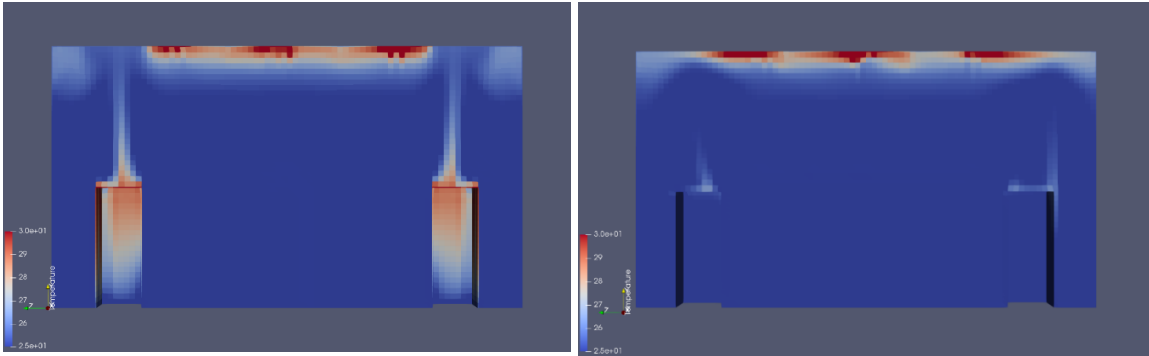


Figura 37. Temperatura nos Ocupantes: V1 (Esquerda) Vs V0 (Direita)

Nas imagens da Figura 37 está representado um corte de secção na região dos ocupantes onde se verifica que para a mesma gama de temperaturas (25 a 30°C), os ocupantes da simulação V1 emitiram mais calor para o interior do domínio, uma vez que a temperatura na região superior dos humanos, que representa a emissão de calor por parte dos mesmos, é superior em comparação com o observado na simulação V0, o que está diretamente relacionado com um efeito de melhor transferência de calor.

O que se verificou na comparação dos resultados numérico Vs experimental, é que houve uma aproximação aos resultados experimentais na simulação V1, quando comparada com a simulação V0, principalmente visível na medição 7, onde a velocidade do escoamento deixou de ser sobrestimada, e na medição 5 e 6, onde os perfis de velocidade se aproximaram dos resultados experimentais.

É de referir que, simultaneamente, se verificou um distanciamento dos perfis de temperatura experimentais na simulação V1 em relação à simulação V0, e tal se deveu ao reajuste de posições que se efetuou no *DesignBuilder* para os difusores de ar, onde após o reposicionamento se verificou que na simulação V1 o jato de ar foi mais difundido para o interior da sala, enquanto que na simulação sem *layers* nos ocupantes (V0) se verificou que o jato sofreu um fenómeno de arrasto, ficando mais estreito.

Este fenómeno pode ser observado nas imagens da Figura 38. Observou-se que na simulação V0 (com *layers* no chão), relativamente à simulação V1 (sem *layers* no chão), o jato vertical perdeu intensidade, tal como se observa na Figura 39.

Ambos os fenômenos referidos poderão ter contribuído para as diferenças esboçadas a nível qualitativo, na comparação dos gráficos numérico Vs experimental, observada na Figura 40.

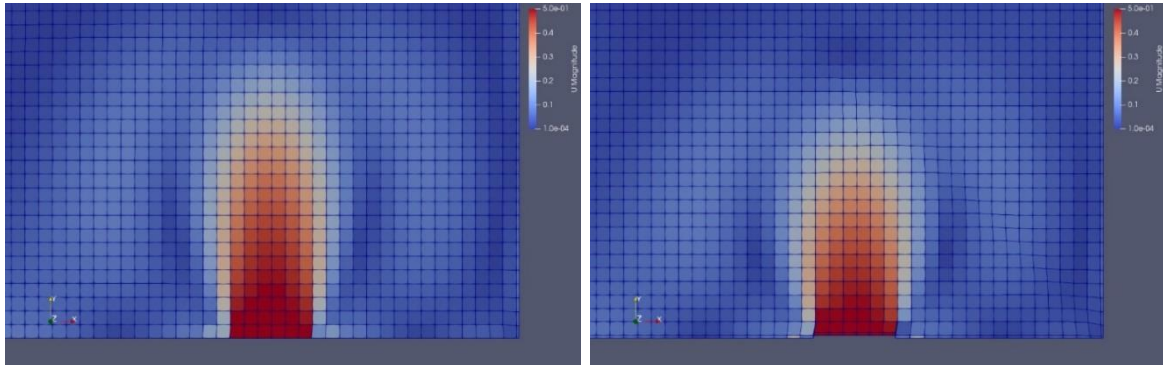


Figura 39. Comparação Difusores Verticais: Simulação V1 (Esquerda) Vs Simulação V0 (Direita)

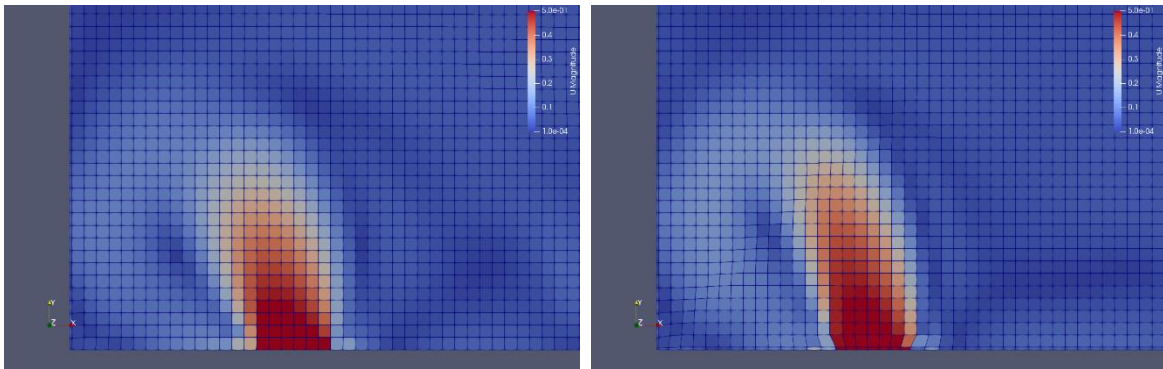


Figura 38. Comparação Difusores Inclinados: Simulação V1 (Esquerda) Vs Simulação V0 (Direita)

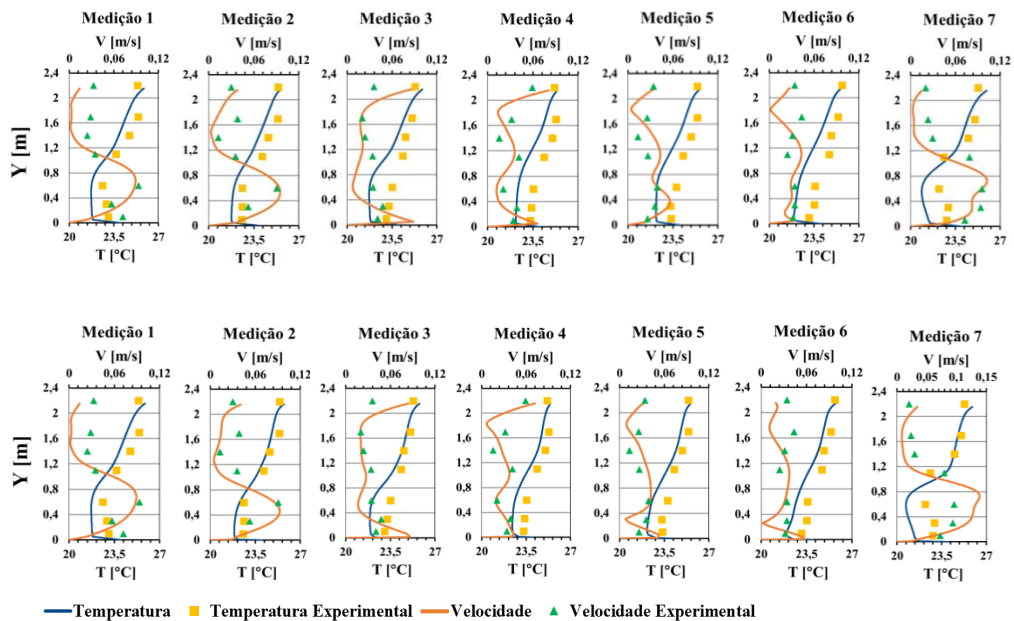


Figura 40. Comparação de Gráficos Numérico Vs Experimental: V1 (Em Cima) Vs V0 (Em Baixo)

Como se pode observar na Figura 40, na medição 7 dos gráficos da simulação V0, à imagem do ocorrido no caso de referência 3, foi necessário aumentar excepcionalmente a escala de velocidades para 0,15 m/s.

#### **4.4.6. Evolução do Estudo a partir dos Caso de Referência 4 e 5**

Da simulação V0 para a simulação V1, que não tinha *layers* no chão, justamente pelo facto de as células adicionadas na região dos difusores serem muito finas (alusão à explicação do fenómeno verificado na Figura 28), um dos jatos perdeu intensidade, pelo que se tentou averiguar na simulação seguinte, o impacto que a inserção de *layers* com espessura mais próxima da espessura da malha base, ou seja *layers* mais grosseiras, teria ao nível dos resultados da simulação.

##### **4.4.6.1. Simulação V2**

Seguindo o *modus operandi* de implementação de *layers* nas simulações, ilustrado no apêndice C.5, o gerador de malha não conseguia adicionar *layers* no chão sem inserir simultaneamente, *layers* nos difusores. Nesta simulação, que se passou a designar V2, adicionou-se *layers* no chão com uma espessura idêntica à das restantes superfícies (0,01m), enquanto nos difusores de ar a espessura definida foi de 0,025 m, em que o objetivo era ter uma camada de células o mais uniforme possível ao longo dos difusores.

Porém, o gerador de malha apenas conseguiu inserir 61,3% do valor da espessura definida ( $\approx 0,0122$  m). Isto se deveu o facto de os parâmetros de calibração pré-definidos por parte do software não permitirem, ao mesmo tempo, a inserção de *layers* com uma espessura superior nos difusores em relação ao resto da superfície, e uma uniformização das camadas de células adicionadas ao longo das superfícies.

Ainda se tentou aumentar, progressivamente, a espessura da *layer* nos difusores, mas em cada tentativa, verificou-se que o gerador ia adicionando cada vez menos percentagem da espessura inicialmente definida, em que a espessura final era praticamente idêntica há que se tinha conseguido na tentativa anterior. Na Tabela 13, apresentam-se as tentativas de geração de malha na região dos difusores, e os valores finais da espessura que se obtiveram.

Tabela 13: Tentativas de Inserção de *Layers* nos Difusores, para simulação V2

Espessura pretendida [m]	Espessura Gerada [m]	Espessura gerada em relação à Espessura pretendida [%]
0,025	0,0122	61,3
0,03	0,0130	55,8
0,05	0,0160	43,4

Com isto, considerou-se os resultados da 1ª tentativa, pelo que nas imagens da Figura 41 verificam-se os resultados ao nível da malha da simulação V2, tendo em conta a inserção de *layers* no chão e nos difusores.

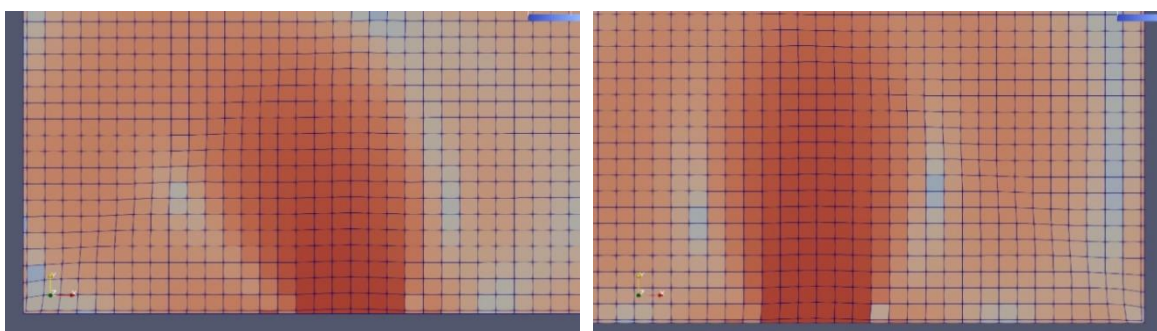


Figura 41. Aplicação de *Layers* no Chão + Difusores: Simulação V2

Como se pode observar, a *layer* adicionada nos difusores ficou com uma espessura ligeiramente superior à restante camada adicionada no chão, e em geral, a camada de células adicionada na região dos difusores apresenta uma uniformização, tal como se pretendia. Esta simulação apresentou melhorias, quando comparada com a simulação sem *layers* no chão (V0), ao nível dos perfis de temperatura, que na generalidade voltaram a aproximar-se dos valores experimentais, assim como ao nível de alguns perfis de velocidade (medições 3 e 4, fundamentalmente). A comparação dos gráficos numérico  $V_s$  experimental das simulações V1 e V2, é possível de ser observada na Figura 42.

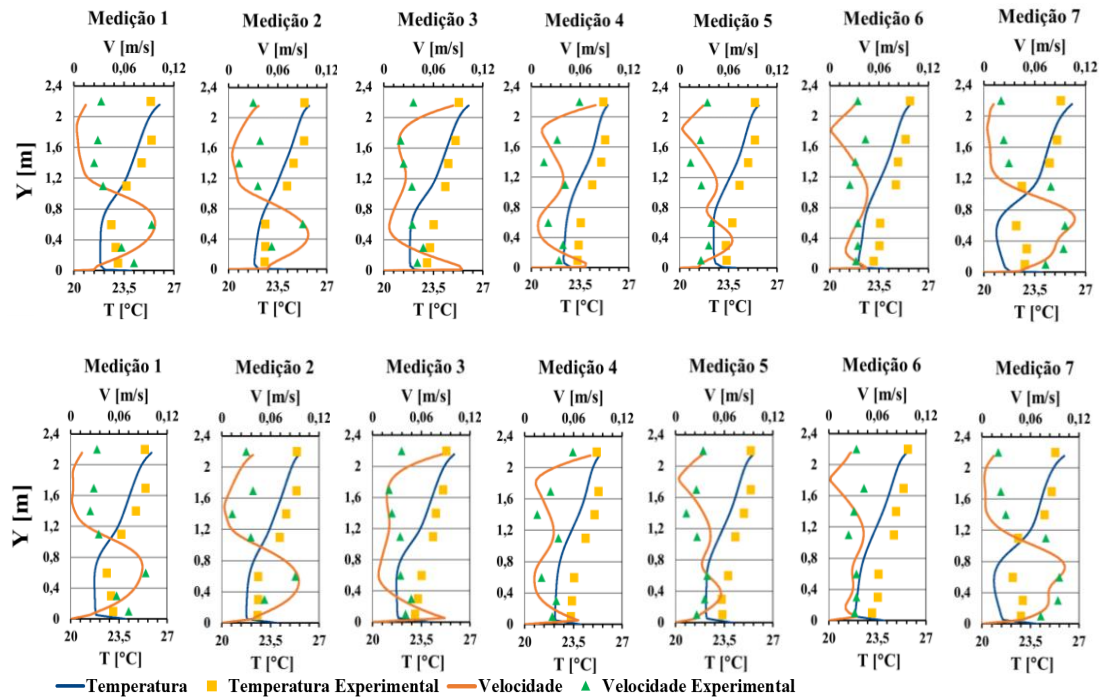


Figura 42. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: V2 (Em Cima) Vs V1 (Em Baixo)

Por estes motivos, a simulação V2 passou a ser o 4<sup>a</sup> caso de referência, uma vez que após todas as alterações verificadas desde a obtenção do 3<sup>o</sup> caso de referência, incluindo as simulações V0 e V1, esta foi a simulação cujos resultados apresentaram melhorias mais significativas a nível qualitativo aquando da comparação dos gráficos numérico Vs experimental, obtidos para a simulação do 3<sup>o</sup> caso de referência.

A comparação dos gráficos numérico Vs experimental das simulações do 3<sup>o</sup> e 4<sup>o</sup> casos de referência, é possível de ser observada na Figura 43. As características da malha do 4<sup>o</sup> caso de referência podem ser analisadas na Tabela 14.

Tabela 14: Características da Malha: Caso de Referência 4

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície	Layers		Nº Células	Nº de Iterações Até Convergir
		Nº Layers Adicionadas	Espessura da Layer [m]		
5	0 em Todas as Superfícies	1	-0,01 em Todas as Superfícies Exceto Difusores - 0,0102 nos Difusores	418192	10000

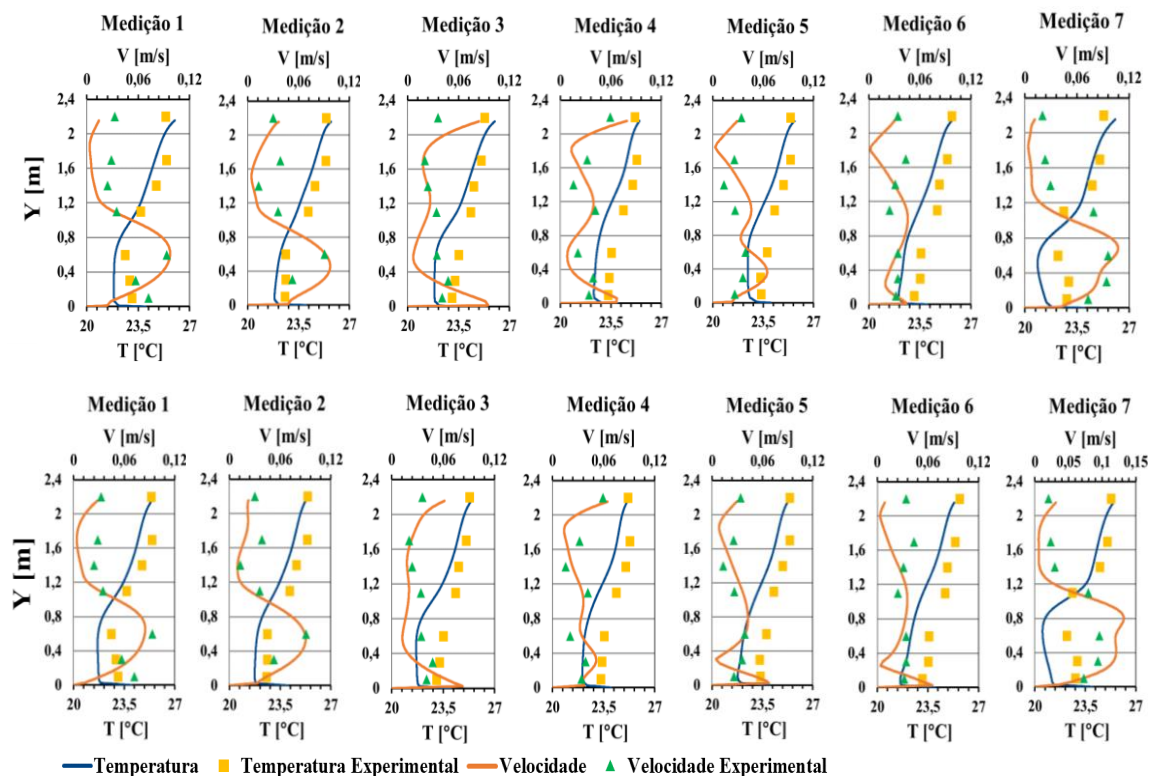


Figura 43. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 4 (Em Cima) Vs Caso de Referência 3 (Em Baixo)

#### 4.4.6.2. Simulação V3, V4, V5 e V6

Na tentativa de extrair ainda mais calor dos ocupantes por forma a melhorar a transferência de calor dos mesmos para o interior do domínio, e assim conseguir melhores resultados a nível qualitativo aquando da comparação de gráficos numérico Vs experimental, foram testadas uma série de simulações recorrendo a diferentes abordagens onde, por um lado, se diminuiu ainda mais a espessura das *layers* junto aos humanos, e por outro, aumentou-se o número de *layers* finas na região dos ocupantes, cujos os efeitos pretendidos em ambos os métodos de simulação, era fazer com que a temperatura média calculada pelo centro das células na região junto aos humanos, fosse ainda mais precisa para se obter o efeito verificado na análise da Figura 28.

Na Tabela 15, encontram-se definidas as características relevantes a assinalar em cada um dos casos em que se utilizou as abordagens anteriormente referidas.

Tabela 15: Simulações de Melhoria de Aplicação de *Layers*

<b>Simulação</b>	<b>Nº de <i>Layers</i> Adicionadas</b>	<b>Espessura das <i>Layers</i> [m]</b>	<b><i>Expansion Ratio</i></b>
V3	1	0.005	1.5
V4	2	0.01	1.01
V5	2	0.01	1.2
V6	3	0.025 (Espessura Total)	1.5

Na Tabela 15 é apresentado o parâmetro de *expansion ratio* que, fundamentalmente nas situações em que se aplica mais do que uma *layer*, faz com que a espessura total das *layers* adicionadas seja a definida na Tabela 15, e ao mesmo tempo permite que desde a *layer* mais próxima aos humanos, até à *layer* mais distante, a espessura vá aumentando sucessivamente, na proporção definida.

Tome-se como exemplo a simulação V6. Seguindo o raciocínio supracitado, tal como se observa na Tabela 15, pretendeu-se adicionar 3 *layers* junto aos humanos, cuja espessura total pretendida era 0,025 m, e a espessura entre as *layers*, no sentido de afastamento dos ocupantes, aumentasse gradualmente na proporção de 1,5.

O objetivo da aplicação deste parâmetro seria, ao aumentar sucessivamente a espessura das *layers* adicionadas, reduzir as instabilidades resultantes do efeito de transferência de informação de uma célula fina para uma célula de malha base com espessura muito superior.

As imagens da Figura 44 representam os resultados obtidos nas 4 simulações (V3,V4,V5 e V6), em comparação com as simulações V1 e V2, ao nível da temperatura junto aos ocupantes por forma a perceber se o efeito pretendido de melhoria de transferência de calor dos humanos para o domínio, tinha sido atingido.

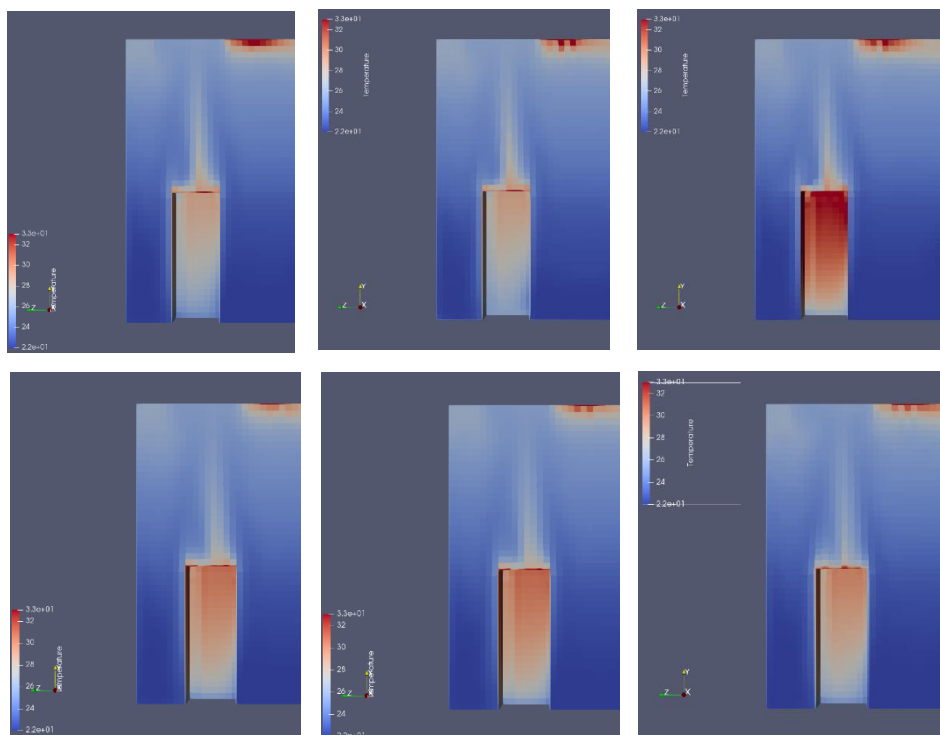


Figura 44. Comparação de V1, V2, V3 (Em cima da Esquerda para a Direita), V4, V5 e V6 (Em baixo, da Esquerda para a Direita)

Nas imagens da Figura 44 estão representados os cortes de secção junto a um dos ocupantes em cada simulação (V1,V2,V3,V4,V5 e V6). O que se verificou foi que o efeito de transferência de calor dos humanos para o interior do domínio, era praticamente idêntico em todas as simulações, ou seja, em V3, V4, V5 e V6, não se conseguiu uma melhoria significativa ao nível da transmissão de calor em relação ao obtido nas simulações transatas, V1 e V2.

A única ressalva a ser feita é que o ocupante da simulação V3 apresentou maior temperatura na sua superfície (centro da célula, não fronteira) em relação aos ocupantes das restantes simulações, pois nesta simulação a *layer* adicionada tinha a menor espessura (ver Tabela 15), e como tal, o cálculo da temperatura média no centro da célula imediatamente adjacente à região superior dos ocupantes, é mais preciso.

No entanto, a extração de calor deste ocupante para a região superior da sala apresentou o mesmo perfil que nas restantes simulações, e como referido, também não se obteve proveito prático nesta simulação. A nível qualitativo, também não se verificou grandes diferenças aquando a comparação dos gráficos numérico Vs experimental, apenas na medição 2 se verificaram ligeiríssimas alterações, mas nada de significativo.

Uma comparação das simulações V3,V4,V5 e V6, com as simulações V1 e V2, dos perfis de velocidade e de temperatura sobrepostos de cada simulação para a medição 2, pode ser observada na Figura 45.

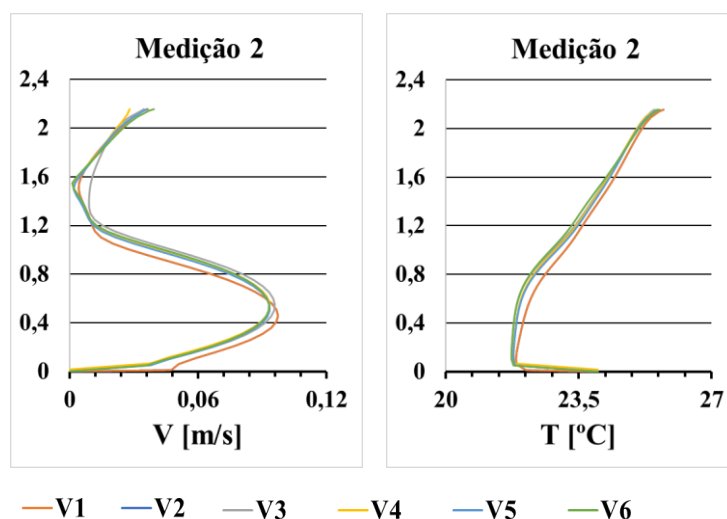


Figura 45. Comparação Numérico Vs Experimental de V1, V2, V3, V4, V5 e V6: Perfis de Velocidade (Esquerda) e Perfis de Temperatura (Direita)

#### 4.4.6.3. Simulação V3.5

É de referir ainda que em nenhum dos estudos representados na Tabela 15 se aplicaram *layers* no chão e nos difusores. O estudo do impacto que a inserção de *layers* nos difusores e no chão teria nos resultados das simulações, prosseguiu através da simulação designada de V3.5.

Nesta simulação, a espessura das *layers* nas superfícies era idêntica à da simulação V3, ou seja, a espessura das *layers* aplicada nas paredes continuava a ser de 0,01 m e nos ocupantes de 0,005 m. Não obstante, neste caso criou-se um efeito semelhante à inserção de *layers* na região do chão, mas em vez se adicionar *layers*, dividiu-se as células de malha base na proporção que se pretendia.

A malha base tinha uma espessura de 0,05 m de lado, e como a espessura pretendida para as *layers* no chão era de 0,01m, dividiu-se as células de malha base na proporção de 0,2. Com isto, conseguiu-se reduzir a espessura das células na região do chão, criando-se um efeito semelhante à inserção de *layers*, obtendo-se ainda, como benefício adicional, a não obrigatoriedade de se inserir *layers* nos difusores. Em suma, na simulação V3.5 conseguiu-se a inserção de *layers* na região do chão sem ter de se adicionar uma camada adicional de células na região dos difusores.

Nas imagens da Figura 46 é possível verificar a comparação das malhas, ao nível do chão e dos difusores, entre o caso V3.5 onde se dividiu as células da região do chão, e o caso V2 onde se aplicaram *layers* tanto no chão como nos difusores, e ainda com o caso V1, onde não se aplicaram *layers* no chão.

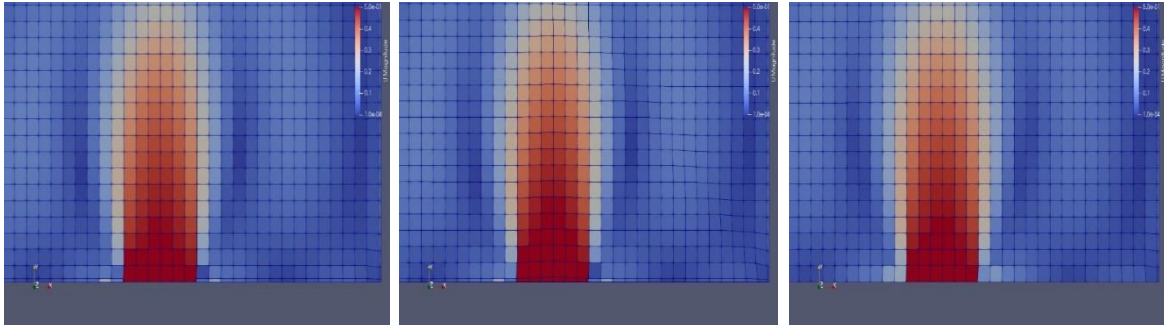


Figura 46. Comparação Malha Junto ao chão e difusores (Da Esquerda Para a Direita): V3.5, V2 e V1

Para se efetuar a divisão de células observada na malha da simulação V3.5, foi necessário recorrer-se ao executável *refineWallLayer* presente no *OpenFOAM*, cujos procedimentos necessários para a sua implementação, encontram-se no capítulo dos apêndices, em concreto, no apêndice C.6.

Verificou-se que os resultados da simulação V3.5 eram muito idênticos aos resultados da simulação V2, ainda que se tenham observado ligeiras aproximações do perfil de velocidades na medição 1, na região entre 1 a 1,5 metros de altura, tal como é possível observar nas imagens da Figura 47.

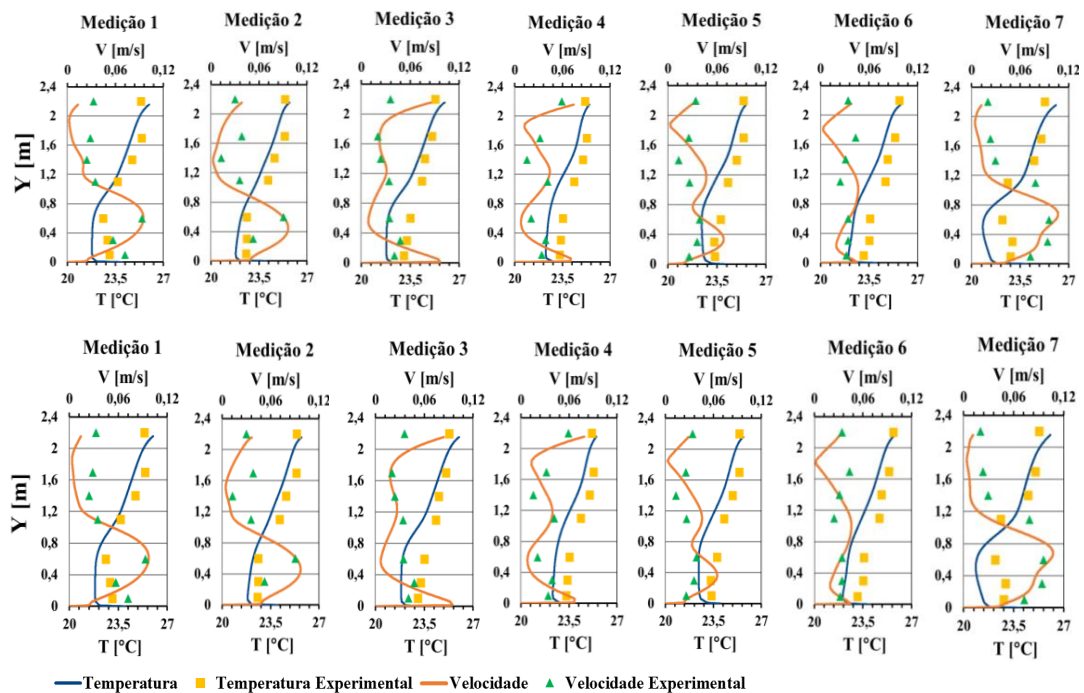


Figura 47. Comparação Gráficos Numérico Vs Experimental: Caso de Referência 5 (Em Cima) Vs Caso de Referência 4 (Em Baixo)

Após estas análises, não se tendo verificado melhorias significativas nas simulações V3, V4, V5 e V6, quando comparadas a V2, e uma vez que estas simulações não apresentavam *layers* no chão, e ainda pelo facto de a simulação V3.5, onde se utilizou uma abordagem diferente para a inserção de *layers* no chão, ter apresentado resultados muito próximos a nível qualitativo, ainda que com ligeiras melhorias, em comparação com V2, assumiu-se que V3.5 passaria a ser a 5ª simulação de referência. As características da malha gerada na simulação V3.5, podem ser observadas na Tabela 16.

Tabela 16: Características da Malha: Caso de Referência 5

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície	Layers		Nº Células	Nº de Iterações Até Convergir
		Nº Layers Adicionadas	Espessura da Layer [m]		
5	0 em Todas as Superfícies	1	- 0,01 nas paredes, incluindo o chão -0,005 nos ocupantes	410352	10000

## 4.5. Conclusões a Retirar do Estudo de Validação

No fim da análise da simulação V3.5 assumiu-se que o 4º e 5º casos de referência (V2 e V3.5) foram as simulações onde se obtiveram resultados mais próximos, a nível qualitativo, em relação às medições experimentais, quer ao nível dos perfis de temperatura, quer ao nível dos perfis de velocidade. Essencialmente, foram 2 os motivos pelo qual não se prosseguiu o estudo de validação, e que se encontram descritos nos seguintes subcapítulos.

### 4.5.1. Aspetos Relacionados com o Artigo Científico

Por um lado, o facto de o artigo [8], tal como sublinhado no início do capítulo, não fazer menção a alguns aspetos considerados fulcrais para a obtenção de resultados fidedignos nas simulações, como as localizações exatas na geometria da sala de todos os elementos, bem como as dimensões exatas dos mesmos (lâmpadas, difusores, extrator, ocupantes), tiveram influência nos estudos efetuados, tal como se observou em 4.4.5.6, onde se teve de efetuar reposicionamentos de elementos na sala, ou logo à partida, em

4.2. e 4.3, onde estão indicadas a geometria e as condições de fronteira dos elementos inerentes à simulação, cujas dimensões e posições foram inferidas somente tendo em conta a Figura 2.

Mais se acrescenta que os locais exatos das medição dos perfis de temperatura e de velocidade experimental no interior da sala, também não foram indicados no artigo [8], pelo que os locais de medição ilustrados na Tabela 5 foram inferidos somente a partir da Figura 1, e tendo em conta o referencial cartesiano indicado na Figura 2.

Para colmatar esta situação, ainda se tentou obter estes dados junto do autor do artigo, tal como se referiu em 4.2.3, mas não se obteve sucesso. A partir deste momento, a análise dos resultados teria de ser forçosamente qualitativa, e não quantitativa, uma vez que não se possuíam todas as informações consideradas necessárias para se obter uma aproximação fidedigna dos resultados experimentais.

Para reforçar esta ideia, reproduziu-se o gráfico de comparação dos resultados numérico Vs experimental ao nível dos perfis de velocidade, obtido para a simulação V3.5, na medição 5, só que desta feita, estariam representados os resultados obtidos para 7 locais de medição, que variavam 5 cm para a esquerda ou para a direita, em relação ao local da medição 5.

Esta situação serviu para demonstrar que a existência da possibilidade de os locais de medição das simulações não estarem posicionados exatamente no local onde foram efetuadas as medições experimentais, poderia levar a um erro na análise dos resultados, e como tal, a validação dos resultados das simulações apenas poderia ser qualitativa, no sentido de aproximar, tanto quanto possível, os perfis de temperatura e de velocidade aos perfis experimentais. Neste caso, na Figura 48 apresenta-se a título de exemplo, os perfis de velocidades obtidos na medição 5 da simulação V3.5 num local posicionado 5 cm à direita e 5 cm à esquerda, em relação ao local de referência da medição 5.

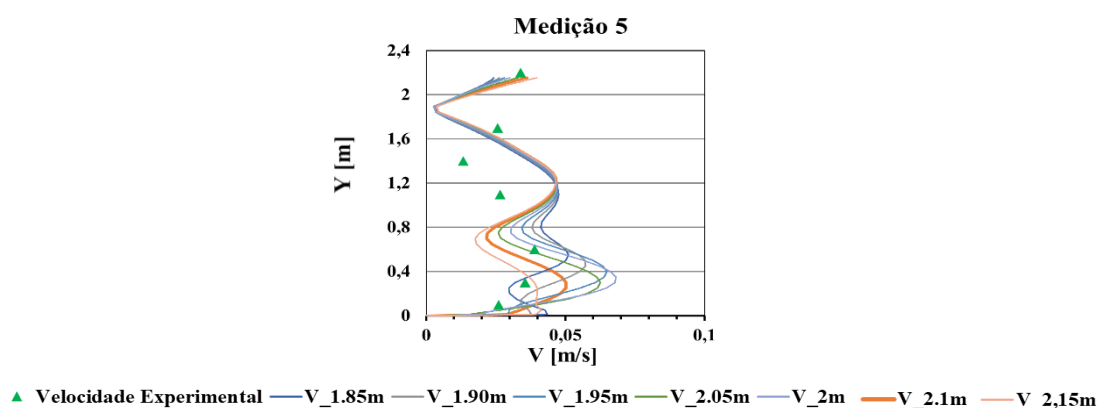


Figura 48. Comparação Gráfico Numérico Vs Experimental, Perfil de Velocidades V3.5, Medição 5: Discrepância de medições  $\pm 5$ cm

## 4.5.2. Fenómenos Que Tornam A Análise Qualitativa

Outro fator que reforça a cessação do estudo de validação com a obtenção do 5º caso de referência, foi o fenômeno observado nas imagens da Figura 49.

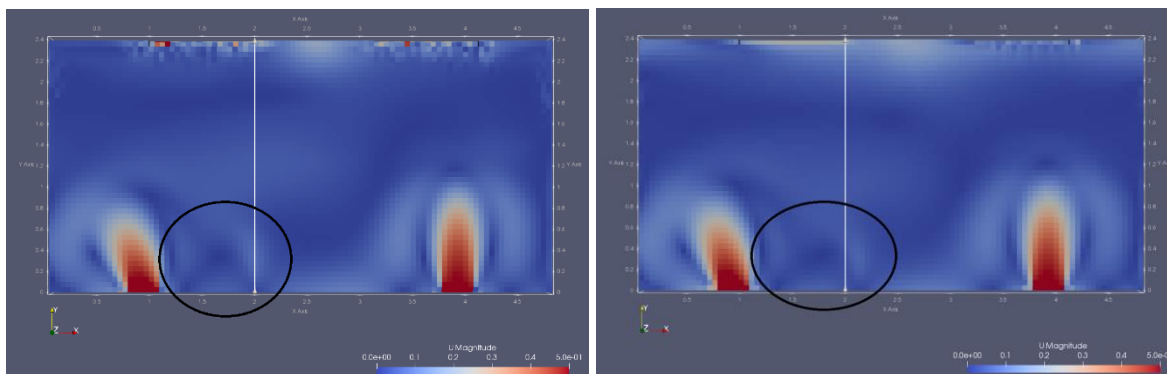


Figura 49. Comparação Fenômeno de Alargamento do centro Vórtice – Medição 5: Simulação V3.5 (Esquerda) Vs Simulação V7 (Direita)

Em cada imagem da Figura 49 pode ser observada a velocidade do escoamento de ar para o mesmo de corte de secção na região dos difusores. A imagem da esquerda diz respeito à simulação V3.5, e a da direita, a uma simulação inicialmente realizada logo após o ajuste de posições dos elementos da sala no *DesignBuilder*, referido em 4.4.5.6, que para efeitos de facilitação de leitura, será designada por V7.

Nesta simulação, para além dos elementos da sala já estarem com o posicionamento efetuado 4.4.5.6, não foi adicionada qualquer *layer*. Nas imagens da Figura 49 verifica-se também a presença de um segmento de reta na vertical, que representa o local da medição 5 ( $[2; 2,1] [m] \{Eixo X; Eixo Y\}$ ).

O que se pretendia com esta comparação era assinalar a presença de um fenómeno de alargamento de vórtice que se identificou da simulação V3.5 para a simulação V7, no local da medição 5, constatado no círculo a preto. Nesta região, é possível verificar que da simulação sem *layers*, para a simulação V3.5, a pluma branca sofreu um fenómeno de arrasto para a direita, por via de um alargamento do vórtice cujo centro se encontra localizado na união do “V” invertido, localizado imediatamente à esquerda da pluma.

O que se verificou a nível qualitativo, foi que o perfil de velocidade na medição 5 da simulação V7 aproximou-se bastante em relação ao perfil de velocidade experimental para a mesma medição, em comparação com o obtido na simulação V3.5, sendo este o

caso onde se assumiu os melhores resultados da validação, a nível qualitativo. Esta comparação pode ser observada na Figura 50.

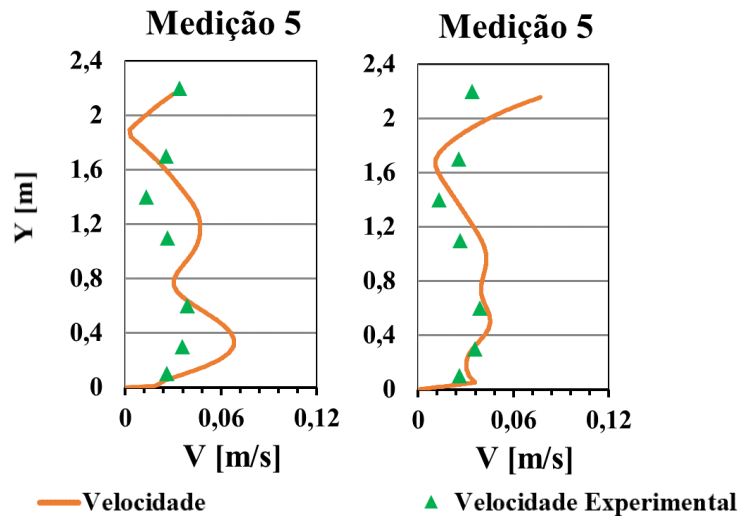


Figura 50. Fenómeno de Alargamento de Vórtice: Simulação V3.5 (Esquerda) Vs Simulação V7 (Direita)

Este fenómeno é relevante, porque permite constatar que sem o conhecimento dos locais exatos dos elementos na sala, assim como do local exato onde se efetuaram as medições dos perfis de temperatura e de velocidade experimentais, em certas simulações, alguns efeitos fulcrais, tais como o fenómeno de alargamento de vórtices identificado na Figura 49, que permitem validar os resultados numéricos, podem ou não ser detetados, e face a esta ambiguidade, deixa de ser possível de identificar, com certeza, o que é necessário modificar nas simulações para que se consiga uma clara aproximação aos resultados experimentais.

Esta foi mais uma observação que permitiu concluir que nas simulações V2 e V3.5, se atingiu uma boa aproximação, a nível qualitativo, aos resultados experimentais do artigo [8], e que para melhorar ainda mais os resultados numéricos era necessário incorrer na análise de pormenores semelhantes ao fenómeno de alargamento de vórtices assinalado na Figura 49, mas sem o conhecimento exato de todos os detalhes acima referidos, tal não era possível.

É de ressaltar ainda que o estudo de validação não foi realizado totalmente de um modo academicamente convencional, porque durante bastante tempo as simulações foram efetuadas com um modelo de turbulência incongruente, tal como referido em 4.4.1, e por essa razão, em vez de se terem realizado estudos de malha convencionais, onde se iriam introduzindo cada vez mais células na malha, quer por redução da espessura da malha base, quer por refinações de determinadas superfícies, e cujas simulações demorariam

mais tempo, os estudos efetuados tiveram o foco naquilo que seria primordial nas simulações, ou seja, as trocas de calor na sala, daí se ter realizado simulações onde, a partir da simulação transata, se diminuiu a refinação da malha, tornando as células mais grosseiras, justamente porque se verificou que células mais finas introduziam instabilidades na simulação. (por exemplo: simulações do subcapítulo 4.4.5).

### **4.5.3. Noções a reter para a realização dos casos de estudo do capítulo 4**

Como se referiu, as simulações V3.5 e V2 foram consideradas as simulações mais próximas dos resultados experimentais, e por conseguinte, deveriam ser as simulações a ter em conta para se reproduzirem os casos de estudo, mais complexos, observados no capítulo 5. No entanto, como se poderá constatar adiante, a complexidade das geometrias dos estudos realizados no capítulo 5 aumentou em relação ao caso de estudo de validação, e como tal, colocou-se a hipótese do surgimento do problema de geração de malha com a inserção de layers nos ocupantes, tal como se observou em 4.4.5.6.

Para fazer face a este eventual problema, e tendo em conta o fenómeno observado no subcapítulo 4.4.5.6, decidiu-se não adicionar *layers* nos ocupantes nos casos de estudo do capítulo 5, porque tal como se verificou, a diferença das simulações entre ter, ou não *layers*, poderia passar, frequentemente, por pequenos pormenores difíceis de prever, e de complexa resolução, mas a nível qualitativo, não haveria grandes diferenças entre um ou outro caso.

Em alternativa à inserção de *layers*, acabou por se refinar a malha a nível 1 na região dos ocupantes para tentar colmatar a perda de precisão da transferência de calor destes elementos para o domínio, algo que, como se poderá ver adiante no capítulo 5, não trouxe grandes diferenças a nível qualitativo quando comparado com os resultados do caso de referência 5.

## 5. Casos de Estudo

Neste capítulo pretende-se demonstrar as etapas conduzidas para se simular o escoamento de partículas em ambientes com diversas configurações. Tendo o escoamento do ar validado, era agora possível simular os casos de escoamento de ar pretendidos, onde se teve em conta o requerido para o projeto PAFSE ao nível, tanto dos regimes de respiração a simular, como dos ambientes onde estes regimes seriam simulados.

Em primeira instância, e tendo em conta a metodologia adotada no capítulo 4, para se simular os casos de escoamento de partículas era necessário implementar na pasta *workflow*, as pastas *Sim.particleFoam*, onde, fundamentalmente se encontravam assinaladas as *settings* das simulações, tal como se observa no subcapítulo 5.3, e as características associadas às partículas respiratórias a simular para cada caso de estudo, ilustradas nos subcapítulos 5.3.1 a 5.3.4.

De seguida, após a construção e implementação destas pastas, era possível simular os casos de escoamento de partículas, para cada ambiente requerido no âmbito do projeto PAFSE, retirando-se as respetivas conclusões acerca do processo de escoamento de partículas.

### 5.1. Modelo Base para criação das pastas *Sim.particleFoam*

Tal como mencionado na introdução do capítulo, para se simular os casos de escoamento de partículas foi primeiro necessário implementar as pastas *Sim.particleFoam* na pasta *workflow* oriunda da simulação de escoamento de ar. O processo de implementação de todas as características associadas às pastas *Sim.particleFoam* foi realizado de forma iterativa, tal como se observa de 5.3.1 a 5.3.4.

Uma vez que os ambientes a serem estudados no capítulo 5 (ver subcapítulo 5.4, adiante), possuíam maior complexidade ao nível das geometrias presentes na sala, quando comparados com o modelo base de validação do capítulo 4, e conseqüentemente, envolviam maiores custos computacionais em termos de geração da malha e de tempo de simulação, utilizou-se um modelo base semelhante aos casos de referência 4 e 5 para se construir as pastas *Sim.particleFoam*, de forma mais célere.

A razão pelo qual este modelo base não foi o modelo dos casos de referência 4 e 5, onde se obteve melhor correlação entre os resultados numéricos e experimentais, prende-se com 2 fatores:

- Tal como referido no capítulo 4 em 4.5.3, devido ao facto de se terem verificado vários problemas aquando da inserção de *layers* nos ocupantes, nos casos de validação que por sua vez eram menos complexos a nível geométrico em comparação com os ambientes a simular no capítulo 4, e como tal, previa-se uma grande dificuldade em inserir *layers* nestas geometrias.
- O outro grande motivo, e que reforça o primeiro argumento assinalado, está relacionado com o facto de que, tal como se observou no capítulo 4, a nível qualitativo, os resultados das simulações com e sem *layers* (ex: simulações V0 e V1), não terem apresentado diferenças substantivas. Para efeitos de facilitação de leitura, o modelo base utilizado para construção e implementação das pastas *Sim.particleFoam*, passou a designar-se modelo 0. As características da malha do modelo 0, são possíveis de serem observadas na Tabela 17.

Tabela 17: Características da Malha: Modelo 0

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Layers	Nº Células	Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1			
5	Todas as Superfícies Exceto Ocupantes	Ocupantes	Nenhuma Superfície	402962	10000

No modelo 0, a malha gerada na região dos humanos possuía refinação nível 1, uma vez que dada a complexidade das geometrias a simular nos casos de estudo do capítulo 5, era expectável que a geração de malha para estes casos fosse efetuada de forma deficiente, se as geometrias fossem todas de nível 0, algo concluído em estudos de malha realizados anteriormente pela *FS Dynamics Portugal blueCAPE Lda.*, e como tal, sendo os modelos do capítulo 5 provenientes do modelo 0, introduziu-se, *à priori*, refinações de nível 1 nos ocupantes, retirando-se as *layers* dos mesmos.

Para validar os resultados obtidos em relação à simulação de escoamento de ar no modelo 0, realizou-se uma comparação semelhante à observada ao longo dos estudos do capítulo da validação entre os resultados numéricos da simulação do modelo 0, e os

resultados experimentais do artigo [8], e observou-se ainda as diferenças obtidas nos resultados desta simulação com os obtidos no caso de referência 5 (subcapítulo 4.4.6). Os gráficos respectivos às comparações traçadas podem ser observados na Figura 51.

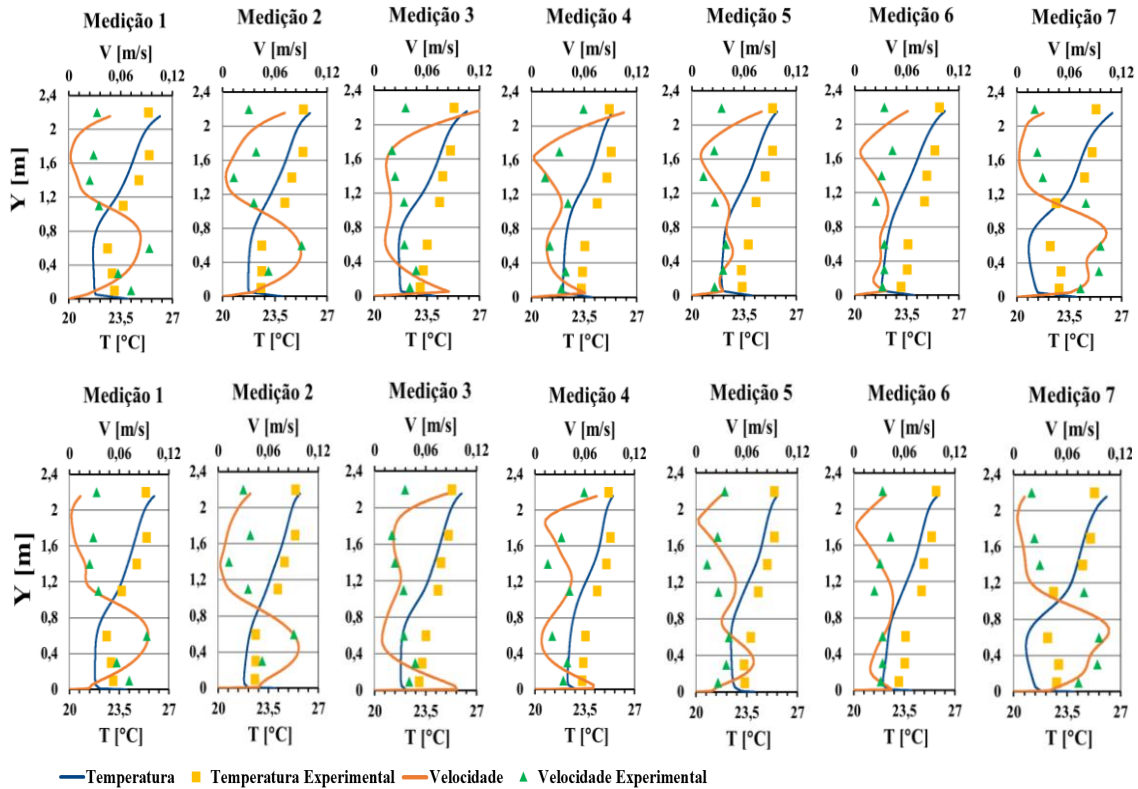


Figura 51. Comparação de Gráficos Numérico Vs Experimental: Modelo 0 (Em Cima) Vs Caso de Referência 5 (Em Baixo)

Como se verifica, apesar de se notar uma ligeira melhoria dos perfis de temperatura no caso de referência 5, a nível qualitativo não se observou diferenças significativas entre as 2 simulações, o que permitiu concluir que seria possível utilizar o modelo 0 para se construir a pasta *Sim.particleFoam* para se simular os casos de escoamento de partículas.

## 5.2. 1º Modelo para Estudo do Escoamento de Partículas

Após a completa construção e implementação das pastas *Sim.particleFoam* foi necessário simular e testar o escoamento de partículas num ambiente com geometrias mais complexas, em comparação com as configurações do modelo 0, herdadas do modelo recriado do artigo [8].

Estas geometrias mais complexas foram obtidas por *default* através do software *DesignBuilder*, e constituíam recriações mais aproximadas da realidade, relativamente à composição de espaços onde se encontram, comumente, janelas, cadeiras, mesas, etc, que eram elementos que não estavam incluídos no modelo de validação.

No que diz respeito aos ocupantes, também estes foram recriados com vista a se obter uma geometria mais próxima da realidade, em comparação com a geometria dos ocupantes definida para o modelo de validação (ocupantes paralelepípedicos).

Adicionalmente, por *default*, estes ocupantes mais próximos da realidade podiam ser desenhados em pé ou sentados, e acompanhados dos elementos já referidos. Neste 1º modelo mais complexo foram incluídas 1 mesa, 1 monitor, 1 teclado e 1 torre, recriando um típico ambiente de escritório.

Na Figura 52, é possível observar a configuração deste modelo, assim como os ocupantes obtidos por *default* do software *DesignBuilder*. Para efeitos de facilitação de leitura, este modelo passou a designar-se modelo 1,

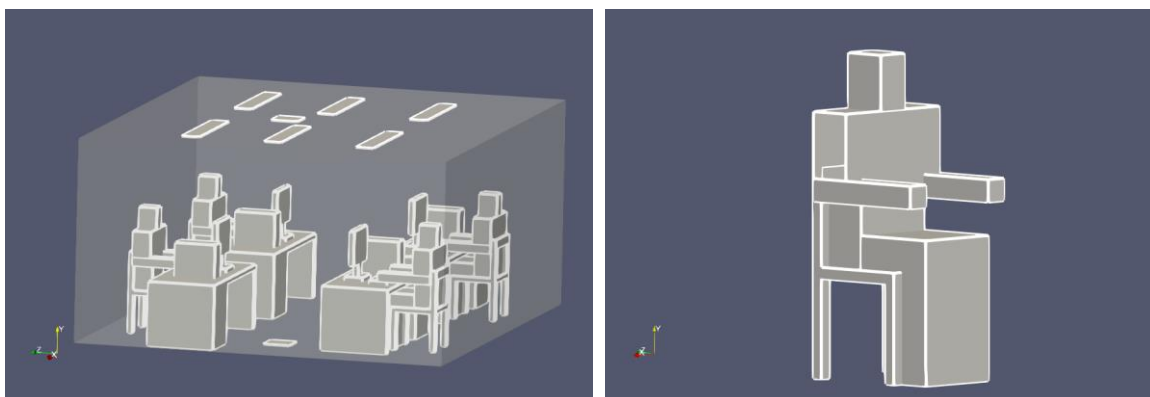


Figura 52. Configurações do Modelo 1 (Esquerda) e Ocupantes Mais Complexos (Direita)

Como se pode observar, no modelo 1 manteve-se a estrutura do modelo recriado do artigo [8], isto é, continuou-se a observar 6 lâmpadas no teto, o mesmo sistema de ventilação (UFAD) e 4 ocupantes na sala, não obstante de as geometrias dos mesmos, assim como dos elementos inerentes, terem aumentado de complexidade.

Foi a partir destas geometrias mais complexas que posteriormente se criaram os ambientes observados em 5.4. É de referir ainda que neste modelo e nos restantes abordados em 5.4, uma vez que as geometrias dos ocupantes foram alteradas em relação ao modelo 0, houve a necessidade de reajustar a posição de emissão das partículas na sala em relação aos ocupantes, em que as coordenadas desta localização são referidas em 5.3.

### 5.3. *Settings* Casos de Estudo de Escoamento de Partículas

Neste subcapítulo encontram-se ilustrados os dados que foram introduzidos na pasta *Sim.10.particleFoam*, relativos às características da partícula respiratória a simular em cada caso de escoamento de partículas, assim como do tempo de cada simulação.

Neste trabalho, tal como foi referido na introdução do capítulo, para cada modelo foram simulados 4 regimes de respiração diferentes: respiração em situação de repouso, e emissão de partículas em situações de tosse, de espirro, e em que o emissor está a falar, onde apenas um dos ocupantes emitia partículas.

Duas razões explicam o porquê de se ter simulado situações em que apenas um dos humanos emitia partículas. Por um lado, devido ao objetivo final da ferramenta, que era perceber o nível de infecciosidade que a emissão de partículas por parte de um humano teria em relação aos restantes humanos no ambiente simulado, e por outro, os custos computacionais envolvidos na simulação de apenas um humano emissor, que eram bastante mais reduzidos em comparação com uma situação em que os humanos estariam a emitir partículas em simultâneo.

O tempo de cada simulação foi definido como sendo de 60 minutos, onde, para efeitos do projeto PAFSE, era pretendido que se observasse o 1º minuto de simulação, mais detalhadamente em vídeo, ou seja, gravando em disco os fenómenos da simulação a cada segundo, enquanto os fenómenos da restante simulação seriam gravados de minuto a minuto.

Tendo em conta o acima referido, foi necessário a utilização de uma segunda pasta, *Sim.11.particleFoam*, com as mesmas características que as presentes na pasta *Sim.10.particleFoam*, mas com as *settings* desta pasta a serem definidas com vista a se obter um maior detalhe na observação do 1º minuto da simulação.

A razão que levou à criação desta pasta pretende-se essencialmente com um parâmetro necessário a definir para se estabelecer o tempo da simulação, designado de *writeInterval*. Inicialmente, tentou-se manipular este parâmetro na pasta *Sim.10.particleFoam* através da implementação de algumas *function objects*, mas tal não foi possível, e, por conseguinte, criou-se a pasta *Sim.11.particleFoam* que permitiu resolver o problema acima descrito.

Dentro de cada pasta *Sim.particleFoam*, para se definir o tempo de simulação era necessário aceder a um ficheiro designado *controlDict*, cujos procedimentos para se efetuar esta etapa encontram-se ilustrados no capítulo dos apêndices, em concreto,

apêndice C.7. Para se introduzir as características relativas à partícula respiratória a ser simulada em cada regime de respiração era necessário aceder ao ficheiro *KinematicCloudProperties*. As etapas necessárias a percorrer para se aceder a este ficheiro, a partir da pasta *workflow*, eram as seguintes: *workflow* → *Sim.10.particleFoam* → *constant* → *kinematicCloudProperties* → Implementação das características necessárias.

Inicialmente, recorreu-se à pasta de tutoriais do *OpenFOAM*, e utilizou-se um tutorial designado de *MixerVessel2D*, desenvolvido pelo respetivo software para exemplificar a implementação e simulação de escoamento de partículas.

Essa pasta continha no ficheiro *kinematicCloudProperties*, as características da partícula a simular nesse tutorial, pelo que para se inserir as características necessárias para se simular cada regime de respiração, foi necessário alterar o conteúdo deste ficheiro. Na Tabela 18, encontram-se os parâmetros que foram necessários inserir para cada regime de respiração, no ficheiro *kinematicCloudProperties*.

Tabela 18: Características a Implementar no ficheiro *kinematicCloudProperties*

<b>Parâmetros a definir</b>	<b>Localização da Implementação dos parâmetros no ficheiro</b>
Forças Externas a Aplicar na partícula	<i>subModels</i> → <i>particleForces</i>
Densidade da Partícula	<i>constantProperties</i> → <i>rho</i>
Tipo de Injeção das partículas	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>type</i>
Duração do Fenómeno*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>duration</i>
Número de Partículas Emitidas por segundo*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>parcelsPerSecond</i> and <i>nParticle</i>
Dimensão das Partículas*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>sizeDistribution</i> → <i>uniformDistribution</i>
Posição do Cone de Injeção*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>Geometry</i> → <i>positions</i> and <i>direction</i>
Ângulo de Abertura do Cone de Injeção*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>Geometry</i> → <i>thetaOuter</i>
Velocidade de Injeção*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>Velocity</i> → <i>Umag</i>
Diâmetro da Boca do Emissor*	<i>injectionModels</i> → <i>model1</i> → <i>Geometry</i> → <i>dOuter</i>
Interação das Partículas Com as Superfícies do Ambiente Simulado	<i>patchInteractionModel</i> → <i>localInteractionCoeffs</i> → <i>patches</i>

\* Tal como se irá observar nos subcapítulos adiante, foram utilizados vários intervalos de dimensão de partículas para simular os regimes de respiração. Por conseguinte, foi necessário criar vários modelos de injeção semelhantes ao *model1*, tantos quanto os intervalos de dimensão de partículas, e como tal, as várias

características definidas para o *modell*, servem de exemplo ao que se teve definir nos restantes *models* implementados.

As forças externas a aplicar na partícula foram as mesmas para cada regime de respiração, e decorrem da pesquisa bibliográfica que se observa no capítulo 1. Nesse sentido, as forças externas a aplicar em cada regime de respiração foram as forças de resistência do ar (*Drag Force*) e a força da gravidade (*Gravity*).

Outra característica semelhante aos 4 regimes de respiração, foi a densidade da partícula respiratória, onde em [29] é referido que a densidade de uma partícula respiratória é cerca de 1000 vezes superior à densidade do ar a 20°C, em que  $\rho_{ar@20^{\circ}C} \approx 1,205 \text{ kg/m}^3$ , logo,  $\rho_{particula\ respiratoria} \approx 1200 \text{ kg/m}^3$ .

O diâmetro da boca do emissor de partículas foi outra característica necessária a implementar nas simulações, e foi encontrado em [30], que o diâmetro médio da boca de um ser humano é cerca de 0,03 m. O tipo de injeção foi determinado através da base de dados do *OpenFOAM*, onde existiam vários tipos de injetores possíveis para se simular a emissão das partículas [31], mas apenas a opção *coneInjection*, [32] possuía todos os dados necessários para se efetuar corretamente as simulações pretendidas.

Ao nível da interação das partículas com as superfícies da sala, era necessário definir o que aconteceria a cada partícula ao colidir com uma determinada superfície da sala. Mais uma vez se recorreu à base de dados do *OpenFOAM* para retirar estas características, a partir de 2 fontes:

- A documentação do código fonte obtida em [33].
- A pasta de tutoriais do OpenFOAM.

Nestas fontes existiam 5 opções possíveis de interação das partículas com as superfícies do ambiente a simular [33], não obstante, neste trabalho só se utilizaram 2 opções devido ao facto de estas serem as únicas opções que se enquadravam no projeto, tendo em conta os dados disponíveis.

As duas configurações de interação implementadas foram, por um lado, a agregação das partículas ao colidirem com uma superfície, e por outro, a remoção das mesmas do ambiente a simular, através da superfície com que colidiram.

Como tal, definiu-se que as partículas que colidissem com superfícies que não pertencessem exclusivamente ao sistema de extração de ar, fosse este mecânico (neste caso, os elementos seriam o extrator e o difusor), ou natural (neste caso, seriam as aberturas nas janelas e/ou das portas), as partículas ficariam agregadas a essas superfícies.

Caso as partículas colidissem com qualquer superfície do sistema de extração de ar presente nos diversos ambientes a simular, seriam tidas como removidas desse mesmo ambiente.

Em relação à posição do cone de injeção na sala, ou seja, à localização da emissão das partículas, primeiro, foi necessário perceber a posição do humano emissor na sala, de seguida, a localização exata da cabeça do humano, e finalmente, determinar a localização da boca do humano.

Tendo conhecimento destes dados, posteriormente foi necessário definir a posição e direção da emissão do cone de injeção, onde se procurou posicionar o cone próximo da boca do humano, uma vez que a localização do mesmo não podia ser exatamente a posição da boca do humano, já que o *OpenFOAM* não permitia realizar esta operação.

Por conseguinte, implementou-se o cone a cerca de 0,01 m de distância em relação à boca do emissor, o que se traduziu nas seguintes coordenadas na sala, tendo em conta o referencial visualizado nas imagens da Figura 53, idêntico ao referencial do artigo [8], que pode ser observado no capítulo 4, em 4.2.2, na Figura 2 :  $\overrightarrow{P}_{sala}(x, z, y) = [3,65 \ 0,56 \ 1,35]$ .

Em relação à face do humano, é necessário referir que o cone de injeção deveria ter ficado centrado na face, a 17 cm do topo da cabeça, tal como se pode observar na imagem esquerda da Figura 53. Tal não se verificou devido a um erro ocorrido aquando da implementação do cone de injeção, em que as coordenadas de  $\overrightarrow{P}_{sala}(x, z, y)$ , dizem respeito à localização do cone de emissão nas simulações, cuja representação é possível de observar na imagem direita da Figura 53.

As coordenadas da localização que se deveriam ter utilizado para posicionar o cone de injeção, observado na imagem esquerda da Figura 53, são as seguintes:  $\overrightarrow{P}'_{sala}(x, z, y) = [3,64 \ 0,56 \ 1,28]$ . Apesar deste equívoco, não se obtiveram resultados muito dispares ao nível das simulações, visto que as diferenças são ínfimas entre as duas posições.

Adicionalmente, tal como referido, era necessário definir também a direção da emissão das partículas, em que tal foi implementado através de um vetor. Uma vez que neste estudo se pretendia que as partículas fossem emitidas longitudinalmente, o vetor da direção das partículas implementado, foi o seguinte:  $\overrightarrow{D}_{particulas}(x, z, y) = [0 \ 1 \ 0]$ .

Nas imagens da Figura 53 é possível observar detalhadamente, a posição do cone de injeção.

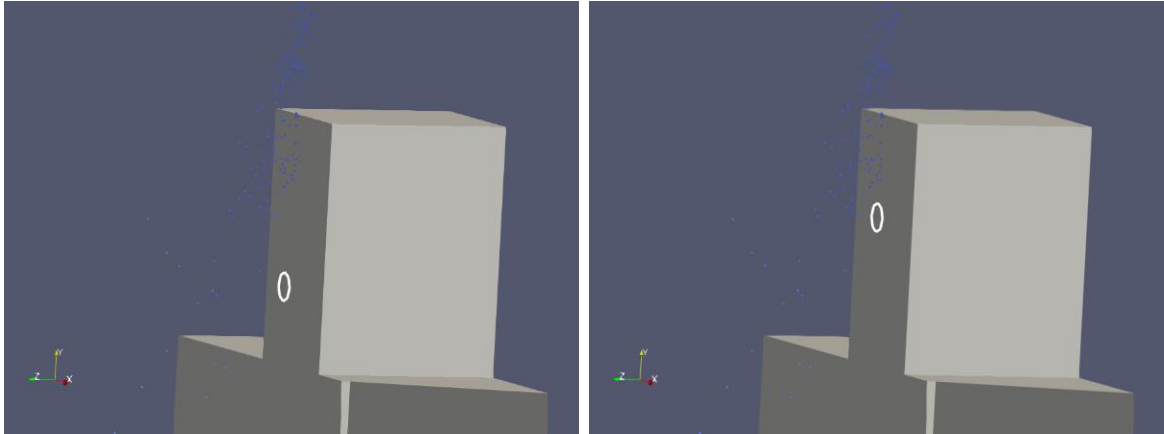


Figura 53. Localização do Cone de Injeção: Posição Certa (Esquerda) e Posição Utilizada nas Simulações (Direita)

Todos os parâmetros que se encontram na Tabela 18, e cujo valor não foi aqui mencionado, foram especificamente implementados para cada regime de respiração e como tal, serão abordados em específico nos subcapítulos seguintes, referentes às *settings* de cada um dos regimes de respiração.

### 5.3.1. *Settings* das Simulações do Emissor a Falar

Neste regime de respiração foi definido que um dos humanos estaria a falar cerca de 5 minutos. Os parâmetros especificamente necessários a implementar no ficheiro *kinematicCloudProperties* para se conseguir simular este regime de respiração, são possíveis de ser observados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19: Características a Implementar: Regime de Respiração de Falar (Parte 1)

<b>Duração do Fenómeno [s]</b>	300
<b>Ângulo de Injeção [°]</b>	42,9
<b>Velocidade de Injeção [m/s]</b>	6,0

É de mencionar que em relação ao parâmetro da velocidade, em [34] era referido que as velocidades mínima e máxima obtidas para uma situação em que o emissor está a falar, eram 2 e 10 m/s, respetivamente, onde, para efeitos deste trabalho se utilizou o valor médio entre estes 2 valores, tal como observado na Tabela 19. Em relação ao ângulo de injeção, em [35] era mencionado que este valor seria em relação ao eixo vertical, para uma situação em que o emissor está a falar.

Tabela 20: Características a Implementar: Regime de Respiração de Falar (Parte 2)

<b>Dimensão das Partículas [<math>\mu m</math>]</b>	<b>Nº de Partículas Emitidas por Segundo</b>
[1;2[	20
[2;4[	20
[4;8[	20
[8;16[	20
[16;24[	15
[24;32[	15
[32;40[	15
[40;50[	15
[50;75[	10
[75;100[	10
[100;125[	10
[125;150[	5
[150;200[	5
[200;250[	5
[250;500[	5
[500;1000[	5

É de referir também que na pesquisa bibliográfica realizada, não se encontrou um estudo em que estivesse mencionado todos os intervalos de dimensão das partículas, assim como do número de partículas emitidas para cada intervalo de dimensão, pelo que se utilizou os intervalos de dimensão mencionados em [36], que eram referentes a situações de tosse e de espirro.

Em relação ao número de partículas emitidas por segundo, em [37], era referido que numa situação de falar, cerca de 195 partículas por segundo seriam emitidas.

Ainda assim, não se utilizou este valor nas simulações uma vez que não seria prático simular um caso, onde, para cada intervalo de dimensão acima mencionado, seriam emitidas 195 partículas por segundo, durante 5 minutos, pois tal situação levaria a custos computacionais bastante elevados. Tendo isto em conta, o procedimento adotado nas simulações dos casos de falar foi distribuir as 195 partículas pelos intervalos mencionados na Tabela 20, e com isto, conseguir respeitar o valor referenciado em [37].

### 5.3.2. Settings das Simulações do Emissor a Espirrar

Os parâmetros especificamente necessários a implementar no ficheiro *kinematicCloudProperties* para se conseguir simular este regime de respiração, são possíveis de ser observados nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21: Características a Implementar: Regime de Respiração de Espirrar (Parte 1)

<b>Duração do Fenómeno [s]</b>	0,5
<b>Ângulo de Injeção [°]</b>	15,4
<b>Velocidade de Injeção [m/s]</b>	6,85

Em primeira instância, é necessário referir que a duração de um espirro foi retirada de [38]. Mais uma vez, tal como se verificou na situação de falar, em [34] era referido que as velocidades mínima e máximas obtidas no estudo para uma situação de espirro foram 5,3 e 8,4 m/s, respetivamente, onde, para efeitos deste trabalho se utilizou o valor médio entre estes 2 valores, tal como observado na Tabela 21. Em relação ao ângulo de injeção, em [35] era mencionado que este valor seria em relação à vertical, para uma situação de espirro.

Tabela 22: Características a Implementar: Regime de Respiração de Espirrar (Parte 2)

<b>Dimensão das Partículas [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b><i>ParcelsPerSecond</i></b>	<b><i>nParticle</i></b>
[1;2[	5200	100
[2;4[	3200	100
[4;8[	7000	100
[8;16[	5600	100
[16;24[	1940	100
[24;32[	7400	10
[32;40[	3400	10
[40;50[	1800	10
[50;75[	1000	10
[75;100[	450	10
[100;125[	250	10
[125;150[	180	10
[150;200[	200	10
[200;250[	140	10
[250;500[	210	10
[500;1000[	100	10

Em primeira instância, é necessário referir que em [36] era mencionado o número de partículas num espirro, mas uma vez que no ficheiro *kinematicCloudProperties*, apenas se podia adicionar o número de partículas emitidas num segundo, e que a duração de um espirro é cerca de 0,5 s [38], o número total de partículas apresentado nas colunas *nParticle* e *ParticlesPerSecond*, da Tabela 22 corresponde ao dobro do número de partículas exibido em [36].

É também necessário mencionar que para melhorar a eficiência da simulação, isto é, reduzir os custos computacionais, utilizou-se a função *nParticle* para permitir que as partículas fossem emitidas em conjuntos, e não individualmente. Por exemplo, para o intervalo de dimensões [1; 2] ( $\mu m$ ), o número de partículas total a ser emitido para o interior da sala são 520000 partículas. O que se implementou foi a emissão deste número de partículas em 5200 conjuntos de 100 partículas cada. Aplicou-se este raciocínio para os restantes intervalos de dimensão. A mesma estratégia foi implementada nas *settings* das simulações em situação de tosse, como se observa em 5.3.3.

### 5.3.3. *Settings* das Simulações do Emissor a Tossir

Os parâmetros especificamente necessários a implementar no ficheiro *kinematicCloudProperties* para se conseguir simular este regime de respiração, são possíveis de ser observados nas Tabela 23 e 24.

Tabela 23: Características a Implementar: Regime de Respiração de Tossir (Parte 1)

<b>Duração do Fenómeno [s]</b>	0,5
<b>Ângulo de Injeção [°]</b>	15,4
<b>Velocidade de Injeção [m/s]</b>	15

Mais uma vez, tal como se verificou na situação de falar e de espirrar, em [34] era referido que as velocidades mínima e máximas obtidas no estudo, para uma situação de tosse foram 10 e 15 m/s, respetivamente, em que para efeitos deste trabalho se utilizou o valor médio entre estes 2 valores, tal como observado na Tabela 23.

É necessário mencionar que no artigo [35] o ângulo de espirro e de tosse medido foi o mesmo, e como durante a pesquisa bibliográfica não foi possível encontrar um artigo que mencionasse a duração do ato de tosse, utilizou-se a mesma duração que um espirro, mencionada em [38].

Tabela 24: Características a Implementar: Regime de Respiração de Tossir (Parte 2)

<b>Dimensão das Partículas [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b><i>ParcelsPerSecond</i></b>	<b><i>nParticle</i></b>
[1;2[	100	10
[2;4[	58	10
[4;8[	194	10
[8;16[	320	10
[16;24[	174	10
[24;32[	84	10
[32;40[	48	10
[40;50[	22	10
[50;75[	28	10
[75;100[	17	10
[100;125[	96	1
[125;150[	76	1
[150;200[	70	1
[200;250[	58	1
[250;500[	68	1
[500;1000[	24	1
[1000;2000[	4	1

Neste caso, tal como para a situação de espirro analisada em 5.3.2, o número de partículas a emitir em cada ato de tosse foi retirado do artigo [36], e como o ato de tosse durava 0,5 s [38], e no ficheiro *kinematicCloudProperties* apenas era possível definir o número de partículas emitidas por segundo, o número total de partículas para cada intervalo de dimensão que se encontra exibido na Tabela 24 é o dobro do número de partículas mencionado em [38].

Também aqui se aplicou a mesma estratégia para a emissão de partículas, isto é, para melhorar a eficiência da simulação, ou seja, reduzir os custos computacionais, utilizou-se a função *nParticle* para permitir que as partículas fossem emitidas em conjuntos, e não individualmente.

#### **5.3.4. Settings das Simulações do Emissor em Respiração Normal**

Este foi o único regime de respiração cuja implementação não seguiu a estrutura apresentada em 5.3.1, 5.3.2 ou 5.3.3, isto é, apenas se simulou uma situação de 10 minutos, uma vez que o custo computacional da simulação de respiração em situação de

repouso seria muito superior ao custo das simulações dos anteriores regimes de respiração mencionados.

Adicionalmente, o ciclo de respiração também era diferente dos outros casos, isto é, ter-se-ia de ter em conta o *tempo de inspiração + tempo de expiração + intervalo de tempo entre expiração e inspiração*, onde, em [39] se verificou que o processo normal de inspiração seria de cerca de 2,5 segundos, e que todo o processo de duração do ciclo acima descrito demoraria cerca de 6 segundos.

Tendo em conta este fenómeno, e para se simular apenas 10 minutos, foi necessário criar um modelo de injeção a cada 6 segundos, ou seja, 100 modelos de injeção. Se se quisesse ter uma simulação de 60 minutos, seria necessário criar 600 modelos de injeção, o que aumentaria significativamente os custos computacionais da simulação e atendendo ao facto de este regime ter de ser simulado para diferentes ambientes, a sua execução em 60 minutos não seria prática.

Considerando o que foi referido, e tendo em conta as características comuns ilustradas em 5.3 entre este regime de respiração, e os regimes apresentados em 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3, os parâmetros especificamente necessários a implementar no ficheiro *kinematicCloudProperties* para se conseguir simular este regime de respiração, são possíveis de ser observados na Tabela 25.

Tabela 25: Características a Implementar: Regime de Respiração Normal

<b>Duração Total do Fenómeno [s]</b>	6
<b>Ângulo de Injeção [°]</b>	60
<b>Velocidade de Injeção [m/s]</b>	1,56
<b><i>ParcelsPerSecond</i></b>	135
<b>Dimensão das Partículas [<math>\mu m</math>]</b>	[0,01;500]

Como se referiu no texto acima, a duração total do fenómeno foi retirada de [39], o ângulo de injeção em [40], e o número de partículas emitidas por segundo, a dimensão das partículas, e a velocidade de injeção foram retiradas de [41] [42] e [43], respetivamente.

## 5.4. Modelos CFD Analisados

Tal como já foi mencionado, cada regime de respiração referido em 5.3 foi simulado em diversos ambientes selecionados no âmbito do projeto PAFSE. Com isto, neste subcapítulo pretende-se ilustrar os procedimentos para a criação de cada um dos modelos CFD, assim como das respetivas dimensões e implementação das condições de fronteira. Adicionalmente, como mencionado no capítulo 4, antes de se proceder à simulação do escoamento de partículas em cada um dos modelos criados, era necessário simular o escoamento do ar, pelo que as características da malha associada a cada modelo, também serão apresentadas neste subcapítulo.

É necessário referir ainda que tal como o sucedido em 4.3.2, para se simular as condições de fronteira implementadas no *DesignBuilder* para o extrator, ou seja, o caudal de ar total a ser extraído sala, foi necessário implementar manualmente, outras condições de fronteira, através da edição dos ficheiros de texto de configuração dos casos que foram depois simulados com o *OpenFOAM*, via linha de comandos, tal como se poderá observar nos subcapítulos subsequentes (ver apêndice C.8, para verificar os procedimentos para se efetuar esta alteração).

Na Tabela 26 é possível observar a nomenclatura utilizada como referência para cada um dos modelos no decorrer do relatório, bem como o número de células da malha gerada em cada modelo

Tabela 26: Modelos CFD criados e Respetiva Nomenclatura

<b>Modelos CFD Implementados</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Nº Células da Malha</b>
Com Geometrias Mais Complexas, e Com um sistema de <i>UFAD</i>	Modelo 1	475855
Sala sem Sistema de Ventilação	Modelo 2	475855
Ar Condicionado no Teto	Modelo 3	477843
Radiador numa Parede Lateral	Modelo 4	475855
Janelas Abertas a 10%, Porta Aberta a 10%	Modelo 5	475813
Janelas Abertas a 50%, Porta Aberta a 10%	Modelo 6	475813
Janelas Abertas a 10%, Porta 100% Fechada	Modelo 7	475855
Janelas Abertas a 50%, Porta 100% Fechada	Modelo 8	475855

### 5.4.1. Modelo 1: Caso Standard

Tal como referido em 5.2, o modelo 1, observado na Figura 51 foi o primeiro modelo com geometrias mais complexas onde se simularam os regimes de respiração mencionados em 5.3. Nas Tabelas 27 e 28 é possível observar as características da malha, assim como as dimensões de atravancamento de cada elemento inerente ao modelo observado na Figura 52, e as condições de fronteira associadas a cada elemento, respetivamente. Nas imagens da Figura 54 é possível observar, individualmente, os elementos que constituem o modelo 1 onde a geometria dos humanos pode ser observada na Figura 52.

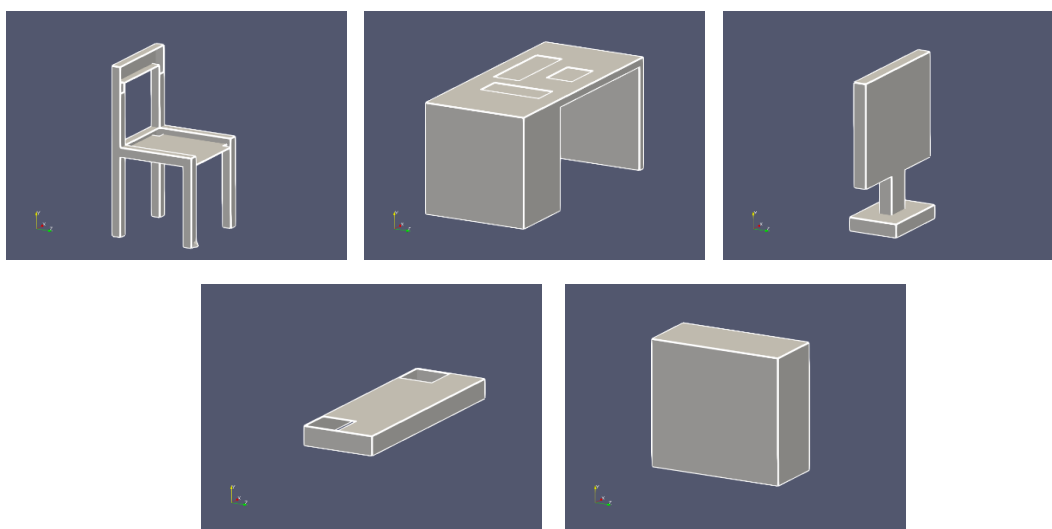


Figura 54. Elementos Comuns Constituintes do Modelo 1 a 8 (Da Esquerda para a Direita): Cadeira, Mesa, Monitor, Teclado, Torre

Tabela 27: Características da Malha: Modelo 1

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto, Chão, Difusores, Extrator	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	10000

Tabela 28: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 1

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [ $m^3/s$ ]	Temperatura Superfície [°C]
*Parede Norte (+X)	1	-	-	-	-	-	24,9
*Parede Sul (-X)	1	-	-	-	-	-	25,0
*Parede Este (+Z)	1	-	-	-	-	-	25,5
*Parede Oeste (-Z)	1	-	-	-	-	-	25,3
*Teto (+Y)	1	-	-	-	-	-	25,7
*Chão (-Y)	1	-	-	-	-	-	24,0
*Humanos (Sentados)	4	0,6	0,6	1,45	100	-	-
Cadeira	1	0,5	0,5	0,95	-	-	-
Mesa	1	1,65	0,75	0,75	-	-	-
Monitor	1	0,5	0,2	0,65	-	-	-
Torre	1	0,2	0,45	0,4	-	-	-
Teclado	1	0,6	0,2	0,05	-	-	-
*Lâmpadas	6	1,2	0,2	-	64	-	-
*Extrator	1	0,3	0,3	-	-	0,0944	-
*Difusor	2	0,3	0,3	-	-	0,0472	-

\* As condições de fronteira definidas para estes elementos eram idênticas às utilizadas no modelo de CFD recriado do artigo [8] e ilustradas no capítulo 3 em 3.3.2.

É necessário referir que os humanos e os elementos em seu redor, ou seja, a cadeira, a mesa, a torre, o teclado e o monitor, estiveram sempre presentes nos restantes modelos recriados, com dimensões e condições de fronteira idênticas às observadas na Tabela 28, pelo que estes elementos não serão inseridos nas tabelas com a listagem e dimensão dos elementos constituintes das restantes configurações. O mesmo raciocínio se aplica para as condições de fronteira implementadas nas paredes, teto e chão.

### 5.4.2. Modelo 2: Sala Sem Sistema de Ventilação

No modelo 2, as configurações da sala, assim como as condições de fronteira eram exatamente as mesmas que as apresentadas para o modelo 1 em 5.4.1, à exceção da inexistência de qualquer sistema de ventilação na sala (difusor e extrator foram removidos da geometria). Por conseguinte, a configuração do modelo 2, e as respectivas características da malha, são as que se observam na Figura 55 e Tabela 29, respetivamente.

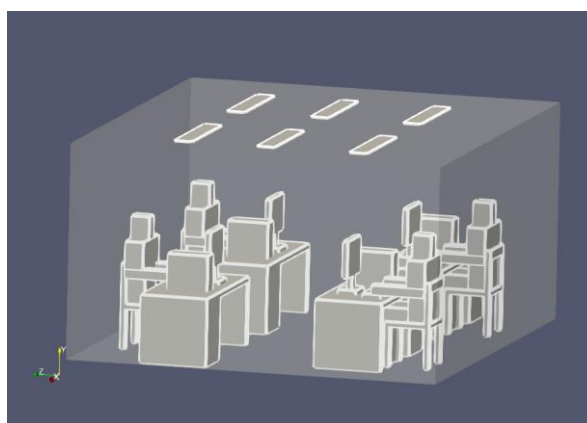


Figura 55. Configurações do Modelo 2

Tabela 29: Características da Malha: Modelo 2

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto e Chão	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	10000

### 5.4.3. Modelo 3: Ar Condicionado no Teto

No modelo 3 implementou-se um ar condicionado no teto, em que as dimensões deste equipamento foram retiradas do catálogo da *Cassete-Geko*, e o modelo utilizado para referência de construção foi o *Single, Motor Type: AC*. [44]. As configurações do modelo, as características da malha, e as dimensões e condições de fronteira dos elementos constituintes, podem ser observadas na Figura 56, e Tabelas 30, 31 e 32, respetivamente. Neste modelo foram ainda incluídas janelas, uma vez que as lâmpadas foram retiradas da sala, permitindo assim recriar uma configuração de sala mais realista.

É necessário mencionar que a dimensão em Z, presente no catálogo da *Cassete-Geko* para o extrator e difusores, era de 0,57 e 0,7 m, respetivamente, e para efeitos de melhor geração de malha, alteraram-se estas dimensões para múltiplos de 5 cm (0,55 m e 0,1 m para extrator e difusor, respetivamente), uma vez que a malha base utilizada foi de 0,05 m. Estas alterações foram necessárias uma vez que ao implementar-se as dimensões estritamente referidas no catálogo, voltaram a observar-se os efeitos de aglutinação de células verificados no capítulo 4, em 4.4.5.6.

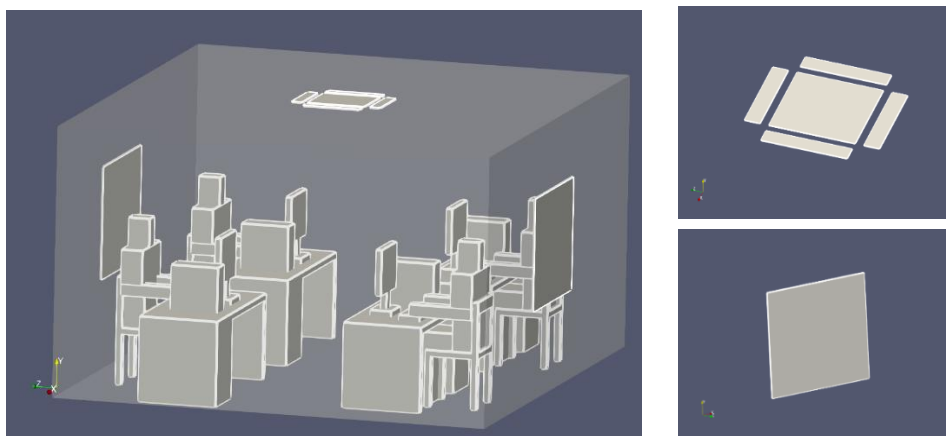


Figura 56. Configurações do Modelo 3 (Esquerda), com Ar Condicionado (À Direita em Cima) e Janela (À Direita em Baixo), em destaque

Tabela 30: Características da Malha: Modelo 3

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto, Chão e Janelas	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor, Extrator e Difusor	10000

Tabela 31: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 3

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura Superfície [°C]
Extrator	1	0,55	0,55	-	-	0,134 * Ver Tabela 32	-
Difusor (Individual)	4	0,55	0,1	-	-	0,0335	-
Janela	2	1,3	-	1	-	-	25,3 em (-Z), 25,5 em (+Z)

Tal como mencionado inicialmente em 5.4, nos modelos com extração de ar, para que se conseguisse simular a situação pretendida com a condição de fronteira definida para este elemento no *DesignBuilder* era necessário definir-se outras características via edição dos ficheiros de texto de configuração dos casos, que foram posteriormente simulados com o *OpenFOAM*, via linha de comandos. Neste caso, as condições de fronteira manualmente implementadas foram as que se encontram ilustradas na Tabela 32.

Tabela 32: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 3

Elemento	Condições de Fronteira Manualmente Implementada		
Extrator	Pressão	Velocidade	Temperatura
	Pressão Manométrica = 0 Pa	$V_{inlet} = 0 \text{ m/s}$ $V_{outlet} = \text{Gradiente } 0$	$T_{inlet} = 20^{\circ}\text{C}$ $T_{outlet} = \text{Gradiente } 0$

Na Tabela 32 encontram-se ilustradas as condições de fronteira definidas manualmente para o extrator, onde neste local se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa, em que a velocidade de saída deveria ser a simulada (Gradiente 0), e à entrada definiu-se que a velocidade deveria ser 0 m/s por forma a garantir que não existia ar a entrar no extrator (apenas remoção de ar da sala). No entanto, o *OpenFOAM* nem sempre conseguiu obedecer a este critério, existindo por vezes uma recirculação residual.

Para complementar, definiu-se ainda que a temperatura de saída do ar seria a simulada (Gradiente 0), e caso houvesse recirculação de ar, o ar de retorno na extração deveria ter uma temperatura de 20°C.

#### 5.4.4. Modelo 4: Radiador Instalado Numa Parede Lateral

Neste modelo implementou-se um aquecedor numa das paredes laterais da sala (+X), em que as dimensões deste equipamento foram retiradas do catálogo da *Worten*, sendo o modelo utilizado para referências de construção, o *BECKEN BTE3512 (2000W)* [45]. As configurações do modelo, as características da malha, e as dimensões e condições de fronteira dos elementos constituintes, podem ser observadas na Figura 57, e Tabelas 33 e 34, respetivamente. Neste modelo voltaram a ser incluídas as lâmpadas.

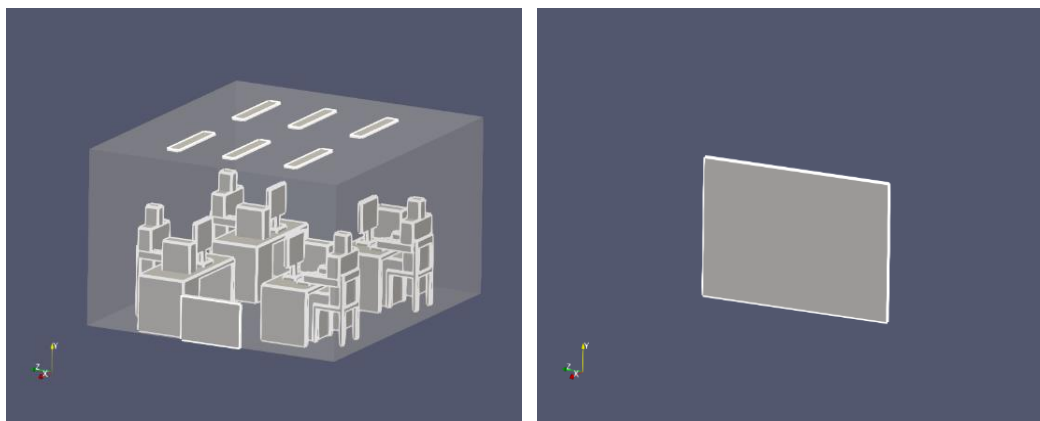


Figura 57. Configurações do Modelo 4 (Esquerda), e Radiador (Direita) em destaque

Tabela 33: Características da Malha: Modelo 4

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto, Chão, Radiador	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	10000

Tabela 34: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 4

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [m <sup>3</sup> /s]	Temperatura Superfície [°C]
Radiador	1	-	1	0,6	*2000	-	-

\* À imagem do que se verificou para a implementação da potência das lâmpadas, no capítulo 4 em 4.2.2, o *DesignBuilder* não permitia definir condições de fronteira de potência, apenas fluxo térmico, e como tal, houve novamente a necessidade de se efetuar a equivalência observada em 4.2.2, desta feita para o radiador, onde se obteve:  $\Phi_{Radiador} \approx 3333,33 \text{ W/m}^2$ .

#### 5.4.5. Modelo 5: Janelas Abertas a 10% e Porta Aberta a 10%

O modelo 5 foi o primeiro de 4 modelos de ventilação natural criados, e, neste caso era pretendido que as aberturas de ambas as janelas (10%), funcionassem como difusores de ar para o interior da sala, e a abertura da porta (10%) funcionasse como extrator do ar da sala. Nestes casos de ventilação natural, tal como referido em 5.4, e ilustrado no modelo 3 em 5.4.3, houve a necessidade de especificar através da edição dos

ficheiros de texto de configuração dos casos, outras condições de fronteira para as regiões das aberturas da porta ou janelas que funcionariam como extratores de ar da sala.

Inicialmente, tentou-se definir condições de fronteira de pressão livre nas aberturas, mas as simulações não convergiram, tendo-se observado desequilíbrios de pressão no interior do modelo, especialmente nas regiões das aberturas.

Por conseguinte, modelo a modelo, foi necessário avaliar as condições de fronteira necessárias a implementar manualmente na região do extrator, para que as simulações convergissem. As configurações do modelo, as características da malha, e as dimensões e condições de fronteira dos elementos constituintes, podem ser observadas na Figura 58, e Tabelas 35, 36 e 37, respetivamente.

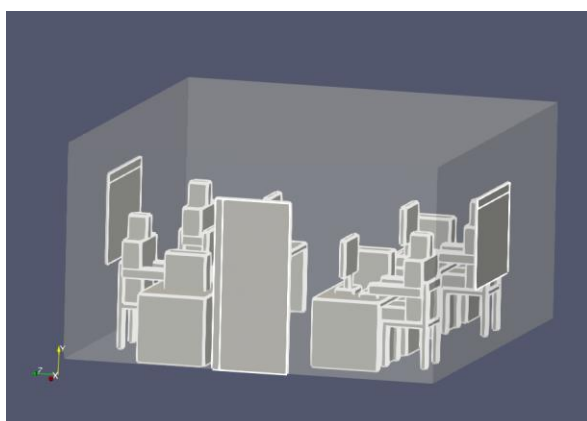


Figura 58. Configurações do Modelo 5

Tabela 35: Características da Malha: Modelo 5

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto, Chão, Janelas, e Porta	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	10000

Tabela 36: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 5

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [ $m^3/s$ ]	Temperatura Superfície [°C]
Porta	1	-	0,85	1,90	-	-	24,9
Abertura Porta (Extrator Ar)	1	-	0,085	1,90	-	0,052	-
						*Ver Tabela 37	
Abertura Janela (Difusor de Ar) (Individual)	2	0,13	-	1	-	0,026	-

Tabela 37: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 5

Elemento	Condições de Fronteira Manualmente Implementadas		
Extrator	Pressão	Velocidade	Temperatura
	Pressão Manométrica = 0 Pa	$V_{inlet} = 0 \text{ m/s}$ $V_{outlet} = \text{Gradiente } 0$	$T_{inlet} = 20^\circ\text{C}$ $T_{outlet} = \text{Gradiente } 0$

Na Tabela 37 encontram-se ilustradas as condições de fronteira definidas manualmente para o extrator, onde neste local se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa, em que a velocidade de saída deveria ser a simulada (Gradiente 0), e à entrada definiu-se que a velocidade deveria ser 0 m/s por forma a garantir que não existia ar a entrar no extrator (apenas remoção de ar da sala).

Para complementar, definiu-se ainda que a temperatura de saída do ar seria a simulada (Gradiente 0), e caso houvesse recirculação de ar, o ar de retorno na extração deveria ter uma temperatura de 20°C.

É de referir ainda que o cálculo do caudal de ar a entrar na janela(s), para os modelos com ventilação natural foi efetuado com base na velocidade de ar admissível de conforto para os humanos presentes na sala, que era cerca de 0,2 m/s [46]. Neste caso, sabendo que a abertura de uma das janelas era 10%, o caudal de ar a entrar na sala, e que respeitava a velocidade de conforto, foi obtido da seguinte maneira, utilizando a equação 16:

$$\dot{Q}_{in,ar} = V_{ar} \cdot A_{abertura} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{in,ar} = V_{ar} \cdot A_{abertura} \leftrightarrow \dot{Q}_{in,ar} = 0,2 \cdot (0,13 \cdot 1) \leftrightarrow \dot{Q}_{in,ar} \approx 0,026 \text{ m}^3/\text{s}$$

Semelhante raciocínio foi aplicado nos modelos seguintes, onde no caso em que as janelas estavam abertas a 50% (ver 4.4.6 e 4.4.8, adiante), se assumiu que a velocidade de ar admissível de conforto não deveria ultrapassar os 0,1 m/s.

#### 5.4.6. Modelo 6: Janelas Abertas a 50% e Porta Aberta a 10%

O modelo 6 foi o segundo com ventilação natural onde se simulou os regimes de respiração mencionados em 5.3. Neste caso, em comparação com o modelo 5 as janelas estavam abertas a 50%. As configurações do modelo, as características da malha, e as dimensões e condições de fronteira dos elementos constituintes, podem ser observadas na Figura 59, e Tabelas 38, 39 e 40, respetivamente.

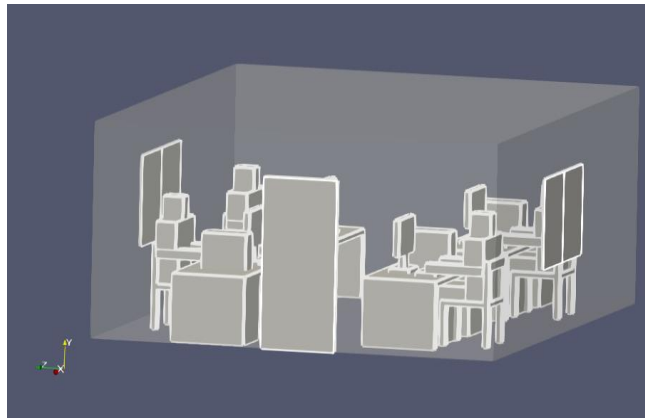


Figura 59. Configurações do Modelo 6

Tabela 38: Características da Malha: Modelo 6

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto, Chão, Janelas, e Porta	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	10000

Tabela 39: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 6

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [ $m^3/s$ ]	Temperatura Superfície [°C]
Abertura Porta (Extrator Ar)	1	-	0,085	1,90	-	0,130	-
						*Ver Tabela 40	
Abertura Janela (Difusor de Ar) (Individual)	2	0,65	-	1	-	0,065	-

Tabela 40: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 6

Elemento	Condições de Fronteira Manualmente Implementadas		
	Pressão	Velocidade	Temperatura
Extrator	Pressão Manométrica = 0 Pa	$V_{inlet} = 0 \text{ m/s}$ $V_{outlet} = \text{Gradiente } 0$	$T_{inlet} = 20^\circ\text{C}$ $T_{outlet} = \text{Gradiente } 0$

Na Tabela 40 encontram-se ilustradas as condições de fronteira definidas manualmente para o extrator, onde neste local se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa, em que a velocidade de saída deveria ser a simulada (Gradiente 0), e à entrada definiu-se que a velocidade deveria ser 0 m/s por forma a garantir que não existia ar a entrar no extrator (apenas remoção de ar da sala).

Para complementar, definiu-se ainda que a temperatura de saída do ar seria a simulada (Gradiente 0), e caso houvesse recirculação de ar, o ar de retorno na extração deveria ter uma temperatura de 20°C.

#### 5.4.7. Modelo 7: Janelas Abertas a 10% e Porta 100% Fechada

No modelo 7, simulou-se uma situação em que a porta estaria totalmente fechada, e o ar entrava na sala por uma janela, e saía pela outra, criando um efeito de corrente de ar. As configurações do modelo, as características da malha, e as dimensões e condições de fronteira dos elementos constituintes, podem ser observadas na Figura 60, e Tabelas 41, 42 e 43, respetivamente.

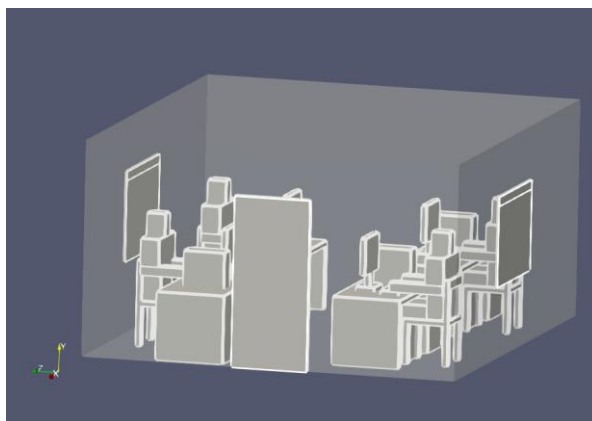


Figura 60. Configurações do Modelo 7

Tabela 41: Características da Malha: Modelo 7

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
	Nível 0	Nível 1	
5	Paredes, Teto, Chão, Janelas, e Porta	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	10000

Tabela 42: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 7

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [ $m^3/s$ ]	Temperatura Superfície [ $^{\circ}C$ ]
Abertura Janela (Difusor de Ar)	1	0,13	-	1	-	0,026 *Ver Tabela 43	-
Abertura Janela (Extrator de Ar)	1	0,13	-	1	-	0,026	-

Tabela 43: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 7

Elemento	Condição de Fronteira Manualmente Implementadas		
Extrator	Pressão	Velocidade	Temperatura
	Pressão Manométrica = 0 Pa	$V_{inlet} = 0 \text{ m/s}$ $V_{outlet} = \text{Gradiente } 0$	$T_{inlet} = 20^{\circ}C$ $T_{outlet} = \text{Gradiente } 0$

Na Tabela 43 encontram-se ilustradas as condições de fronteira definidas manualmente para o extrator, onde neste local se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa, em que a velocidade de saída deveria ser a simulada (Gradiente 0), e à entrada definiu-se que a velocidade deveria ser 0 m/s por forma a garantir que não existia ar a entrar no extrator, (apenas remoção de ar da sala).

Para complementar, definiu-se ainda que a temperatura de saída do ar seria a simulada (Gradiente 0), e caso houvesse recirculação de ar, o ar de retorno na extração deveria ter uma temperatura de 20°C.

#### **5.4.8. Modelo 8: Janelas Abertas a 50% e Porta 100% Fechada**

Neste caso era pretendido simular o mesmo efeito que no modelo 7, só que com janelas abertas a 50%. Este foi o único caso onde devido à não convergência das simulações, a condição de fronteira de temperatura do ar de entrada no extrator a ser definida manualmente, foi a de Gradiente 0, que fundamentalmente permitia que caso houvesse recirculação de ar, o ar de retorno deveria ter a mesma temperatura que o ar que foi extraído.

As configurações do modelo, as características da malha, e as dimensões e condições de fronteira dos elementos constituintes, podem ser observadas na Figura 61, e Tabelas 44, 45 e 46, respetivamente.

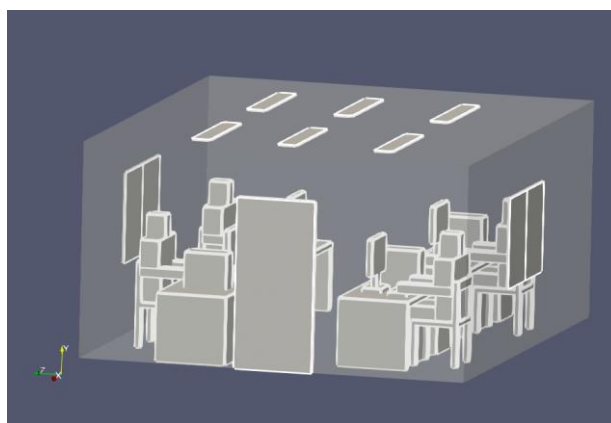


Figura 61. Configurações Modelo 8

Tabela 44: Características da Malha: Modelo 8

Malha Base [cm]	Nível de Refinação da Superfície		Nº de Iterações Até Convergir
5	Nível 0	Nível 1	10000
	Paredes, Teto, Chão, Janelas, e Porta	Ocupantes, Cadeira, Mesa, Torre, Teclado e Monitor	

Tabela 45: Dimensões e Condições de Fronteira: Modelo 8

Elemento	Quantidade	Dimensões [m]			Condição de Fronteira		
		X	Z	Y	Potência [W]	Caudal de Ar [ $m^3/s$ ]	Temperatura Superfície [°C]
Abertura Janela (Difusor de Ar)	1	0,65	-	1	-	0,065 *Ver Tabela 46	-
Abertura Janela (Extrator de Ar)	1	0,65	-	1	-	0,065	-

Tabela 46: Condições de Fronteira Manualmente Implementadas: Modelo 8

Elemento	Condição de Fronteira Manualmente Implmentadas		
Extrator	Pressão	Velocidade	Temperatura
	Pressão Manométrica = 0 Pa	$V_{inlet} = 0 \text{ m/s}$ $V_{outlet} = \text{Gradiente } 0$	$T_{inlet} = \text{Gradiente } 0$ $T_{outlet} = \text{Gradiente } 0$

Na Tabela 46, encontram-se ilustradas as condições de fronteira definidas manualmente para o extrator, onde neste local se definiu uma pressão manométrica de 0 Pa, em que a velocidade de saída deveria ser a simulada (Gradiente 0), e à entrada definiu-se que a velocidade deveria ser 0 m/s por forma a garantir que não existia ar a entrar no extrator (apenas remoção de ar da sala).

Para complementar, definiu-se ainda que a temperatura de saída do ar seria a simulada (Gradiente 0), e caso houvesse recirculação de ar, ao temperatura do ar de retorno na extração deveria ser exatamente igual à temperatura do ar no centro da célula adjacente à saída (Gradiente 0). Este foi o único caso com sistemas de ventilação onde foi necessário utilizar a condição de fronteira de Gradiente 0 para a entrada de ar no

extrator, devido aos problemas de convergência que esta simulação, em específico, revelou.

## 5.5. Resultados Obtidos

Neste subcapítulo, para cada um dos regimes de respiração mencionados em 5.3, simulados em cada modelo CFD apresentado em 5.4, encontram-se demonstrados os resultados obtidos com a ferramenta ao nível das simulações CFD de escoamento de partículas.

Estes resultados foram representados sob a forma de gráficos, e traduzem o que se observou no fim de cada simulação. As imagens da Figura 62 permitem exemplificar o que se conseguiu observar em relação ao comportamento das partículas, ao longo do tempo definido para a simulação.

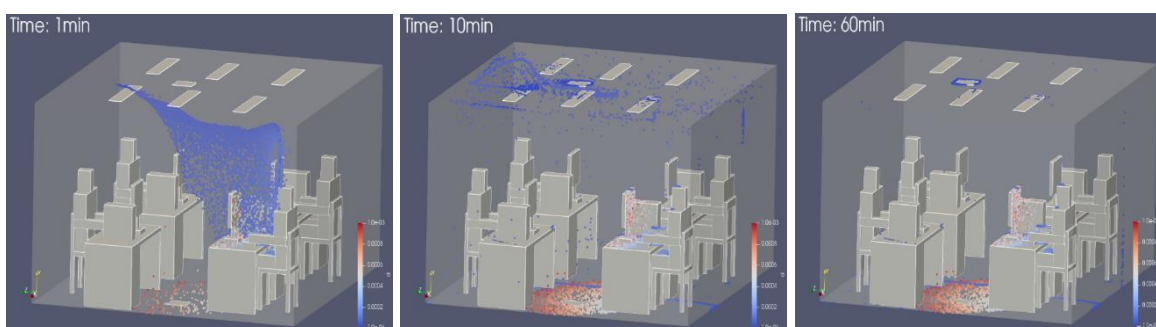


Figura 62. Exemplo de Comportamento das Partículas ao Longo de Cada Simulação

Nas imagens da Figura 62, encontra-se exibido o comportamento das partículas em 3 instantes de tempo da simulação, numa situação em que o humano está a falar na sala com as configurações do modelo 1.

No canto inferior direito da imagem é possível visualizar a escala de dimensões das partículas que estão a ser emitidas, permitindo identificar que partículas se depositaram na sala, as superfícies em que se agregaram, e as partículas que ainda estão no ar, onde, comparando os instantes de tempo inicial e final da simulação, é possível ter uma perceção a nível qualitativo da dimensão das partículas que foram retiradas da sala.

Fundamentalmente, é por esta via que o utilizador da ferramenta de simulação terá a possibilidade de perceber os fenómenos que estão a ocorrer dentro da sala, relativamente ao processo de escoamento de partículas, em que os resultados obtidos nos gráficos ilustrados nos subcapítulos subsequentes, dizem respeito ao que se observa no

fim de cada simulação, ou seja, resumiram o comportamento das partículas no período de simulação.

### 5.5.1. Resultados Modelo 1

Tal como referido em 5.5, os resultados que se obtiveram através dos gráficos, resumiram fenómenos semelhantes aos visualizados nas imagens da Figura 62, para cada regime de respiração. Para o modelo 1, os resultados obtidos através da ferramenta, encontram-se exibidos nos subcapítulos seguintes.

#### 5.5.1.1. Falar

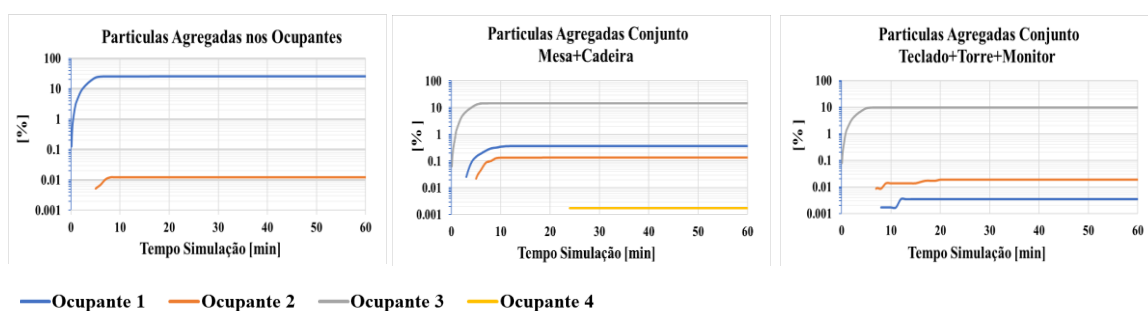


Figura 63. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Falar

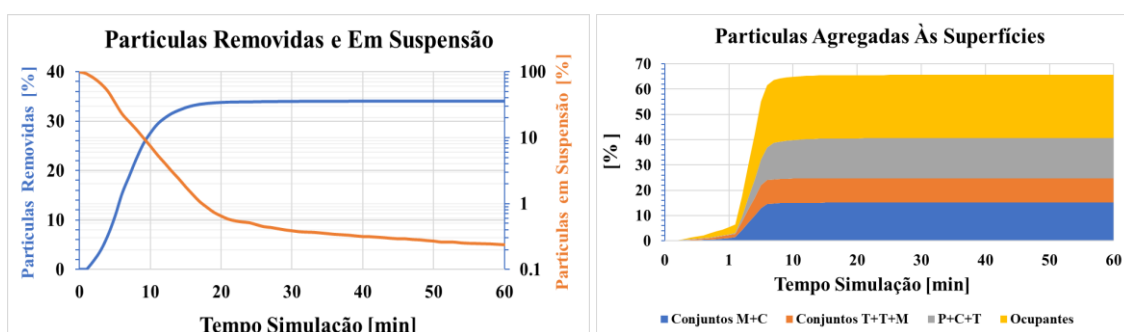


Figura 64. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Falar

Os gráficos representados nas Figuras 63 e 64 exemplificam todos os resultados que se conseguiram obter através da ferramenta, em relação ao escoamento de partículas, para os diversos regimes de respiração simulados. Como referido em 5.3.1, uma das funções implementadas no ficheiro *kinematicCloudProperties* permitia à ferramenta contabilizar, simultaneamente, as partículas que se agregaram às superfícies do ambiente simulado, e as que foram removidas pelo sistema de ventilação presente em cada modelo.

As superfícies que serviram de base para a contabilização de partículas agregadas, encontram-se nos gráficos da Figura 63, onde no caso dos ocupantes, se observou que o emissor das partículas é aquele que ficou mais infetado no fim da simulação ( $\approx 25\%$ ), mas no entanto, o ocupante 3, é aquele que seria mais suscetível de ficar infetado, uma vez que uma grande percentagem das partículas emitidas ficaram agregadas nos elementos em redor deste ocupante (*Mesa + Cadeira*  $\approx 15\%$  e *Teclado + Torre + Monitor*  $\approx 10\%$ ). O risco de infeção direto para os ocupantes 2 e 4, neste regime de respiração, para este modelo, foi quase nulo.

Com o gráfico da esquerda da Figura 64, obteve-se uma perceção da eficiência do sistema de ventilação implementado no modelo, onde, neste caso se verificou que no fim da simulação, cerca de 34% das partículas emitidas foram removidas da sala. Também neste gráfico foi representada a percentagem de partículas que ainda estavam em suspensão, e por conseguinte, foi possível avaliar o potencial de risco de infeção no final da simulação, onde neste regime de respiração, para o modelo 1 se observou que menos de 1% das partículas emitidas ainda se encontravam em suspensão, logo, o potencial de risco de infeção por partículas em suspensão, no regime de respiração de falar, para o modelo 1, era residual.

No gráfico da direita da Figura 64 foi possível analisar em quais das superfícies do modelo 1 as partículas se agregaram em maior percentagem, e com isso, conseguiu-se ter a perceção das superfícies que possuíam maior risco de infeção.

Os dados neste gráfico foram agrupados por conjuntos, onde o conjunto “M+C” representa a percentagem total de partículas que ficaram agregadas no conjunto *Mesa+Cadeira* presentes em toda a sala, o conjunto “T+T+M” representa a percentagem de partículas que ficaram agregadas no conjunto *Teclado+Torre+Monitor* de toda a sala, e o conjunto “P+C+T”, ilustra a percentagem de partículas que ficou agregada ao conjunto *Paredes+Chão+Teto*.

Neste regime de respiração, para o modelo 1, o que se observou foi que a maioria das partículas que se agregaram na sala ficaram agregadas ao ocupante emissor ( $\approx 25\%$ ), e que o conjunto “T+T+M”, foi aquele onde as partículas se agregaram menos ( $\approx 10\%$ ).

### 5.5.1.2. Espirrar

Os resultados obtidos para a simulação de espirrar, no modelo 1, foram muito semelhantes aos obtidos para a simulação de falar, e foram os que se apresentam nos gráficos abaixo ilustrados.

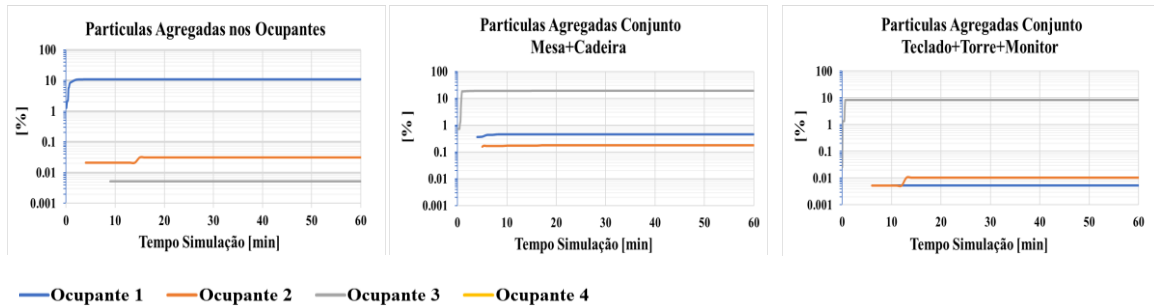


Figura 65. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Espirrar

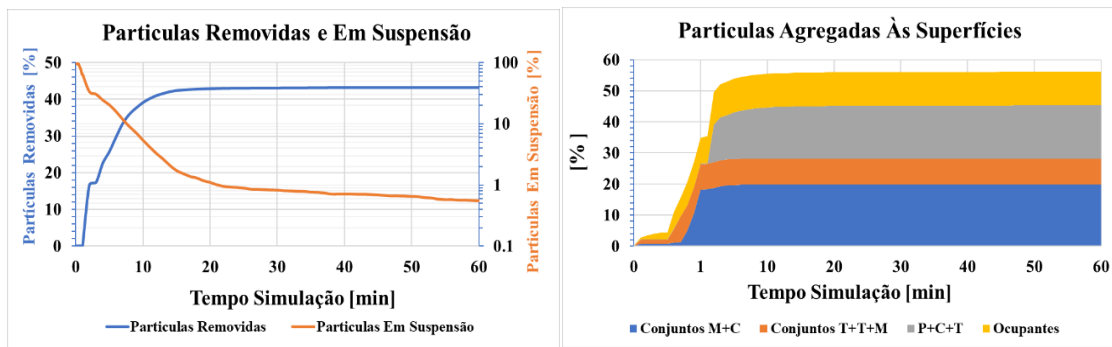


Figura 66. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Espirrar

Como se observa nos gráficos das Figuras 65 e 66, os resultados obtidos na situação de espirro foram muito semelhantes aos obtidos na situação de falar, isto é, ao nível dos ocupantes, aquele que foi mais infetado, foi o próprio emissor de partículas ( $\approx 11\%$ ), e o ocupante mais suscetível de ser infetado seria o ocupante 3, com uma grande percentagem das partículas inicialmente emitidas a ficarem agregadas aos elementos em redor deste ocupante (*Mesa + Cadeira*  $\approx 20\%$  e *Teclado + Torre + Monitor*  $\approx 9\%$ ), tal como se tinha verificado na situação de falar em 5.5.1.1.

Também para este regime de respiração se verificou que no fim da simulação, a percentagem de partículas ainda em suspensão era muito reduzida ( $<1\%$ ), em que neste caso a eficiência de remoção de partículas por parte do sistema de ventilação do modelo 1, foi superior ( $\approx 43\%$  partículas removidas). Em termos de agregação de partículas nas superfícies do modelo, neste caso, verificou-se que o conjunto “M+C” foi aquele onde

as partículas se agregaram em maior percentagem ( $\approx 20\%$ ), e o conjunto “T+T+M”, foi aquele onde as partículas se agregaram menos.

### 5.5.1.3. Tossir

Os resultados obtidos para a simulação de tossir, no modelo 1, foram muito semelhantes aos obtidos nos 2 regimes de respiração apresentados anteriormente, e foram os que se apresentam nos gráficos abaixo ilustrados.

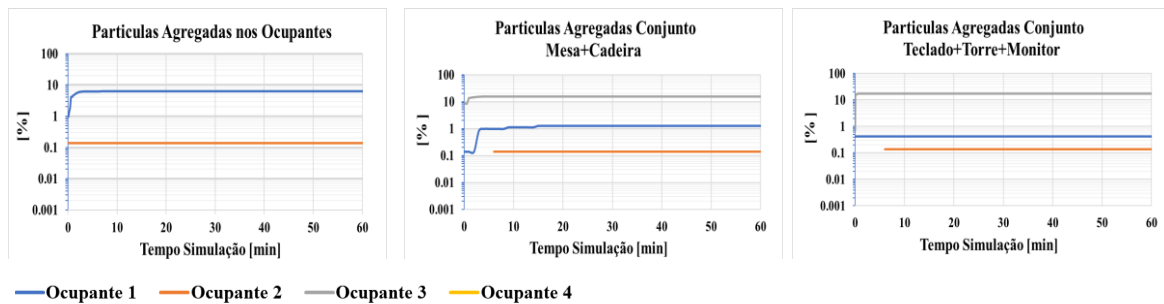


Figura 67. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Tossir

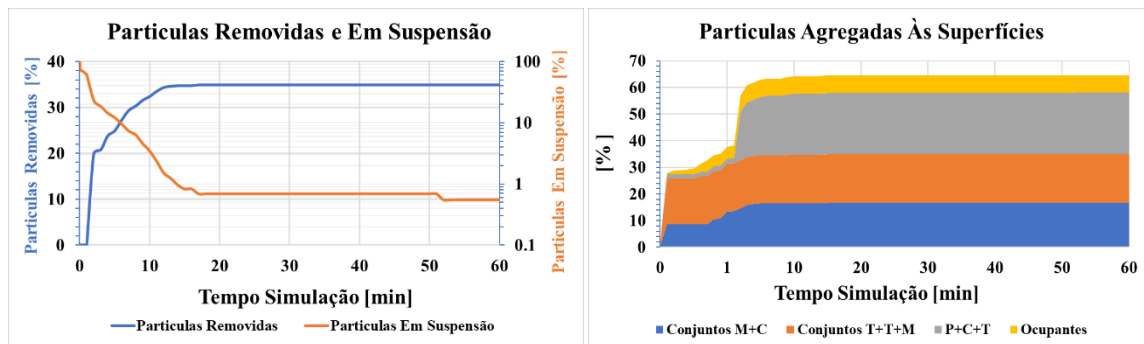


Figura 68. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Tossir

À imagem do que se verificou em 5.5.1.1 e em 5.5.1.2, o ocupante mais infetado foi o emissor das partículas (ocupante 1), ainda que em comparação com os 2 anteriores regimes de respiração, o emissor ficou menos infetado ( $\approx 7\%$ ). Novamente se verificou a tendência observada nos 2 anteriores casos, relativamente ao ocupante mais suscetível de ser infetado, sendo este, o ocupante 3, uma vez que a maioria das partículas que se agregaram aos conjuntos “M+C” e “T+T+M”, fixaram-se nos conjuntos respetivos ao ocupante 3. (*Mesa + Cadeira*  $\approx 15\%$  e *Teclado + Torre + Monitor*  $\approx 18\%$ ).

O nível de partículas suspensas verificado no final da simulação foi residual ( $<1\%$ ), e a eficiência de remoção das partículas da sala por parte do sistema de ventilação foi muito semelhante à ocorrida no caso de falar ( $\approx 34\%$ ), e inferior à situação de espirrar.

Nesta simulação verificou-se também que as superfícies onde as partículas mais se agregaram foram as superfícies do conjunto “P+C+T” ( $\approx 24\%$ ), e por oposição, as superfícies onde as partículas menos se agregaram, foram as superfícies dos ocupantes. ( $\approx 7\%$ ).

#### 5.5.1.4. Respiração Normal

Os resultados obtidos para a simulação em que o ocupante respirava normalmente no modelo 1 não seguiram a tendência verificada nos 3 anteriores regimes de respiração, principalmente ao nível da remoção de partículas e das superfícies onde as partículas se agregaram. Os resultados obtidos para este regime de respiração foram os que se apresentam nos gráficos abaixo ilustrados.

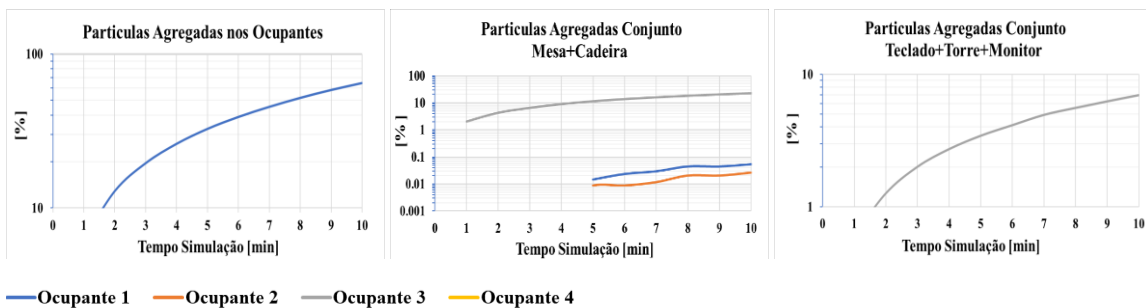


Figura 69. Partículas Agregadas nos Ocupantes, Mesas+Cadeiras e Teclado+Torre+Monitor: Situação de Respiração Normal

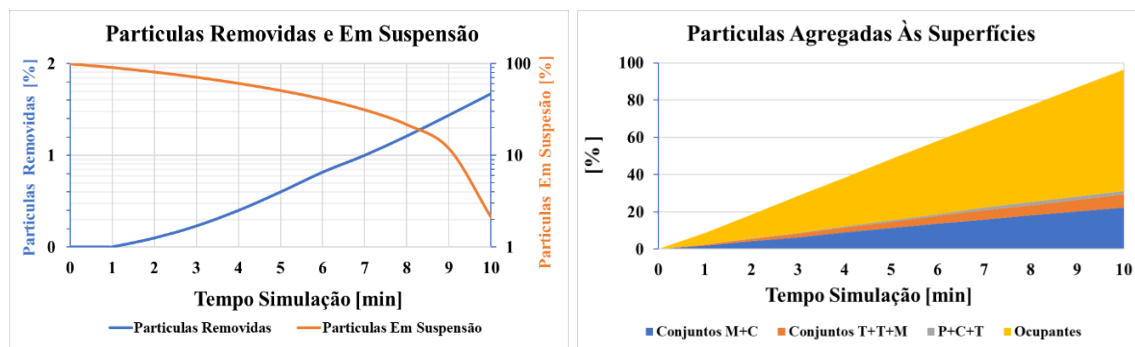


Figura 70. Partículas Removidas e em Suspensão e Agregadas às Superfícies: Situação de Respiração Normal

Como se observa, os resultados desta simulação foram muito díspares dos resultados obtidos para os 3 regimes anteriormente analisados, uma vez que a grande maioria das partículas emitidas ficaram agregadas no próprio ocupante emissor ( $\approx 65\%$ ), ainda que o ocupante 3 corra um risco de infeção considerável, já que uma porção significativa das partículas emitidas se agregou nos elementos em seu redor. (*Mesa +*

Cadeira  $\approx 22\%$  e Teclado + Torre + Monitor  $\approx 7\%$ ).

A eficiência de remoção das partículas por parte do sistema de ventilação nesta situação foi muito baixa ( $<2\%$ ), ainda que se tenha observado a mesma tendência nos 3 regimes anteriores, no que diz respeito a partículas em suspensão no final da simulação ( $\approx 2\%$ ).

### 5.5.1.5. Análise dos 4 Regimes de Respiração

Neste subcapítulo pretendeu-se analisar detalhadamente os resultados obtidos das simulações e extrair as conclusões relevantes a retirar de toda a informação apresentada nos subcapítulos 5.5.1.1-5.5.1.4.

O modelo 1, como foi referido, serviu de exemplificação de todas as conclusões que se obtiveram, até este momento com a ferramenta. Para os resultados obtidos nos restantes modelos apenas serão apresentadas as noções relevantes, similares às apresentadas neste subcapítulo para o modelo 1. As conclusões relevantes retiradas em cada um dos regimes de respiração acima analisados, são as que se apresentam nos gráficos da Figura 71.

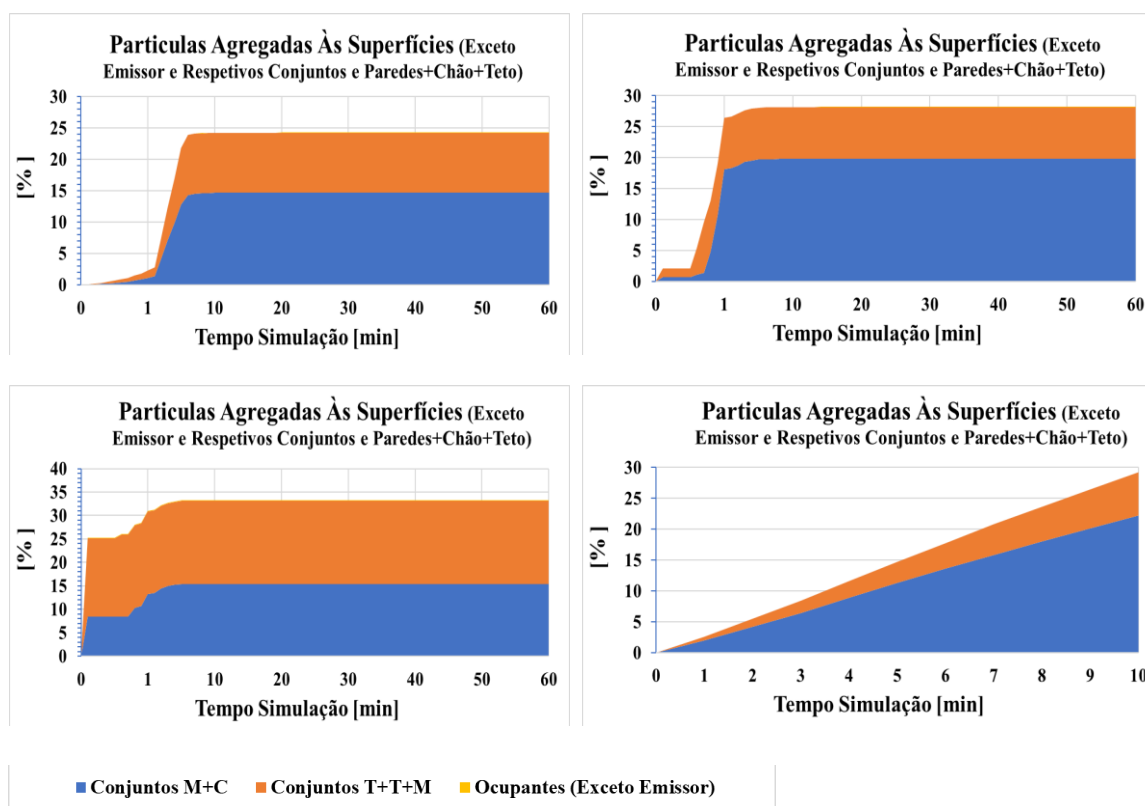


Figura 71. Conclusões Relevantes Retiradas do Modelo 1 para os 4 regimes de respiração: (Em cima da Esquerda para a Direita) Falar e Espirrar, (Em Baixo da Esquerda para a Direita), Tossir e Respiração Normal

Nos gráficos da Figura 71 observa-se para cada regime de respiração, a percentagem de partículas emitidas que se agregou às superfícies, excetuando o conjunto “P+C+T”, o ocupante emissor e os respetivos conjuntos em redor.

Analisando os gráficos, é possível inferir que a percentagem de partículas que se agregou aos ocupantes, que não o emissor, é praticamente inexistente, o que permite afirmar que a existir contágio dos ocupantes, apenas ocorrerá por via indireta através do contacto dos mesmos com as secretárias uns dos outros.

No entanto, com estes dados não é possível afirmar com clareza, o nível de risco de contágio dos ocupantes ao tocarem nos conjuntos “M+C” e “T+T+M”, uma vez que não é possível concluir quais foram as regiões exatas destes conjuntos onde as partículas se agregaram. A área de contágio é a região de interesse na perspetiva do utilizador da ferramenta, e até este momento apenas se conseguiu inferir a percentagem de partículas inicialmente emitidas que se agregou nesses conjuntos, e não a região em específico.

Por conseguinte, não foi possível avaliar o nível de risco de contágio dos ocupantes ao tocarem nos conjuntos acima mencionados, o que reforça a ideia de que a ferramenta ainda se encontra em fase embrionária, e como tal, as conclusões a retirar ainda são rudimentares.

A análise do gráfico da Figura 71, juntamente com a análise dos gráficos das partículas agregadas em todas as superfícies, e do gráfico com as partículas em suspensão e removidas do modelo, permitiu retirar as conclusões relevantes, até então obtidas com a ferramenta, decorrentes de cada simulação efetuada para os modelos em estudo.

#### **5.5.1.6. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados**

Neste subcapítulo pretendeu-se referir as principais conclusões da comparação dos 4 regimes de respiração simulados para cada modelo, onde se comparou os resultados das simulações tendo em conta o nível de infecciosidade direto dos ocupantes, as partículas em suspensão, a eficiência de remoção das partículas por parte do sistema de ventilação, e as partículas que se agregaram às geometrias do modelo, excluindo os ocupantes. Para o modelo 1, a comparação dos resultados dos 4 regimes de respiração simulados encontra-se ilustrada nos gráficos das Figuras 72 e 73.

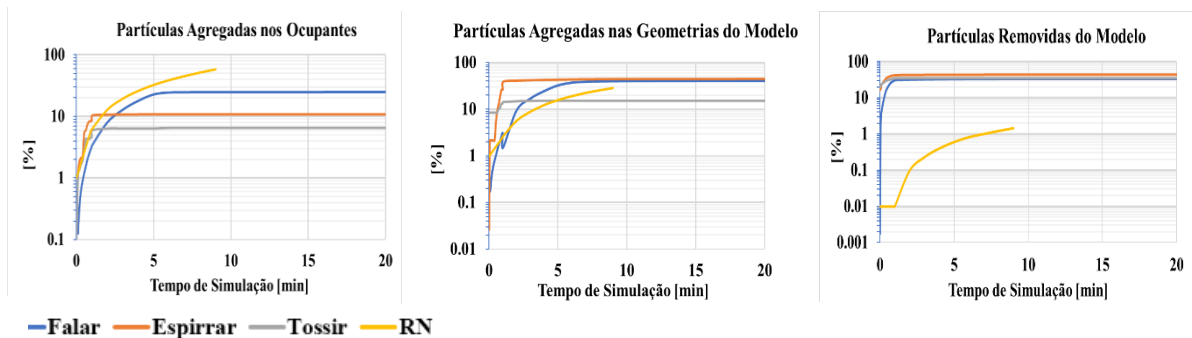


Figura 72. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 1

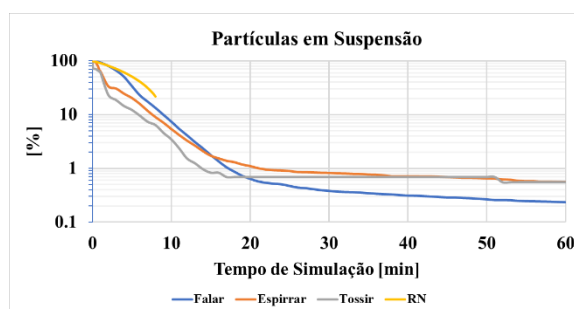


Figura 73. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 1: Parte 2

Ao contrário dos gráficos até agora apresentados, na comparação dos 4 regimes de respiração, para as conclusões observadas na Figura 72 apenas se apresentou os resultados obtidos até 20 minutos da simulação, uma vez que desse instante até aos 60 minutos, os resultados permaneceram constantes.

O que se observou dos gráficos da Figura 72 é que na simulação de falar os ocupantes ficaram mais infetados ( $\approx 25\%$ ). Na simulação de espirrar, o sistema de ventilação foi mais eficiente ao nível da remoção de partículas ( $\approx 44\%$ ).

Não obstante, também na simulação de espirrar se observou que este foi o caso onde as partículas se encontravam suspensas em maior número no final da simulação, ainda que a percentagem seja praticamente residual, e, por conseguinte, desprezável.

Através da comparação destes gráficos, é novamente possível realçar o facto de a ferramenta ainda estar numa fase inicial de desenvolvimento, onde no gráfico da percentagem de partículas agregadas às geometrias se retirou a conclusão de em qual dos regimes de respiração as partículas mais se agregaram às superfícies (*espirrar*  $\approx 46\%$ ).

No entanto, tal como se referiu em 5.5.1.5, não foi possível identificar qual a área específica de contágio, onde essa seria a principal conclusão a retirar deste estudo na ótica do utilizador, em relação à agregação de partículas nas geometrias do modelo.

Adicionalmente, outra conclusão a assinalar, mas que ainda não foi possível de obter através da ferramenta, seria a determinação exata das dimensões das partículas que se agregaram em cada superfície, uma vez que da física do movimento da partícula respiratória, é conhecido que as partículas de maior dimensão têm tendência a depositarem-se logo após a sua emissão, e o efeito contrário se verifica nas de menor dimensão, isto é, acabam por ficar suspensas mais tempo no ar [7] [8].

Por fim, é necessário referir que só a partir destes gráficos é que se começou a ter a noção que o fenómeno de escoamento de partículas numa situação de respiração normal não se encontrava totalmente descrito, uma vez que aos 10 minutos a simulação ainda apresenta uma evolução significativa, e como tal, as conclusões que se tiraram nesse instante de tempo não traduziram todo o processo de escoamento de partículas para uma situação de respiração normal.

Como foi referido em 5.3.4, a simulação dos casos de respiração normal apenas foi efetuada para 10 minutos devido há não aplicabilidade prática da simulação destes casos para os 60 minutos, no entanto, há espaço para num futuro trabalho avaliar a simulação deste regime de respiração por um período mais longo de tempo.

## 5.5.2. Resultados Modelo 2

Neste modelo foi preciso ter em consideração que não existia sistema de ventilação, e, por conseguinte, o gráfico da remoção das partículas não foi efetuado. As conclusões relevantes retiradas do modelo 2, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram ilustradas nos subcapítulos abaixo ilustrados.

### 5.5.2.1. Falar

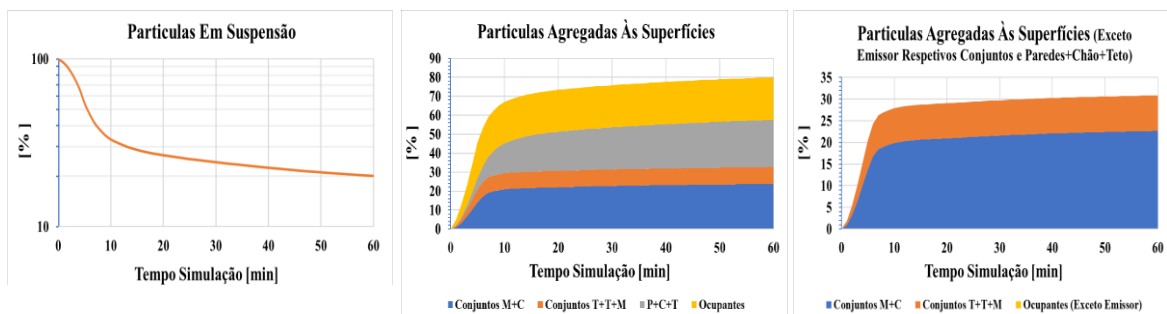


Figura 74. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 2

Como foi referido, no modelo 2, não havia extração de partículas da sala, e como tal, o somatório das partículas em suspensão com as partículas agregadas nas superfícies

representa o número total de partículas emitidas durante a simulação.

O que se concluiu deste regime de respiração foi que no final da simulação ainda se encontravam um elevado número de partículas em suspensão ( $\approx 20\%$ ), o que representava um potencial de risco de infeção para os ocupantes elevado, quando comparado, por exemplo, com o mesmo regime de respiração simulado no modelo 1, onde a percentagem de partículas em suspensão no final da simulação era inferior a 1%.

Ainda assim, a grande maioria das partículas agregou-se às superfícies ( $\approx 80\%$ ). No entanto, apenas uma parte muito residual ( $\lll 1\%$ ), se agregou aos ocupantes, que não o emissor, o que quer dizer que, novamente, à imagem do que se observou no modelo 1, a existir contágio dos ocupantes, seria por via indireta através do contacto com as secretárias presentes no modelo.

### 5.5.2.2. Espirrar

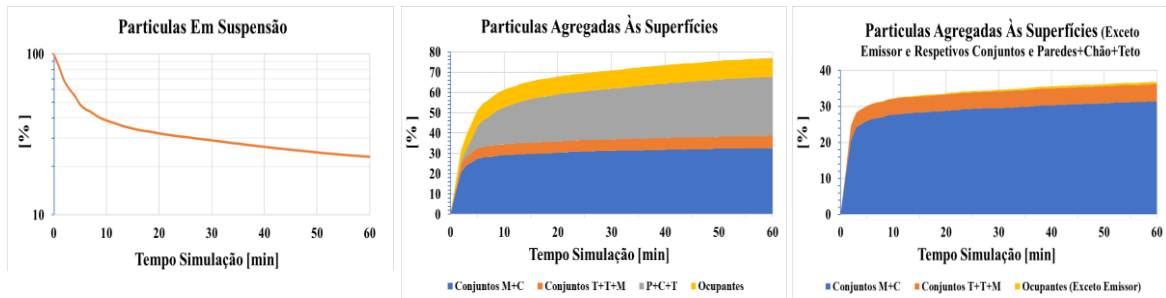


Figura 75. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 2

Na situação de espirro no modelo 2 o comportamento das partículas foi muito semelhante ao caso de falar, onde, neste caso as partículas em suspensão no final da simulação eram cerca de 22%, valor muito próximo ao registado na situação de falar, assim como o número de partículas agregadas nas superfícies, incluindo os ocupantes (maioritariamente, o emissor) ( $\approx 78\%$ ).

### 5.5.2.3. Tossir

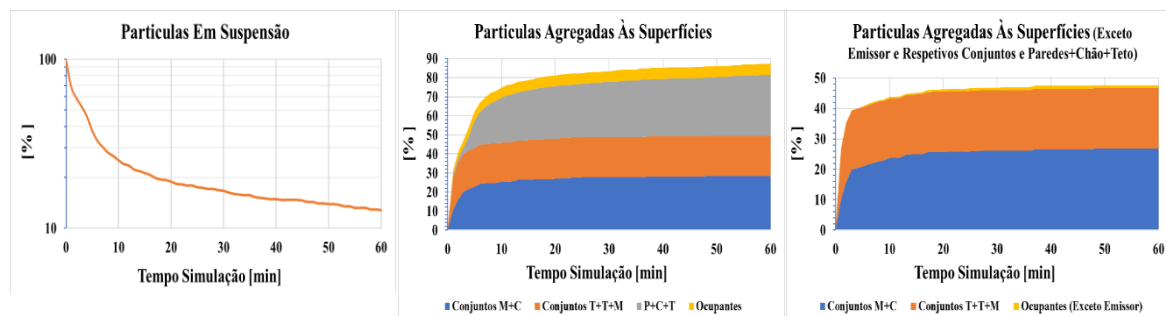


Figura 76. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 2

Na situação de tosse no modelo 2, o comportamento das partículas foi muito semelhante aos 2 regimes de respiração anteriormente analisados, onde, neste caso as partículas em suspensão no final da simulação eram cerca de 13%, 10 pontos percentuais abaixo do valor registado na situação de falar e espirrar, e, por conseguinte, uma vez não existia sistema de ventilação no modelo, o restante número de partículas emitidas na simulação agregou-se às superfícies da sala ( $\approx 87\%$ ).

Tal como nos outros 2 regimes, e no modelo 1, manteve-se a impossibilidade de concluir acerca de quais as áreas de contágio no modelo, pelas razões elencadas em 5.5.1.5 e 5.5.1.6.

#### 5.5.2.4. Respiração Normal

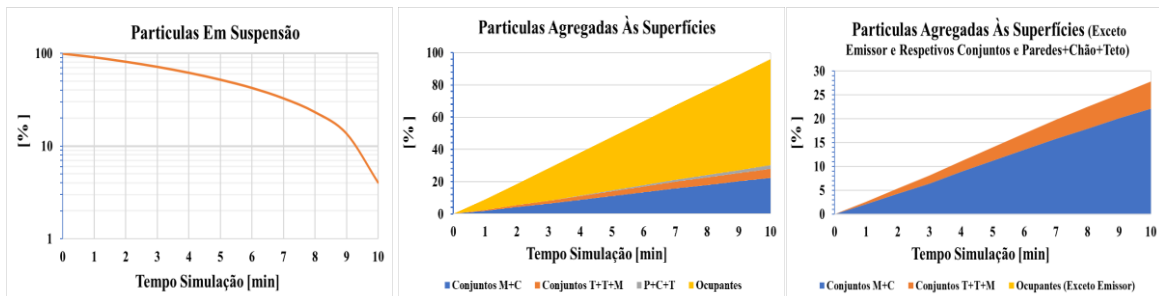


Figura 77. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 2

No caso da simulação em que o ocupante respirava normalmente no modelo 2 observou-se que a percentagem de partículas em suspensão no final da simulação era cerca de 4%, ainda com tendência de descida, sendo este o caso onde uma menor percentagem de partículas ainda se encontrava suspensa no final da simulação, para o modelo 2.

Por oposição, a grande maioria das partículas encontrava-se agregada às superfícies ( $> 90\%$ ), no final da simulação, onde a maioria das partículas se alojou no ocupante emissor, isto se se comparar os 2 gráficos mais à direita da Figura 77.

#### 5.5.2.5. Comparação dos 4 Regimes de Respiração Simulados

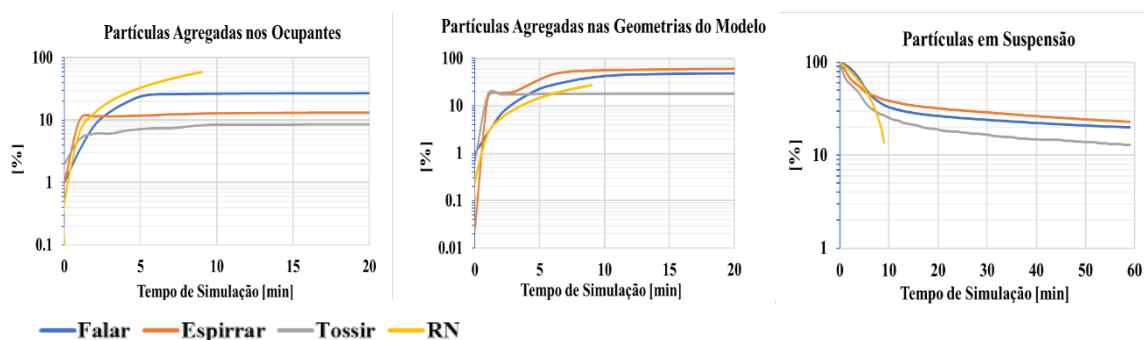


Figura 78. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 2

Ao compararem-se todos os regimes de respiração simulados no modelo 2, verificou-se que o escoamento de partículas se processou da mesma maneira em cada um desses casos, ou seja, a maioria das partículas, em todos os casos, agregou-se às superfícies do modelo, e a restante fração, na mesma proporção, ou se agregou nos ocupantes, e como se analisou individualmente em cada um dos casos, principalmente no ocupante emissor, ou ainda permanecia suspensa no ar no fim da simulação.

Foi possível verificar que o caso onde os ocupantes ficaram mais infectados (maioritariamente o ocupante emissor), foi a situação de falar ( $\approx 23\%$ ). O caso onde a percentagem de partículas ainda suspensa no ar no fim da simulação, foi mais elevada, foi o caso de espirro ( $\approx 22\%$ ).

### 5.5.3. Resultados Modelo 3

As conclusões relevantes retiradas do modelo 3, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram nos subcapítulos abaixo ilustrados.

#### 5.5.3.1. Falar

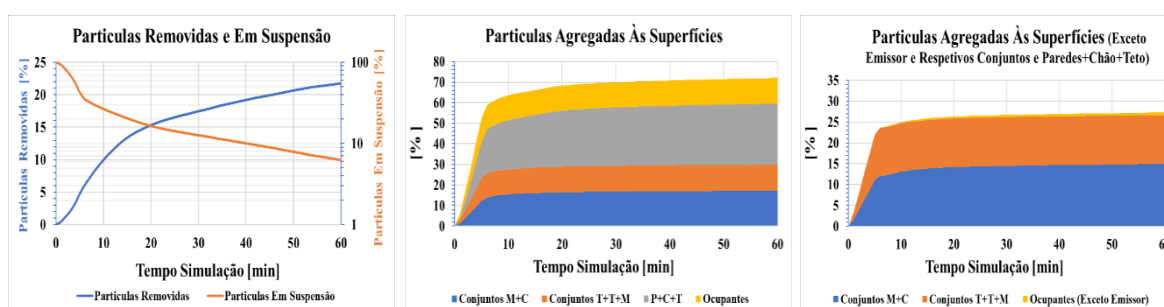


Figura 79. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 3

Na simulação em que o ocupante falava no modelo 3, conseguiu-se concluir que cerca de 22% das partículas foram removidas através do sistema de ventilação implementado no teto. Ainda assim, valor inferior ao que se verificou no modelo 1, para a mesma situação, onde a remoção de partículas foi na ordem dos 30%. Neste caso (modelo 1), o sistema de ventilação era do tipo UFAD (*Under Floor Air Distribution*).

No fim da simulação, cerca de 7% das partículas inicialmente emitidas ainda se encontravam suspensas no ar, valor superior ao obtido no caso análogo no modelo 1 ( $<1\%$ ). Tal como no modelo 1 e 2, por comparação dos gráficos mais à direita da Figura 79, verificou-se que o contágio dos ocupantes, que não o emissor, só ocorreria por via indireta, pelas razões elencadas nos anteriores modelos.

### 5.5.3.2. Espirrar

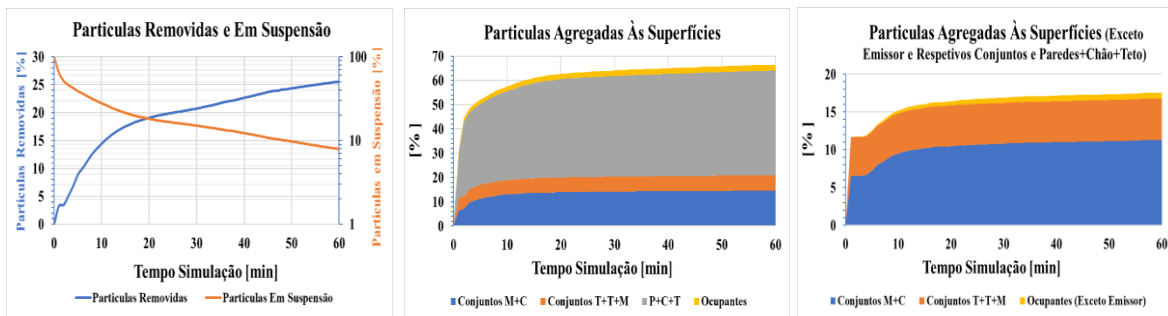


Figura 80. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 3

No caso em que o ocupante espirrava no modelo 3, os resultados obtidos foram muito semelhantes aos registados na simulação de falar, em que a percentagem de partículas removidas do modelo no final da simulação era cerca de 26%, superior ao obtido na simulação de falar ( $\approx 22\%$ ).

Já a percentagem de partículas suspensa no ar foi muito semelhante à registada no caso de falar ( $\approx 8\%$ ). Comparando esta fração com a obtida no caso análogo do modelo 1, que também continha um sistema de ventilação, esta percentagem era superior ( $<1\%$  no modelo 1). Nesta simulação, a possibilidade de contágio dos ocupantes, apenas por via indireta, manteve-se, à imagem do ocorrido nos modelos 1 e 2.

### 5.5.3.3. Tossir

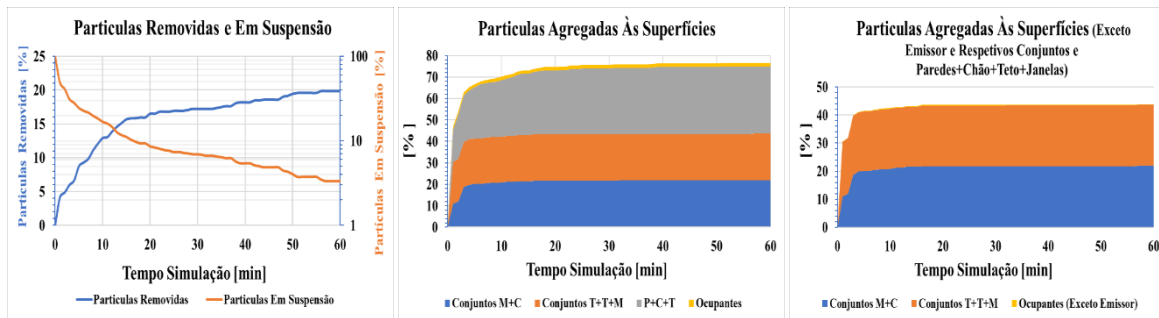


Figura 81. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 3

No caso em que o ocupante tossia no modelo 3, os resultados obtidos foram muito semelhantes aos registados nas 2 simulações anteriormente analisadas em que a percentagem de partículas removidas do modelo no final da simulação era cerca de 20%, inferior à percentagem obtida nos 2 anteriores casos (22 e 26%, respetivamente).

Não obstante, a percentagem registada de partículas suspensas no ar ( $\approx 4\%$ ), foi inferior à registada nos casos de falar ( $\approx 8\%$ ) e de espirrar (7%). A possibilidade de infeção dos ocupantes, apenas por via indireta, manteve-se neste caso, pelas razões elencadas em 5.5.1.5 e 5.5.1.6.

### 5.5.3.4. Respiração Normal

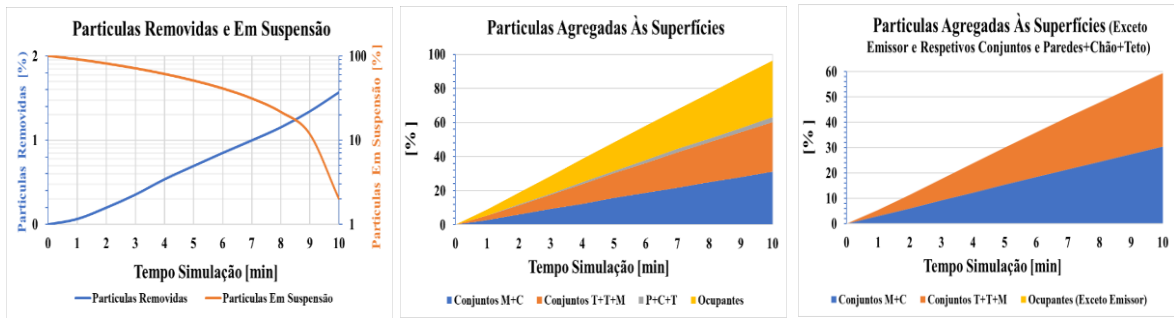


Figura 82. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 3

Na simulação em que o ocupante respira normalmente, apenas 2% das partículas emitidas foram removidas do modelo. Este foi o caso para o modelo 3 onde o sistema de ventilação foi menos eficiente no processo de remoção de partículas, ainda que no gráfico mais à esquerda da Figura 82, se tenha observado que esta percentagem estava em crescendo, ou seja, seria provável que se se simulasse por um período mais longo, as partículas seriam removidas em maior percentagem.

Não obstante, este caso apresentou uma percentagem de partículas suspensas no final da simulação inferior ao observado nos anteriores casos ( $\approx 2\%$ ). A possibilidade de infeção dos ocupantes, apenas por via indireta, manteve-se neste caso, pelas razões elencadas em 5.5.1.5 e em 5.5.1.6.

### 5.5.3.5. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados

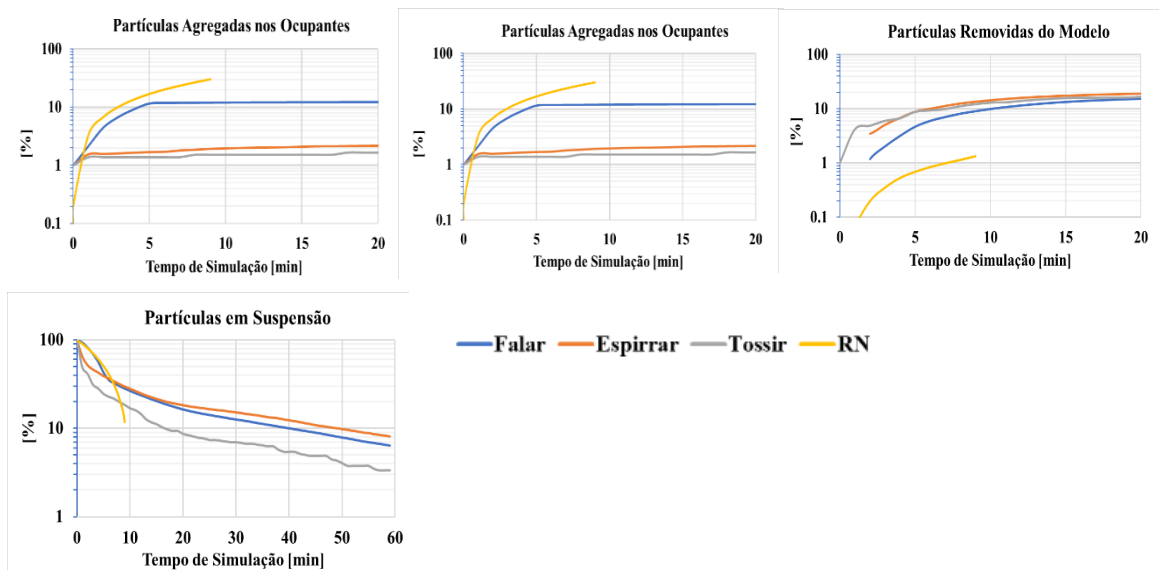


Figura 83. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 3

Comparando os resultados obtidos nos 4 regimes de respiração para o modelo 3, à imagem do que se observou nos outros 2 modelos, excetuando na situação de respiração normal, o escoamento de partículas processou-se de forma semelhante em todos os casos.

Excetuando a situação de respiração normal, a situação de falar foi aquela onde as partículas mais infetaram os ocupantes (maioritariamente, o ocupante emissor), com uma percentagem de agregação das partículas nos ocupantes de cerca de 12%, ainda que este valor seja inferior ao maior valor de infeção direta nos ocupantes no modelo 1 (situação de falar  $\approx 20\%$ ).

De todos os casos simulados para o modelo 3, aquele onde o sistema de ventilação foi mais eficiente na remoção de partículas foi o caso de espirro, tal como verificado no modelo 1. No caso do modelo 3 a remoção de partículas no fim da simulação foi cerca de 26%. Não obstante, a situação onde as partículas ainda se encontravam suspensas no ar no final da simulação, em maior número, foi a de espirro ( $\approx 8\%$ ).

#### 5.5.4. Resultados Modelo 4

Neste modelo, tal como no modelo 2, foi preciso ter em consideração que não existia um sistema de ventilação, e, por conseguinte, o gráfico da remoção das partículas não foi efetuado. As conclusões relevantes retiradas do modelo 4, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram nos subcapítulos abaixo ilustrados.

##### 5.5.4.1. Falar

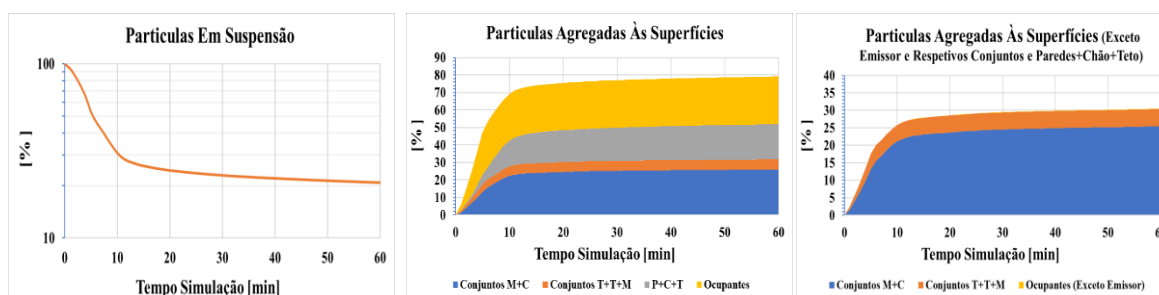


Figura 84. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 4

Para os casos do modelo 4, tal como no modelo 2, o somatório das partículas em suspensão com as partículas agregadas nas superfícies resultava no total de partículas emitidas na simulação.

No caso da simulação em que o ocupante falava no modelo 4, verificou-se que no fim da simulação a percentagem de partículas ainda suspensas no ar foi cerca de 20%,

valor muito próximo para o obtido na situação análoga do modelo 2, também sem ventilação ( $\approx 20\%$ ).

Ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 84, continuou-se a observar a tendência verificada nos anteriores modelos relativamente à infeção dos ocupantes, que não o emissor, isto é, observou-se que a ocorrer contágio dos ocupantes, seria sempre por via indireta, pelas razões mencionadas nas análises dos anteriores modelos.

### 5.5.4.2. Espirrar

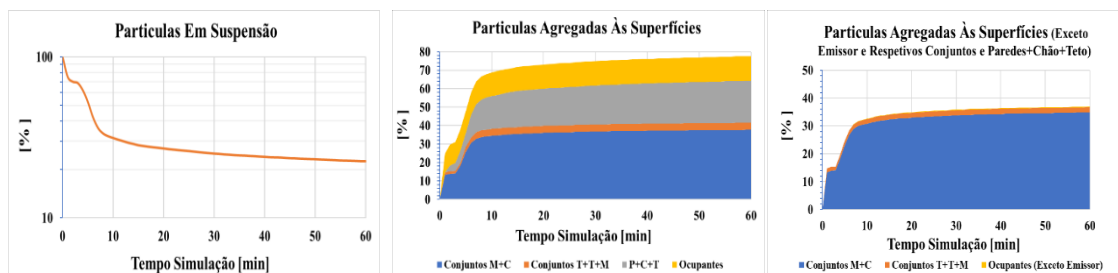


Figura 85. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 4

Na situação em que o ocupante espirrava no modelo 4, o comportamento das partículas foi muito semelhante ao caso de falar, onde, neste caso as partículas em suspensão no final da simulação eram cerca de 22%, valor muito próximo ao registado na situação de falar, assim como o número de partículas agregadas nas superfícies, incluindo os ocupantes (maioritariamente o emissor) ( $\approx 78\%$ ). Ambas as percentagens estiveram muito próximas do que se obteve no caso análogo para o modelo 2, também sem sistema de ventilação.

### 5.5.4.3. Tossir

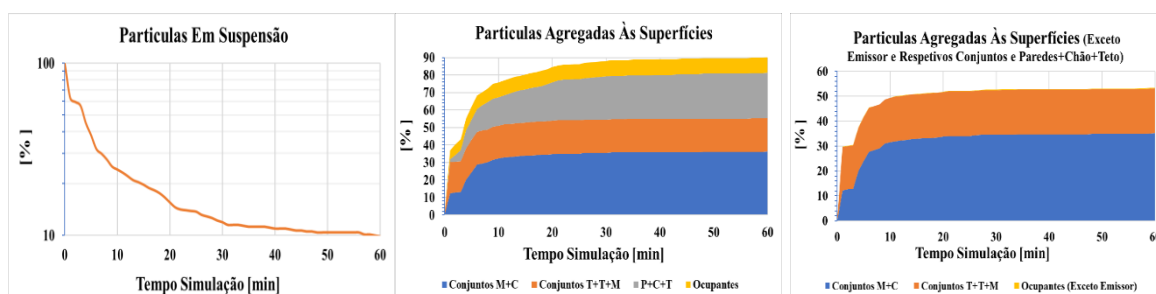


Figura 86. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 4

Na situação em que o ocupante tossia no modelo 4, o comportamento das partículas foi muito semelhante aos 2 regimes de respiração anteriormente analisados, onde, neste caso as partículas em suspensão no final da simulação eram cerca de 10%, cerca de metade do que foi registado nas duas situações anteriores, e, por conseguinte, uma vez não existia sistema de ventilação no modelo 4, o restante número de partículas

emitidas na simulação agregou-se às superfícies do modelo ( $\approx 90\%$ ).

Tal como nos 2 anteriores casos, também na situação em que o ocupante tossia se observou um comportamento semelhante para as partículas em relação à simulação análoga do modelo 2.

#### 5.5.4.4. Respiração Normal

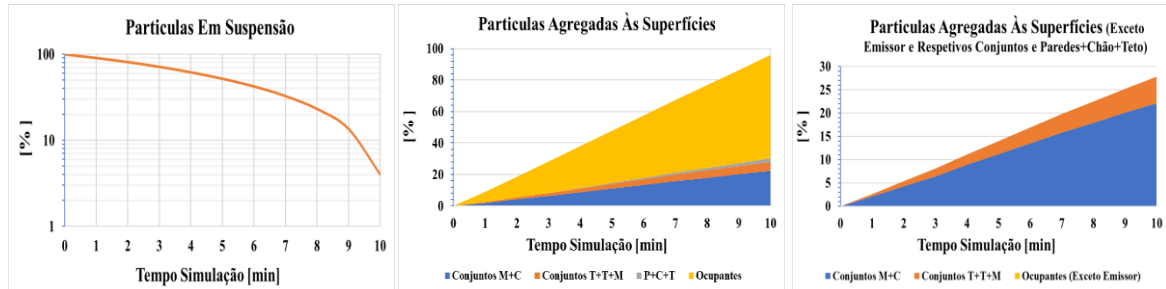


Figura 87. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 4

No caso em que o ocupante respirava normalmente no modelo 4, observou-se que a percentagem de partículas em suspensão no final da simulação foi cerca de 4%, ainda com tendência de descida, sendo este o caso onde uma menor percentagem de partículas ainda se encontrava suspensa no final da simulação, para o modelo 4.

Por oposição, a grande maioria das partículas encontrava-se agregada às superfícies ( $> 90\%$ ) no final da simulação, onde a maioria das partículas se alojou no ocupante emissor, isto se se comparar os 2 gráficos mais à direita da Figura 87. É de referir que tal como nos 3 anteriores casos, também na situação de respiração normal se observou um comportamento semelhante para as partículas em relação à simulação análoga do modelo 2.

#### 5.5.4.5. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados

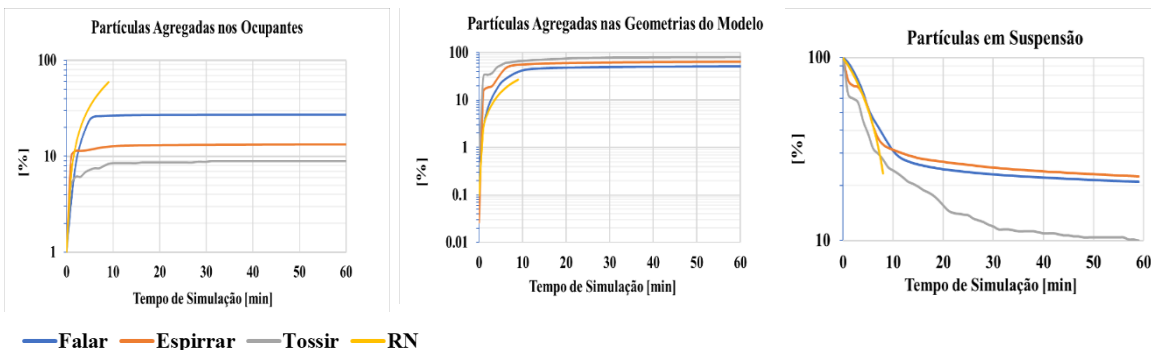


Figura 88. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 4

Ao compararem-se todos os regimes de respiração simulados no modelo 4, verificou-se que o escoamento de partículas se processou da mesma maneira em cada um desses casos,

ou seja, a maioria das partículas, em todos os casos, agregou-se às superfícies do modelo, e a restante fração, na mesma proporção, ou se agregou nos ocupantes, e como se analisou individualmente em cada um dos casos, principalmente no ocupante emissor, ou ainda permanecia suspensa no ar no fim da simulação.

Foi possível verificar que o caso onde os ocupantes ficaram mais infectados (maioritariamente o ocupante emissor), excetuando a situação de respiração normal, foi a situação de falar ( $\approx 23\%$ ). A situação onde a percentagem de partículas ainda suspensas no ar no fim da simulação, foi mais elevada, foi o caso de espirro ( $\approx 22\%$ ).

### 5.5.5. Resultados Modelo 5

As conclusões relevantes retiradas do modelo 5, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram nos subcapítulos abaixo ilustrados.

#### 5.5.5.1. Falar

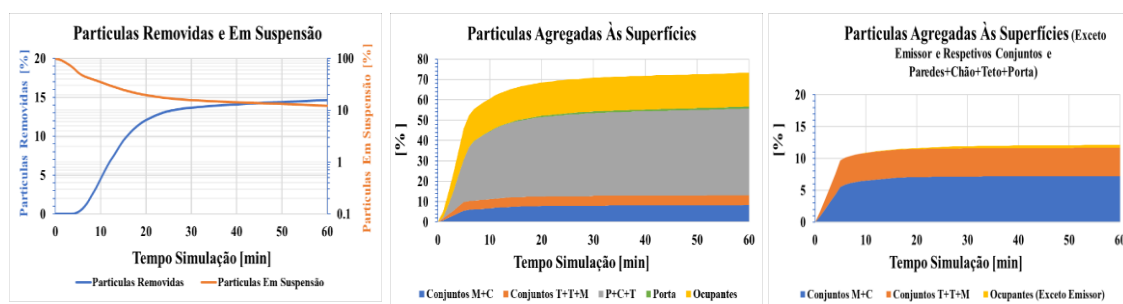


Figura 89. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 5

É de referir que este foi o primeiro modelo onde também se considerou nas conclusões as partículas que ficaram agregadas na porta, já que o modelo 5 foi o primeiro modelo onde se simulou um sistema de ventilação natural.

Neste caso as partículas saíam pela porta e entravam pelas janelas, tal como referido em 5.4.5. A mesma situação descrita se observou nos modelos 6,7 e 8.

Através dos gráficos da Figura 89 foi possível verificar que no final da simulação em que o ocupante falava no modelo 5, cerca de 10% das partículas ainda se encontravam suspensas na sala, e cerca de 15% das partículas emitidas tinham sido removidas da sala, sendo este, até ao momento, o caso onde se tinha registado menor remoção de partículas, quando comparado com os casos análogos dos anteriores modelos.

Também neste caso, à imagem do que se tinha verificado nos outros modelos, ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 89, verificou-se que a infeção dos

ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, pelas razões mencionadas em 5.5.1.5 e 5.5.1.6.

### 5.5.5.2. Espirrar

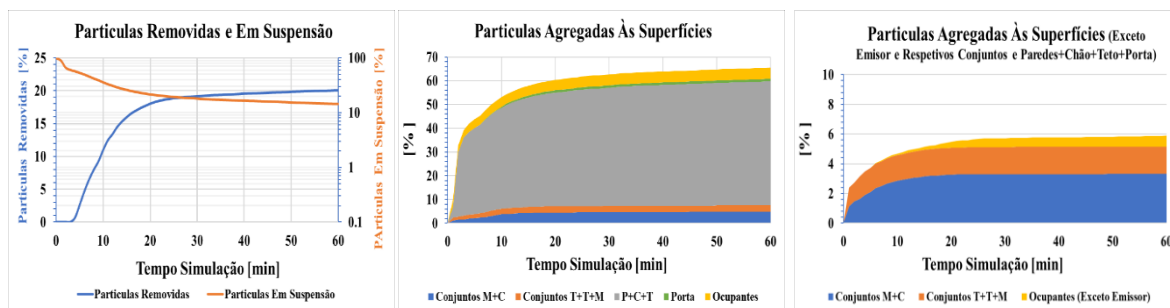


Figura 90. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 5

O escoamento de partículas no caso de espirro no modelo 5 é muito semelhante ao que se verificou no caso de falar, não obstante, a percentagem de partículas removidas da sala no final do modelo ser superior ( $\approx 20\%$ ).

No entanto, quando comparado com os casos análogos do modelo 1 e modelo 3, que possuíam sistemas de ventilação mecânicos, a remoção de partículas foi inferior (34% e 26%, para modelos 1 e 3, respetivamente).

Em relação à percentagem de partículas ainda suspensas no ar no final da simulação, registou-se um valor de cerca de 12% para o caso de espirro no modelo 5. Outro fenómeno que não foi referido no caso anterior, mas que se voltou a repetir neste caso e que importa salientar, é o facto de no modelo 5 a grande maioria das partículas emitidas terem ficado agregadas ao conjunto “P+C+T” ( $\approx 50\%$ ).

Este foi um fenómeno que foi confirmado através do que se observou no gráfico mais à direita da Figura 90, onde, sem considerar este conjunto, as partículas agregadas no ocupante emissor, e os respetivos conjuntos em seu redor, se verificou uma menor percentagem de partículas agregadas às superfícies dos conjuntos “M+C” e “T+T+M”, ( $\approx 6\%$ ) quando comparado com o gráfico análogo para os modelos já analisados. (25%, 38%, 17% e 38%, para modelos 1, 2, 3 e 4, respetivamente).

Mais uma vez, mesmo obtendo este dado, não foi possível inferir, com exatidão, o nível de risco de contágio dos ocupantes, pelas razões elencadas em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, relativamente à inaptidão da ferramenta em determinar qual a área específica de contágio de cada um dos conjuntos mencionados nos gráficos.

### 5.5.5.3. Tossir

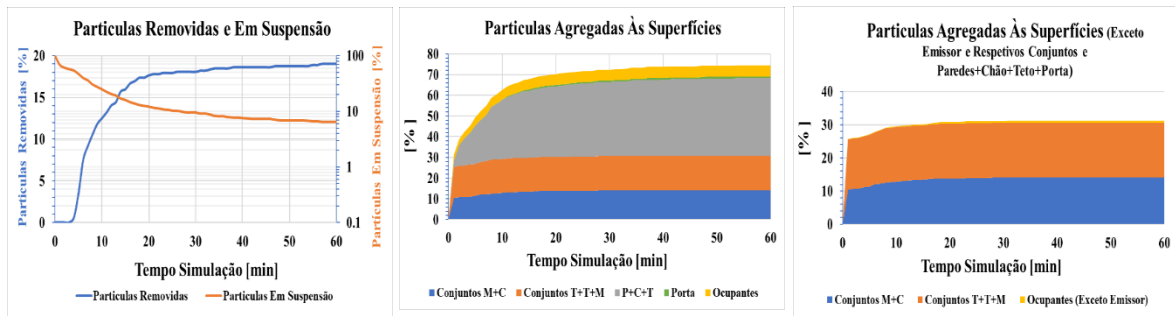


Figura 91. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 5

O escoamento das partículas do caso de tosse no modelo 5 foi muito semelhante aos 2 anteriores casos, onde, no final da simulação cerca de 8% das partículas ainda se encontravam suspensas no ar, um valor inferior ao registado nos 2 anteriores casos ( $\approx$  10% e 12%, para falar e espirrar, respetivamente).

Também se observou que cerca de 18% das partículas emitidas foram removidas pelo sistema de ventilação. Este valor foi inferior ao registado nos casos análogos para os modelos 1 e 3, que também possuíam sistema de ventilação, neste caso, mecânico. (34% e 20%, para modelos 1 e 3, respetivamente).

Tal como nos outros 2 casos do modelo 5, uma grande fração das partículas ( $\approx$  35%) ficou agregada ao conjunto “P+C+T”, algo que foi possível concluir analisando os 2 gráficos mais à direita da Figura 91.

### 5.5.5.4. Respiração Normal

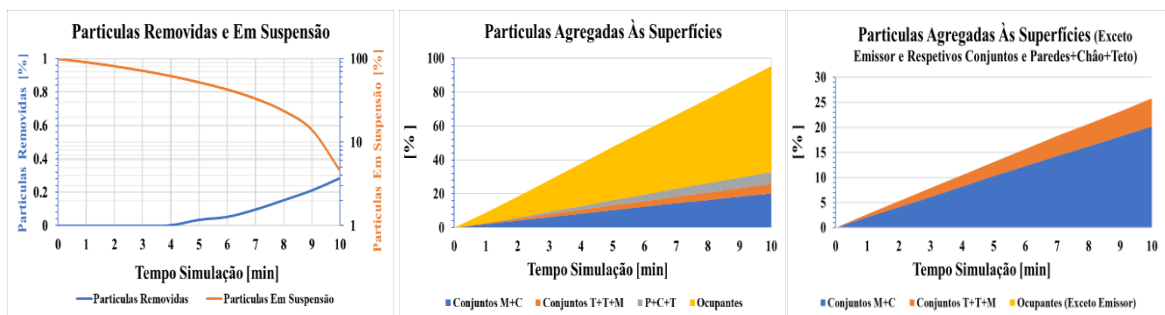


Figura 92. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal- Modelo 5

No caso em que o ocupante respirava normalmente no modelo 5, foi possível concluir que no fim da simulação, cerca de 5% das partículas ainda se encontravam suspensas no ar, um valor inferior ao que se registou nos casos anteriores para o mesmo modelo.

Por oposição, a maioria das partículas agregou-se às superfícies ( $\approx$  95%), e uma larga porção deste conjunto agregou-se no ocupante emissor ( $\approx$  65%), algo que foi

possível observar comparando os 2 gráficos mais à direita da Figura 92. Este foi um fenómeno verificado nos casos análogos dos modelos já analisados.

Em relação à remoção de partículas, foi possível verificar que menos de 1% das partículas foi removida do modelo, sendo este, de todos os casos analisados até ao momento, aquele em que se tinha registado uma menor eficiência do sistema de ventilação na remoção de partículas do modelo.

#### 5.5.5.5. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados

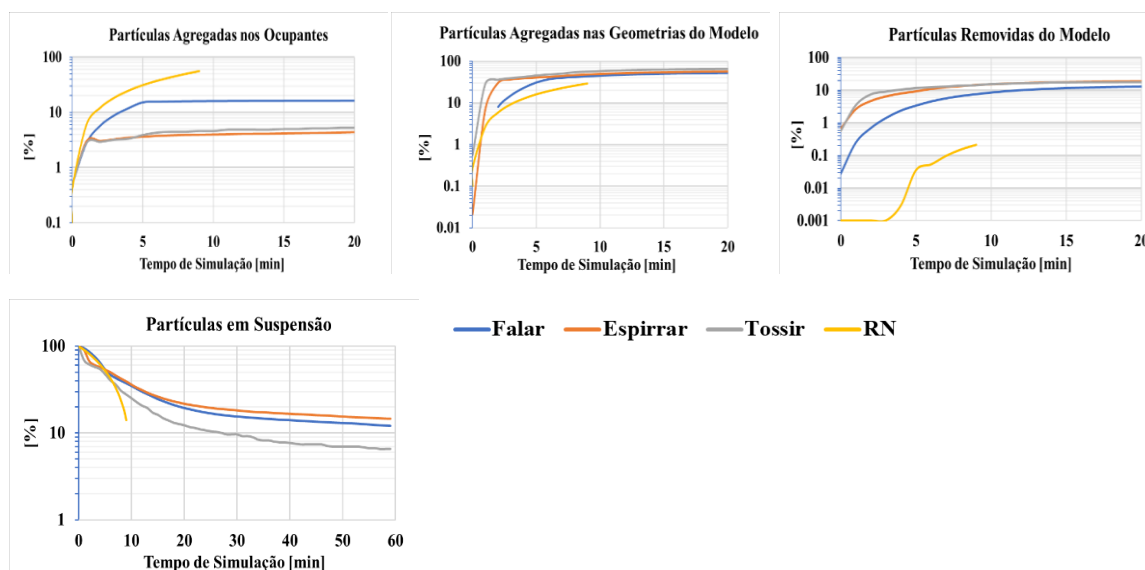


Figura 93. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 5

Comparando as simulações realizadas para o modelo 5, à imagem do que ocorreu nos outros modelos, a dispersão de partículas foi semelhante em todos os regimes de respiração, exceto no de respiração normal, pelas razões já elencadas nas análises dos outros modelos.

Verificou-se que o caso onde o ocupante falava, tal como nos outros modelos, foi aquele onde os ocupantes ficaram mais infetados (maioritariamente, o ocupante emissor) ( $\approx 18\%$ ), um valor próximo do registado nos modelos 1 e 3 ( $\approx 20\%$  e  $15\%$ , respetivamente).

Neste modelo, em geral, no fim da simulação houve uma maior percentagem de partículas ainda suspensas no ar, quando comparado com os modelos 1 e 3, em que o caso de espirro foi aquele onde se observou uma maior percentagem de partículas ainda suspensas no ar ( $\approx 12\%$ ), algo que se verificou também nos modelos 1 e 3.

Em termos de remoção de partículas, observou-se que o caso de espirro, tal como verificado nos modelos 1 e 3, foi aquele onde o sistema de ventilação foi mais eficiente ( $\approx 20\%$  partículas removidas).

Quando comparado com os casos análogos do modelo 1 e 3, verificou-se que o sistema de ventilação do modelo 5 foi menos eficiente na remoção de partículas ( $\approx$  43% e 26% partículas removidas, respetivamente).

Tal como referido nas análises do subcapítulo 5.4.5, em geral, este foi o modelo com ventilação onde, até ao momento, se tinha verificado uma menor eficiência de remoção das partículas por parte do sistema de ventilação.

### 5.5.6. Resultados Modelo 6

As conclusões relevantes retiradas do modelo 6, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram nos subcapítulos abaixo ilustrados.

#### 5.5.6.1. Falar

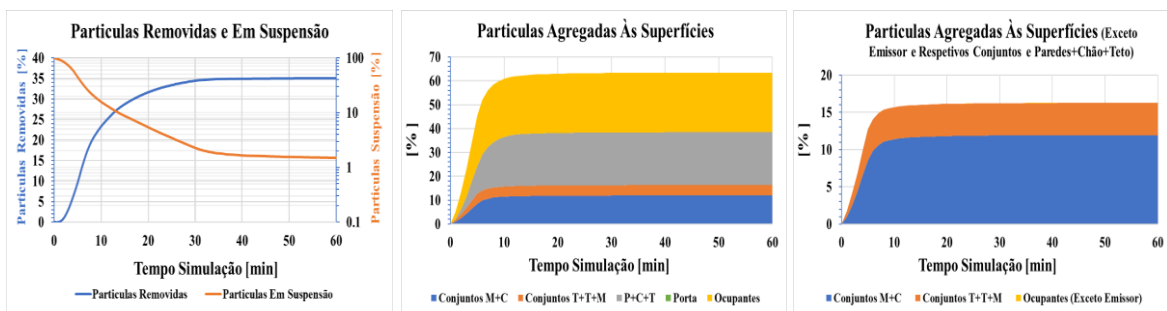


Figura 94. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 6

No final da simulação do caso em que o ocupante falava no modelo 6, observou-se que cerca de 35% das partículas tinham sido removidas. Comparando este resultado com o obtido no caso análogo do modelo 5, que também possuía um sistema de ventilação natural, a eficiência de remoção de partículas aumentou. ( $\approx$  15% partículas removidas do modelo 5).

Constatou-se também que a percentagem de partículas suspensas no ar no final da simulação era cerca de 2%, valor inferior ao que se obteve no mesmo caso para o modelo 5 ( $\approx$  10%). Ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 94, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, pelas razões já mencionadas em 5.5.1.5 e em 5.5.1.6.

### 5.5.6.2. Espirrar

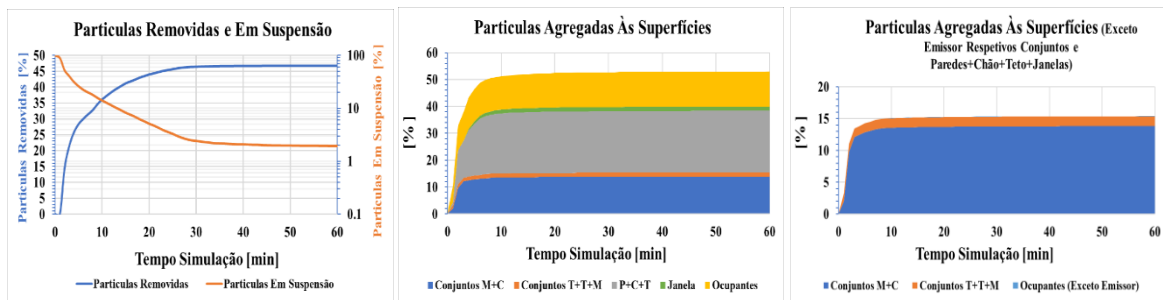


Figura 95. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 6

O escoamento de partículas no caso de espirro no modelo 6 foi muito semelhante ao que se verificou no caso de falar, não obstante, a percentagem de partículas removidas da sala no final do modelo ser superior ( $\approx 47\%$ ), sendo este, o maior valor até então registado na análise de resultados.

Em relação à percentagem de partículas ainda suspensas no ar no final da simulação, registou-se um valor de cerca de 2%, valor próximo do obtido na situação de falar, e inferior ao observado no caso análogo para o modelo 5 ( $\approx 12\%$ ). Neste caso, ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 95, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, pelas razões já mencionadas em 5.5.1.5 e em 5.5.1.6.

Foi ainda possível verificar no gráfico ao centro da Figura 95, que na simulação de espirro para o modelo 6, é evidenciada uma percentagem de partículas que se agregou nas janelas, um elemento que ainda não tinha sido referido nas análises de resultados, não obstante de se ter registado uma percentagem reduzida ( $\approx 1,6\%$ ), e tal como nos outros elementos, não foi possível perceber, exatamente, a área de contágio da janela.

### 5.5.6.3. Tossir

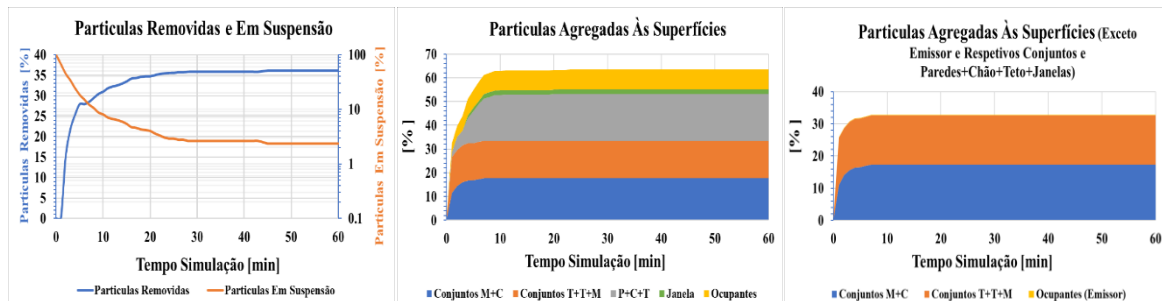


Figura 96. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 6

O escoamento das partículas do caso de tosse no modelo 6, foi muito semelhante aos 2 anteriores casos, onde, no final da simulação cerca de 3% das partículas ainda estavam suspensas no ar, um valor próximo do registado nos 2 anteriores casos ( $\approx 2\%$  para falar e espirrar, respetivamente). Também se observou que cerca de 37% das partículas emitidas foram removidas pelo sistema de ventilação. Este valor foi inferior ao registado no caso de espirro (47%), mas superior ao registado no simulação de falar ( $\approx 35\%$ ). Ao comparar-se este dado com o caso análogo do modelo 5, verificou-se que houve um aumento da eficiência de remoção das partículas por parte do sistema de ventilação ( $\approx 18\%$  no caso análogo do modelo 5).

Neste caso, ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 96, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, pelas razões já mencionadas em 5.5.1.5 e em 5.5.1.6., e tal como observado no caso de espirrar, foi novamente evidente que uma porção das partículas se agregou às janelas ( $\approx 2\%$ ), ainda que não tivesse sido possível concluir o potencial de risco de contágio nestas regiões.

#### 5.5.6.4. Respiração Normal

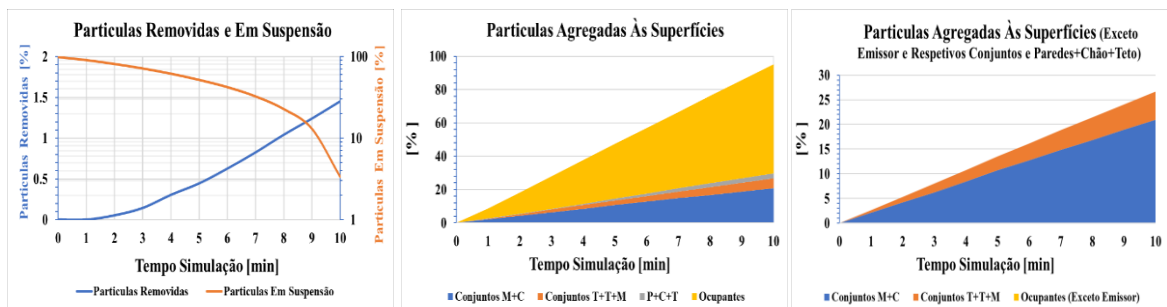


Figura 97. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 6

No caso em que o ocupante respirava normalmente no modelo 6, foi possível concluir que no fim da simulação, cerca de 4% das partículas ainda se encontravam suspensas no ar, um valor próximo do que se registou nos casos anteriores para o mesmo modelo, e no caso análogo do modelo 5 ( $\approx 5\%$ ).

Por oposição, a maioria das partículas agregou-se às superfícies ( $\approx 95\%$ ), onde a maioria das partículas se agregou no ocupante emissor ( $\approx 65\%$ ), algo que foi possível verificar comparando os 2 gráficos mais à direita da Figura 97. Este foi um fenómeno verificado nos casos análogos dos modelos já analisados.

Em relação à remoção de partículas, foi possível verificar que menos de 1,5% das partículas foi removida na sala, valor próximo ao registrado no caso análogo do modelo 5 (1%).

#### 5.5.6.5. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados

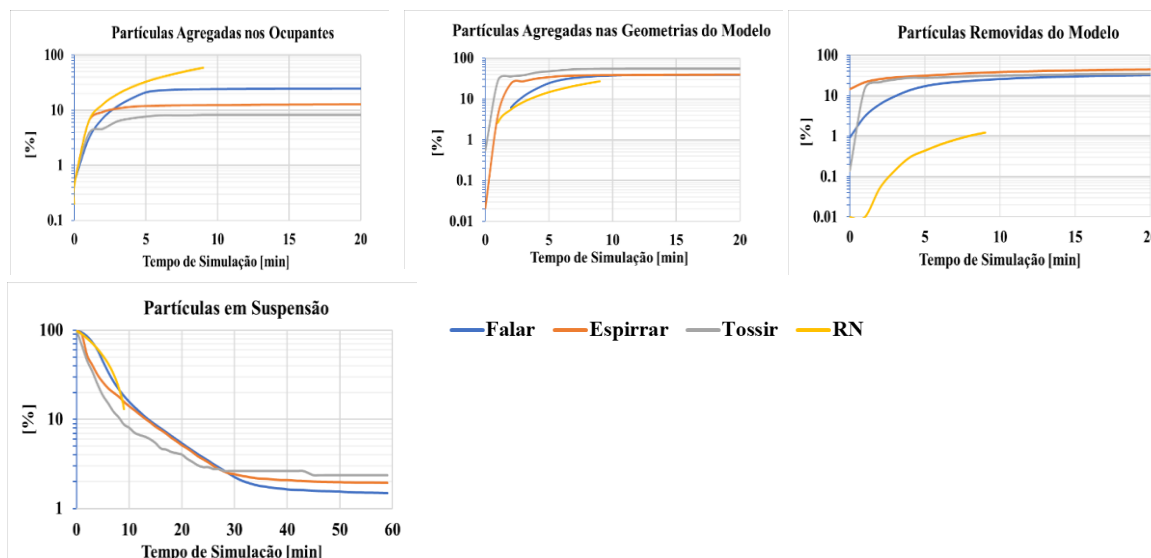


Figura 98. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 6

Comparando as simulações realizadas para o modelo 6, à imagem do que ocorreu nos outros modelos, o escoamento de partículas foi semelhante em todos os regimes de respiração, exceto no de respiração normal, pelas razões já elencadas nas análises dos outros modelos.

Verificou-se que o caso em que o emissor falava, tal como nos outros modelos, foi aquele onde os ocupantes ficaram mais infetados (maioritariamente, o ocupante emissor) ( $\approx 25\%$ ), um valor superior ao registrado no modelo 5 ( $\approx 18\%$ ). Neste modelo, em geral, no fim da simulação houve uma menor percentagem de partículas ainda suspensas no ar, quando comparado com o modelo 5.

Em relação à eficiência de remoção de partículas, verificou-se novamente, à imagem do que tinha observado nos modelos anteriores, que na situação de espirro, o sistema de ventilação foi mais eficiente, tendo sido removidas cerca de 43% das partículas emitidas nesta simulação.

Fazendo uma análise ainda mais global, tendo em conta os modelos 1 e 3, que também possuíam sistema de ventilação (mecânico), verificou-se que para o melhor caso de remoção de partículas (espirrar), o sistema de ventilação do modelo 6 (natural), mostrou-se ser mais eficiente do que o do modelo 3 ( $\approx 26\%$  de partículas removidas no

caso análogo), e com uma eficiência equiparável ao sistema de ventilação do modelo 1 ( $\approx 44\%$  de partículas removidas no caso análogo).

### 5.5.7. Resultados Modelo 7

As conclusões relevantes retiradas do modelo 7, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram ilustradas nos subcapítulos abaixo ilustrados.

#### 5.5.7.1. Falar

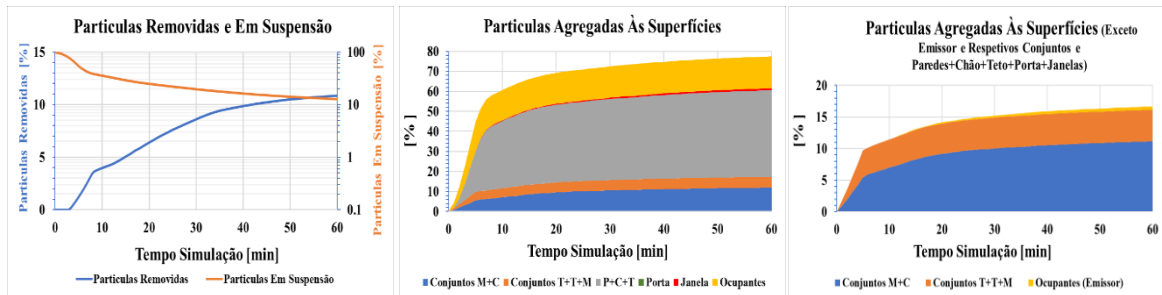


Figura 99. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 7

No final da simulação em que o ocupante falava no modelo 7, observou-se que cerca de 11% das partículas tinham sido removidas, valor inferior ao que se tinha verificado no modelo 6 ( $\approx 35\%$ ), e no modelo 5 ( $\approx 15\%$ ).

Constatou-se também que a percentagem de partículas suspensas no ar no final da simulação era cerca de 15%, valor superior ao registado no modelo 6 ( $\approx 2\%$ ), e semelhante ao registado no modelo 5.

Ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 99, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, pelas razões já mencionadas. Concluiu-se também da comparação destes 2 gráficos, a verificação do mesmo fenómeno já observado no modelo 5, principalmente observado nos casos de falar e de espirrar, onde a maioria das partículas emitidas ( $>50\%$ ), se alojou no conjunto “P+C+T”.

#### 5.5.7.2. Espirrar

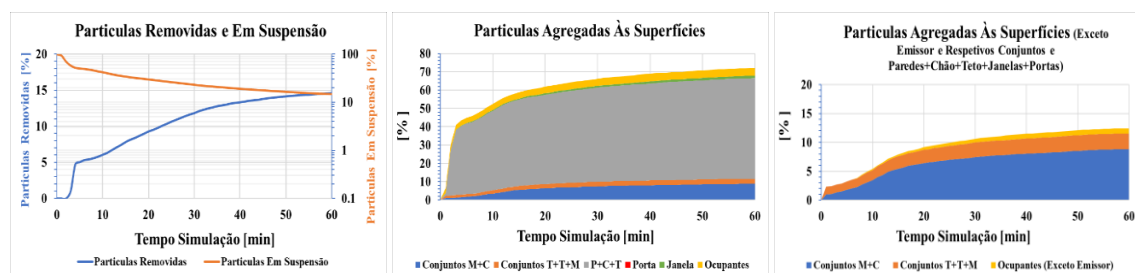


Figura 100. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 7

O escoamento de partículas no caso em que o ocupante espirrava no modelo 7, foi muito semelhante ao que se verificou no caso em que o ocupante falava, não obstante, a percentagem de partículas removidas da sala no final do modelo foi superior ( $\approx 14\%$ ).

Em relação à percentagem de partículas ainda suspensas no ar no final da simulação, registou-se um valor de cerca de 15%, valor superior ao obtido na situação de falar ( $\approx 11\%$ ), e nos casos análogos do modelo 5 ( $\approx 12\%$ ) e 6 ( $\approx 2\%$ ). Ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 100, verificou-se o mesmo fenómeno observado no caso de falar, e no modelo 5, onde a maioria das partículas ( $>50\%$ ), se agregou no conjunto “P+C+T”.

### 5.5.7.3. Tossir

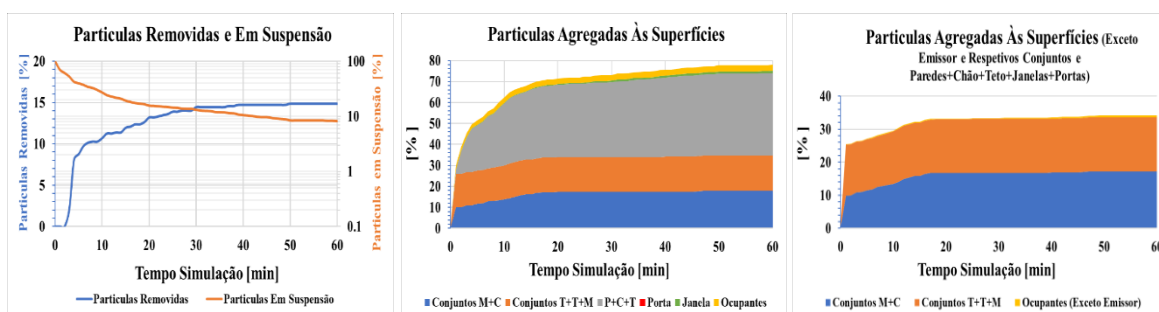


Figura 101. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 7

O escoamento das partículas do caso em que o ocupante tossia no modelo 7, foi muito semelhante aos 2 anteriores casos, onde, no final da simulação cerca de 10% das partículas ainda estavam suspensas no ar, um valor inferior ao registado nos 2 anteriores casos ( $\approx 15\%$  para falar e espirrar, respetivamente), e superior ao observado nos casos análogos dos modelos 5 e 6 ( $\approx 8\%$  e  $3\%$ , respetivamente).

Também se observou que cerca de 15% das partículas emitidas foram removidas pelo sistema de ventilação, valor próximo do registado na simulação de espirrar ( $\approx 14\%$ ), e ligeiramente superior ao observado no caso de falar ( $\approx 11\%$ ).

Quando comparado com os casos análogos do modelo 5 e 6, verificou-se que a eficiência de remoção das partículas por parte do sistema de ventilação foi inferior neste modelo ( $\approx 18\%$  e  $37\%$  de partículas removidas nos modelos 5 e 6, respetivamente).

Neste caso, ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 101, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, e continuou-se a observar, tal como nos 2 casos anteriores, a agregação de uma grande fração das partículas ao conjunto “P+C+T” ( $\approx 40\%$ ).

#### 5.5.7.4. Respiração Normal

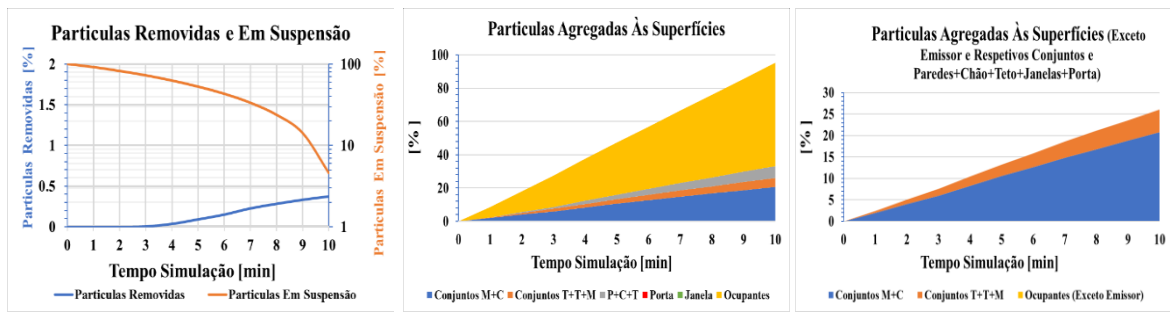


Figura 102. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 7

No caso em que o ocupante respirava normalmente no modelo 7, foi possível concluir que no fim da simulação, cerca de 5% das partículas ainda se encontravam suspensas no ar, um valor inferior ao que se registou nos casos anteriores para o mesmo modelo, mas próximo do observado nos casos análogos do modelo 5 e 6 ( $\approx 5\%$  e  $4\%$ , respetivamente).

Por oposição, a maioria das partículas agregou-se às superfícies ( $\approx 95\%$ ), 65% no ocupante emissor, algo que foi possível verificar comparando os 2 gráficos mais à direita da Figura 102. Este foi um fenómeno verificado nos casos análogos de todos os modelos já analisados.

Em relação à remoção de partículas, foi possível verificar que menos de 1% das partículas foram removidas na sala, sendo este, até ao momento, o caso de todos os já analisados onde o sistema de ventilação implementado foi menos eficiente.

### 5.5.7.5. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados

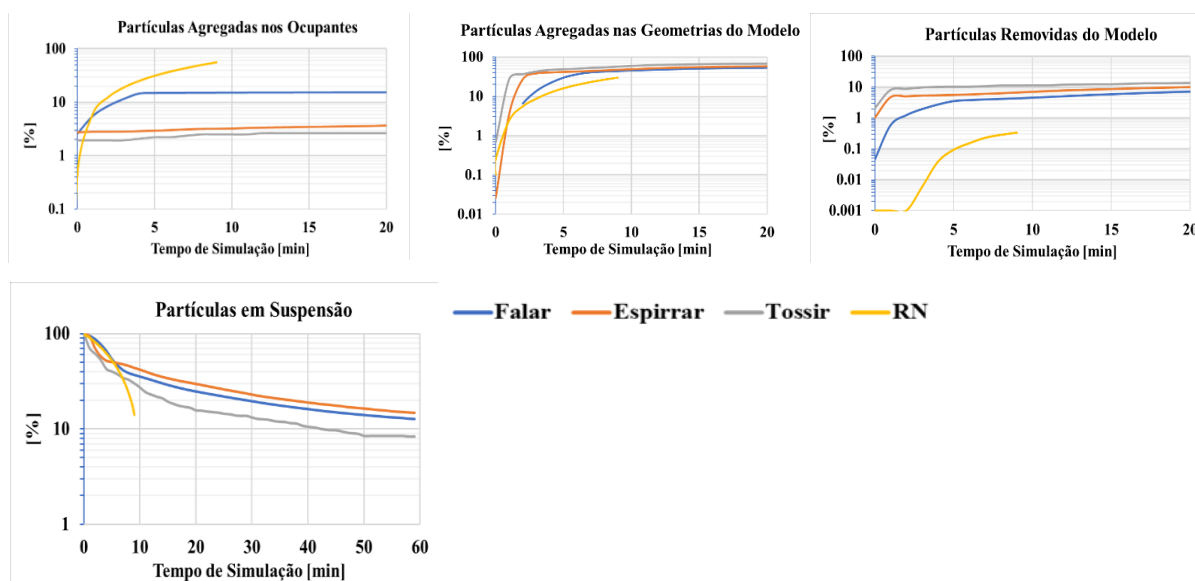


Figura 103. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 7

Comparando as simulações realizadas para o modelo 7, à imagem do que ocorreu nos outros modelos, o escoamento de partículas foi semelhante em todos os regimes de respiração, exceto no de respiração normal, pelas razões já elencadas nas análises dos outros modelos.

Verificou-se que o caso onde o ocupante falava, tal como nos outros modelos, foi aquele onde os ocupantes ficaram mais infetados (maioritariamente, o ocupante emissor) ( $\approx 15\%$ ), um valor inferior ao registado nos casos análogos dos modelos 5 e 6 ( $\approx 18\%$  e  $25\%$ , respetivamente).

Neste modelo, em geral, no fim da simulação houve uma maior percentagem de partículas ainda suspensas no ar, quando comparado com o modelo 6, mas em valor semelhante ao registado nos casos do modelo 5. Em relação à eficiência de remoção de partículas, verificou-se, ao contrário do que se tinha observado nos modelos anteriores, que na situação de tosse o sistema de ventilação foi mais eficiente, onde foram removidas cerca de 15% das partículas emitidas nesta simulação.

Fazendo uma análise ainda mais global, tendo em conta os modelos 5 e 6, que também possuíam sistema de ventilação natural, verificou-se que o sistema de ventilação do modelo 7 foi menos eficiente na remoção de partículas quando comparado com os sistemas dos modelos 5 e 6 ( $\approx 18\%$  e  $37\%$  partículas removidas no caso de tossir, respetivamente).

### 5.5.8. Resultados Modelo 8

As conclusões relevantes retiradas do modelo 8, com base no que foi referido em 5.5.1.5 e 5.5.1.6, foram as que se encontram ilustradas nos subcapítulos abaixo ilustrados.

#### 5.5.8.1. Falar

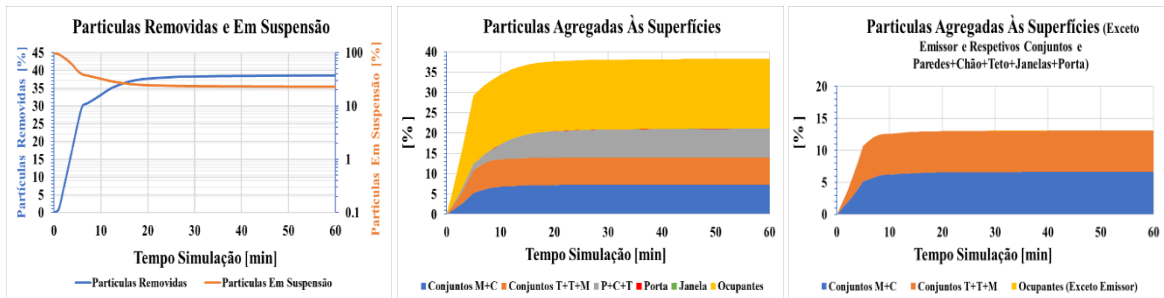


Figura 104. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Falar - Modelo 8

No final da simulação do caso em que o ocupante falava no modelo 8, observou-se que cerca de 39% das partículas tinham sido removidas, valor superior ao que se tinha verificado nos modelos 5, 6 e 7, que também possuíam sistema de ventilação natural ( $\approx$  15%, 35% e 11%, respetivamente).

Constatou-se também que a percentagem de partículas suspensas no ar no final da simulação era cerca de 20%, valor superior ao registado no modelos 5, 6 e 7 ( $\approx$  15%, 2% e 15%, respetivamente).

Ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 104, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, à imagem do que se verificou em todos os modelos analisados, e pelas razões já mencionadas em 5.5.1.5 e em 5.5.1.6.

#### 5.5.8.2. Espirrar

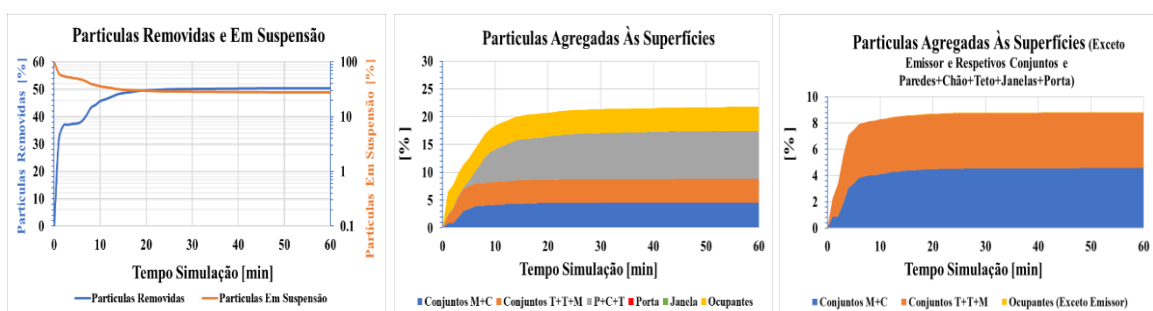


Figura 105. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Espirrar - Modelo 8

O escoamento de partículas no caso em que o ocupante espirrava no modelo 8 foi muito semelhante ao que se verificou no caso em que o ocupante falava, não obstante, a

percentagem de partículas removidas da sala no final da simulação ser superior ( $\approx 50\%$ ), sendo este, o valor mais elevado de percentagem de partículas removidas da sala, até então, e bastante superior quando comparado com o registado para as simulações análogas dos modelos 5, 6 e 7 ( $\approx 20\%$ ,  $14\%$  e  $47\%$ , respetivamente).

Em relação à percentagem de partículas ainda suspensas no ar no final da simulação, registou-se um valor de cerca de  $28\%$  superior ao obtido na situação de falar ( $\approx 20\%$ ), e nos casos análogos dos modelos 5, 6 e 7 ( $\approx 12\%$ ,  $2\%$  e  $15\%$ , respetivamente).

Ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 105, verificou-se a mesma tendência observada nos outros modelos em relação à infeção dos ocupantes, que não o emissor, isto é, a ocorrer a infeção, seria por via indireta, e pelas razões já elencadas em 5.5.1.5 e em 5.5.1.6.

Ao efetuar-se uma análise mais geral, tendo em conta os anteriores modelos, foi possível verificar, tanto no caso de espirro, como no caso em que o ocupante falava, através do gráfico ao centro, que houve menos partículas agregadas às superfícies ( $<20\%$ ) neste modelo, o que resultou do facto de haver mais partículas a serem extraídas da sala.

### 5.5.8.3. Tossir

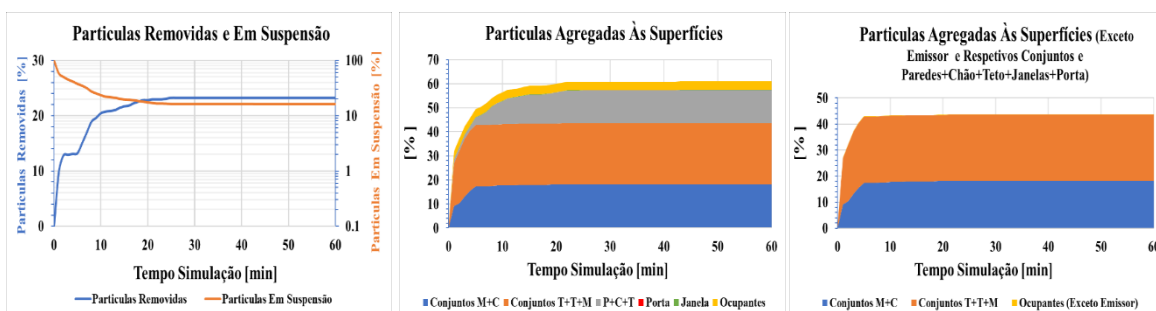


Figura 106. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Tossir - Modelo 8

O escoamento das partículas do caso de tosse no modelo 8 foi muito semelhante aos 2 anteriores casos, onde, no final da simulação cerca de  $15\%$  das partículas ainda estavam suspensas no ar, um valor inferior ao registado nos 2 anteriores casos ( $\approx 20\%$  e  $28\%$  para falar e espirrar, respetivamente), ainda assim, superior ao registado nos casos análogos dos modelos 5, 6 e 7 ( $\approx 8\%$  e  $3\%$  e  $10\%$ , respetivamente).

Também se observou que cerca de  $23\%$  das partículas emitidas foram removidas pelo sistema de ventilação, um valor inferior ao registado nos anteriores casos ( $\approx 39\%$  e  $50\%$ , para falar e espirrar, respetivamente), e em relação à simulação análoga no modelo 6 ( $\approx 37\%$ ). Ainda assim, superior ao registado nos modelos 5 e 7 ( $\approx 18\%$  e  $15\%$ , respetivamente).

Neste caso, ao comparar-se os 2 gráficos mais à direita da Figura 106, verificou-se que a infeção dos ocupantes, que não o emissor, só deveria ocorrer por via indireta, tal como observado em todos os estudos anteriormente analisados.

#### 5.5.8.4. Respiração Normal

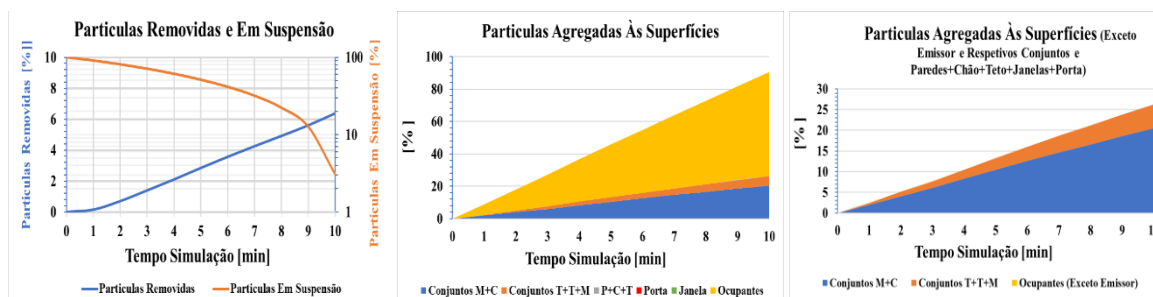


Figura 107. Conclusões Relevantes a Retirar: Caso de Respiração Normal - Modelo 8

No caso em que o ocupante respirava normalmente no modelo 8, foi possível concluir que no fim da simulação, cerca de 2% das partículas ainda se encontravam suspensas no ar, um valor inferior ao que se registou nos casos anteriores para o mesmo modelo, mas próximo do observado nos casos análogos do modelo 5, 6 e 7 ( $\approx$  5%, 4% e 5%, respetivamente).

Por oposição, a maioria das partículas agregou-se às superfícies ( $\approx$  95%), em que a larga percentagem deste conjunto agregou-se no ocupante emissor ( $\approx$  65%), algo que foi possível verificar comparando os 2 gráficos mais à direita da Figura 107. Este foi um fenómeno verificado nos casos análogos de todos os modelos já analisados.

Em relação à remoção de partículas, foi possível verificar que cerca de 7% das partículas foram extraídas da sala, sendo este, de todos os casos de respiração normal analisados, aquele em que o sistema de ventilação foi mais eficiente.

#### 5.5.8.5. Comparação dos Resultados dos 4 Regimes de Respiração Simulados

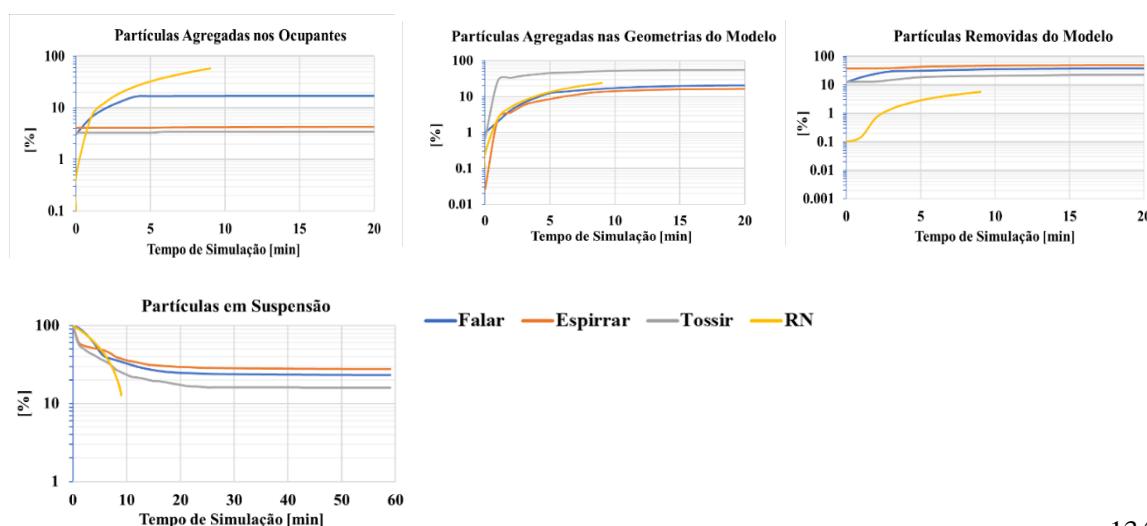


Figura 108. Comparação dos 4 regimes de respiração simulados para o Modelo 8

Comparando as simulações realizadas para o modelo 8, à imagem do que ocorreu nos outros modelos, o escoamento de partículas foi semelhante em todos os regimes de respiração, exceto no de respiração normal, pelas razões já elencadas nas análises dos outros modelos.

Verificou-se que o caso onde o ocupante falava, tal como nos outros modelos, foi aquele onde os ocupantes ficaram mais infetados (maioritariamente, o ocupante emissor) ( $\approx 17\%$ ), um valor próximo do registado nos casos análogos dos modelos 5 e 7 ( $\approx 15\%$  e  $18\%$ , respetivamente), e inferior ao observado no modelo 6 ( $\approx 25\%$ ).

Neste modelo, em geral, no final da simulação houve uma maior percentagem de partículas ainda suspensas no ar, quando comparado com os restantes modelos, onde no modelo 8, o caso de espirrar foi aquele em que no fim da simulação havia uma maior percentagem de partículas suspensas no ar ( $\approx 28\%$ ).

Em relação à eficiência de remoção de partículas, verificou-se, tal como nos modelos anteriores, exceto no modelo 7, que na situação de espirro, o sistema de ventilação foi mais eficiente ao nível da remoção de partículas, tendo sido removidas cerca de  $50\%$  das partículas emitidas nesta simulação.

Ao efetuar-se uma análise mais global, foi possível afirmar que o modelo 8 foi aquele onde o sistema de ventilação foi mais eficiente na remoção de partículas, quando comparado com os restantes modelos, não obstante de se ter observado, simultaneamente, uma maior percentagem de partículas suspensas no ar no final da simulação.

## 6. Conclusões

### 6.1. Conclusões dos casos de estudo

Neste trabalho foi possível concluir, em primeira instância, que para se utilizar uma metodologia CFD para simular a dispersão de partículas no interior de um ou mais ambientes, é necessário proceder a duas etapas: primeiro, a simulação e validação do escoamento do ar no interior da sala, e posteriormente a simulação do escoamento de partículas.

Em relação à validação do modelo CFD recriado a partir do artigo [8], foi possível constatar que se obteve uma boa correlação, a nível qualitativo, entre os resultados numéricos e experimentais, onde a validação não foi possível ser efetuada através de uma análise quantitativa, devido aos problemas elencados em 4.2.

Em relação aos casos de estudo do capítulo 5, foi possível obter várias conclusões, em que na perspetiva do utilizador da ferramenta, era mais preponderante comparar, em primeira instância, os resultados obtidos para os 4 regimes de respiração simulados, e subsequentemente, realizar uma análise mais abrangente entre modelos.

Tendo em conta estes fatores, é possível referir *à priori*, que as conclusões obtidas para o regime de respiração normal não eram totalmente fidedignas, uma vez que se verificou em todas as simulações que ao fim dos 10 minutos da simulação o escoamento das partículas ainda apresentava uma evolução. Não se simulou estes casos durante mais tempo, pelas razões mencionadas em 5.3.4.

Comparando os restantes 3 regimes de respiração, verificou-se que nos casos de espirro o sistema de ventilação foi sempre mais eficiente na remoção de partículas (exceto no modelo 7). Não obstante, o regime de respiração de espirro foi aquele onde se verificou que no final da simulação uma maior percentagem de partículas ainda permanecia suspensa no ar.

Na perspetiva do utilizador da ferramenta, era também importante perceber em qual dos regimes de respiração os ocupantes da sala teriam maior risco de serem contagiados, pelo que neste aspeto, aquilo que se concluiu de todos os modelos analisados, foi que a ocorrer infeção dos ocupantes, esta seria sempre por via indireta, uma vez que em relação ao contacto das partículas com os ocupantes, se observou que o emissor foi aquele em que as partículas mais se agregaram, e, por conseguinte, a infeção

dos restantes ocupantes, a ocorrer, seria sempre por contacto com cada um dos conjuntos mencionados nas análises dos casos.

Efetuada uma análise mais global, considerando o que se observou em todos os modelos, verificou-se que o modelo 8 (janelas abertas a 50%, porta 100% fechada), foi aquele onde se registou a maior eficiência de remoção de partículas da sala, nomeadamente, no caso de espirro, onde aproximadamente 50% das partículas foram removidas da sala. Por oposição, o modelo onde o sistema de ventilação foi menos eficiente, foi o modelo 5 (janelas abertas a 10%, porta 10% aberta), nomeadamente, o caso em que o ocupante falava, onde aproximadamente 15% das partículas foram removidas da sala.

Em relação aos resultados dos casos sem ventilação na sala (modelos 2 e 4), verificou-se que o comportamento das partículas foi muito semelhante em ambos os casos, e, comparando-os com os restantes modelos que tinham sistemas de ventilação, foi possível concluir que no final da simulação, os modelos 2 e 4 apresentavam uma maior percentagem de partículas suspensas no ar (excetuando os casos de falar e espirrar do modelo 8), e, por conseguinte, um maior potencial de risco de contágio para os ocupantes em relação aos modelos com sistemas de ventilação.

Ao comparar-se os resultados dos modelos com sistema de ventilação natural e mecânico, a única conclusão retirada foi que nos casos com janelas abertas a 50% (modelos 6 e 8), a remoção de partículas por parte do sistema de ventilação foi mais eficiente. Ao comparar-se os modelos 1 e 3 (apenas sistema de ventilação mecânico), conclui-se que o sistema de ventilação do modelo 1 (UFAD) foi mais eficiente na remoção de partículas que o modelo 3 (AC no teto).

Foi também possível identificar quais os conjuntos onde as partículas mais se agregaram, permitindo chegar a conclusões, como por exemplo, as verificadas nos modelos 5 e 7, onde em cada regime de respiração simulado, a maioria das partículas se agregou ao conjunto “P+C+T”.

Como foi referido ao longo das análises, não foi possível concluir o nível de risco para os ocupantes decorrente do contacto dos mesmos com os vários conjuntos de elementos presentes na sala, uma vez que não foi possível identificar, com precisão, a área específica de contágio destes conjuntos.

No entanto, nos modelos 2 e 4, que não tinham sistemas de ventilação, as partículas agregaram-se em maior percentagem nos conjuntos inerentes aos modelos. Por conseguinte, foi possível constatar que nestes modelos (2 e 4) haveria maior

probabilidade de os ocupantes serem infetados, ainda que por via indireta, quando comparados com os restantes modelos.

Ao comparar-se os modelos com sistemas de ventilação mecânica (modelos 1 e 3), e os que possuíam ventilação natural (modelos 5,6,7, e 8), verificou-se que em 1 e 3, a percentagem de partículas que se alojou nos conjuntos que compunham a sala foi superior em cada regime de respiração analisado, quando comparado com os casos análogos dos modelos 5, 6, 7 e 8, logo, nos modelos com ventilação natural, para as condições simuladas, haveria menos probabilidade de ocorrer infeção dos ocupantes por via indireta do que nos modelos com ventilação mecânica.

Em suma, o objetivo do trabalho foi atingido: conseguiu-se criar uma ferramenta em ambiente gráfico animado que simulava o escoamento de partículas em ambientes com diversas configurações, e conseguiu-se retirar algumas conclusões acerca da influência que os sistemas de ventilação, e os elementos que compõem a sala, têm, na forma como a trajetória das partículas se desenvolve.

## **6.2. Trabalhos Futuros**

Tal como foi referido ao longo da análise de resultados conduzida em 5.5, a ferramenta desenvolvida encontra-se ainda na sua fase embrionária, pelo que mais conclusões poderiam ser retiradas acerca de riscos para a saúde pública, assim como do próprio processo de dispersão de partículas.

Como mencionado, uma das principais lacunas verificadas no decorrer da análise de resultados está relacionada com o facto de não se conseguir identificar, exatamente, a área de contágio dos elementos presentes na sala, e como tal, as percentagens de agregação de partículas nas superfícies dos vários modelos analisados no capítulo 5 não permitem inferir o nível de risco de contágio para os ocupantes, o que na perspetiva do utilizador da ferramenta seria uma questão fundamental, e a ser incorporada num futuro desenvolvimento da ferramenta.

Outra questão que não foi verificada neste trabalho está relacionada com a determinação exata da dimensão de partículas que se agregou em cada superfície, em especial nos ocupantes. Este é mais um fator pertinente no âmbito do desenvolvimento da ferramenta, porque, como referido em 5.5.1.6, as partículas de maior dimensão tendem a ficar mais tempo suspensas no ar [7] [8], e como tal, apresentam um potencial de risco de infeção superior, face a partículas de menor dimensão, que tendem a depositar-se mais

cedo. Não obstante, este fator não foi considerado nesta fase pois seria necessário programar um código específico para que a ferramenta realizasse esta contabilização/diferenciação, trabalho que estava para além do pretendido nesta tese.

É de referir ainda que outros estudos poderiam ter sido considerados no trabalho, como por exemplo, variar a localização dos sistemas de ventilação, e averiguar se esse fator teria influência na eficiência de remoção de partículas.

Este estudo permitiria, simultaneamente, testar a capacidade da ferramenta em analisar casos cada vez mais complexos. Por último, um estudo que se iniciou, mas que careceu de verificação e análise de resultados, foi a simulação, para cada regime de respiração mencionado, de uma situação em que o ocupante emissor estaria a utilizar uma máscara, por forma a perceber as vantagens/diferenças que se obtêm da utilização deste equipamento de proteção.

# Referências Bibliográficas

- [1] European Commission, CORDIS – Horizon 2020, *Partnerships for science education, Project description*. (2021). Disponível em: <https://cordis.europa.eu/project/id/101006468>. Último acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [2] (WHO)- *Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?* (2021). Disponível em: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>. Último acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [3] CDC (USA) – *How COVID-19 Spreads* (2022). Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/how-covid-spreads.html>. Último acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [4] CDC (USA) – *SARS-CoV-2 Transmission* (2021). Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>. Último acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [5] SNS24 (Portugal) – *Medidas COVID-19: Em que situação ainda é obrigatório o uso de máscara?* Disponível em: <https://www.sns24.gov.pt/alerta/medidas-covid-19/>. Último acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [6] Yang, S., Lee G.W.M., Chen, C.M., Wu, C.C., Yu, K.P. (2007). The Size and Concentration of Droplets Generated by Coughing in Human Subject. *Journal of Aerosol Medicine*, 20, pp. 484-494.
- [7] Duguid, J.P. (1946). The Size and Duration of Air-Carriage of Respiratory Droplets and Droplet-Nuclei. *Journal of Hygiene*, 4, pp 471-480.
- [8] Zhang, Z., Chen, Q. (2006). Experimental measurements and numerical simulations of particle transport and distribution in ventilated rooms. *Atmospheric Environment*, 40(18), pp. 3396-3408.
- [9] Chao, C.Y.H., Wan, M.P., Sze To, G.N. (2008). Transport and Removal of Expiratory Droplets in Hospital Ward Environment. *Aerosol Science and Technology*, 42(5), pp.377-394.
- [10] Wang, H., Qian, H., Zhou, R., Zheng, X. (2020). A novel circulated air curtain system to confine the transmission of exhaled contaminants: A numerical and experimental investigation. *Building Simulation*, 13, pp. 1425-1437.
- [11] Béghein, C., Jiang, Y., Chen, Q. (2005). Using Large Eddy Simulation to Study Particle Motions in a Room. *Indoor Air*, 15, pp.281-290.

- [12] Gomez-Flores, A., Gukhwa, H., Ilyas, S., Kim, H. (2021). A CFD Study of transport and fate of airborne droplets in a ventilated office: The role of droplet-droplet interactions. *Environment Science Engineering*, 16(3), pp.31-45.
- [13] Seepana, S., Lai, A. C. (2012). Experimental and Numerical Investigation of Interpersonal Exposure of Sneezing in a Full-Scale Chamber. *Aerosol Science and Technology*, 46(5), pp.485-493.
- [14] Anderson Jr., J.D., Degroote, J., Degrez, D., Dick, E., Grundmann, R., Vierendeels, J. (1992). *Computational Fluid Dynamics, An Introduction*. A von Karman Institute Book, Editado Por Wend, J.F. 3ª Edição, Springer. Bélgica.
- [15] Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computation Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*. 2ª Edição, Pearson Education Limited. Edinburgh Gate, Harlow, Inglaterra.
- [16] King, M-F., Noakes, C.J., Sleight, P.A., Camargo-Valero, M.A. (2013). Bioaerosol deposition in single and two-bed hospital rooms: a numerical and experimental study. *Building and Environment*, 59, pp.436-447.
- [17] Kang, Z., Zhang, Y., Fan, H., Feng, G. (2015). Numerical Simulation of Coughed Droplets in the Air-Conditioning Room. Em: *9<sup>th</sup> International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) e 3<sup>rd</sup> International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*. *Procedia Engineering*, 121, pp. 114-121.
- [18] Liu, H., He, S., Shen, L., Hong, J. (2021). Simulation-based study of COVID-19 outbreak associated with air-conditioning in a restaurant. *Physics of Fluids*, 33.
- [19] Aliabadi, A.A., Rogak, S.N., Green, S.I., Barlett, K.H. (2010). CFD Simulation of Human Coughs and Sneezes: A study in droplet dispersion, heat, and mass transfer. Em: *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. Novembro 12-18, 2010, Vancouver Canada. IMECE2010, pp. 1051-1060.
- [20] Park, D.Y., Chang, S. (2019). Numerical investigation of thermal comfort and transport of expiratory contaminants in a ventilated office with an air curtain system. *Indoor and Built Environment*, 28(3), pp.401-421.
- [21] Zhou, Y., Ji, S. (2020). Experimental and numerical Study on the transport of droplet aerosols generated by occupants in a fever clinic. *Building and Environment*.
- [22] Romano, F., Marocco, L., Gustén, J., Joppolo, C.M. (2015). Numerical and experimental analysis of airborne particles control in an operating theater. *Building and Environment*, 89, pp.369-379.

- [23] Chen, C., Liu, W., Lin, C.H., Chen, Q. (2015). Comparing the Markov Chain Model with the Eulerian and Lagrangian Models for Indoor Transient Particle Transport Simulations. *Aerosol Science and Technology*, 49(10), pp. 857-871.
- [24] Gupta, J., Lin, C.H., Chen, Q. (2011). Transport of expiratory droplets in an aircraft cabin. *Indoor Air*, 21(1), pp. 3-11.
- [25] Lai, A.C.K., Wang, K., Chen, F.Z. (2008). Experimental and Numerical study on particle distribution in a two-zone chamber. *Atmospheric Environment*, 42, pp.1717-1726.
- [26] Tom & Rajat's CFD Blog. (2021). All about CFD... Wall Function: Boundary Layer Modelling Approach. Disponível em: <https://cfdisrael.blog/2021/09/20/wall-function-boundary-layer-modelling-approach/>. Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [27] Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab*. Springer. 113, pp.693-722.
- [28] Thermal Boundary layer thickness and shape. (2021). Wikipedia, The Free Encyclopedia. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_boundary\\_layer\\_thickness\\_and\\_shape#/media/File:Thermal\\_Boundary\\_Layer\\_Thickness\\_formed\\_by\\_heated\\_fluid\\_flow\\_along\\_a\\_plate.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_boundary_layer_thickness_and_shape#/media/File:Thermal_Boundary_Layer_Thickness_formed_by_heated_fluid_flow_along_a_plate.jpg). Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [29] Lubarda, M. V., Lubarda, V.A. (2021). On the motion of an evaporating respiratory droplet. *Proceedings of the Section of Natural Sciences*, 25.
- [30] Ahmadzadeh M., Shams, M. (2019). Passenger exposure to respiratory aerosols in a train cabin: Effects of window, injection source, output flow location. *Sustain Cities and Society*.
- [31] InjectionModel<CloudType>Class Template Reference. OpenFOAM v8, The OpenFOAM Foundation. C++ Source Code Guide. Disponível em: [https://cpp.openfoam.org/v8/classFoam\\_1\\_1InjectionModel.html](https://cpp.openfoam.org/v8/classFoam_1_1InjectionModel.html). Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [32] ConeInjection<CloudType > Class Template Reference. OpenFOAM v8, The OpenFOAM Foundation. C++ Source Code Guide. Disponível em: [https://cpp.openfoam.org/v8/classFoam\\_1\\_1ConeInjection.html#details](https://cpp.openfoam.org/v8/classFoam_1_1ConeInjection.html#details). Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [33] PatchInteractionModel< CloudType > Class Template Reference. OpenFOAM v8, The OpenFOAM Foundation. C++ Source Code Guide. Disponível em: [https://cpp.openfoam.org/v8/classFoam\\_1\\_1PatchInteractionModel.html#a92e87ef624293110fcae578d99950e2a](https://cpp.openfoam.org/v8/classFoam_1_1PatchInteractionModel.html#a92e87ef624293110fcae578d99950e2a) Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.

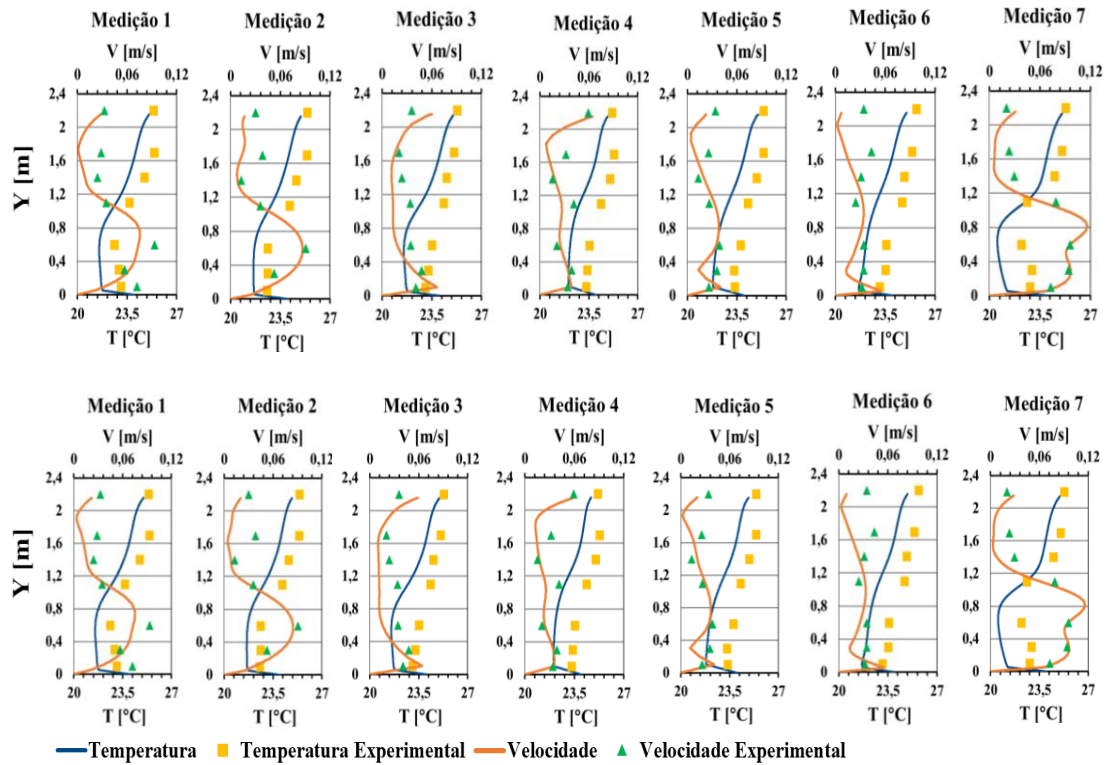
- [34] Zhang, H., Li, D., Xie, L., Xiao, Y. (2015). Documentary Research of Human Respiratory Droplets Characteristics. Em: *9<sup>th</sup> International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) e 3<sup>rd</sup> International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*. *Procedia Engineering*, 121, pp. 1365-1374.
- [35] Han, M., Ooka, R., Kikumoto, H., Oh, W., Bu, Y., Hu, S. (2021). Experimental measurements of airflow features and velocity distribution exhaled from sneeze and speech using particle image velocimetry. *Building and Environment*.
- [36] Nicas, M., Nazaroff, W.W., Hubbard, A. (2010). Toward Understanding the Risk of Secondary Airborne Infection: Emission of Respirable Pathogens. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.*, 2(3), pp.143-154.
- [37] Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., Kriegel, M. (2020). Emission rate and particle size of bioaerosols during breathing, speaking, and coughing. *Technische Universität Berlin*.
- [38] Busco, G., Yang, S.R., Seo, J. (2020). Sneezing and asymptomatic virus. *Special Topic, Flow, and the Virus*. 32(7).
- [39] Bulinska, A., Bulinski, Z. (2015). A CFD analysis of different human breathing models and its influence on spatial distribution of indoor air parameters.
- [40] Gupta, J.K., Lin, C-H., Chen, Q. (2010). Characterizing Exhaled Airflow from Breathing and Talking, *Indoor Air*, 20, pp.31-39.
- [41] Alsved, M., Matamis A., Bohlin, R., Richter, M., Bengtsson, P-E., Frankel, C-J., Löndahl, J. (2020). Exhaled respiratory particles during singing and talking. *Aerosol Science and Technology*, 54.
- [42] Gralton, J., Tovey, E., McLaws, M-L., Rawlinson, W. D. (2010). *The Journal of Infection*, 62(1), pp.1-13.
- [43] Xu, C., Nielsen, P. V., Liu, L., Jensen, R.L., Gong, G. (2016). Human exhalation characterization with the aid of schlieren imaging technique. *Building and Environment*, 112, pp.190-199.
- [44] Cassette-Geko FAN COIL UNIT, FläktGroup. Catálogo Disponível em: <https://www.flaktgroup.com/en/products/air-diffusion/fan-coils/non-ductable-fan-coil-unit/cassette-geko-fan-coil-unit/> Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [45] Aquecedor Emissor Térmico BECKEN BTE3512 (2000W), Worten. Catálogo Disponível em: <https://www.worten.pt/grandes-eletrdomesticos/aquecimento/aquecedores/emissores-termicos/aquecedor-emissor-termico-becken-bte3512-2000-w-6223907> Último Acesso em 30 de Setembro de 2022.
- [46] Casaca, C., Cardoso, J. (2022). Sistemas de Climatização I. Instalações Técnicas Especiais.

# **Apêndice A**

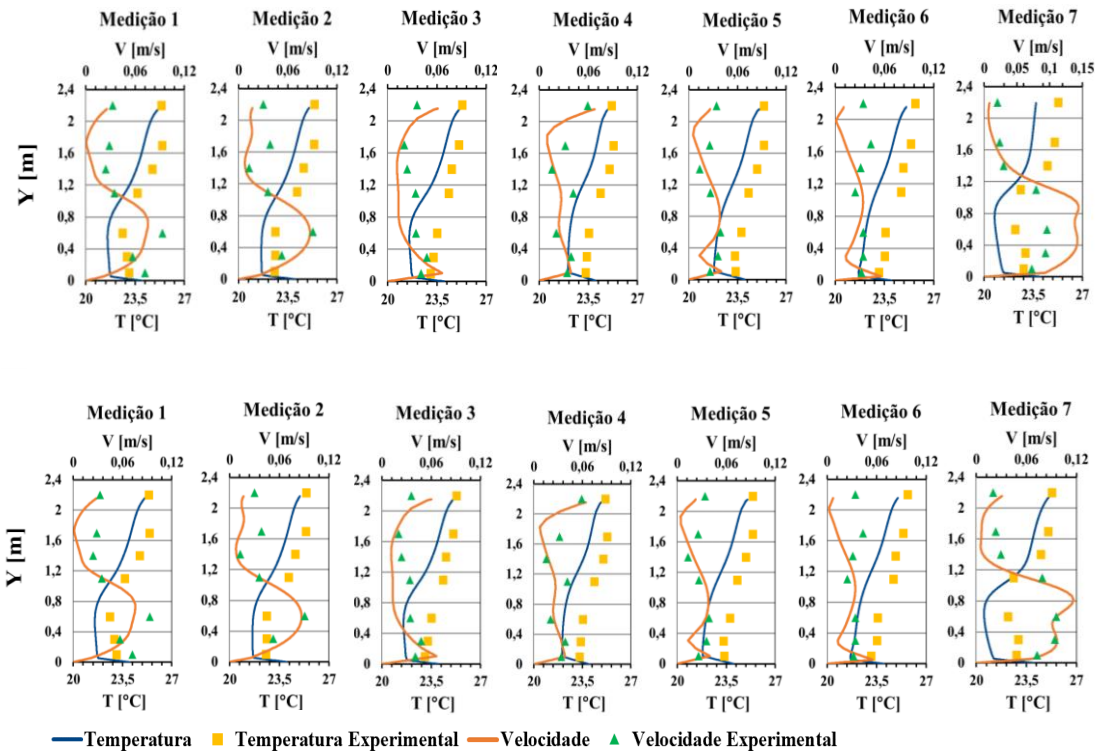
-

## **Comparação de Gráficos dos Resultados Numéricos Vs Resultados Experimentais**

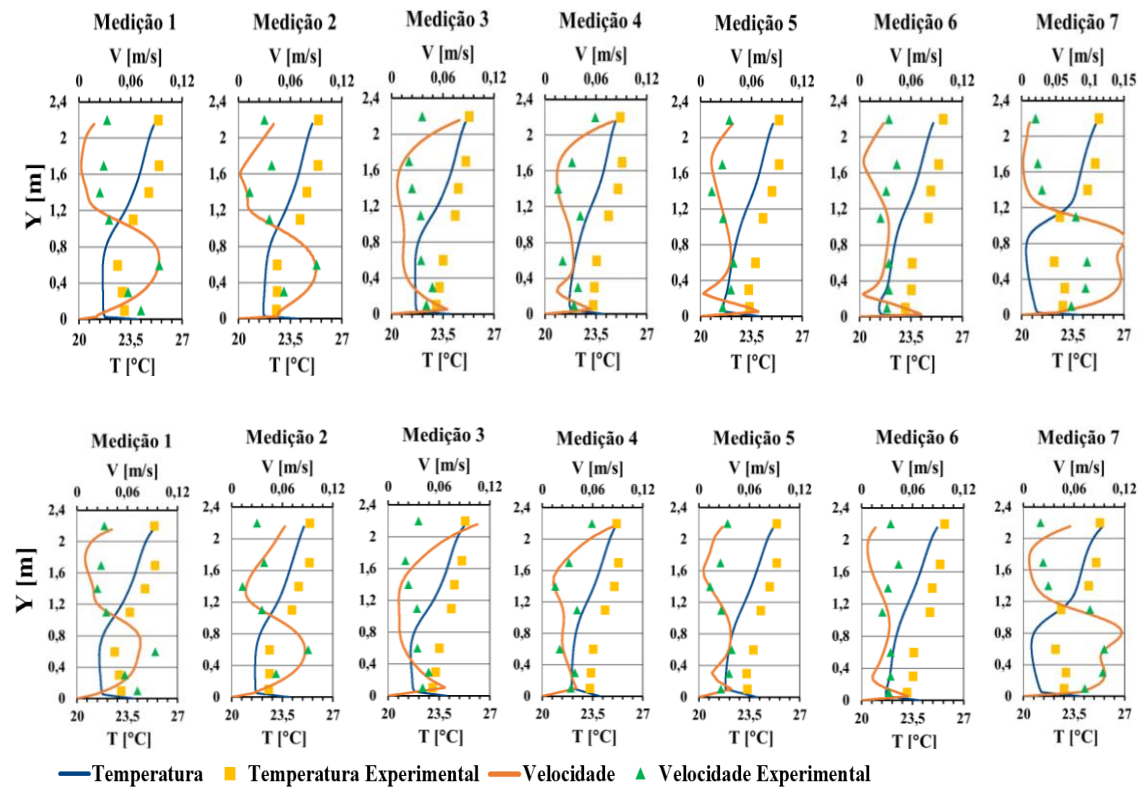
## A.1 - Ocupantes Com Refinações (Cima) Vs Ocupantes Sem Refinações (Baixo)



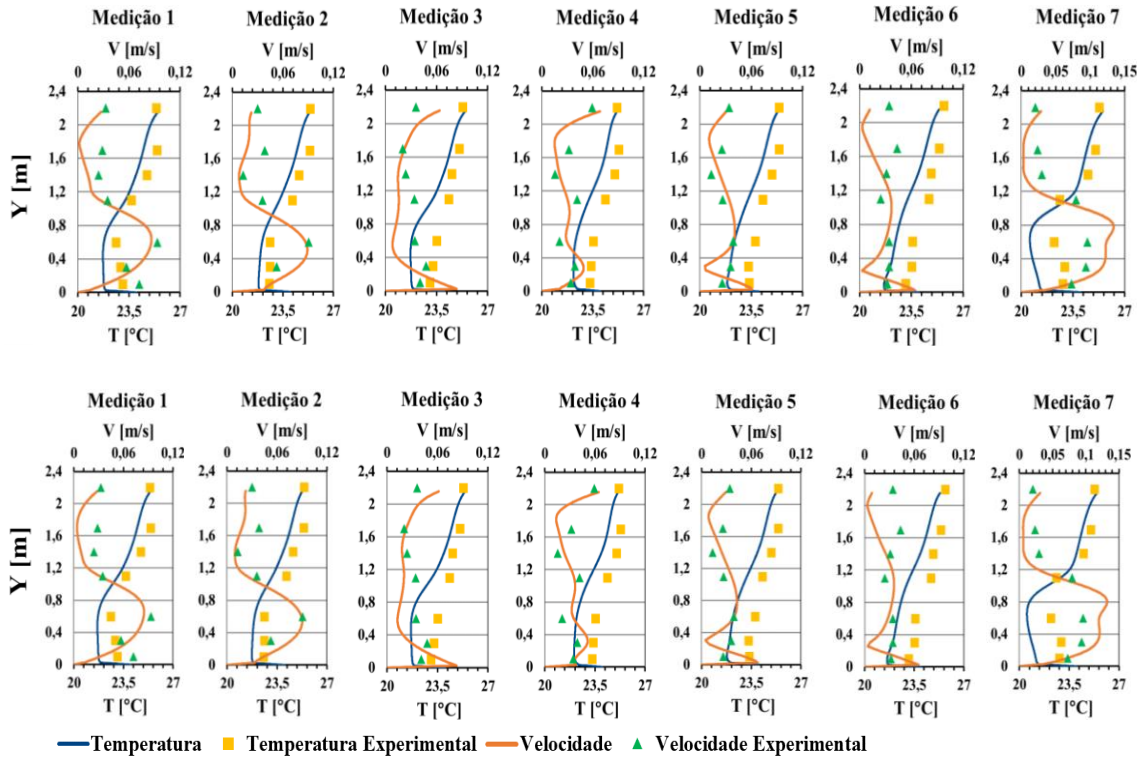
## A.2 – Ocupantes Com Refinações: *Wall Functions OpenFOAM* (Cima) Vs *Wall Functions Kernel* (Baixo)



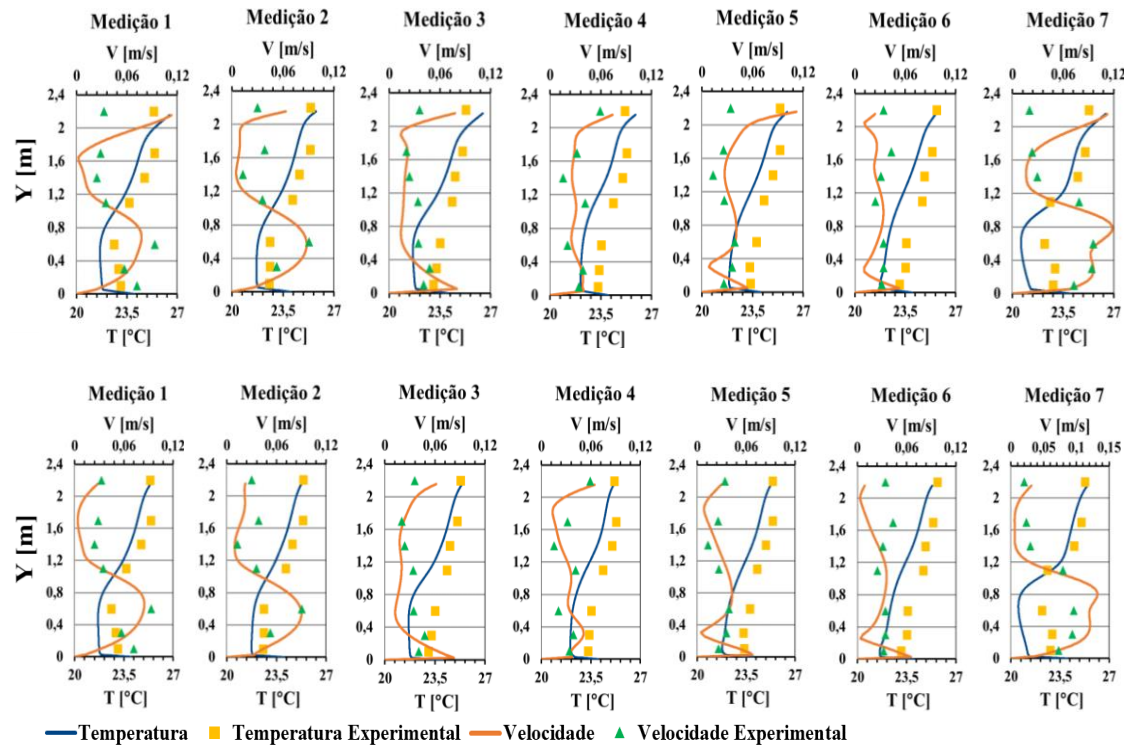
### A.3 – Caso de Referência 2 Com Malha Base 5cm (Cima) Vs Caso de Referência 2 (Baixo)



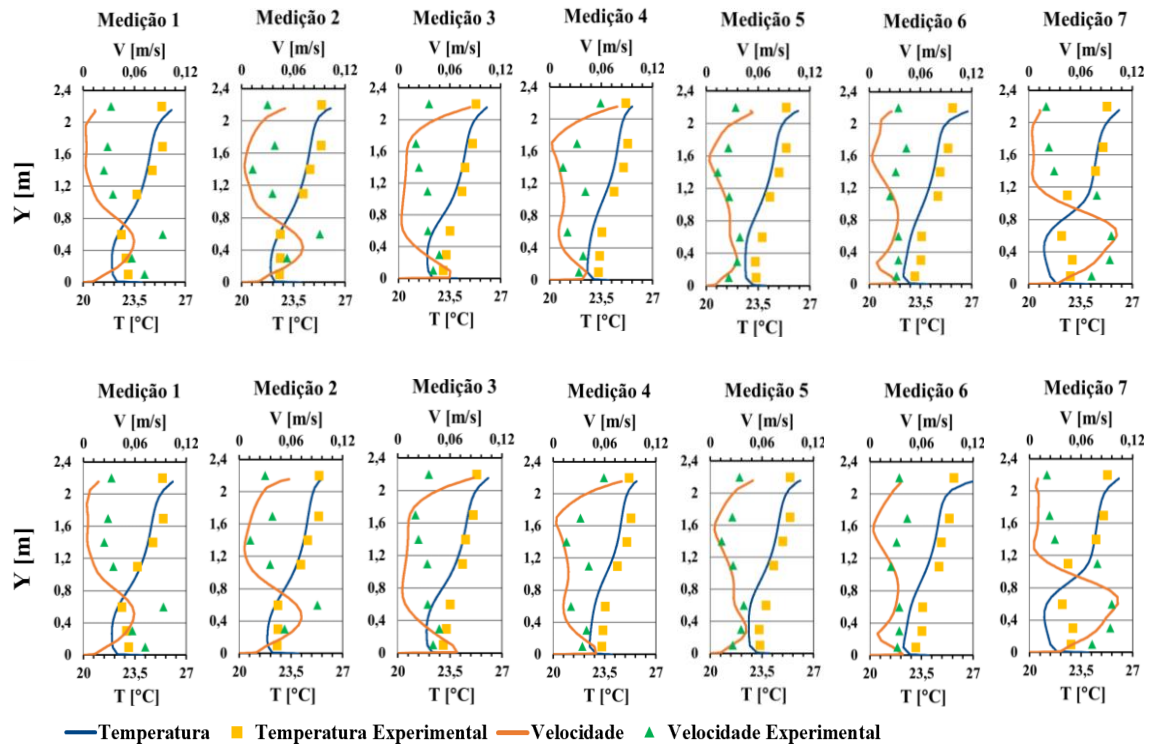
## A.4 - Caso de Referência 3 com *Wall Functions* do *OpenFOAM* (Cima) Vs Caso Referência 3 (Baixo)



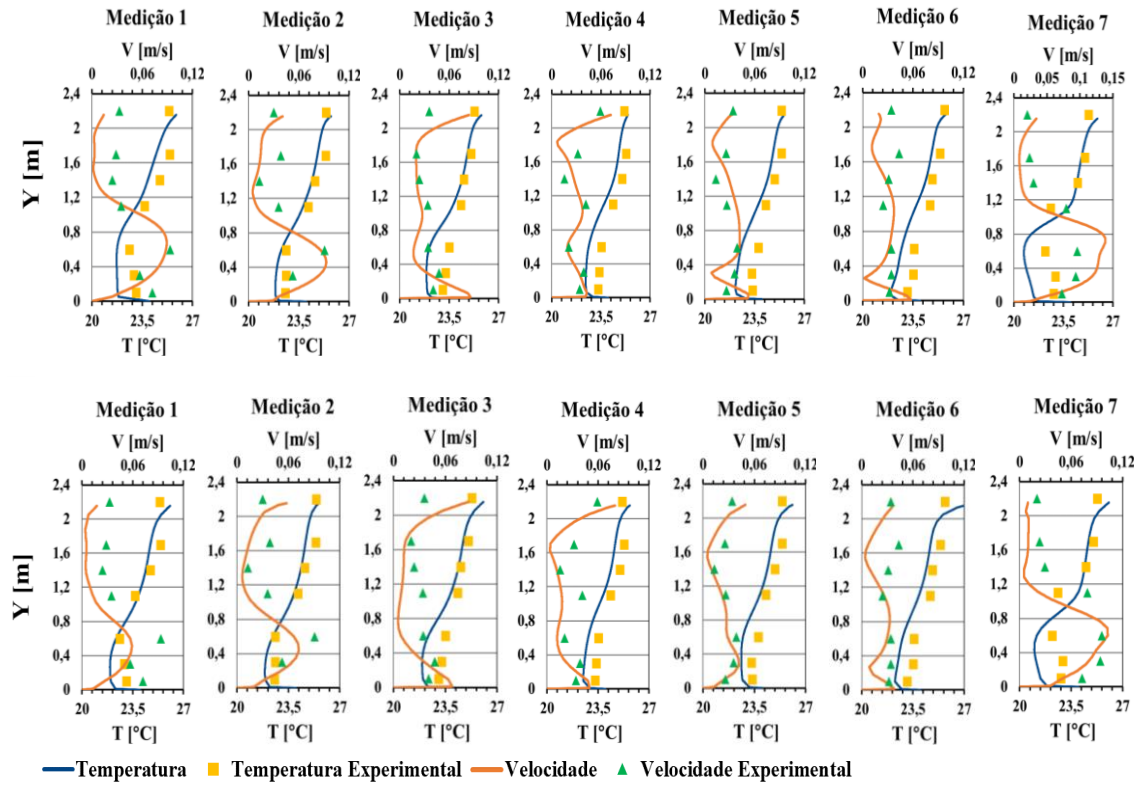
## A.5 - Malha Base 5 cm: Refinações Nível 0 (Cima) Vs Caso de Referência 3 (Baixo)



## A.6 - Malha Base 8,5 cm Com Layers: Wall Functions do OpenFOAM (Cima) Vs Wall Functions do Kernel (Baixo)



## A.7 - Simulação V0 (Cima) Vs Simulação Malha Base 8,5 Com Layers (Baixo)



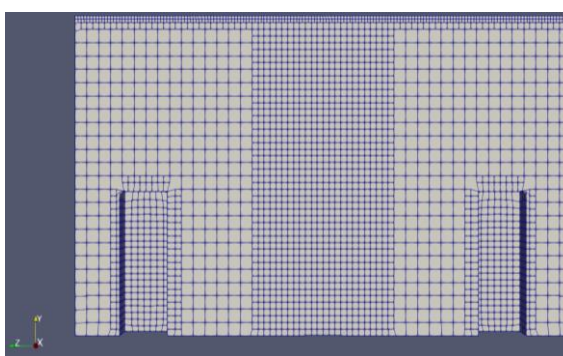
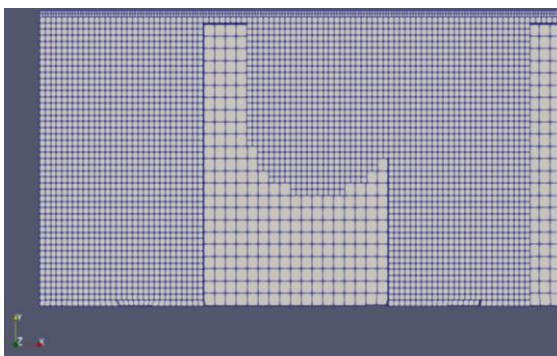
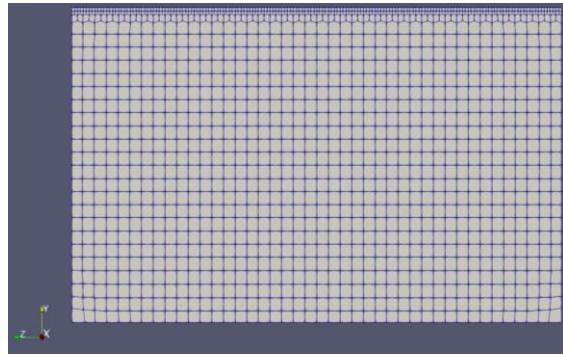
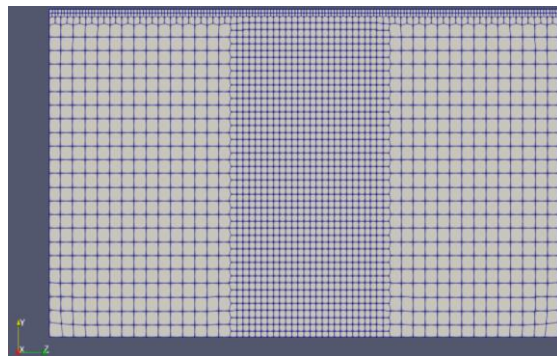
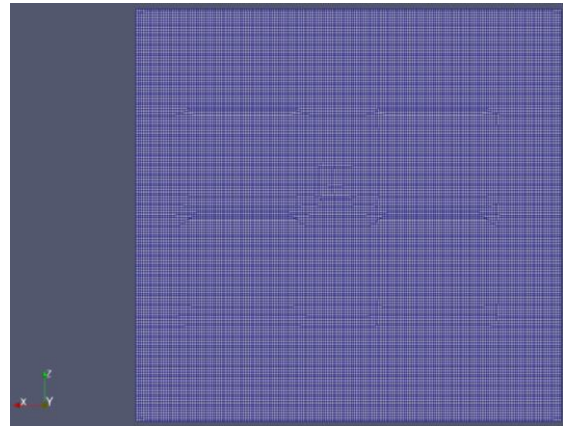
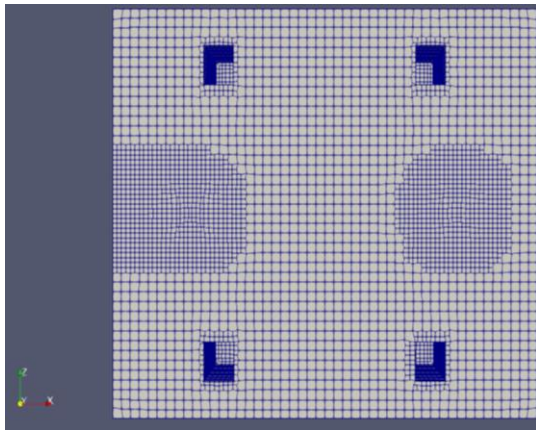
# **Apêndice B**

-

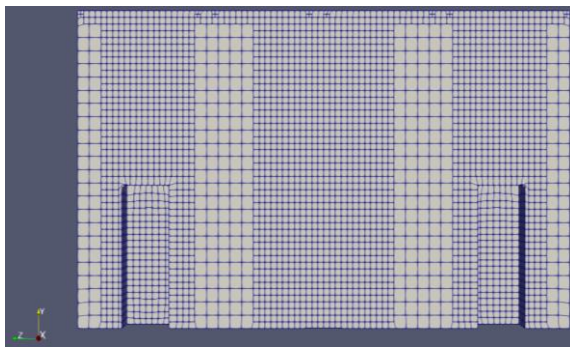
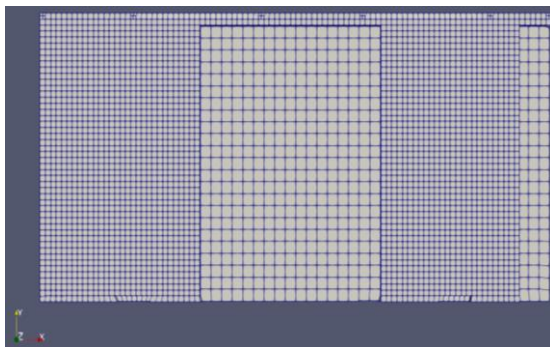
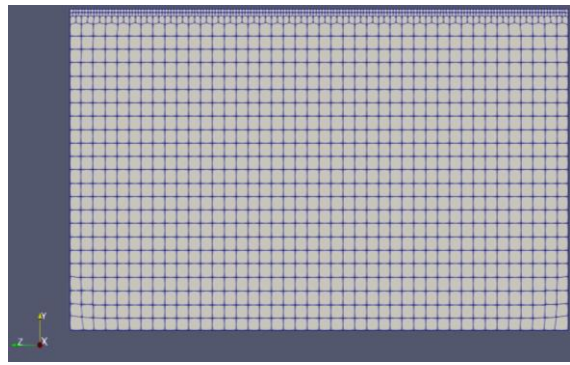
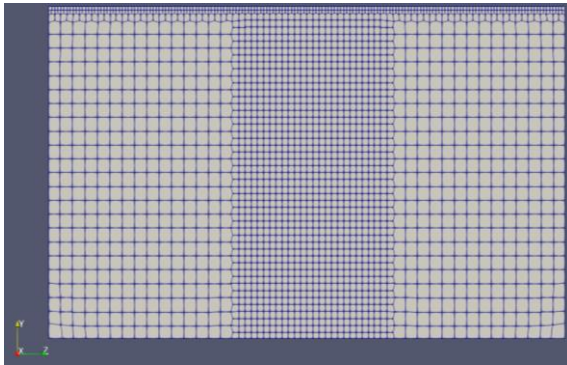
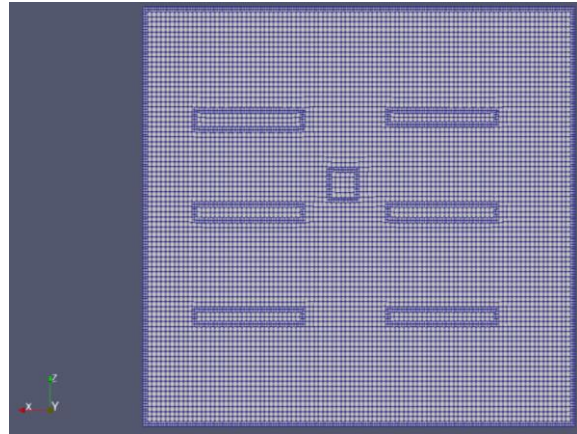
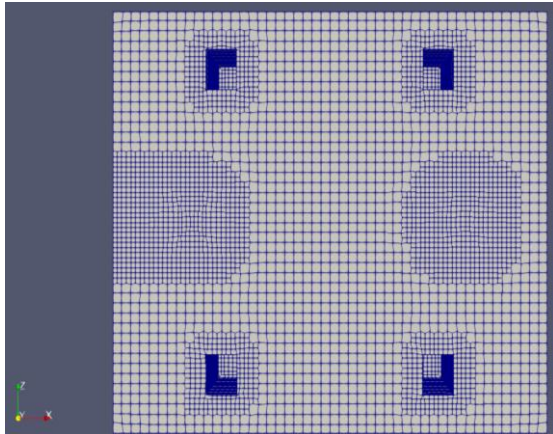
## **Malhas dos Casos de Referência**

A ordem pelo qual se encontram exibidas as imagens, é a seguinte: A partir de cima, da esquerda para a direita: Vista do Chão, Vista do Teto, Vista da Parede Adjacente ao Jato Inclinado, Vista da Parede Adjacente ao Jato Vertical, Vista do Corte Secção na Região dos Difusores, Vista do Corte de Secção nos Bonecos.

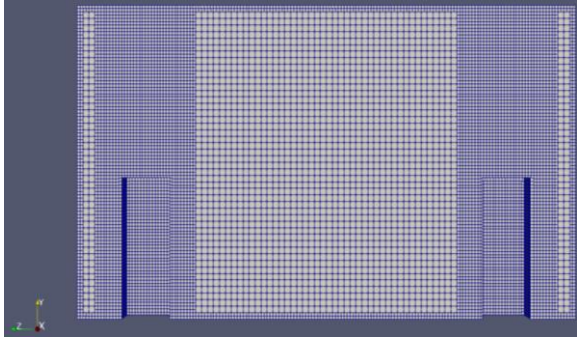
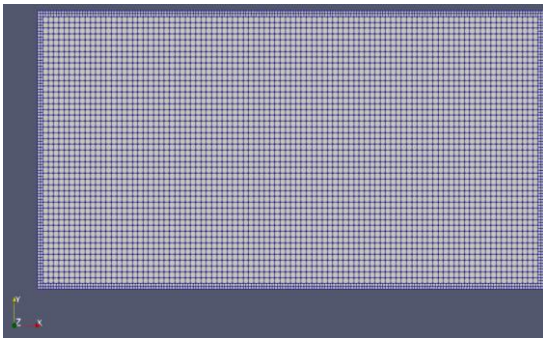
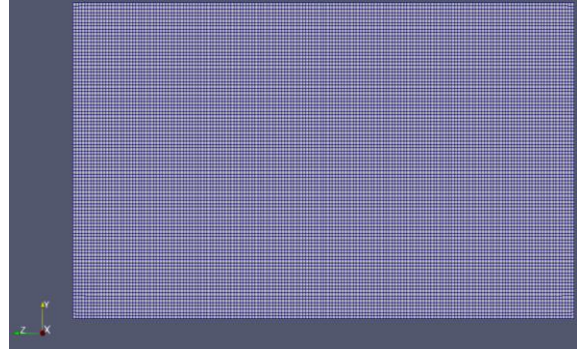
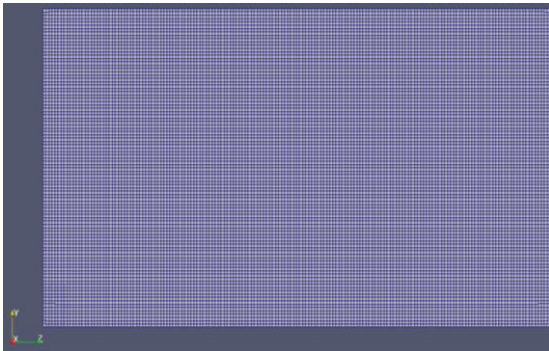
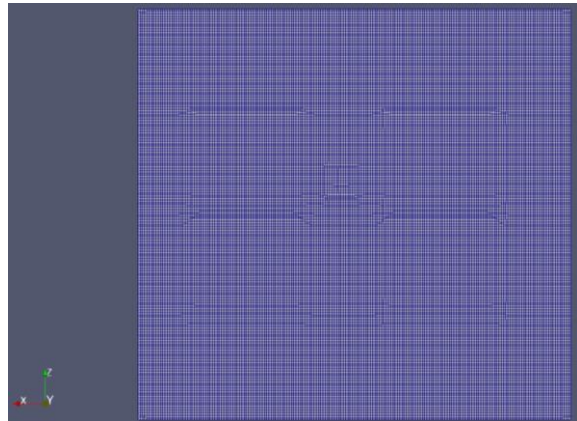
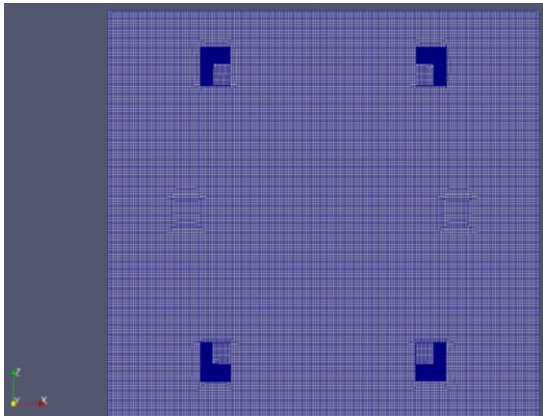
## Malha Caso de Referência 1



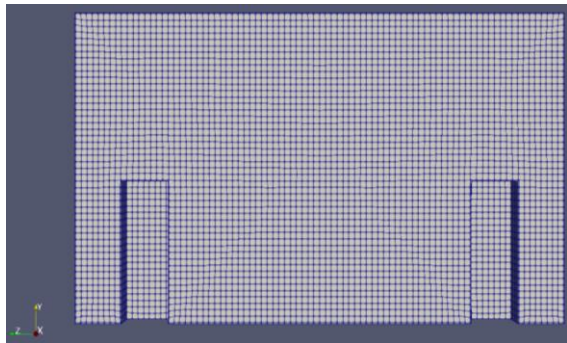
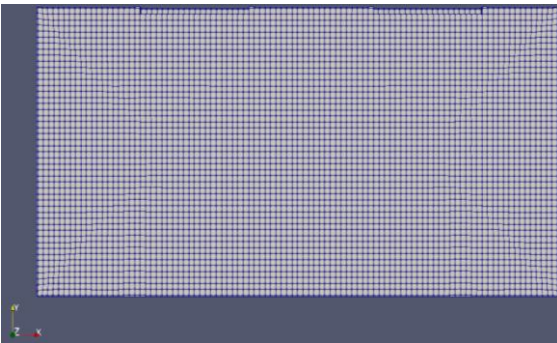
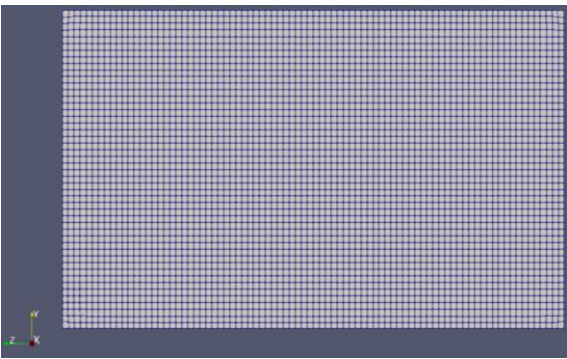
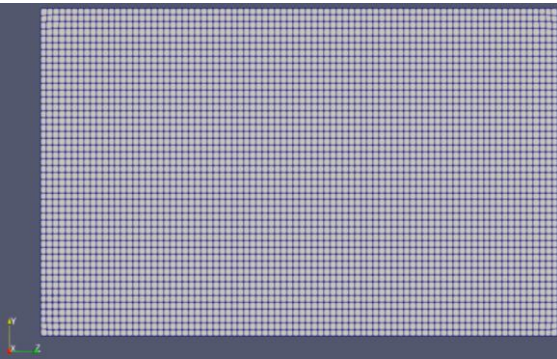
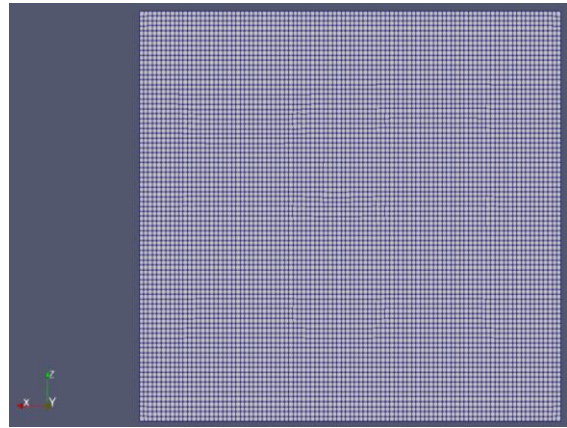
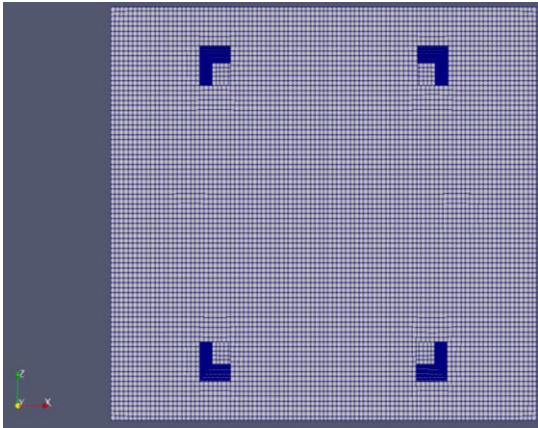
## Malha Caso de Referência 2



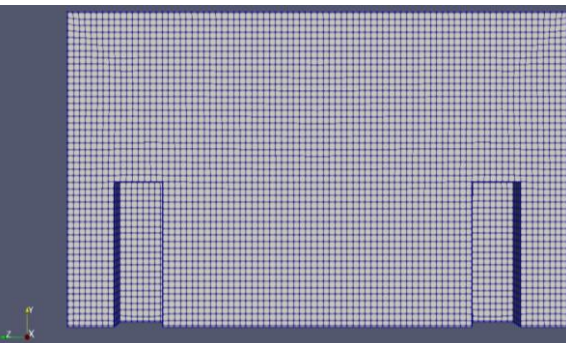
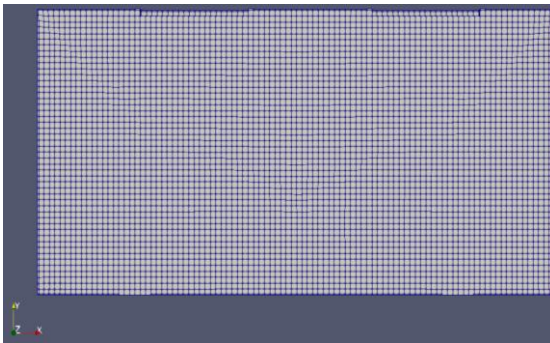
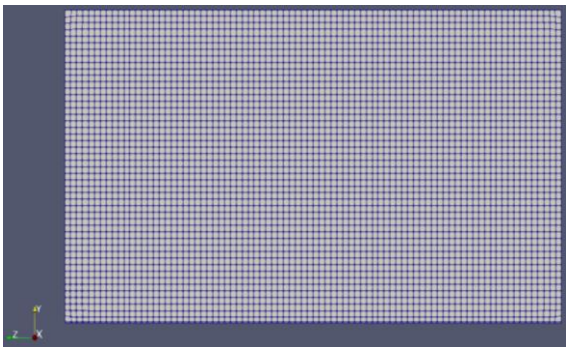
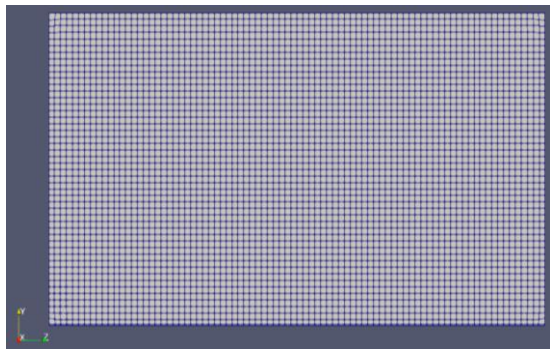
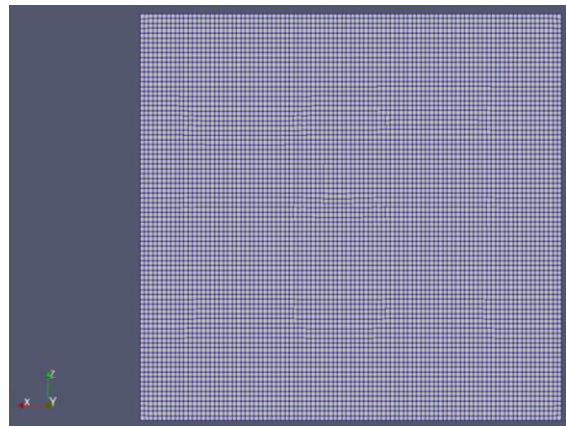
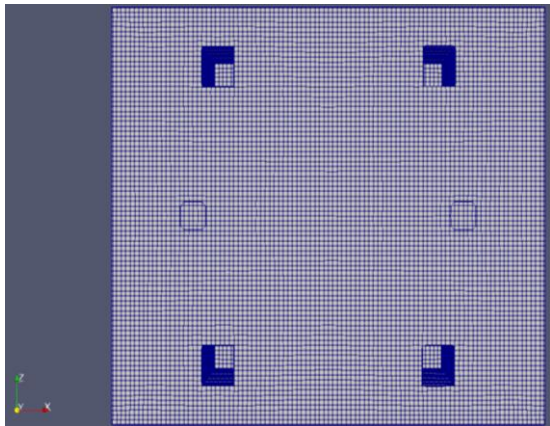
# Malha Caso de Referência 3



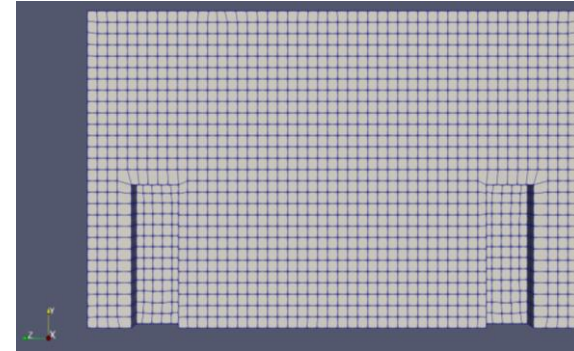
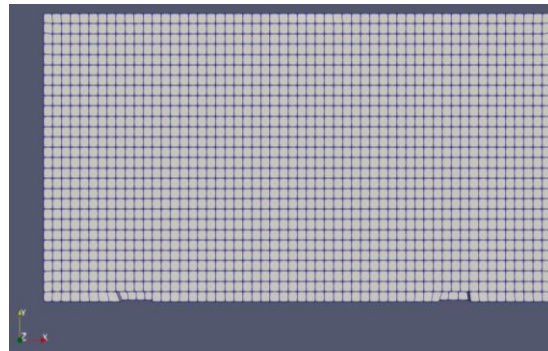
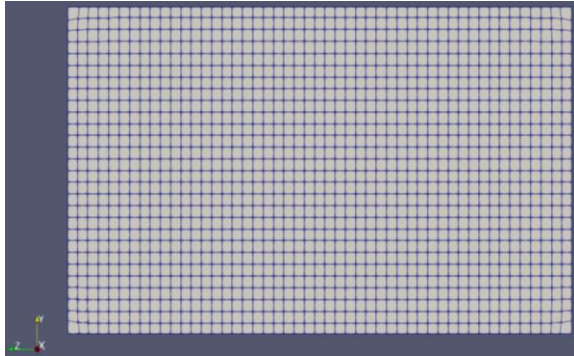
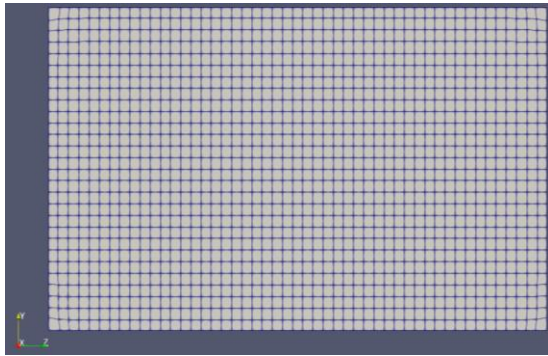
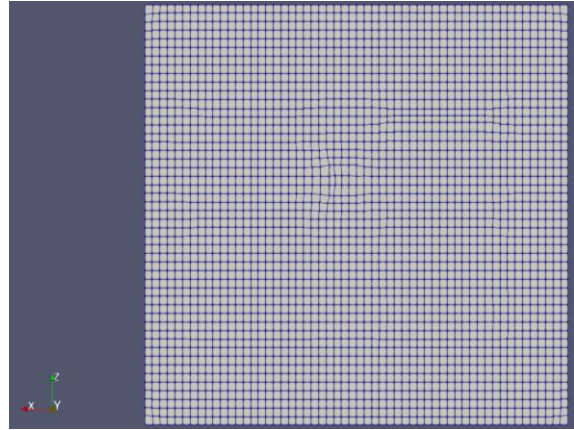
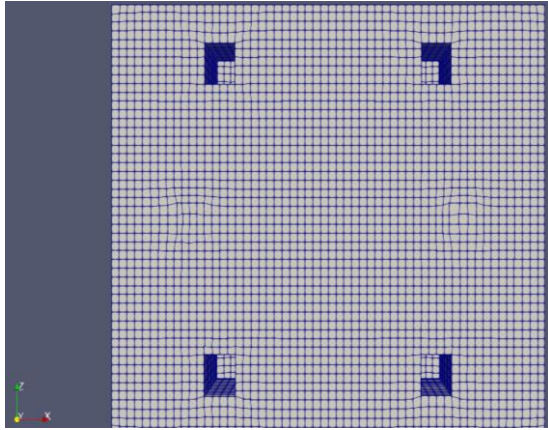
# Malha Caso de Referência 4



# Malha Caso de Referência 5



## Malha Base 8,5 cm: Refinação Nível 0



# **Apêndice C**

-

## **Alterações Manuais via Edição de Ficheiros de Texto de Configuração dos Casos**

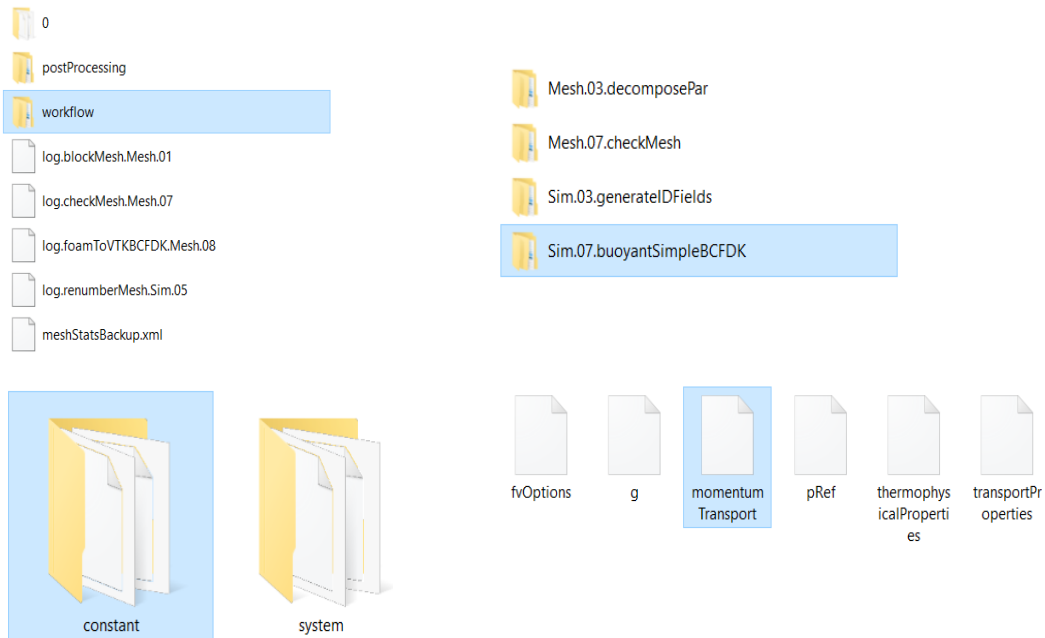
Neste anexo, serão demonstrados os vários procedimentos que se tomaram para efetuar cada uma das alterações manuais, aos casos inicialmente exportados da pasta *prject.bcfdk*, referidas ao longo dos capítulos 4 e 5. É necessário referir, em primeira instância, que para se efetuar todas as alterações referidas no apêndice C, foi necessário aceder à pasta de ficheiros automaticamente gerada em simultâneo com a criação da simulação CFD no *DesignBuilder*, designada de *CFD+*.

Posteriormente, era necessário entrar nessa pasta, e aceder à pasta *zip*, designada de *project.bcfdk*. De seguida, era necessário descomprimi-la, e aceder aos ficheiros da pasta *workflow*, onde se efetuariam as alterações referidas nos anexos subsequentes.

Adicionalmente, antes de se proceder às alterações era necessário limpar as iterações que o *DesignBuilder* tinha corrido inicialmente para a simulação, uma vez que a pasta *CFD+*, só seria gerada quando a simulação tivesse corrido pelo menos 1 iteração. Para limpar as iterações já realizadas, foi necessário recorrer à linha de comandos do *OpenFOAM*, através do *blueCFD - Core 2020*, e correr, em primeira instância, o código *./Clean.Sim.sh*, e de seguida, após se efetuarem as alterações na pasta *workflow*, dever-se-ia correr o comando *./Run.Sim.sh*, para que a simulação fosse efetuada.

## C.1 Alteração do Modelo de Turbulência *BuoyantkEpsilonBCFDK* para *kEpsilon*

Tal como referido em 4.4.1., foi necessário alterar o modelo de turbulência do *Kernel*, inicialmente utilizado nas simulações, para o modelo de turbulência do próprio *OpenFOAM*. Para se proceder a esta alteração foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: *workflow* → *Sim.07.buoyantSimpleBCFDK* → *constant* → *momentumTransport* → **Alteração de *BuoyantkEpsilonBCFDK* para *kEpsilon***. A sequência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas.



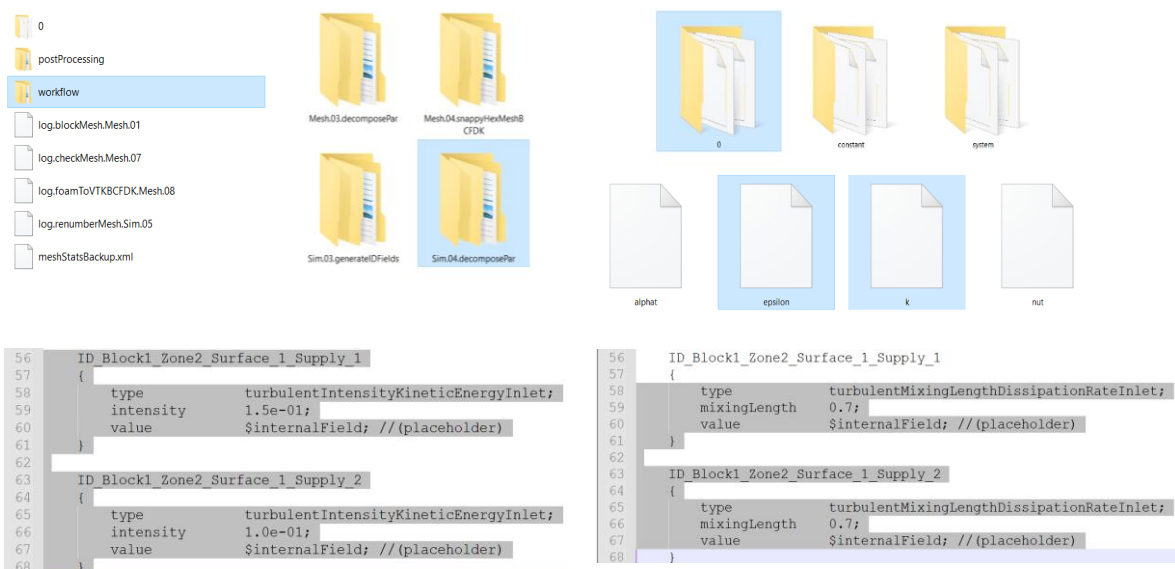
```
1  /----- C:\ --*\
2  File created by blueCFD-Kernel; http://blueCFD.com/Kernel
3  \-----/
4  FoamFile
5  {
6    version    2.0;
7    format     ascii;
8    class      dictionary;
9    location   "constant";
10   object     momentumTransport;
11 }
12 // *****
13
14 simulationType RAS;
15
16 RAS
17 {
18   modul kEpsilon;
19   turbulence on;
20   printCoeffs on;
21 }
22 // *****
23
24
```

## C.2 Alteração do *mixing length* e *turbulence intensity*

Tal como referido em 4.3.2, do artigo [8] foi inferida a intensidade turbulenta em cada um dos difusores de ar. Esta condição de fronteira apenas era possível ser implementada manualmente, através da edição de ficheiros de texto de configuração dos casos. Os valores da intensidade turbulenta referidos no artigo [8] eram de 10% para o difusor localizado na direção +X e de 15% para o difusor localizado na direção -X. (ver Figura 2).

O *mixing length*, apesar de ser um parâmetro não referido no artigo [8], foi também alterado em relação ao seu valor inicial obtido por *default* do *DesignBuilder*, uma vez que o valor pré-definido pelo software foi considerado demasiado reduzido (2,5 cm). Fundamentalmente, este parâmetro refere a distância da mistura do escoamento, ou seja, define até que altura deve ir o jato criado pelos difusores. Se este valor for muito reduzido, a zona de mistura do ar será reduzida, e uma vez que este fator poderia ser uma condicionante para as simulações, alterou-se o valor deste parâmetro para cada difusor, de 2,5 cm para 7 cm.

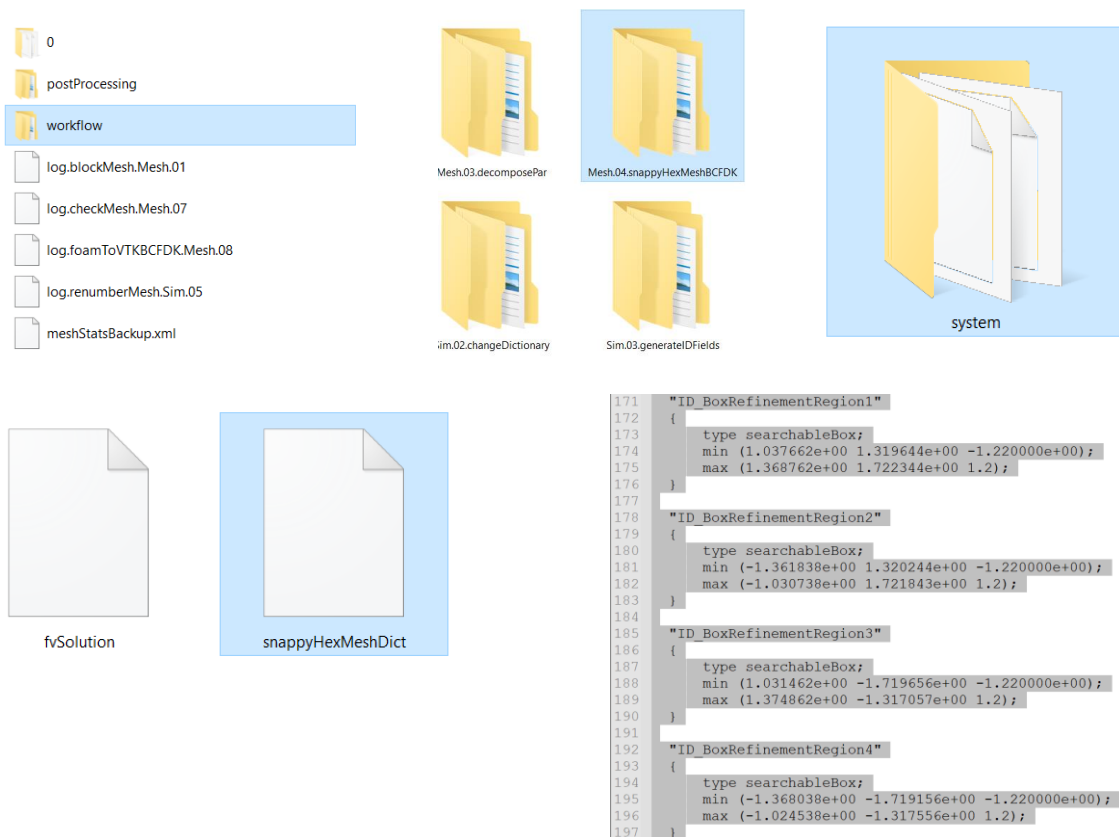
Para se proceder a ambas as alterações referidas, foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: **workflow** → **Sim.04.decomposePar** → **0** → **momentumTransport k e epsilon** → **Alteração de turbulence intensity e mixing length, respetivamente**. A sequência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas.



## C.3 Refinações Adicionais nos Ocupantes

Tal como referido em 4.4.3.3, foi necessário proceder-se à refinação manual dos ocupantes, em termos de largura, uma vez que no *DesignBuilder* apenas era possível definir a distância das células refinadas às superfícies dos ocupantes. É de referir ainda que a refinação realizada manualmente, resultou no efeito visualizado na imagem da direita da Figura 8 em 4.4.3.3. Para se proceder a esta alteração foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: **workflow** → **Mesh.04.snappyHexMeshBCFDK** → **system** → **snappyHexMeshDict** → **Alteração para a Refinação pretendida**. A sequência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas.

É preciso referir também, que após a implementação das novas refinações, foi necessário apagar a malha gerada inicialmente pelo *DesingBuilder*, e posteriormente gerar uma nova malha. Para se efetuar ambos os passos, foi necessário recorrer à linha de comandos do *OpenFOAM*, através do *blueCFD - Core 2020*, implementando primeiro, o comando **./Clean.Mesh.sh**, para apagar a malha criada pelo *DesingBuilder*, e de seguida, correr o comando **./Run.Mesh.sh**. para gerar a nova malha.

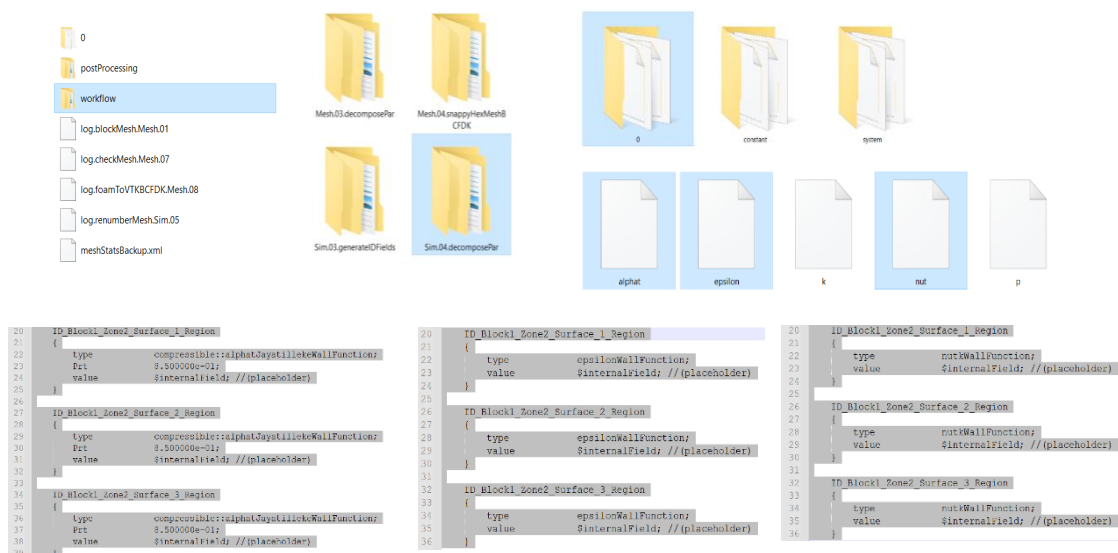


## C.4 Alteração para *Wall Functions* do *OpenFOAM*

Esta foi uma alteração que foi efetuada ao longo dos vários estudos conduzidos no capítulo 4, e consistia em modificar as funções de tratamento de parede previamente implementadas. Por *default*, as funções de tratamento de parede em vigor eram as do *Kernel*, e tal como referido, em 4.4.3.4 ou em 4.4.5.1, foi necessário testar as funções de tratamento de parede do *OpenFOAM*.

Fundamentalmente, para se efetuar esta alteração, era apenas necessário apagar uma fracção da nomenclatura definida para as *wall functions*, isto é, por exemplo, uma das *wall functions* do *Kernel* estava definida com a nomenclatura, *alphatJayatillekeWallFunctionBCFDK*, para se alterar para a função de tratamento de parede do *OpenFOAM*, a nomenclatura da *wall function* passaria a ser *alphatJayatillekeWallFunction*.

Estas alterações foram implementadas nas superfícies do domínio, ou seja, nas paredes, nas lâmpadas, e nas superfícies dos bonecos. Para se proceder a esta alteração foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: *workflow* → *Sim.04.decomposePar* → *0* → *k*, *alphat* e *nut* → **Alteração para as *Wall Functions* do *OpenFOAM***. . A seqüência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas.

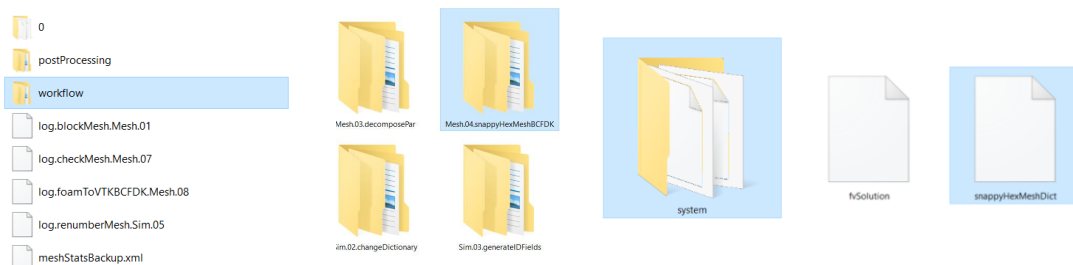


## C.5 Inserção de *Layers*

Como referido, a partir de 4.4.5.4, efetuaram-se várias simulações onde foi necessária a inserção de *layers*. Como se referiu também, neste processo era necessário referir quantas *layers* seriam inseridas nas superfícies, e qual seria a espessura de cada *layer*.

Adicionalmente, se se aplicasse mais do que uma *layer*, era necessário definir também o parâmetro *expansion ratio* cuja função foi descrita em 4.4.6.2. Para se proceder a esta alteração foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: **workflow** → **Mesh.04.snappyHexMeshBCFDK** → **system** → **snappyHexMeshDict** → **Implementação de *Layers* na secção *AddLayersControl***.

A sequência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas. É de referir que ao proceder-se a esta alteração, tal como em C.3, era necessário gerar uma nova malha, sendo para isso necessário recorrer à linha de comandos do *OpenFOAM*, através do *blueCFD - Core 2020*, implementando primeiro, o comando `./Clean.Mesh.sh`, para apagar a malha criada pelo *DesingBuilder*, e de seguida, correr o comando `./Run.Mesh.sh` para gerar a nova malha.



```
507 addLayersControls
508 {
509     relativeSizes false;
510     layers
511     {
512         "ID_Block1_Zone2_Surface [123456] Region"
513         {
514             nSurfaceLayers 1;
515         }
516         "ID_Block1_Zone2_Surface_2_Flux_.*"
517         {
518             nSurfaceLayers 1;
519         }
520         ID_Block1_Zone2_Surface_2_Extract_1
521         {
522             nSurfaceLayers 1;
523         }
524         "ID_Block1_Zone2_Surface_1_Supply_.*"
525         {
526             nSurfaceLayers 1;
527             thickness 0.025;
528         }
529         "ID_Block1_BlockComponentBlock.*)"
530         {
531             nSurfaceLayers 1;
532             thickness 0.01;
533         }
534     }
535 }
536

539     thickness 0.01;
540     expansionRatio 1.5;
541     finalLayerRatio 0.3;
542     minThickness 0.001;
543     nGrow 1;
544     featureAngle 90;
545     maxFaceThicknessRatio 0.5;
546     nSmoothSurfaceNormals 5;
547     nSmoothThickness 20;
548     minMedianAxisAngle 130;
549     maxThicknessToMedialRatio 0.3;
550     nSmoothNormals 5;
551     slipFeatureAngle 30;
552     nRelaxIter 30;
553     nBufferCellsNoExtrude 1;
554     nLayerIter 50;
555     nRelaxedIter 20;
```

## C.6 Utilização do executável *RefineWallLayer*

Tal como referido em 4.4.6.3, esta foi uma abordagem alternativa para a adição de *layers*, que como explicado no subcapítulo mencionado, consistia em dividir a célula na proporção pretendida. Neste caso, para a simulação V3.5, tal como sublinhado, pretendia-se criar uma *layer* com espessura de 0,01 m, e como a célula da malha base tinha 0,05 m de lado, era necessário dividi-la na proporção de 0,2, através do executável *refineWallLayer*, presente no *OpenFOAM*.

É de referir que esta foi a única alteração manual efetuada ao longo do estudo de validação, em que não foi necessário recorrer à pasta *workflow*, apenas foi preciso correr o seguinte comando, na linha de comandos do *OpenFOAM*, através do *blueCFD - Core 2020: refinewallLayer '(ID\_Block1\_Zone\_2\_Surface\_1\_Region)' 0.2 -overwrite*.

A nomenclatura *ID\_Block1\_Zone\_2\_Surface\_1\_Region*, refere-se à identificação da superfície onde se pretendia aplicar a referida função. Adicionalmente, era necessário implementar também este comando no *script* definido para a geração de malha, sendo para isso, necessário alterar o ficheiro gerado automaticamente aquando da criação da simulação, *Run.Mesh.sh*. A implementação deste comando pode ser analisada na imagem abaixo ilustrada.

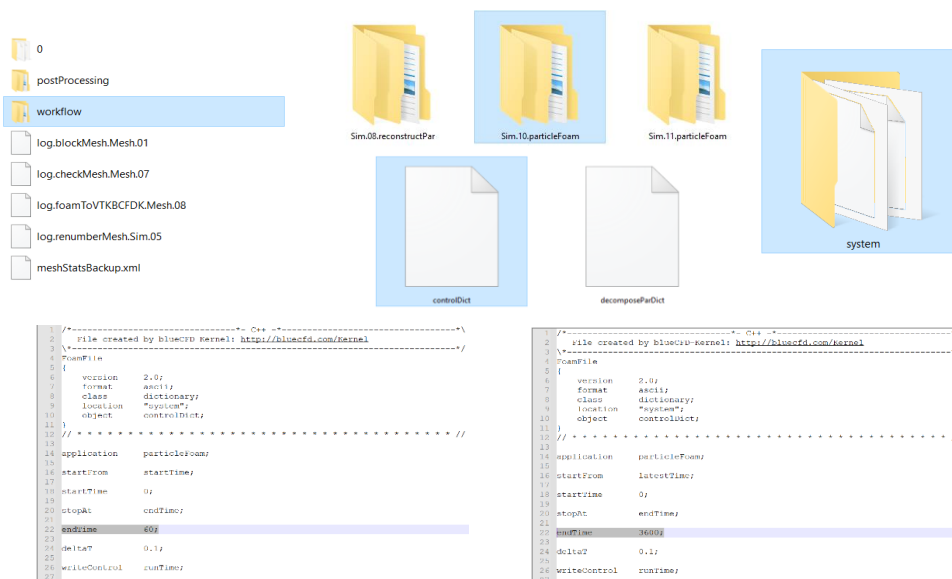
```
27 cp -r workflow/Mesh.05.reconstructParMesh/* ./
28 runApplication -s Mesh.05 reconstructParMesh -constant
29
30 rm -r processor*
31
32 cp -r workflow/Mesh.06.transformPoints/* ./
33 runApplication -s Mesh.06 transformPoints -translate '(-2.435962 2.0482565 1.2)'
34
35 runApplication -s Mesh.065 refineWallLayer '(ID_Block1_Zone2_Surface_1_Region)' 0.2 -overwrite
```

## C.7 Definição do Tempo de Simulação de Escoamento de Partículas

Tal como referido em 5.3, era necessário definir os tempos de simulação na edição de ficheiros de texto de configuração dos casos de escoamento de partículas, tendo de se aceder ao ficheiro *controlDict* para definir o tempo de simulação, que nos casos de estudo, excetuando o regime de respiração normal, era de 60 minutos. Nas simulações de escoamento de partículas, para efeitos de melhor perceção tanto no âmbito da tese, como no âmbito do projeto PAFSE, definiu-se que o 1º minuto da simulação deveria ser analisado mais detalhadamente, e a restante simulação seria analisada na mesma velocidade, só que mais rápida que no 1º minuto.

Nesse sentido, foi necessário definir 2 tempos de simulação, um em que a simulação era conduzida de forma mais detalhada nos primeiros 60 segundos, e no outro, em que a simulação era conduzida da mesma forma, para os restantes 59 minutos da simulação. Para se efetuar as definições acima referidas foi necessário aceder às pastas *Sim10.particleFoam* e *Sim11.particleFoam*, onde estavam contidos os ficheiros *controlDict*, para a definição do 1º minuto e dos restantes 59 minutos da simulação, respetivamente.

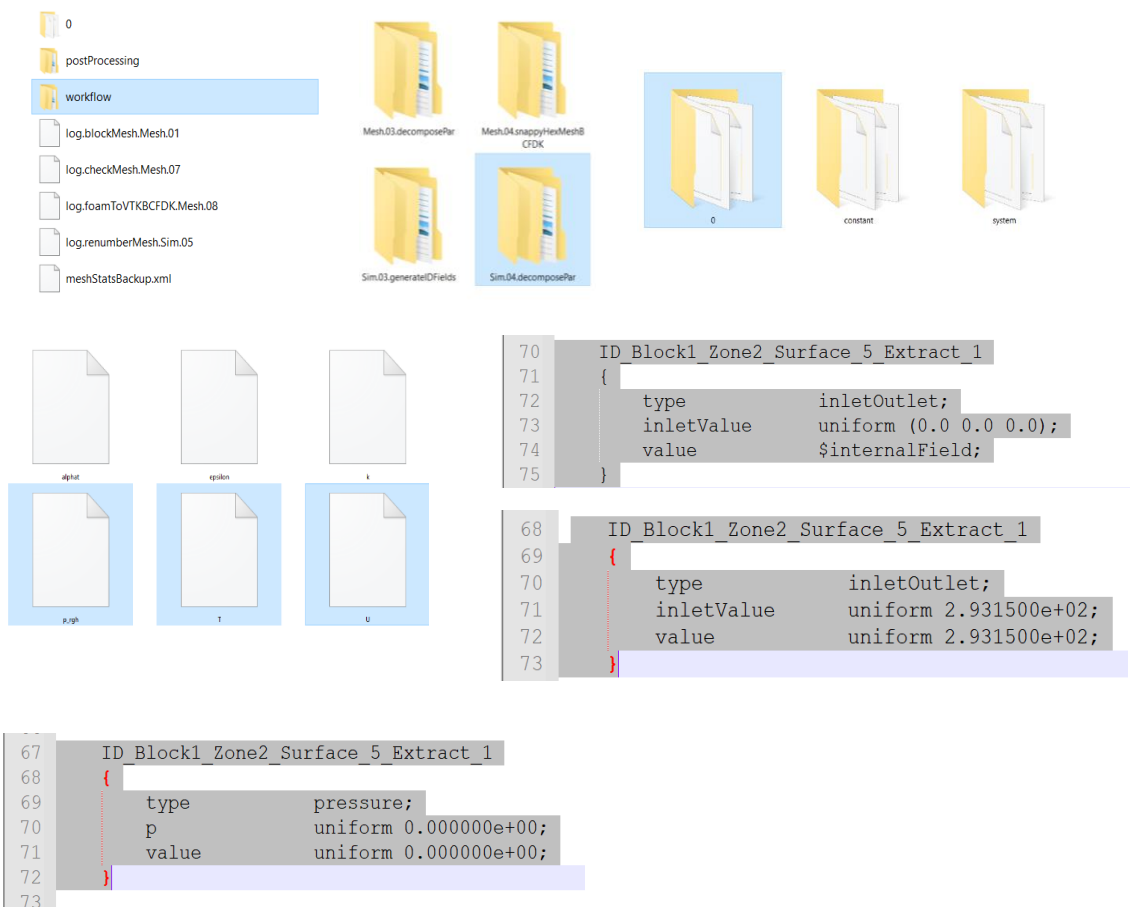
Para se efetuar estas definições foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: **workflow** → **Sim10.particleFoam/Sim11.particleFoam** → **system** → **controlDict** → **Definição do Tempo de Simulação**. A sequência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas.



## C.8 Condições de Fronteira Manualmente Implementadas para o Extrator de Ar

Tal como mencionado ao longo do subcapítulo 5.4, e em 4.3.2, no capítulo 4, para se conseguir simular a condição de fronteira definida no *DesignBuilder*, para o extrator de ar, foi necessário implementar, manualmente, certas condições de fronteira através da edição dos ficheiros de texto de configuração dos casos, que foram depois simulados com o *OpenFOAM*, via linha de comandos.

As alterações foram processadas ao nível da velocidade, temperatura e pressão do ar no extrator, conforme referido em 4.3.2 e ao longo de 5.4, e para se proceder a estas alterações foi necessário aceder, pela seguinte ordem, às pastas de ficheiros mencionadas: *workflow* → *Sim.04.decomposePar* → *0* → *U, T, p\_rgh* → **Alteração das condições de fronteira para o extrator de ar, respetivamente**. A sequência referida, também pode ser observada nas imagens abaixo ilustradas.



## **Apêndice D**

-

**Determinação da Dimensão e Localização das Geometrias do Modelo Físico, e da Localização dos Pontos de Medição de Velocidade e Temperatura**

Neste anexo, pretende-se demonstrar os procedimentos efetuados para se determinar a dimensão e a localização na sala, dos elementos inerentes ao modelo físico do artigo [8], referidos e tabelados em 4.3.1. Pretende-se também, ilustrar os procedimentos para a determinação dos locais de medição da temperatura e velocidade, mencionados no artigo [8].

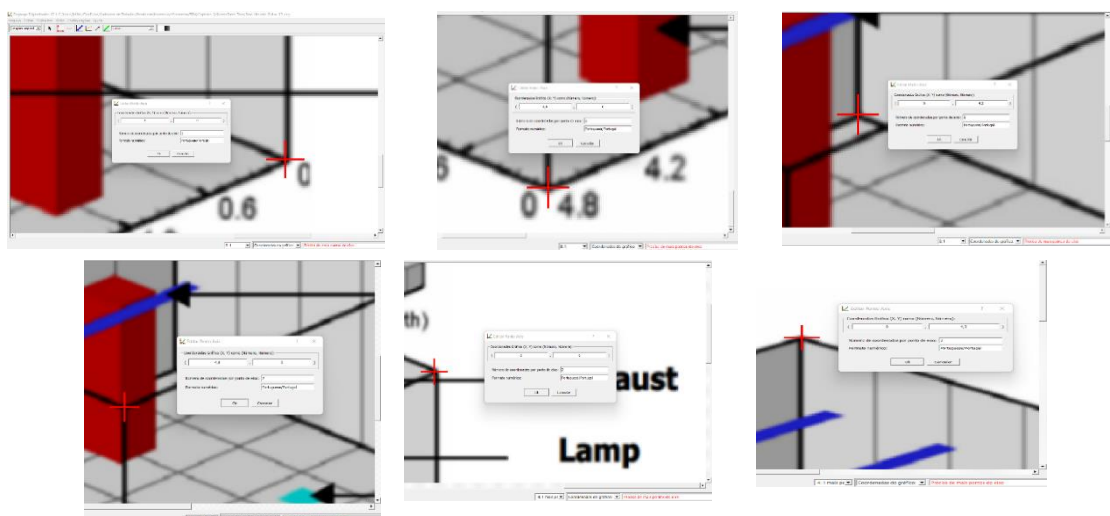
Em primeira instância, é necessário reforçar a noção apresentada tanto em 4.2.1, como em 4.2.2, de que os valores apresentados neste anexo são meras aproximações do que realmente deveriam ser, tendo-se realizado inferências a partir da Figura 1 e da Figura 2 para se determinar as respectivas dimensões e localizações mencionadas. É preciso assinalar também que o software utilizado para determinar os aspetos inferidos foi o *Enguage Digitizer*, tal como sublinhado ao longo da introdução do capítulo.

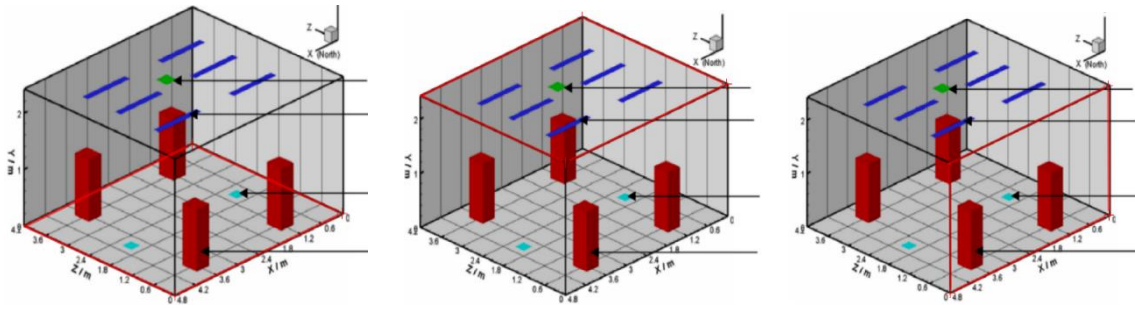
## D.1 – Determinação da Dimensão e Localização dos Elementos Constituintes do Modelo Físico

Tendo em conta a Figura 2, era possível inferir, tal como assinalado na Tabela 7, os elementos constituintes do modelo físico: 6 lâmpadas, 1 extrator, 1 difusor e 4 simuladores de humanos. Do artigo [8] eram conhecidas as dimensões de atravancamento da sala, referidas na Tabela 6, onde o primeiro aspeto para se utilizar o *Engauge* seria importar a Figura 2 para o software, e aí inserir 2 referenciais cartesianos 2D, sequencialmente, com as dimensões de atravancamento da sala, atribuindo a cada dimensão da geometria (X, Y e Z) a respetiva cota indicada na Tabela 6.

A razão pelo qual foi necessário definir, sequencialmente, 2 referenciais 2D, tem a ver com o facto do *Engauge* não permitir definir de uma só vez, o referencial 3D, ou seja, para criar os referenciais no software, apenas era permitido introduzir as coordenadas de 3 pontos, em que um deles era obrigatoriamente a origem do referencial (0;0), de maneira que, posteriormente, só poderiam ser definidas 2 cotas de atravancamento através das coordenadas correspondentes.

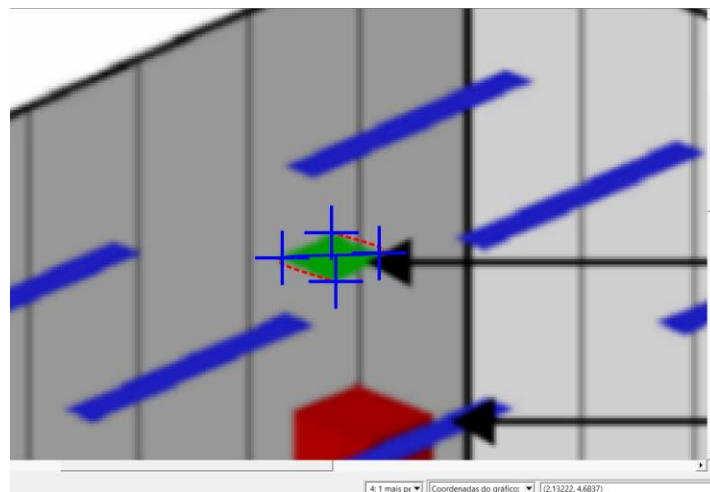
A cota de atravancamento de altura (Plano em Y) apenas era necessária para determinar a altura exata dos bonecos. O plano de topo (XZ) era necessário para determinar as dimensões e localização das lâmpadas, e o plano do chão (XZ) para determinar as dimensões da base dos bonecos, assim como da sua localização, tal como a dos difusores. A introdução das coordenadas, bem como a formação dos planos, é possível de ser observada nas imagens abaixo ilustradas.





Tendo os planos criados, era uma questão de se efetuar a determinação da coordenada de cada vértice de cada geometria, e tendo esses valores, para além de se conseguir determinar a dimensão dos elementos, era possível obter, em simultâneo, a localização dos mesmos no modelo.

Com os planos definidos, existia uma funcionalidade no *Engauge* que permitia determinar as coordenadas de qualquer ponto desse referencial. Como tal, tendo o plano do teto definido (XZ), para determinar a dimensão do extrator foi necessário obter as coordenadas dos vértices deste elemento. A título de exemplo, abaixo, demonstram-se os procedimentos adotados para determinar as dimensões, bem como a localização do extrator.



Como se verifica, as 4 cruces azuis assinalam a coordenada de cada vértice do extrator. Posteriormente, era necessário importar as coordenadas obtidas pelo software para um ficheiro de texto, para que se pudesse analisar estes valores. As coordenadas obtidas para os vértices do extrator podem ser analisadas na tabela abaixo.

Vértice	Coordenada em X [m]	Coordenada em Z [m]
1	2,381	2,592
2	2,381	2,301
3	2,682	2,301
4	2,682	2,592

Tendo estas medidas, já era conhecida a localização do extrator na sala, onde para calcular a dimensão do objeto, apenas era necessário realizar os seguintes cálculos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{X}_{Extrator} = 2,682 - 2,381 \\ \bar{Z}_{Extrator} = 2,592 - 2,301 \end{array} \right. \leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \bar{X}_{Extrator} \approx \mathbf{0,301\ m} \\ \bar{Z}_{Extrator} \approx \mathbf{0,291\ m} \end{array} \right.$$

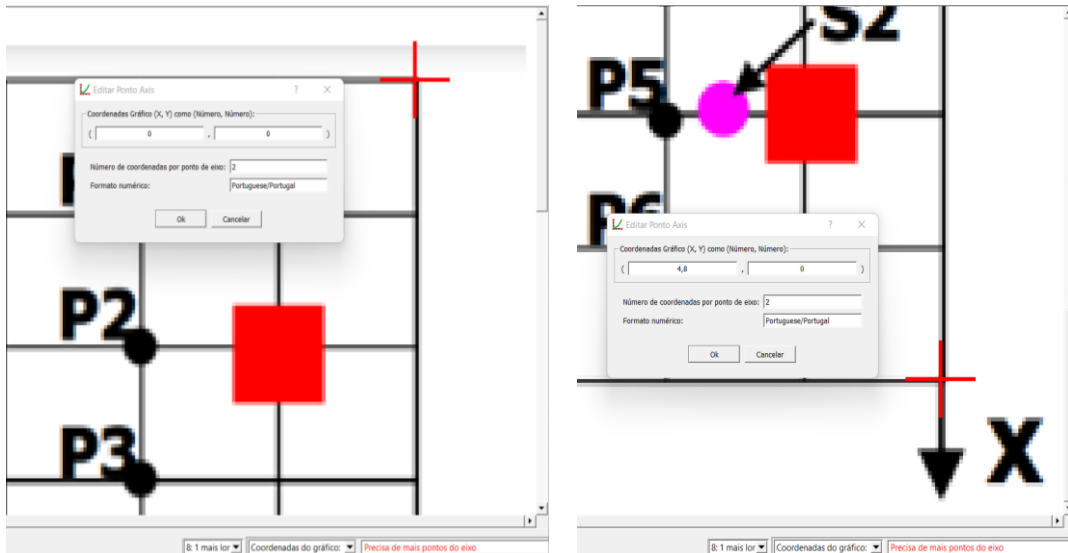
Este foi o procedimento adotado para se determinar todas as dimensões e localizações das geometrias do modelo físico, em que, tal como sublinhado em 4.2.1, 4.2.2 e em 4.5.1, existia sempre uma incerteza acerca da veracidade destes resultados, já que não foi possível obter uma confirmação destes valores no artigo [8].

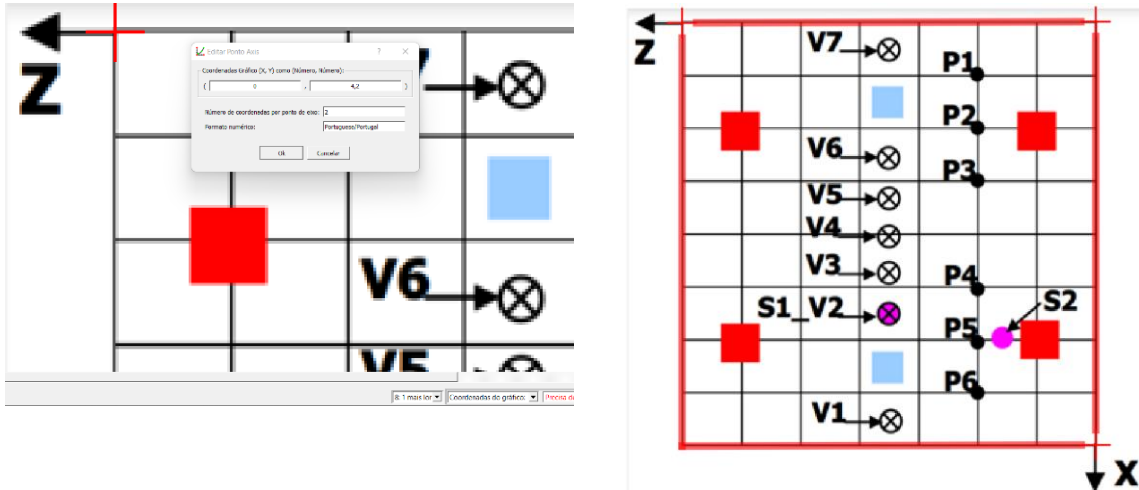
Mais se acrescenta, que como referido em 4.4.5.6, por forma a inserir-se *layers* foi necessário efetuar um reposicionamento, assim como um redimensionamento destas geometrias, onde, por exemplo, o extrator, com as dimensões de 0,291 e 0,301 m de lado, foi redimensionado para um valor exato de 0,3 m de lado. O mesmo se verificou para as restantes geometrias, onde a dimensão final destes objetos é a que se observa na Tabela 7 em 4.3.1.

## D.2 – Determinação da Localização dos Pontos de Medição de Temperatura e de Velocidade

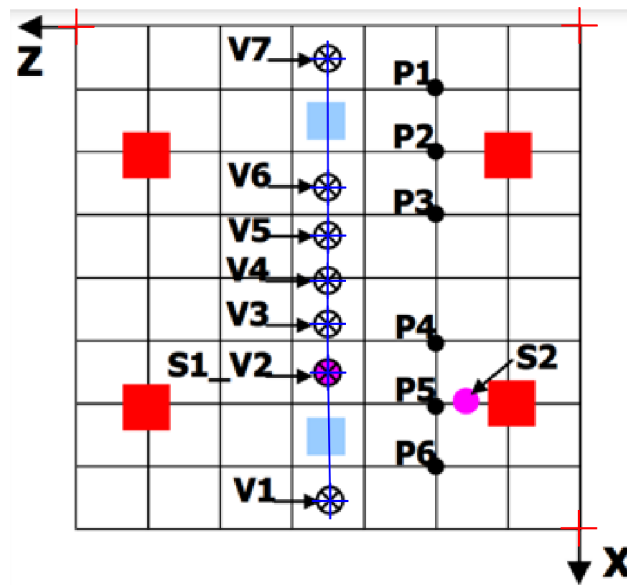
Tal como referido em 4.2.1, e à semelhança do que se verifica em D.1, também foi necessário determinar a localização dos pontos de medição de temperatura e velocidade mencionados no artigo [8], já que esta informação não constava no respetivo artigo. Para se determinar estes parâmetros, foi utilizada a imagem da Figura 1 do capítulo 3.

Os procedimentos adotados neste caso foram muito semelhantes aos utilizados em D.1 para se determinar as localizações das geometrias no modelo físico, isto é, recorreu-se de novo, ao software *Engauge Digitizer*, tendo-se definido, primeiro, o referencial cartesiano 2D utilizando-se as cotas de atravancamento indicadas na Tabela 6, onde em comparação com o que se fez em D.1, apenas foi necessário definir 1 referencial cartesiano, já que os pontos de medição apenas se encontram localizados no plano do chão (XZ). A introdução das coordenadas, bem como a formação do plano, é possível de ser observada nas imagens abaixo ilustradas.





Tendo agora os planos definidos, era apenas necessário utilizar a funcionalidade do *Engauge* mencionada em D.1, que permitia determinar a coordenada de cada ponto no referencial, em que neste caso, se determinou a coordenada do centro de cada ponto de medição, tal como exibido na imagem abaixo ilustrada.



Tal como em D.1, era necessário importar as coordenadas dos pontos de medição fornecidas pelo software, para um ficheiro de texto, onde as coordenadas obtidas no *Engauge* para cada um dos pontos de medição, encontram-se na tabela abaixo exibida.

Ponto de Medição	Coordenada em X [m]	Coordenada em Z [m]
V1	4,514	2,101
V2	3,308	2,101
V3	2,811	2,101

V4	2,416	2,101
V5	2,000	2,101
V6	1,511	2,101
V7	0,312	2,101

Tal como referido em 4.2.1, existia uma incerteza acerca da veracidade destas localizações, e atendendo ao ilustrado na Figura 1, decidiu-se que a coordenada em Z de cada um dos pontos de medição deveria ser 2,1 m, exatamente ao meio da sala, e para diminuir a incerteza da localização das coordenadas em X, decidiu-se arredondar cada valor estipulado na tabela, por defeito, às décimas, ou seja, por exemplo, a coordenada em X de V1 era 4,514 m, arredondando este valor por defeito às décimas, passava a ser 4,5 m. Estas 2 alterações levaram às localizações para os pontos de medição inferidas na Tabela 5 em 4.2.1.

# **Anexo A**

-

**Dados Fornecidos pelo Professor Q. Chen**

Tal como referido no subcapítulo 4.2.3, contactou-se os autores do artigo [8], onde apenas o professor Qingyan Chen respondeu. Todavia, os dados que o professor Chen enviou, eram praticamente idênticos aos que o artigo [8] continha. A única informação adicional que se obteve, foi os dados da temperatura registada em *Celsius*, em cada medição. Os dados enviados pelo professor Chen, podem ser consultados no restante anexo.

### Experiment Results

Two experiments with the same thermal fluid boundary conditions but different particle source positions have been conducted. The thermal boundary conditions, temperature and velocity field are presented in Table A.4-A.6 respectively. Temporal development of particle concentration at the exhaust is listed in Table A.7 and the particle concentration inside the room with a source near the inlet and one near an occupant is shown in Table A.8 and A.9 respectively.

Table A.4 Measured boundary conditions in non-isothermal condition.

Boundary	Surface temperature (°C)	Boundary	Surface temperature (°C)	Heat power (W)
North wall (+X)	24.9	Floor (-Y)	23	-
South wall (-X)	25.0	Lamps (each)	-	64
East wall (+Z)	25.5	Persons (each)	31.6	100
West wall (-Z)	25.3	Supply (north)	20.4	-
Ceiling (+Y)	25.7	Supply (south)	19.9	-

Table A.5 Velocity measurement data in non-isothermal condition.

Height (m)	V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	V5 (m/s)	V6 (m/s)	V7 (m/s)
0.1	0.07	0.20	0.04	0.03	0.03	0.03	0.07
0.3	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.09
0.6	0.09	0.09	0.03	0.02	0.04	0.03	0.10
1.1	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.02	0.08
1.4	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03
1.7	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02
2.2	0.03	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03	0.02

Table A.6 Temperature measurement data in non-isothermal condition.

Height (m)	V1 (°C)	V2 (°C)	V3 (°C)	V4 (°C)	V5 (°C)	V6 (°C)	V7 (°C)
0.1	23.1	22.6	23.0	23.3	23.3	23.1	22.8
0.3	22.9	22.6	23.2	23.4	23.3	23.5	22.9
0.6	22.6	22.6	23.5	23.5	23.8	23.6	22.2
1.1	23.7	24.1	24.3	24.4	24.3	24.7	22.6
1.4	24.7	24.6	24.5	25.0	24.9	24.8	24.5
1.7	25.4	25.4	25.0	25.3	25.4	25.4	25.0
2.2	25.4	25.4	25.3	25.2	25.4	25.7	25.3