



## Estudo experimental de processos de ventilação em sala modelo

GUILHERME ANTÓNIO VALENTE OSSWALD

setembro de 2023

## **Estudo experimental de processos de ventilação em sala modelo**

Guilherme António Valente Osswald

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isep

P.PORTO

## **Estudo experimental de processos de ventilação em sala modelo**

Guilherme António Valente Osswald

1170563

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Rui Filipe Neves Araújo Rego e Coorientação do Professor Doutor Fernando Aristides da Silva Ferreira de Castro.

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## AGRADECIMENTOS

Sinto-me grato pelo apoio da minha família, que ao longo deste percurso me entendeu e suportou nos momentos em que me vi mais necessitado. Foi com a educação e recursos com que me presentearam ao longo do meu crescimento que me encontro hoje a finalizar este objetivo.

Agradeço também aos meus orientadores, Prof. Doutor Rui Rego e Prof. Doutor Aristides Castro, pelo acompanhamento dado neste último ano. A sua menção num único parágrafo não faz jus ao conhecimento cedido e apoio dado ao longo da elaboração de todo o trabalho realizado para a escrita desta dissertação. A estes acrescento o Engenheiro Joaquim Monteiro, cuja experiência e conhecimento prático foram igualmente fundamentais para este trabalho.

Por último, mas não menos importante, desejo expressar o prazer que tive em ser acompanhado pelo meu grupo de colegas ao longo destes dois anos de mestrado. Entre estes realço o meu colega João Miranda, cujo apoio académico se demonstrou não só importante como necessário, como se verifica no conteúdo desta dissertação.



## RESUMO

Dentro dos consumos energéticos globais, os edifícios compreendem uma parte significativa, sendo os sistemas AVAC, aquecimento, ventilação e ar condicionado, por sua vez, um dos maiores componentes nos gastos dos edifícios. Este consumo tem justificado a investigação de novas estratégias e equipamentos de ventilação que consigam aumentar a sua eficiência e diminuir os gastos desnecessários. Para se conseguir esta diminuição, têm vindo a ser estudadas técnicas e equipamentos de ventilação que aumentem a sua eficiência. Estes testes, devido à sua complexidade crescente, implicam estudos que se apoiam fundamentalmente no CFD, Mecânica de Fluidos Computacional, ferramenta que prevê o comportamento de escoamentos, interiores ou exteriores, baseando-se na conservação de massa, energia e quantidade de movimento dos fluidos.

As simulações numéricas do CFD proporcionam resultados que necessitam, por sua vez, de validação. A validação consiste na comparação de resultados experimentais com os resultados numéricos. Estes dados experimentais são conseguidos por meio de ensaios experimentais da situação real análoga à que se pretende simular.

Nesta dissertação são realizados ensaios experimentais para uso em validação de simulação numérica no caso de uma sala de testes isotérmica climatizada. Estes ensaios consistiram na medição de velocidade e temperatura de ar no interior da sala com o uso de anemómetros de fio quente omnidirecionais para a situação de caudal de insuflação constante a temperatura constante. Foi proposta uma metodologia de ensaio e fizeram-se alguns testes para validar a mesma.

Esta validação de ensaio permitiu validar a metodologia usada com base nas condições iniciais estabelecidas e na coerência de resultados ao longo do tempo. Também foi avaliada a interferência da obstrução física do suporte usado nas medições de velocidade.

Após a validação de ensaio mediu-se a magnitude da velocidade e a temperatura numa malha de 119 pontos no plano XY em 5 alturas distintas. As medições nestes pontos permitiram mapear as magnitudes em diversos planos e retirar os seus contornos.

Com estes dados foi possível caracterizar a ventilação como Ventilação Aderente à Parede Vertical e observaram-se fenómenos de escoamento interior característicos desta ventilação.

Estes resultados experimentais foram posteriormente usados para validação de resultados numéricos, permitindo a validação da simulação numérica referente a este caso.

**PALAVRAS-CHAVE**

Estudo experimental, Ventilação, Validação de CFD, Sala modelo

## ABSTRACT

Within global energy consumption, buildings comprise a significant part, with HVAC, heating, ventilation and air conditioning systems, in turn, being one of the largest components in building expenses. This consumption has justified the investigation of new ventilation strategies and equipment that can increase efficiency and reduce unnecessary expenses. To achieve this reduction, ventilation techniques and equipment have been studied to increase efficiency. These tests, due to their increasing complexity, involve studies that are fundamentally based on CFD, Computational Fluid Mechanics, a tool that predicts the behavior of flows, interior or exterior, based on the conservation of mass, energy and momentum of fluids.

CFD numerical simulations provide results which require validation. Validation consists of comparing experimental results with numerical results. These experimental data are obtained through experimental tests of the real situation analogous to the one intended to be simulated.

In this thesis, experimental tests are carried out to validate numerical simulation in the case of an air-conditioned isothermal test room. These tests consisted of measuring air speed and temperature inside the room using omnidirectional hot wire anemometers for the situation of constant inflation flow at constant temperature. A testing methodology was proposed and some tests were carried out to validate it.

These tests made it possible to validate the methodology used based on the established initial conditions and the consistency of results over time. The interference of physical obstruction of the support used in speed measurements was also evaluated.

After the test validation, the magnitude of speed and temperature were measured on a grid of 119 points in the XY plane at 5 different heights. Measurements at these points made it possible to map the magnitudes in different planes and remove their contours. With these data it was possible to characterize the ventilation as Vertical Wall Attached Ventilation and internal flow phenomena characteristic of this ventilation were observed. These experimental results were later used to validate numerical results, allowing the validation of the numerical simulation relating to this.

**KEYWORDS**

Experimental Study, Ventilation, CFD Validation, Test chamber

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	2
1.3	Entidade acolhedora . . . . .	2
1.4	Metodologia de Dissertação . . . . .	2
1.5	Estrutura . . . . .	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	Ventilação em Espaços Interiores . . . . .	5
2.1.1	<i>Conforto Térmico</i> . . . . .	6
2.1.1.1	Definição . . . . .	6
2.1.1.2	Normas de Conforto Térmico . . . . .	7
2.1.2	<i>Qualidade do Ar Interior</i> . . . . .	8
2.1.2.1	Definição . . . . .	8
2.1.2.2	Normas e Legislação da Qualidade do Ar Interior . . . . .	8
2.1.3	<i>Eficácia da Ventilação</i> . . . . .	9
2.1.3.1	Definição . . . . .	9
2.1.3.2	Determinação da idade média do ar . . . . .	9
2.2	Estudos Experimentais para Validação de CFD . . . . .	10
2.2.1	<i>Uso de CFD para estudos de escoamentos em espaços interiores</i> . . . . .	10
2.2.2	<i>Estudos Experimentais realizados</i> . . . . .	11
2.2.3	<i>Resumo de casos</i> . . . . .	22
2.2.3.1	Metodologias . . . . .	22
2.2.3.2	Vantagens e Desvantagens . . . . .	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>25</b>
3.1	Sala de Ensaio (SATEC) . . . . .	25
3.2	Equipamento . . . . .	27
3.3	Ensaio Experimental . . . . .	28
3.3.1	<i>Pontos de Medição</i> . . . . .	28
3.3.2	<i>Definição da nomenclatura de cada ponto de medição</i> . . . . .	36
3.3.3	<i>Definição do tempo de medição</i> . . . . .	37
3.3.4	<i>Condições de ensaio</i> . . . . .	41
3.3.5	<i>Procedimento</i> . . . . .	42
3.4	Tratamento e Análise de Dados . . . . .	44
3.4.1	<i>Tratamento de Dados</i> . . . . .	44
3.4.2	<i>Análise de Dados</i> . . . . .	47
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE ENSAIO</b>	<b>49</b>
4.1	Comparação de velocidades . . . . .	49
4.2	Uniformidade de temperatura . . . . .	53

4.3	Obstrução Física do Suporte . . . . .	56
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	<b>59</b>
5.1	Resultados . . . . .	59
5.1.1	<i>Análise de Distribuição de Velocidades</i> . . . . .	59
5.1.2	<i>Caracterização de Ventilação</i> . . . . .	67
5.2	Discussão de Resultados . . . . .	69
5.2.1	<i>Validação de ensaio</i> . . . . .	69
5.2.2	<i>Análise de velocidades e Caracterização de estratégia de ventilação</i> . . . . .	69
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>71</b>
6.1	Conclusões finais . . . . .	71
6.2	Limitações . . . . .	72
6.2.1	<i>Equipamento</i> . . . . .	72
6.2.2	<i>Condições Térmicas</i> . . . . .	72
6.3	Trabalhos futuros . . . . .	72
6.3.1	<i>Estudos de Velocidade do Ar</i> . . . . .	73
6.3.2	<i>Estudos de Humidade Relativa do Ar</i> . . . . .	73
6.3.3	<i>Estudos de Turbulência</i> . . . . .	73
6.3.4	<i>Estudos Térmicos</i> . . . . .	73
6.3.5	<i>Estudos de Caudal</i> . . . . .	74
<b>A</b>	<b>APÊNDICE A</b>	<b>81</b>
<b>B</b>	<b>APÊNDICE B</b>	<b>83</b>
<b>C</b>	<b>APÊNDICE C</b>	<b>87</b>
<b>D</b>	<b>APÊNDICE D</b>	<b>103</b>
<b>E</b>	<b>APÊNDICE E</b>	<b>105</b>
<b>A</b>	<b>ANEXO A</b>	<b>115</b>
<b>B</b>	<b>ANEXO B</b>	<b>117</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Gráfico de apoio para determinação de conforto Térmico, adaptado de [14]. . . . .	7
Figura 2.2	Número de artigos publicados sobre CFD em ventilação, adaptado de [26]. . . . .	10
Figura 2.3	Pontos de velocidade medidos, adaptado de [33]. . . . .	12
Figura 2.4	Concentração de gás a diferentes alturas para manequim sentado e em pé, adaptado de [34]. . . . .	13
Figura 2.5	Comparação de medições LDA com simulação CFD, adaptado de [35]. . . . .	14
Figura 2.6	Comparação de PIV com HWA a velocidades médias de saída de 0.8, 1.1 e 1.4 metros por segundo da esquerda para a direita, adaptado de [37]. . . . .	15
Figura 2.7	Esquema de Sala para Estudo Experimental, adaptado de [4]. . . . .	15
Figura 2.8	Pontos de medição, adaptado de [38]. . . . .	16
Figura 2.9	Localização de pontos de medição no plano e a sua localização, adaptado de [23]. . . . .	17
Figura 2.10	Situação de secretária aberta (esquerda) e fechada (direita), adaptado de [40]. . . . .	18
Figura 2.11	Comparação de velocidades experimentais e simulação numérica, adaptado de [6]. . . . .	19
Figura 2.12	Comparação de temperaturas experimentais e simulação numérica, adaptado de [6]. . . . .	19
Figura 2.13	Modelo experimental para estudo do algoritmo <i>EnKF</i> , adaptado de [50]. . . . .	21
Figura 3.1	Modelo 3D de SATEC com pormenor de pleno lateral. . . . .	26
Figura 3.2	Modelo da Malha Interior. . . . .	30
Figura 3.3	Modelo da Malha Exterior. . . . .	32
Figura 3.4	Modelo da Malha Central. . . . .	35
Figura 3.5	Variação de erro relativo da média acumulada ao longo do tempo para determinação do tempo de estabilização. . . . .	39
Figura 3.6	Variação de erro relativo da média acumulada ao longo do tempo para determinação do tempo de medição. . . . .	40
Figura 3.7	Esquema de Instalação da SATEC. . . . .	43
Figura 3.8	Medição de velocidade no ponto 011 da Malha Interior sem filtro LPF, com filtro LPF = 0.15625 Hz e com filtro LPF = 0.02 Hz. . . . .	44
Figura 3.9	FFT de sinal do ponto 011 da Malha Interior (a) sem LPF, (b) com LPF de frequência limite 0.15625 Hz e (c) com LPF de frequência limite 0.02 Hz. . . . .	46
Figura 3.10	Projeções tridimensionais da distribuição de velocidade nos Cortes (a) $x = 296$ cm, (b) $y = 396$ cm e (c) $z = 4$ cm. . . . .	47
Figura 3.11	Distribuição de Velocidade ao longo dos planos de corte de: (a) $x = 296$ cm, (b) $y = 396$ cm e (c) $z = 4$ cm. . . . .	48
Figura 4.1	Comparação de velocidades para $z = 30$ cm da Malha Exterior e Interior: (a) Diferença de velocidades - $e_a$ e (b) comparação da diferença de velocidade com o erro relativo das sondas - $e_r$ . . . . .	51
Figura 4.2	Comparação da diferença de velocidades das configurações, $e_a$ , a laranja, com diferença de velocidades limite, $e_s$ , a azul, na Malha Central, com orientação a: (a) Norte, (b) Sul, (c) Este e (d) Oeste. . . . .	52
Figura 4.3	Distribuição de Temperatura no Plano XY com altura de: (a) 4 cm, (b) 12 cm, (c) 30 cm com configuração B, (d) 30 cm com configuração A, (e) 110 cm e (f) 170 cm. . . . .	54

Figura 4.4	Variação de Temperatura ao longo do tempo de medição nos pontos (a) 001, (b) 002 e (c) 012 da ME. . . . .	55
Figura 4.5	Comparação de velocidades de cada Orientação de Suporte à altura de: (a) 4 cm , (b) 12 cm, (c) 30 cm na configuração B, (d) 30 cm na configuração A, (e) 110 cm e (f) 170 cm. . .	57
Figura 5.1	Localização em malha de planos de corte analisados. . . . .	60
Figura 5.2	Distribuição de velocidade nos planos de $y = 70$ cm (plano O): (a) experimental e (b) numérico [60] e de $x = 30$ cm (plano C): (c) experimental e (d) numérico [60]. . . . .	62
Figura 5.3	Distribuição de velocidade no plano de $z = 4$ cm: (a) experimental e (b) numérico [60] e no plano de $z = 12$ cm: (c) experimental e (d) numérico [60]. . . . .	63
Figura 5.4	Planos de $z = 30$ cm: (a) experimental e (b) numérico [60], $z = 110$ cm: (c) experimental e (d) numérico [60] e de $z = 170$ cm: (e) experimental e (f) numérico [60]. . . . .	65
Figura 5.5	Esquema 3D para descrição do comportamento do ar à entrada da sala utilizando a ferramenta <i>ParaView</i> com dados numéricos de [60]. . . . .	66
Figura 5.6	Diagrama de descrição de estratégia de Ventilação - VWAV, adaptado de [10]. . . . .	68
Figura C.1	Plano de corte de $Z = 4$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	87
Figura C.2	Plano de corte de $Z = 12$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	88
Figura C.3	Plano de corte de $Z = 30$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	88
Figura C.4	Plano de corte de $Z = 110$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	89
Figura C.5	Plano de corte de $Z = 170$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	89
Figura C.6	Plano de corte de $Y = 4$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	90
Figura C.7	Plano de corte de $Y = 12$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	90
Figura C.8	Plano de corte de $Y = 30$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	91
Figura C.9	Plano de corte de $Y = 70$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	91
Figura C.10	Plano de corte de $Y = 113$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	92
Figura C.11	Plano de corte de $Y = 157$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	92
Figura C.12	Plano de corte de $Y = 200$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	93
Figura C.13	Plano de corte de $Y = 243$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	93
Figura C.14	Plano de corte de $Y = 287$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	94
Figura C.15	Plano de corte de $Y = 330$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	94
Figura C.16	Plano de corte de $Y = 370$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	95
Figura C.17	Plano de corte de $Y = 388$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	95
Figura C.18	Plano de corte de $Y = 396$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	96
Figura C.19	Plano de corte de $X = 4$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	97
Figura C.20	Plano de corte de $X = 12$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	97
Figura C.21	Plano de corte de $X = 30$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	98
Figura C.22	Plano de corte de $X = 70$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	98
Figura C.23	Plano de corte de $X = 110$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	99
Figura C.24	Plano de corte de $X = 150$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	99
Figura C.25	Plano de corte de $X = 190$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	100
Figura C.26	Plano de corte de $X = 230$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	100
Figura C.27	Plano de corte de $X = 270$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	101
Figura C.28	Plano de corte de $X = 288$ cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	101

Figura C.29 Plano de corte de X = 296 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b). . . . .	102
Figura D.1 Esquema de Princípio - SATEC, adaptado de esquema de princípio requisitado a LAVAC. . . . .	104
Figura E.1 Código <i>Python</i> - Página 1. . . . .	106
Figura E.2 Código <i>Python</i> - Página 2. . . . .	107
Figura E.3 Código <i>Python</i> - Página 2. . . . .	108
Figura E.4 Código <i>Python</i> - Página 3. . . . .	109
Figura E.5 Código <i>Python</i> - Página 4. . . . .	110
Figura E.6 Código <i>Python</i> - Página 5. . . . .	111
Figura E.7 Código <i>Python</i> - Página 6. . . . .	112
Figura E.8 Código <i>Python</i> - Página 7. . . . .	113
Figura E.9 Código <i>Python</i> - Página 8. . . . .	114
Figura A.1 Catálogo da Sonda CTV 210-R - Página 1. . . . .	115
Figura A.2 Catálogo da Sonda CTV 210-R - Página 2. . . . .	115
Figura B.1 Catálogo do Caudalímetro DBM 610 - Página 1. . . . .	117
Figura B.2 Catálogo do Caudalímetro DBM 610 - Página 2. . . . .	117



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Concentrações limite dos principais poluentes no ar interior. . . . .	8
Tabela 3.1	Características de anemómetro e caudalímetro. . . . .	28
Tabela 3.2	Coordenadas dos pontos da MI, em cm. . . . .	31
Tabela 3.3	Coordenadas dos pontos de 000 a 052 da ME, em cm. . . . .	33
Tabela 3.4	Coordenadas dos pontos de 053 a 108 da ME, em cm. . . . .	33
Tabela 3.5	Coordenadas de pontos da MC, em cm. . . . .	34
Tabela 3.6	Altura das sondas das configurações A e B, em cm. . . . .	36
Tabela 3.7	Coordenadas de pontos de medição de ensaios para determinação de tempo de medição, em cm. . . . .	40
Tabela 3.8	Condições de ensaio medidas experimentalmente. . . . .	42
Tabela 5.1	Coordenadas de planos de corte utilizados para análise de velocidades, em cm. . . . .	61
Tabela A.1	Registo temporal de ensaio para determinação de tempo de estabilização. . . . .	81
Tabela B.1	Registo de condições da sala. . . . .	84
Tabela B.2	Registo de condições da sala. . . . .	85



## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de siglas

AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
CFD	Mecânica de Fluidos Computacional
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DV	Ventilação por deslocamento
EPA	Agência de Proteção Ambiental
FFT	Transformada Rápida de Fourier
HWA	Anemómetro de Fio Quente
IEA	Agência Internacional de Energia
IJV	Ventilação a jato de impacto
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LAVAC	Laboratório de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
LPF	Filtro passa-baixo
LDA	Anemómetro Laser-Doppler
MC	Malha Central
ME	Malha Exterior
MI	Malha Interior
MV	Ventilação Mista
OSHA	Agência Europeia para a Segurança e a Saúde no Trabalho
PIV	Velocimetria por Imagem de Partículas
PEV	Ventilação Personalizada
POV	Ventilação em zona protegida
SATEC	Sala de Testes de Equipamentos de Climatização
SV	Ventilação Estratificada
UA	Anemómetro Ultrassónico
UFAD	Distribuição de ar abaixo do pavimento
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
WAV	Ventilação Aderente à parede

**Lista de símbolos**

$e_a$	Diferença absoluta de velocidade	m/s
$e_i$	Erro relativo no instante $i$	
$e_s$	Diferença limite de velocidade associado ao erro das sondas	m/s
$e_r$	Valor acima do limite de velocidade associado ao erro das sondas	m/s
$PM_{10}$	Partículas em suspensão de diâmetro igual ou inferior a $10 \mu\text{m}$	
$PM_{2.5}$	Partículas em suspensão de diâmetro igual ou inferior a $2.5 \mu\text{m}$	
$Q$	Caudal Volúmico	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_{ins}$	Caudal volúmico de insuflação	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_{ext}$	Caudal volúmico de extração	$\text{m}^3/\text{s}$
$T$	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{T}$	Temperatura média	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ext}$	Temperatura de extração	$^{\circ}\text{C}$
$T_{ins}$	Temperatura de insuflação	$^{\circ}\text{C}$
$U$	Velocidade	m/s
$\bar{U}$	Velocidade média	m/s
$\bar{U}_i$	Velocidade média entre o instante inicial e o instante $i$	m/s
$\bar{U}_t$	Velocidade média de ensaio	m/s
$V$	Volume	$\text{m}^3$
$\tau_s$	Constante nominal de tempo da sala	$\text{s}^{-1}$
$\tau_a$	Constante de tempo do anemómetro	s

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

Segundo a IEA [1], os edifícios são responsáveis por 40% do consumo energético a nível mundial, e 33% da emissão de gases de efeito de estufa. Este consumo energético corresponde ao consumo geral de um edifício, sendo que 30% deste consumo corresponde aos sistema AVAC, o que justifica o interesse no estudo da eficiência da ventilação. Se por um lado a eficiência dos equipamentos está diretamente relacionada com o avanço tecnológico dos mesmos, a eficiência da ventilação é também um fator importante, vindo a ser melhorada quer pela tecnologia existente quer pelos estudos associados.

Estes estudos levam cada vez mais ao estudo de fenómenos mais complexos e mais detalhados [2] [3] para se conseguir melhorias na eficiência da ventilação e consequentemente no consumo de energia de edifícios. Neste contexto, a Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) apresenta-se como uma ferramenta ideal para realizar estes estudos de otimização de sistemas ou avaliação de alternativas [4] [5] [6].

Contudo, e apesar da grande quantidade de informação produzida, o CFD carece sempre de validação experimental em todo o processo, desde a descrição do problema até à solução numérica do mesmo [7].

Este trabalho está inserido neste contexto, ou seja, na produção de resultados experimentais para validação de estudos CFD de ventilação.

## 1.2 Objetivos

A dissertação desenvolvida tem em vista o estudo experimental de escoamentos em espaços interiores, de forma a dar um contributo para a validação de códigos numéricos para a modelação de escoamentos isotérmicos em espaços interiores.

Para este objetivo será utilizada a instalação experimental SATEC, Sala de Testes de Equipamento de Climatização, do laboratório de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado, LAVAC, do ISEP.

## 1.3 Entidade acolhedora

A entidade acolhedora para a realização deste trabalho foi o laboratório LAVAC, no ISEP.

O laboratório LAVAC é utilizado para estudo de equipamentos relacionados à área de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado, AVAC, com uma área de 120 m<sup>2</sup>. Neste laboratório, tal como a SATEC, encontra-se equipamento de carácter industrial da área de fluidos com o intuito de proporcionar um ensino mais prático aos estudantes.

## 1.4 Metodologia de Dissertação

Para a realização da dissertação seguiram-se os seguintes passos:

- Estudo de bibliografia referente a ventilação e casos de estudo experimentais usados para validação de CFD;
- Definição da metodologia de ensaio, que incluiu:
  - Determinação de equipamento a usar;
  - Determinação de estratégia e pontos de medição de ensaio;
  - Definição de intervalo de tempo de ensaio;
  - Determinação de condições de ensaio;
  - Definição de procedimento experimental;
  - Definição de método de tratamento e análise de dados;
- Realização de ensaios experimentais;
- Tratamento e análise de dados;
- Obtenção de conclusões;
- Redação da dissertação relativa ao caso de estudo.

## 1.5 Estrutura

O trabalho realizado divide-se em 6 capítulos, sendo estes:

- No capítulo 1 é introduzido o tema da dissertação no contexto atual, justificando a sua importância. São também descritos os objetivos, a metodologia usada, a entidade acolhedora e descreve-se a estrutura desta dissertação;
- No capítulo 2 é demonstrada toda a pesquisa realizada previamente ao estudo. Todo o estudo foi realizado com a informação compilada neste capítulo;
- Posteriormente, no capítulo 3, aborda-se a metodologia, que apresenta e justifica toda a informação necessária para se replicar os ensaios experimentais realizados neste caso de estudo;
- O capítulo 4 apresenta uma avaliação crítica ao procedimento realizado previamente à análise de dados, abordando alguns dados que permitem concluir se este procedimento de ensaio é válido;
- No capítulo 5 são analisados os resultados experimentais provenientes do ensaio. Esta análise inclui a observação e identificação de fenómenos característicos de ventilação e a identificação da ventilação usada;
- Finalmente, no capítulo 6 é concluída a dissertação, compilando as conclusões retiradas dos capítulos anteriores e referindo limitações encontradas e trabalhos futuros recomendados.



## 2 Revisão Bibliográfica

Dada a necessidade de estudos experimentais referentes à ventilação, é necessário fazer uma revisão sobre estas duas componentes, a ventilação e os estudos experimentais da mesma.

A revisão bibliográfica compreende duas secções, sendo estas a ventilação em espaços interiores e estudos experimentais para validação de CFD.

Na ventilação de espaços interiores são abordados os principais objetos de estudo para estudos de ventilação, sendo estes o conforto térmico, a qualidade do ar interior e a eficácia da ventilação.

Nos estudos experimentais para validação CFD, é inicialmente descrito o contexto desta ferramenta e a sua importância, sendo posteriormente referidos e descritos alguns casos de estudo experimentais realizados. Por fim, estes casos são avaliados relativamente às suas metodologias.

### 2.1 Ventilação em Espaços Interiores

A ventilação de espaços interiores tem duas funções principais: renovar o ar e consequentemente aumentar a sua qualidade e criar condições térmicas de conforto para os ocupantes desse espaço. Para se conseguir cumprir cada função deve ser tido em conta o método de ventilação a usar.

Há atualmente diversos métodos de distribuição de ar, sendo os principais revistos por Cao [8] e Fan [9]. Segundo este último podem ser divididas em oito principais tipos

de distribuição de ar em regime estacionário, sendo eles:

- Ventilação mista (MV), método tradicionalmente mais usado, que consiste na insuflação de ar tratado, normalmente pelo teto, e mistura-se com o ar interior para alcançar uniformidade em todo o espaço;
- Ventilação por Deslocamento (DV), método que consiste na distribuição de ar a baixa altura e a velocidade reduzida, criando uma camada de ar novo a uma altura baixa. A extração encontra-se normalmente a nível elevado;
- Ventilação Personalizada (PEV), método que prioriza a zona onde se encontram os ocupantes, para que esta tenha as condições de conforto necessárias, ignorando a zona não ocupada, onde não há interesse nesse conforto;
- Distribuição de ar debaixo do pavimento (UFAD), método que insufla ar por difusores acoplados no chão do espaço, estando os plenos abaixo no nível do chão;
- Ventilação a jato de impacto (IJV), método que insufla ar a elevada velocidade, a altura baixa e direcionado ao chão, levando à dispersão do ar pelo chão;
- Ventilação Estratificada (SV), método que insufla ar diretamente na zona respiratória dos ocupantes, sensivelmente 1.7 metros de altura, de modo a criar boa qualidade de ar nesse nível;
- Ventilação de Zona Ocupada Protegida (POV), método que insufla ar a elevada velocidade do teto para o chão, criando uma cortina de ar que divide o espaço em diferentes zonas, onde podem ser criadas condições de conforto apenas na zona ocupada;
- Ventilação Aderente à Parede (WAV), método de insuflação de ar próximo ou no teto, com elevada velocidade, do teto para o chão, sendo o ar disperso a nível baixo. Este tipo de ventilação foi estudada mais aprofundadamente por Li [10].

Estes métodos de ventilação são utilizados consoante a necessidade do espaço e têm sido estudados e comparados em termos de eficácia de ventilação.

## 2.1.1 Conforto Térmico

### 2.1.1.1 Definição

Segundo a ASHRAE 55 [11], o conforto térmico pode ser definido como a satisfação que um ocupante sente face às condições climatéricas exteriores. O conforto térmico é avaliado na zona ocupada, zona onde se prevê maior atividade no espaço a ventilar. Segundo [12], a zona ocupada compreende o espaço que dista 60 cm das paredes, 10 cm do solo e tem altura máxima de 200 cm.

Os fatores do ambiente que afetam o conforto térmico de um ocupante considerados pela norma são a temperatura do ar, a temperatura radiante, a velocidade do ar e a sua humidade, enquanto que os fatores do ocupante que afetam o seu conforto térmico são o seu vestuário e o seu nível de atividade [13] [11].

#### 2.1.1.2 Normas de Conforto Térmico

Há diferentes métodos para a determinação do conforto térmico dos ocupantes de um determinado espaço, relativamente às características do ar interior desse mesmo espaço. Segundo a ASHRAE [14], pode-se relacionar as propriedades do ar ambiente, anteriormente descritas, com o conforto térmico, utilizando o gráfico apresentado na figura 2.1, sendo este gráfico uma adaptação da carta psicrométrica para as condições de conforto térmico.

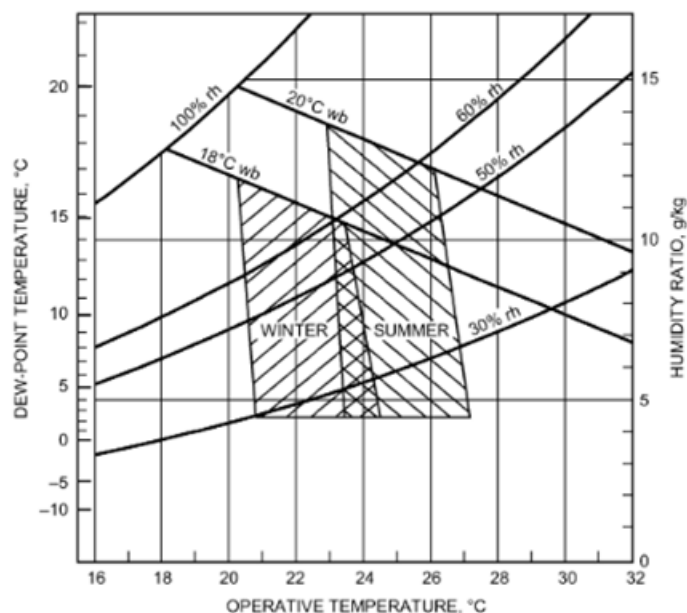


Figura 2.1 - Gráfico de apoio para determinação de conforto Térmico, adaptado de [14].

Este gráfico representa as zonas de conforto sombreadas admissíveis para verão e inverno, utilizando propriedades do ar interior. Esta avaliação de conforto deve ter ainda em conta a velocidade do ar, o revestimento dos ocupantes e as assimetrias térmicas, que podem afetar os intervalos de valores aceitáveis para conforto.

## 2.1.2 Qualidade do Ar Interior

### 2.1.2.1 Definição

A qualidade do ar interior é, segundo a Agência Portuguesa do Ambiente [15], o conjunto dos parâmetros biológicos, físicos e químicos que caracterizam esse ar.

Como indica a AHSRAE, a qualidade do ar num espaço pode ser determinada pela concentração de contaminantes que possam afetar o bem-estar e saúde dos seus ocupantes.

### 2.1.2.2 Normas e Legislação da Qualidade do Ar Interior

Para se atingir uma boa qualidade do ar interior, as concentrações de poluentes não poderão ultrapassar valores considerados nocivos. Para tal, são legislados valores máximos de concentração de poluentes para diferentes situações.

Na tabela 2.1 podem ser encontrados os valores máximos dos principais poluentes previstos pela Legislação Portuguesa, Portaria n.º 138-G/2021 [16], bem como os valores impostos pela EPA [17], OSHA [18] e pela comissão MAK [19], normas referenciadas pela ASHRAE 62.1 [20]. Os valores que não se encontram nas normas foram assinalados com *ND*.

Tabela 2.1 – Concentrações limite dos principais poluentes no ar interior.

Principais componentes	Legislação Portuguesa	EPA	OSHA	MAK
$PM_{10}$	50 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	150 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	ND	4000 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
$PM_{2.5}$	25 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	35 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	5 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	1.5 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]
$COV$	600 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	ND	ND	ND
$CO$	10 [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]	9 ppm	50 ppm	30 ppm
$CH_2O$	100 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	ND	0.75 ppm	0.3 ppm
$CO_2$	1250 ppm	ND	5000 ppm	5000 ppm
Radão	300 [ $\text{Bq}/\text{m}^3$ ]	ND	ND	ND
$SO_2$	ND	0.14 ppm	5 ppm	0.5 ppm

### 2.1.3 Eficácia da Ventilação

Como já foi indicado anteriormente, há grande interesse na eficácia da ventilação, pelo que têm vindo a ser testadas diferentes alternativas de ventilação para se conseguir a melhor solução para cada caso.

#### 2.1.3.1 Definição

A eficácia da ventilação é geralmente associada à capacidade do sistema de ventilação de remoção de poluentes de um determinado espaço. Esta é determinada pela idade média do ar, em que quanto maior for a sua idade, menor a eficácia do sistema [21].

#### 2.1.3.2 Determinação da idade média do ar

Atualmente o método mais usado para a determinação da idade média do ar é o de diminuição de concentração, ou método de decaimento.

Este método consiste na inserção, previamente ao estudo, de um gás dissipado igualmente por todo o espaço a estudar. Posteriormente é insuflado ar pela ventilação em estudo e analisado, por meio de um rastreador, a concentração desse mesmo gás na zona de extração de ar. Segundo Chow [22] e Raftery [23], a idade média do ar num ponto pode ser definida pela equação 2.1:

$$A_p = \frac{\int_0^{\infty} C_p(t) dt}{C_p(0)} \quad (2.1)$$

Sendo:

- $A_p$  a idade média do ar no ponto  $P$ ;
- $C_p(t)$  a concentração de gás no ponto  $P$  no instante  $t$ ;
- $C_p(0)$  a concentração de gás inicial em toda a sala previamente ao estudo.

## 2.2 Estudos Experimentais para Validação de CFD

### 2.2.1 Uso de CFD para estudos de escoamentos em espaços interiores

O CFD foi primeiramente usado, a partir da década de 1950, na indústria aeroespacial e para estudos meteorológicos. De acordo com Nielsen [2], a mecânica de fluidos computacional foi apenas introduzida nos estudos de ventilação na década de 70, 20 anos depois, sendo Nielsen, Restivo e Whitelaw alguns dos seus principais pioneiros.

De acordo com Howard [24], a mecânica de Fluidos Computacional é uma ciência que prevê o comportamento de escoamentos, interiores ou exteriores, baseando-se na conservação de massa, energia e momento que regem o comportamento dos fluidos. Para estas previsões, são usados equipamentos de cálculo avançados.

Apesar de atualmente o CFD ser uma ferramenta bastante completa e avançada no estudo da ventilação, ainda há uma necessidade de validação experimental para este método [7]. Isto porque o CFD é uma ferramenta puramente matemática, ou seja, o seu objetivo é certificar que todas as condições e equações impostas foram cumpridas e solucionadas corretamente. Acresce-se ainda o facto desta ferramenta estar ainda em constante evolução, sendo criados novos modelos constantemente, e para a validação destes é necessária uma comparação com dados experimentais.

Para facilitar o uso de dados experimentais para validação de códigos CFD, foram realizados ensaios experimentais para uso de futuras simulações, os *benchmarks*. Em [25] é disponibilizada uma base de dados com os dados de ensaios experimentais que foram cedidos com o objetivo de validação de códigos.

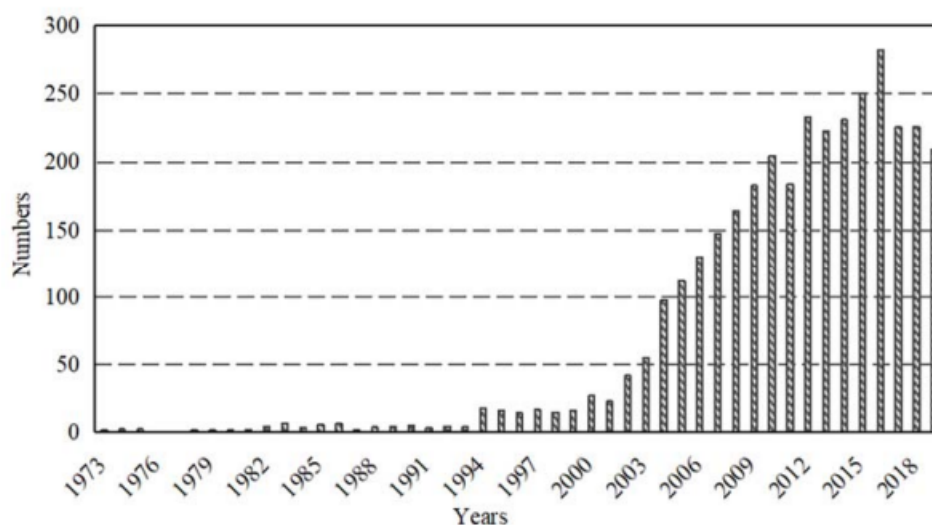


Figura 2.2 - Número de artigos publicados sobre CFD em ventilação, adaptado de [26].

A validação experimental de uma simulação numérica consiste na comparação de dados experimentais com os dados numéricos adquiridos pela simulação [27]. Os dados experimentais são resultantes de ensaios experimentais realizados em zonas controladas que replicam as condições e geometrias usadas na simulação a validar. Após a sua validação, a simulação numérica é considerada fiável para ser usada noutros casos de estudo, pois encontra-se de acordo com a situação real a simular.

### 2.2.2 Estudos Experimentais realizados

Os dados retirados para validação numérica são provenientes de estudos experimentais. Estes ensaios requerem o uso de técnicas e equipamentos com rigor suficiente para que os dados resultantes sejam viáveis. Por este motivo, ao longo do tempo, estas técnicas têm sido alteradas e o equipamento melhorado. Estes estudos avaliam diferentes variáveis referentes à ventilação, variando de equipamento e técnicas de medição consoante o caso em estudo. Por este motivo, são analisados neste capítulo alguns casos de estudo que descrevem as principais componentes deste tipo de estudos.

Um dos primeiros estudos experimentais cujos dados foram usados para posterior estudo de modelos de turbulência foi realizado em 1974, por Nielsen [28], cujo intuito de verificar se equações previamente definidas se aproximavam do comportamento real do fluido, levou à necessidade de medições numa pequena sala modelo. Nielsen mediu para o escoamento a distribuição de temperatura e velocidade usando um anemómetro de fio quente (HWA) e um termómetro do tipo T.

A partir deste estudo Nielsen concluiu que apesar de os resultados experimentais irem de encontro com as suas previsões numéricas, seria necessário um estudo mais aprofundado relativamente ao tipo de insuflação e à área de insuflação.

O mesmo, acompanhado de Whitelaw em 1978 [29], desenvolveu novos estudos experimentais para testar um novo modelo matemático desenvolvido por Whitelaw e Pope [30] que se acreditava ser o mais complexo até à data. Para conseguir esses dados utilizou um anemómetro de Laser-Doppler (LDA), que, contrariamente ao anemómetro de fio quente, não interfere no escoamento por utilizar tecnologia laser não intrusiva [31].

Em 1992, Zhang [32], com o intuito de ceder novos dados para criação de modelos de CFD, estudou e comparou um sistema que não era tão usado na altura, ventilação por deslocamento (DV), onde está presente convecção mista. Este estudo foi realizado numa sala para estudos de ventilação e foram testados 3 casos, um pequeno escritório, um escritório maior e uma sala de aula, alterados por meio de mobília e ocupantes simulados por manequins. Foram medidas as velocidades do ar para determinação da intensidade da turbulência e ainda usado um analisador de gás, que mediu as concentrações de  $SF_6$ , colocado artificialmente na sala, para medição da idade do ar. Deste estudo resultaram certas discrepâncias entre o modelo numérico e experimental a nível de concentração de  $SF_6$ .

No ano de 2002, Awbi e Karimipناه [33], por sua vez, compararam um novo método de ventilação, a ventilação por jato forçado, (IJV), comparando-a à DV, que era no momento a mais vulgarmente utilizada. O método consiste na insuflação de ar a uma maior velocidade direcionada ao chão.

Neste estudo foi medida a velocidade do ar por meio de um HWA, com incerteza de 0.5 K, em 12 pontos diferentes, esquematicamente representados na figura 2.3, nas alturas de 0.3 e 0.95 metros. Para cada ponto foram feitas 480 medições com uma frequência de 2 Hz.

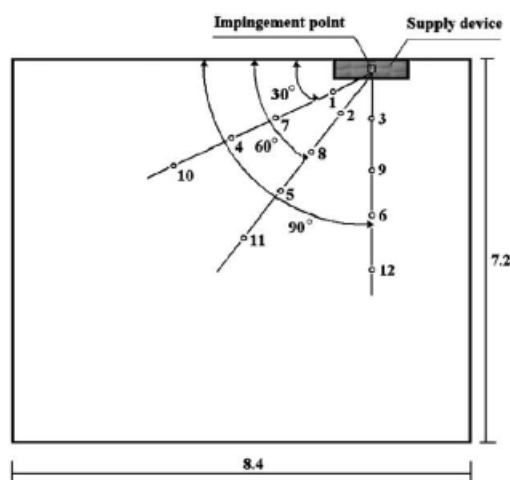


Figura 2.3 – Pontos de velocidade medidos, adaptado de [33].

No ano de 2002, Bjorn e Nielsen [34] estudaram o efeito da respiração humana numa sala ventilada por DV. O objetivo deste estudo foi o de determinar a idade média do

ar a nível respiratório. Para tal, utilizaram manequins que exalavam o gás a rastrear, e mediram-se as concentrações de gás e temperatura a diferentes alturas. Estes manequins possibilitaram a simulação de um ocupante sentado ou em pé.

Foi utilizado o analisador de gás Bruel & Kjaer 1302. Na figura 2.4 estão apresentados alguns dados de concentração de gás para o manequim sentado e em pé, em que em pé foram de encontro aos dos simulados pelo CFD, a linha, e permitiram concluir que houve estratificação de ar na zona respiratória do manequim em pé. Estes resultados repetiram-se nas várias situações.

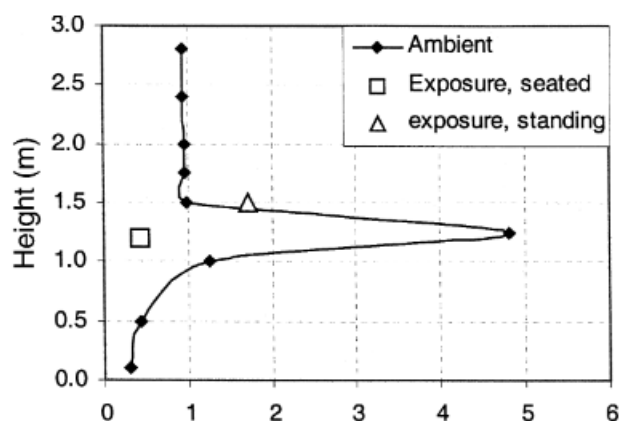


Figura 2.4 – Concentração de gás a diferentes alturas para manequim sentado e em pé, adaptado de [34].

Seguindo o mesmo objetivo de Nielsen e WhiteLaw [29], Posner, Bunchanan e Rankin [35], em 2003, realizaram um novo estudo que permitisse recolher dados de apoio ao CFD face a parâmetros geométricos com o uso de tecnologia não intrusiva. Neste estudo foram usados dois métodos, com o LDA e a Velocimetria de Imagem de Partículas (PIV), cujos resultados foram comparados a uma simulação em CFD com modelos de turbulência  $k - \epsilon$  e  $RNGk - \epsilon$ . O método PIV consiste na captação de imagem de partículas não inerciais disseminadas no fluido, adotando as partículas o seu comportamento. Desta forma é possível a medição de diferentes pontos simultaneamente, uma vantagem face ao LDA que consegue apenas medições ponto a ponto [36].

Os dados conseguidos pelas medições do LDA foram comparados com os valores simulados em CFD, como se pode observar na figura 2.5.

Dos dados retirados, concluiu-se que houve alguma discrepância relevante, especialmente em zonas de fronteira. Os resultados do PIV também contaram com algumas discrepâncias, algo expectável pela velocidade reduzida do escoamento, que leva a maior incerteza.

Uma das desvantagens do PIV é a dificuldade do seu uso em espaços em larga escala

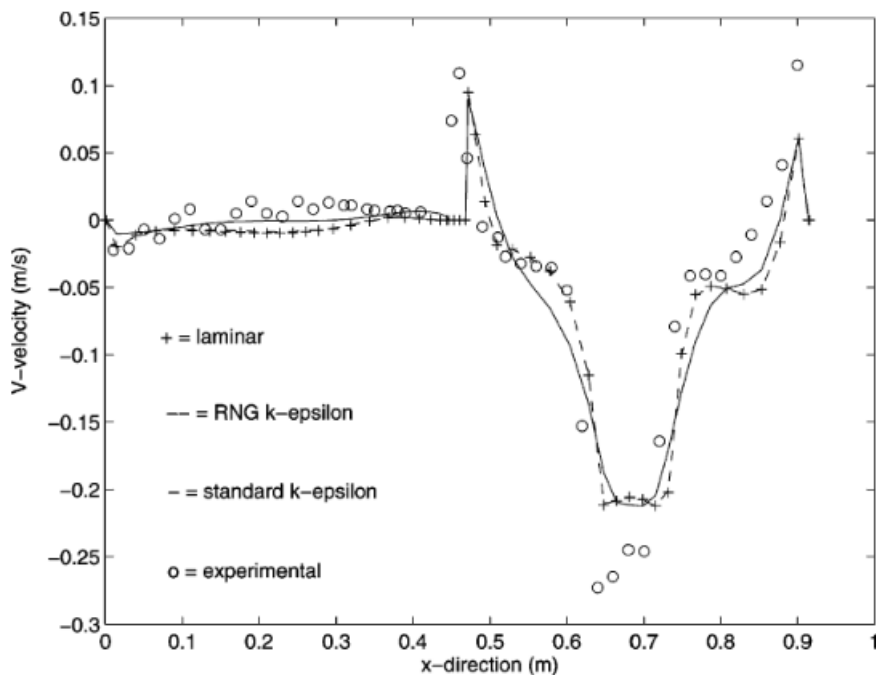


Figura 2.5 - Comparação de medições LDA com simulação CFD, adaptado de [35].

devido ao maior custo de equipamento necessário e obstáculos presentes que obstruem o visionamento de partículas [8]. Para contornar este entrave é utilizada uma sala modelo representativa. No caso deste estudo foi utilizada uma sala de 0.914 por 0.457 por 0.305 metros de comprimento, largura e altura respetivamente.

A tecnologia PIV foi novamente usada em 2010 por Cao [37] para estudo do escoamento causado por um diferente método de arrefecimento, *Chilled Beam*. Neste estudo, contrariamente às salas modelo normalmente usadas, foi medida a distribuição de velocidade do ar numa sala em tamanho real. O estudo consistiu na visualização de partículas não inerciais utilizando um laser num plano perpendicular ao escoamento. Este laser permitiu a captação de imagens das partículas disseminadas por uma câmara de captação de imagens de alta velocidade.

Com o intuito de confirmar a precisão dos dados do PIV, foram ainda medidas as velocidades do ar em diferentes pontos por meio de anemómetros de fio quente na saída de ar e a 0.3 metros da mesma, a alturas de 5, 20 e 50 milímetros abaixo do teto para 3 velocidades de saída diferentes. Na figura 2.6 é possível observar alguns dos dados comparados entre as medições a 0.3 metros da saída do ar, dos quais se concluiu que houve pouca discrepância de resultados.

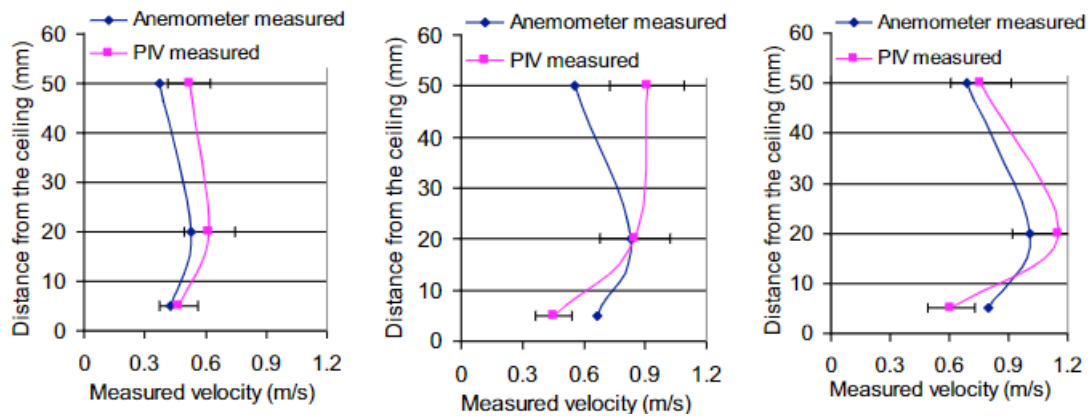


Figura 2.6 – Comparação de PIV com HWA a velocidades médias de saída de 0,8, 1,1 e 1,4 metros por segundo da esquerda para a direita, adaptado de [37].

Uma das alternativas ao arrefecimento por ventilação é o arrefecimento por teto radiante, com as vantagens de evitar ruídos e ter menos custos energéticos face aos métodos convencionais. Esta alternativa foi estudada por Catalina, Virgone e Kuznik [5] em 2009, para testar o conforto térmico conseguido por esta solução.

Neste estudo foram usados termopares para medição de temperaturas nas paredes, sendo medidas interna e externamente, totalizando 108 pontos de medição. Este estudo concluiu a existência da possibilidade de uso desta alternativa para conseguir condições de conforto térmico.

Tal como Awbi e Karimipannah [33], Chen também demonstrou interesse na IJV, realizando uma dissertação em 2014 [4] em torno da possibilidade da aplicação deste método em escritórios. Para replicar o ambiente de escritório foi colocado um manequim e mobília a representar um ocupante num escritório, como descrito na figura 2.7.

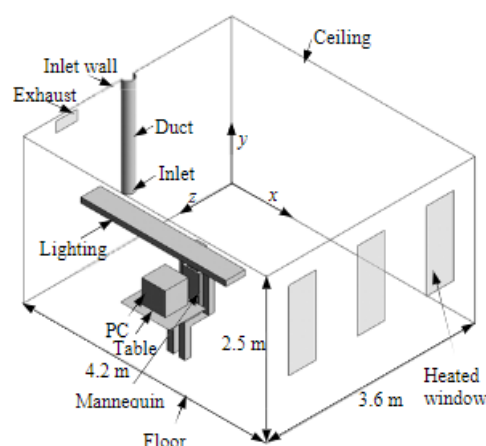


Figura 2.7 – Esquema de Sala para Estudo Experimental, adaptado de [4].

Neste estudo Chen avaliou a distribuição de velocidade do ar e a temperatura do mesmo com termo-anemómetros de temperatura constante (CTA) por uma malha de 8 pontos com um distanciamento de 0.7 e 0.6 metros entre si, a alturas de 0.1, 0.6, 1.1 e 1.7 metros.

No entanto, neste estudo foram observadas algumas incertezas nas medições, pelo que o autor recomenda o uso de métodos de medição mais avançados, tais como o LDA e o PIV.

Outro método de ventilação bastante estudado é a ventilação por movimentação de ventoinhas de teto. Este tipo de ventilação permite um maior conforto térmico no arrefecimento, pois aumenta a velocidade do ar interior e consequentemente a convecção entre os ocupantes e o ar exterior.

Para se entender melhor o impacto deste tipo de ventilação, foram realizados diferentes estudos, Liu [38] estudou os efeitos de uma ventoinha e de três ventoinhas em diferentes posições. Para medir a velocidade do ar, o mesmo definiu uma grelha de pontos que se distanciavam 0.35 metros entre si nas alturas de 0.1, 0.6, 1.1 e 1.7 metros, utilizando um anemómetro de fio quente omnidirecional. Isto traduz-se numa grelha de 180 pontos, em que foram feitas medições de três minutos. Na figura 2.8 estão representados os esquemas ventilação usados e localização dos pontos.

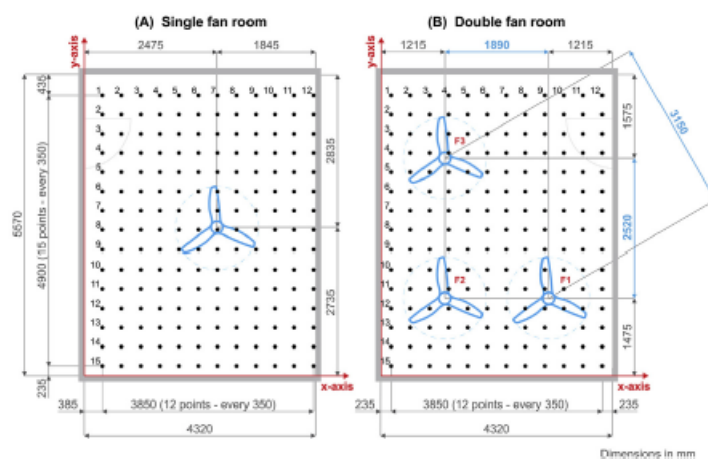


Figura 2.8 – Pontos de medição, adaptado de [38].

Posteriormente foi estudado o efeito desta ventilação e o seu efeito em contacto com mobília [39], o que permitiu um maior conhecimento em relação à influência de obstáculos nesta ventilação.

Os dois estudos anteriores, bem como outros relativos a este tipo de ventilação foram revistos, e com o intuito de compreender os diferentes dados e conseguir criar um modelo que preveja a distribuição de velocidade no ar para um determinado espaço, foi feito um estudo de grande escala por Raftery [23] em 2019 que compreendeu todas as variáveis impostas, sendo estas o tamanho da ventoinha, o número de ventoinhas, a sua disposição e a velocidade de rotação.

Para tal, e para se manter coerência nos resultados, foram medidos às mesmas alturas, com acréscimo de 4 alturas, num suporte vertical e com os mesmos anemómetros que o estudo anterior de Liu [38]. A malha de pontos, por sua vez, teve espaçamento entre pontos de 0.15 metros entre o centro da ventoinha a 2.44 metros desta, sendo os restantes pontos distanciados em 0.3 metros, como nos casos de estudo anteriores, isto porque a zona de maior interesse é aquela abaixo da ventoinha. Na figura 2.9 estão demonstrados os esquemas de distribuição de pontos no plano e as suas alturas.

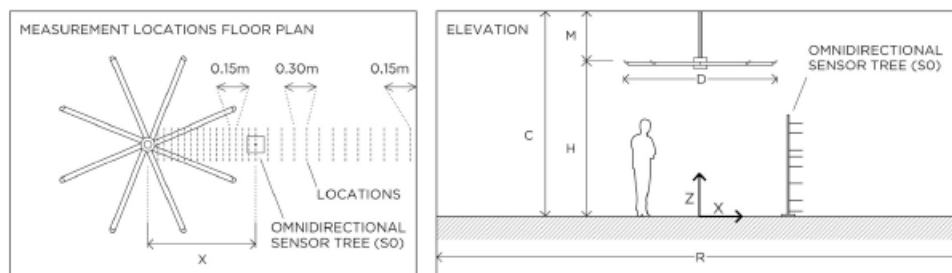


Figura 2.9 – Localização de pontos de medição no plano e a sua localização, adaptado de [23].

Atualmente, estes estudos experimentais com vista a validação de CFD mantêm os seus objetivos, como é o caso do estudo realizado por Kalmár e Szodrai [40], com o intuito de comparar a eficácia de três métodos de ventilação, MV, DV e PEV. Para esta comparação, avaliou-se a idade média do ar pelo método de decaimento na zona de exaustão de ar e ao nível respiratório, e utilizou-se  $CO_2$  como gás rastreador.

Para comparação com a simulação em CFD, mediu-se a velocidade do ar por um anemómetro de fio quente, a temperatura da sala por meio de um termómetro de globo TC Type K, a humidade relativa, a concentração de  $CO_2$  e o caudal de ar. O estudo foi ainda apoiado pela visualização de saída de fumo e teve como intervalo de medição 5 minutos.

Para cada uma das ventilações foram consideradas duas situações representativas de um ocupante simulado por um manequim disposto numa secretária aberta ou fechada, como demonstra a figura 2.10, perfazendo um total de seis situações de estudo. Este tipo de secretárias tem especial interesse no contexto pandémico, como possibilidade de redução de contágio.

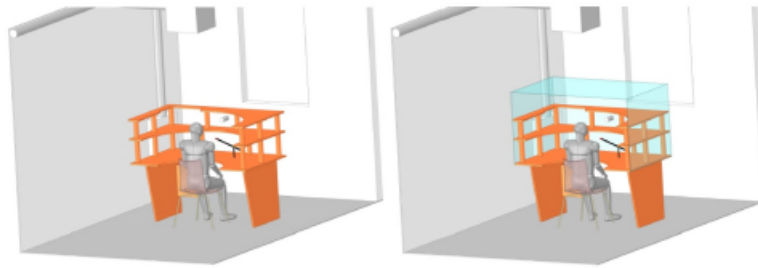


Figura 2.10 – Situação de secretária aberta (esquerda) e fechada (direita), adaptado de [40].

Foi realizado um total de 100 medições, uma a cada 5 minutos, para o conjunto dos casos. A partir destes dados relativos à concentração de  $CO_2$  concluiu-se que a PEV demonstrou mais eficácia. Os autores propõem ainda a continuação deste estudo utilizando ocupantes em movimento para melhor retratar uma situação de escritório, bem como o teste de diferentes métodos de distribuição de ar.

O interesse na DV demonstrado no caso anterior tem sido notável. Outros aspetos avaliados neste tipo de ventilação, nomeadamente a distribuição de velocidade e temperatura [41], a comparação com outros sistemas [42], a nível de conforto térmico [43] e a nível de ocupação do espaço [44].

Da mesma forma que o estudo da influência de ventoinhas por Raftery [23] deu uso a diferentes casos realizados anteriormente para poder fazer uma avaliação mais extensa e completa da sua área, englobando cada vez mais fatores e variáveis, há na atualidade um crescente interesse nestes estudos de grande escala.

Um desses estudos realizado recentemente, em 2021, por Yang e a sua equipa [6], abordou de uma forma mais completa a distribuição de ar por meio de IJV. Este foi realizado devido ao cada vez maior interesse neste tipo de ventilação em alternativa à tradicional MV.

Tal como a DV, a IJV já foi estudada em diversas situações em diferentes aspetos, como a influência desta em salas de aula, com insuflação em diferentes pontos [45], cujas medições foram realizadas com 27 anemómetros omnidirecionais durante 10 minutos, e para diferentes direções [46]. Para tal, foram revistos estudos como o de Awbi e Karimipannah [33] e o de Chen [4] já abordados, relativos à IJV.

O estudo de Yang [6] teve em consideração as situações de escoamento isotérmico, de arrefecimento e de aquecimento, dentro das quais foram estudadas três variáveis, a geometria e altura das grelhas de insuflação e a altura da sala, sendo estudadas as alturas da sala de 6, 9 12 e 24 metros.

Para aquisição de dados experimentais que validassem a simulação CFD para este

caso foram medidas as velocidades com HWA, que conta com uma incerteza de 2%, e as temperaturas com termopares, com incerteza de 0.1 °C. Os anemômetros foram montados em quatro suportes móveis, doze em cada, a diferentes alturas, e na entrada e saída de ar. As alturas de medição estão apresentadas nas figuras 2.11 e 2.12. Estas alturas são adimensionais proporcionais à altura de cada uma das situações estudadas.

Os dados de velocidades e temperaturas do ar foram comparados com a simulação em CFD, no modelo  $RNGk - \epsilon$  como apresentados nas figuras 2.11 e 2.12, respectivamente, onde se observa coerência entre a simulação e o ensaio experimental.

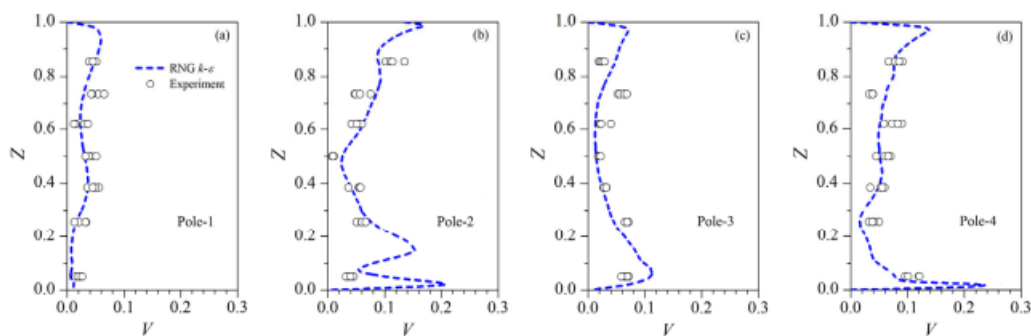


Figura 2.11 – Comparação de velocidades experimentais e simulação numérica, adaptado de [6].

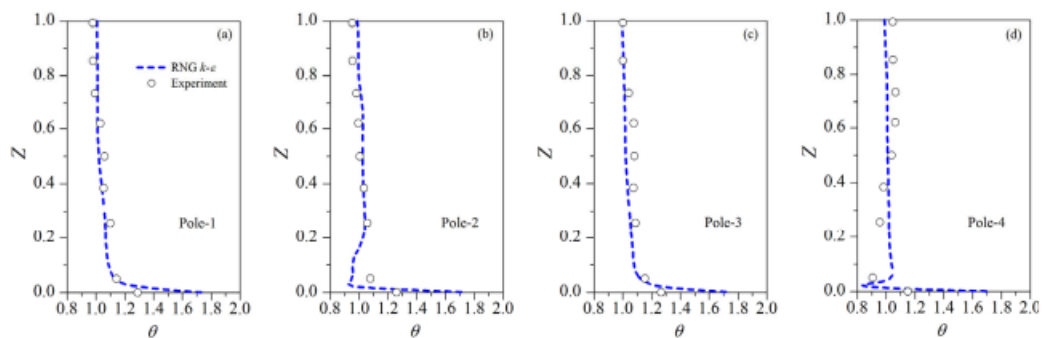


Figura 2.12 – Comparação de temperaturas experimentais e simulação numérica, adaptado de [6].

Pelos dados obtidos, pode-se concluir que o perfil de velocidades simulado, representado a azul, aproxima-se bastante dos valores medidos experimentalmente, representados por círculos.

Deste estudo concluiu-se que os casos isotérmico e de arrefecimento apresentam comportamentos semelhantes em que o ar insuflado propaga-se pelo chão ao longo de uma maior distância do que a situação de aquecimento, em que o ar se eleva mais rapidamente devido à sua maior temperatura.

Com o objetivo de tentar contornar algumas desvantagens dos anemômetros de fio quente, Arens, Ghahramani, entre outros, compararam este equipamento com um anemómetro ultrassónico, UA, sendo este último normalmente usado em estudos atmosféricos [47]. Este tipo de anemómetros utiliza a influência da velocidade do ar na velocidade de propagação do som, consistindo num emissor e recetor que captam a diferença de tempo até à chegada, determinando a velocidade do som à chegada e traduzindo este valor numa medição de velocidade [48]. Estes, tais como os HWA, apresentam a desvantagem de ser intrusivos.

Neste caso de estudo, foi comparado o anemómetro sónico com o anemómetro de fio quente. Deste estudo, concluiu-se que o anemómetro sónico conseguiu bons valores de medição em termos de incerteza e de consumos energéticos.

Um anemómetro ultrassónico foi também testado, em 2019, com o objetivo de melhorar a sua eficiência energética. Neste caso de estudo foi testado o seu uso num túnel de secção retangular num intervalo de 30 segundos a velocidades entre 0 e 4 m/s e com frequência de 2 Hz [49] e concluiu-se que permitia medição de precisão semelhante a um UA mais caro e menos eficiente a nível energético.

Em 2022, Qian, Gao e a sua equipa [50] testaram o algoritmo *EnKF*, Ensemble Karman Filter, no CFD com o intuito de apoiar simulações futuras. Para validar a sua simulação, mediu experimentalmente, utilizando a técnica PIV, a distribuição de temperatura e velocidade do ar numa sala modelo de 1 por 0.75 por 0.5 metros. A figura 2.13 representa o esquema desta sala. O sistema PIV foi composto por um laser, uma câmara de resolução 2048 x 2048 pixels, um sincronizador para que o feixe de laser e a câmara funcionem simultaneamente e um computador para processamento de dados. Foram usadas partículas disseminadas não inerciais de sebacato de dioctilo.

Para medição de temperaturas foram usados termopares de incerteza 0.4% em 30 pontos diferentes, nas alturas de 0.125, 0.25 e 0.375 metros, estando 15 próximos à parede. As medições de temperatura e velocidade não foram realizadas em simultâneo para evitar a obstrução física causada pelos termopares. Os dados experimentais conseguidos validaram a simulação, tendo erros de medição não superiores a 12.8% e comprovou-se, que este algoritmo pode apoiar futuras simulações CFD para escoamentos de ar interior.

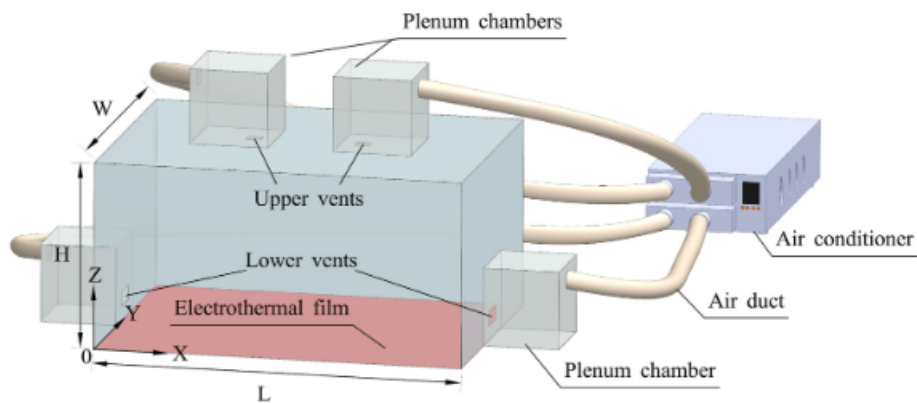


Figura 2.13 - Modelo experimental para estudo do algoritmo  $EnKF$ , adaptado de [50].

No mesmo ano, Jahanbin e Semprini testaram a influência da ventilação em espaços aquecidos na eficácia da ventilação[51]. Para este estudo foi medida a idade média do ar e comparada com a constante nominal de tempo da sala, que corresponde ao tempo necessário para o caudal insuflado renovar todo o volume da sala.

### 2.2.3 Resumo de casos

Os casos analisados podem dividir-se pelos estudos de aumento de eficácia da ventilação, de melhoria de métodos de ventilação e de aquisição de dados que apoiem a evolução do CFD. O processo do estudo experimental pode ser dividido em seis passos, sendo estes:

- Calibração de equipamentos quando esta for necessária;
- Preparação da sala para serem atingidas condições iniciais desejadas;
- Realização de medições
- Aquisição de dados;
- Processamento e tratamento de dados;
- Determinação de conclusões retiradas do estudo.

#### 2.2.3.1 Metodologias

Os casos de estudo analisados utilizam diferentes metodologias, no entanto há alguns pontos comuns que devem ser seguidos.

Alguns procedimentos que se observaram constantes foi a calibração de equipamentos previamente ao estudo e a criação de condições a estudar antes de se proceder às medições. As principais grandezas medidas nestes casos foram a concentração de poluentes, a velocidade e a temperatura do ar.

Para medição de concentração de poluentes é usado um gerador de poluente e um analisador de gás para medir a concentração desse poluente num ponto. Inicialmente, insufla-se ar com poluente gerado pelo produtor de poluentes até se atingir uniformidade de concentração de poluentes em todo o espaço, e são instalados dois analisadores de concentração de gás nas entradas e saída de gás. Podem ser acrescentados analisadores consoante outros pontos de interesse, tais como na zona respiratória. A norma ASHRAE 55 [11] determina ainda as alturas de 0.1, 0.6, 1.1 e 1.7 metros para medição de concentrações.

Para medição de velocidades há quatro principais métodos, utilizando PIV, LDA, HWA e UA. O método PIV consiste num método normalmente usado em salas modelo de escala reduzida em que para a medição de velocidades, são disseminadas partículas não inerciais no ar que se irão misturar e assumir o comportamento deste. As posições destas partículas serão captadas por uma câmara quando nestas é refletido um feixe de laser[52]. A partir das imagens captadas pela câmara consegue-se determinar a velocidade

de diferentes partículas simultaneamente.

A medição de velocidade com uso de LDA é também realizada, normalmente, em salas modelo de escala reduzida. Como o anterior, este insufla partículas no ar interior que são captadas por laser. No entanto, este método apenas mede velocidades num ponto e está dependente de passagens de partículas no laser.

O método mais comum para medição de velocidades é pelo uso de HWA. Estes anemómetros são previamente calibrados e fazem medições num ponto. Para se conseguir a distribuição de velocidades no espaço são feitas medições de vários pontos. Para a determinação da posição destes pontos é criada uma malha onde são discriminadas as distâncias entre pontos no plano e as alturas a medir. Estas distâncias podem variar consoante as dimensões da sala e os requisitos do estudo, no entanto as alturas deverão ser pelo menos as mencionadas anteriormente da norma ASHRAE 55 [11] e nos planos perpendiculares à saída de ar para estudo do conforto térmico. Usualmente são usados vários anemómetros simultaneamente para se conseguirem fazer várias medições, para tal é usado um suporte onde estes estão acoplados.

A medição com UA, tal como o HWA, é intrusiva e necessita de várias medições ao longo da sala. No entanto as suas medições não são ponto a ponto pois medem a velocidade média do espaço entre o emissor e recetor.

Um método que apoia também o estudo de distribuição de velocidades é o de visionamento de saída de fumo, em que é insuflado fumo na sala e são captadas imagens do mesmo. Este teste é de aspeto mais qualitativo, para ajudar a entender o escoamento, mas não permite medições exatas.

Para medição de temperaturas, os casos analisados utilizam termopares distribuídos pelo espaço a medir. A metodologia é semelhante à utilizada com os HWA, no entanto também pode existir interesse na medição de temperatura de superfícies, pelo que pode ser criada uma malha adicional para esse objetivo.

Os tempos de medição usados nos ensaios analisados, entre os poucos que estão devidamente registados nos casos de estudo revistos, variam consoante o equipamento e as propriedades que o ensaio mede. Por este motivo, não é possível tirar conclusões concretas face a este tema a partir desta revisão.

### 2.2.3.2 Vantagens e Desvantagens

Segundo as metodologias estudadas, podem ser utilizados diferentes equipamentos de medição de velocidade do ar. As medições com uso de LDA, têm a vantagem de não usar equipamento intrusivo [52], ou seja, não há obstrução do equipamento ao fluido e por isso não o afeta. No entanto este equipamento retira apenas dados num só ponto e a aquisição de dados resulta da passagem aleatória de partículas nesse ponto [53].

As medições com PIV são atualmente as que apresentam mais vantagens, uma vez que conseguem medir velocidades de vários pontos simultaneamente, tornando-o o método que requer menos tempo de ensaio. Tal como o LDA não é um equipamento intrusivo e não necessita de calibração prévia. No entanto, este método é normalmente usado, em salas modelo [31]. A sua utilização em salas de escala real é menos comum uma vez que implica equipamento mais caro, complexo e a visibilidade das partículas é dificultada pela presença de obstáculos e pela distância da câmara às mesmas [8].

As medições com o uso de HWA são mais usadas devido ao menor custo de equipamento. Com este método é possível a medição em salas modelos a escala real e em diferentes pontos consoante o objetivo do estudo. No entanto, é um método de medição por ponto, o que implica vários estudos. Acrescentando a necessidade de calibração prévia, este método demonstra ser aquele que requer mais tempo. Por fim, este método é intrusivo, causa obstrução física, que pode influenciar os valores medidos [54].

A principal vantagem do HWA é a capacidade de captar variações de velocidade mais rigorosamente do que o PIV e o LDA, ou seja, tem superior resolução temporal face aos anteriores, um aspeto importante no estudo de escoamentos em espaços interiores [31] [55].

As medições com UA têm igualmente vantagens, não sendo tão caros como os LDA e PIV mas mais que os HWA e permitem a medição de velocidade para diferentes direções simultaneamente. Tal como os HWA, são intrusivos e não permitem a medição de velocidade no ponto, mas sim uma velocidade média entre o emissor e o recetor [49].

### 3 METODOLOGIA

A revisão feita no capítulo 2 abordou casos de estudo com diferentes metodologias e equipamentos usados, permitindo entender as variáveis medidas, as estratégias de medição mais comuns e as normas usadas para cada critério.

A metodologia apresentada neste trabalho inclui a descrição da sala de ensaio, a localização dos pontos de medição e a sua nomenclatura, a determinação do tempo de medição e o tratamento e apresentação de dados.

Esta metodologia será realizada para dois ensaios, tendo o primeiro o objetivo de avaliar a influência do suporte de medição e o segundo o de avaliar a velocidade e temperatura na sala de ensaios . Estes critérios foram definidos com base no equipamento usado, que será abordado posteriormente.

#### 3.1 Sala de Ensaio (SATEC)

Para a realização dos ensaios experimentais, o LAVAC, pertencente ao ISEP, cedeu a SATEC, que foi adaptada para a realização dos ensaios experimentais.

Esta sala de ensaios consiste numa câmara paralelepípedica de dimensões interiores referidas na figura 3.1 com um sistema de climatização associado.

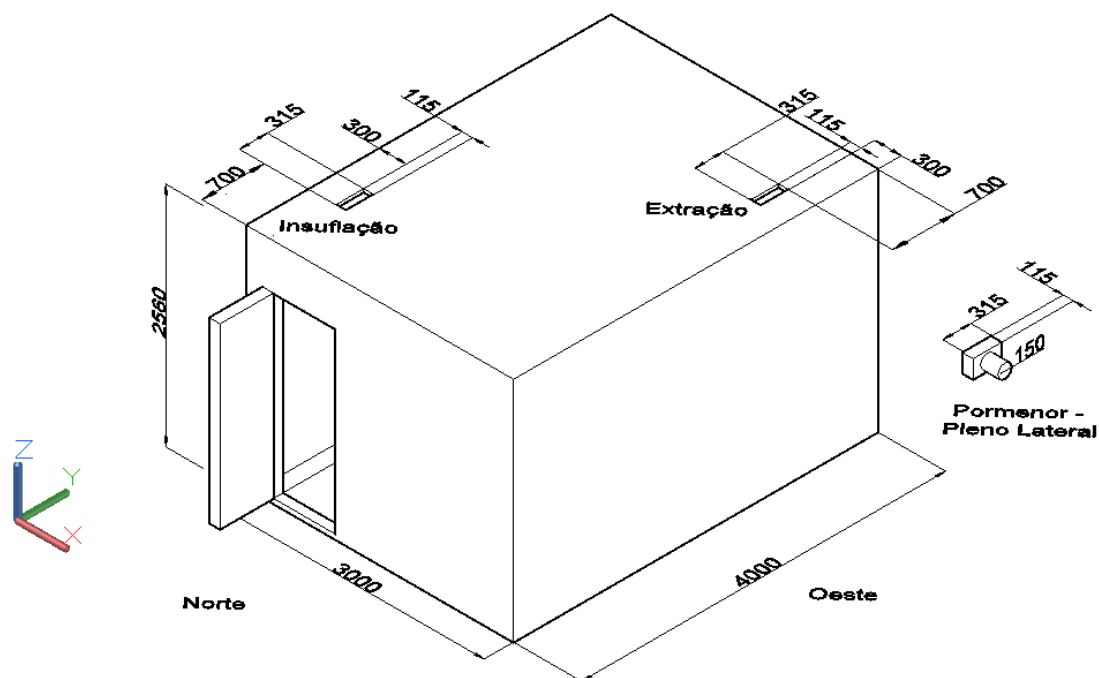


Figura 3.1 - Modelo 3D de SATEC com pormenor de pleno lateral.

O sistema de climatização consiste numa Unidade de Tratamento de Ar (UTA) com dois ventiladores, de insuflação e extração, e duas baterias, de arrefecimento e aquecimento, alimentadas por um *chiller* e uma caldeira, respetivamente. O esquema de princípio deste sistema está disponível no apêndice D.

A UTA liga-se à sala e ao espaço exterior por meio de uma rede de condutas, tendo 6 pontos de insuflação e 6 pontos de extração de ar disponíveis na sala, possibilitando o estudo de diferentes tipos de ventilação consoante o desejado. Os de insuflação e extração usados neste caso de estudo estão apresentados na figura 3.1. As condutas ligam-se às ranhuras por meio de um pleno circular lateral, cujas dimensões estão descritas na figura no pormenor da mesma figura 3.1.

A partir de medições experimentais prévias a este ensaio em que se avaliou o impacto dos acessórios de climatização no ponto de insuflação, nomeadamente registos e grelhas, foi concluído que estes acessórios afetam de forma relevante o comportamento do ar à entrada da sala. Comparando com simulações numéricas, concluiu-se que a situação mais aproximada à simulada é aquela que não apresenta estes acessórios e por este motivo a saída e entrada de ar na sala não apresenta registos ou grelhas.

## 3.2 Equipamento

Como estudado no capítulo 2, o equipamento usado pode variar consoante a dimensão do espaço a medir, a variável a medir, o rigor pretendido, entre outros.

Para a medição de velocidade do ar, a bibliografia estudada compreendeu quatro principais ferramentas de medição, o PIV, os anemómetros LDA, os anemómetros HWA e os anemómetros UA. Entre estes, como referido no mesmo capítulo, as medições com PIV são mais vantajosas, medindo vários pontos simultaneamente e sem necessidade de pré-calibração, mas é indicado apenas para salas modelo de escala reduzida. A mesma razão se aplica aos LDA.

Os anemómetros UA também podem ser aplicados na sala experimental, mas são mais caros que os HWA e é igualmente intrusivo. Por outro lado o seu tempo de resposta é menor que este, podendo alcançar maiores frequências de medição [56]. No entanto, a sua precisão espacial também é mais reduzida, pois este calcula a média linear entre o seu recetor e emissor.

Desta forma, os HWA podem ser utilizados para medição ponto a ponto, apesar deste método requerer mais tempo de ensaio e ser intrusivo, pelo que a obstrução física do suporte pode influenciar as medições. Idealmente, devem ser usadas tantas sondas quanto as alturas de medição, e estas devem ser dispostas verticalmente, de modo a captar as velocidades do mesmo ponto no plano a todas as alturas, simultaneamente. Algumas das propriedades das sondas estão descritas na tabela 3.1

Para o trabalho presente, foram disponibilizadas três sondas *KIMO CTV 210-TR*, utilizadas para medições de velocidade e temperatura do ar. No entanto, sendo estas omnidirecionais, não permitem determinar a direção do ar no ponto de medição.

Para além disso, por serem omnidirecionais, a magnitude calculada tem em conta a flutuação da velocidade do ar, e por isso as sondas registam velocidades médias superiores às que estão a ser medidas [57]. Esta característica acrescida da elevada constante de tempo da sonda, 1.6 segundos, exclui a hipótese de análises relativas à turbulência.

Para medição de caudal de insuflação e extração e as suas temperaturas, foi usado um caudalímetro *KIMO DBM - 610* com as propriedades apresentadas na tabela 3.1.

O catálogo das sondas e do caudalímetro apresentam-se nos anexos A e B respetivamente.

Tabela 3.1 – Características de anemómetro e caudalímetro.

	<i>KIMO CTV 210 – TR</i>		<i>KIMO DBM – 610</i>	
	<i>U</i> [m/s]	<i>T</i> [°C]	<i>Q</i> [m <sup>3</sup> /h]	<i>T</i> [°C]
Intervalo de Medição	0 a 30	0 a 50	40 a 3500	0 a 50
Exatidão	3% ±0.03	3% ±0.25	3% ±10	3% ±0.1
Resolução	0.01	0.1	1	0.1

### 3.3 Ensaio Experimental

Para a caracterização da distribuição de velocidade e temperatura na SATEC, com a configuração descrita atrás, foram realizados dois ensaios experimentais. Um ensaio principal em que se pretende medir a velocidade e temperatura em vários pontos da sala de forma a se criar um *contour*, mapa colorido, com a magnitude de velocidade e temperatura na sala. Um segundo ensaio em que se pretende avaliar a influência do suporte nas medições. Este último aspeto, apesar de ser considerado relevante neste trabalho, não foi referido na bibliografia consultada.

Assim, com estes objetivos em mente, foi definida uma malha interior (MI) para as medições na zona interior da sala e uma malha exterior (ME) para a caracterização do escoamento junto às paredes. Para o segundo objetivo foi definida uma submalha da MI que se denominou malha central (MC). Estas malhas, bem como a nomenclatura usada para os seus pontos, é apresentada nas secções seguintes.

Posteriormente, é apresentada a análise realizada para a definição de tempo de medição de cada ensaio, bem como o tempo de estabilização do escoamento dentro da sala após a abertura e fecho da porta para reposicionamento de sondas. Esta secção termina com a definição das condições de ensaio e o procedimento a adotar nos ensaios.

#### 3.3.1 Pontos de Medição

Devido à geometria simples da câmara, optou-se pela localização dos pontos a partir de uma grelha de pontos, como aconselhado por Huang em [58] e observado nos casos de Liu [38] e Raftery [23] já aqui referidos no capítulo 2.

Na região central, foi definida uma malha de pontos, denominada Malha Interior (MI), que distam entre si 40 e 43 centímetros, pelas coordenadas  $x$  e  $y$ , respetivamente. Este distanciamento foi decidido com base noutros ensaios onde a geometria da sala e as suas dimensões são semelhantes, dos quais se conclui que para este caso um distanciamento de 30 a 50 centímetros entre os pontos era o mais aconselhado. Alguns dos casos de estudo usados como exemplo são os de Liu [38], Raftery [23], Chen [4], Catalina [5], entre outros.

A malha interior dista 70 centímetros de cada uma das paredes, zona onde será criada uma malha de distanciamento diferente devido ao interesse nas proximidades das superfícies da sala. Com as dimensões referidas, a MI distribui-se em 7 pontos ao longo de  $y$  e 5 pontos ao longo de  $x$ , perfazendo um total de 35 pontos de medição no plano. A figura 3.2 apresenta as localizações destes pontos, cujas coordenadas se encontram na tabela 3.2.

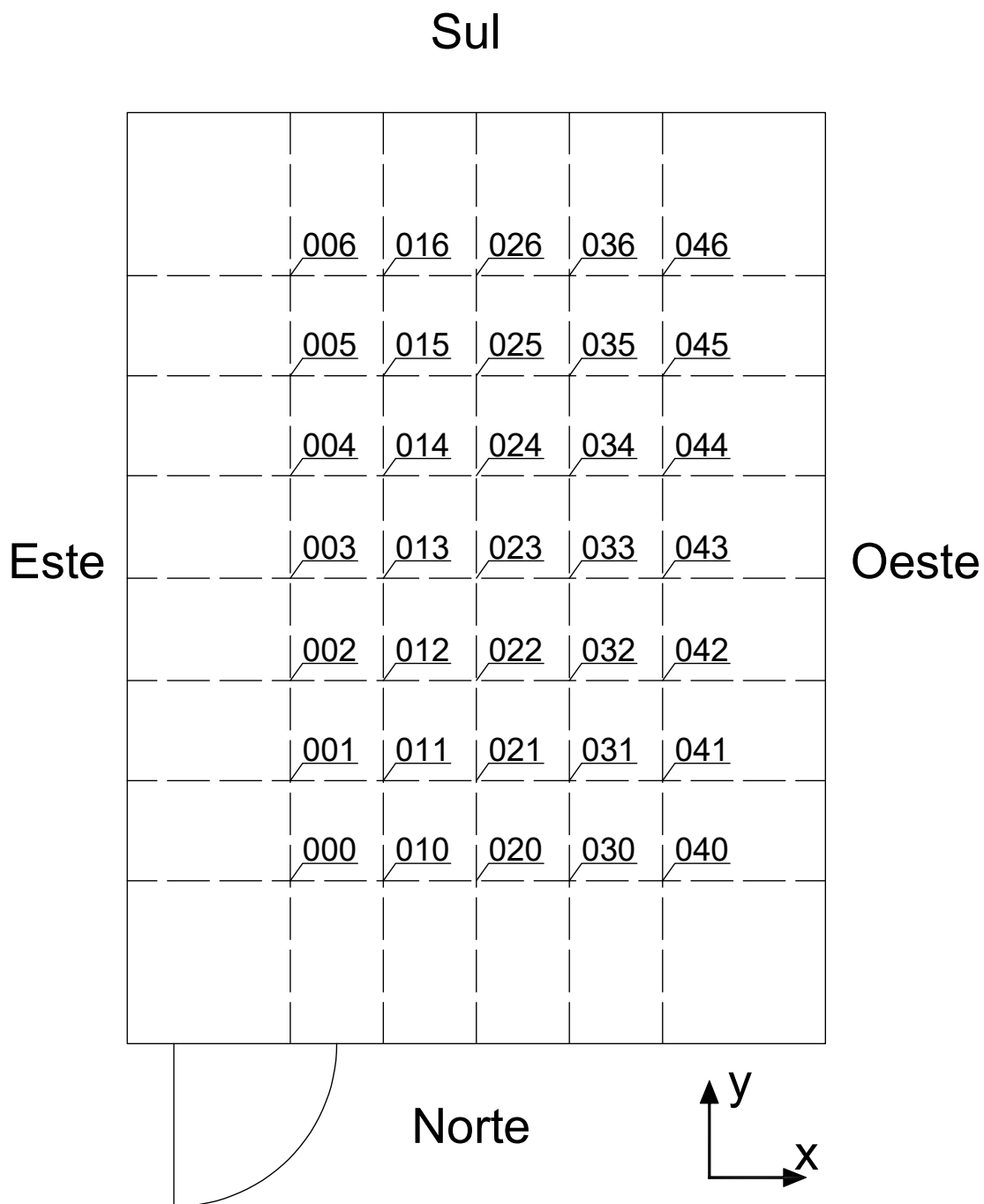


Figura 3.2 - Modelo da Malha Interior.

Tabela 3.2 – Coordenadas dos pontos da MI, em cm.

Malha Interior								
Pontos	x	y	Pontos	x	y	Pontos	x	y
000	70	70	015	110	287	033	190	200
001	70	113	016	110	330	034	190	243
002	70	157	020	150	70	035	190	287
003	70	200	021	150	113	036	190	330
004	70	243	022	150	157	040	230	70
005	70	287	023	150	200	041	230	113
006	70	330	024	150	243	042	230	157
010	110	70	025	150	287	043	230	200
011	110	113	026	150	330	044	230	243
012	110	157	030	190	70	045	230	287
013	110	200	031	190	113	046	230	330
014	110	243	032	190	157			

No espaço restante da sala foram também distribuídos pontos numa segunda malha, denominada Malha Exterior (ME). Para determinação do número de pontos e a sua localização foram aproximados os pontos de fronteira da malha interior à parede por um fator de aproximação de  $1/2.26$ , de modo a que o terceiro ponto, mais próximo, diste 4 cm à parede, distância condicionada pela armadura da sonda.

Com as dimensões referidas, a ME distribui-se num total de 84 pontos de medição no plano, como apresentado na figura 3.3.

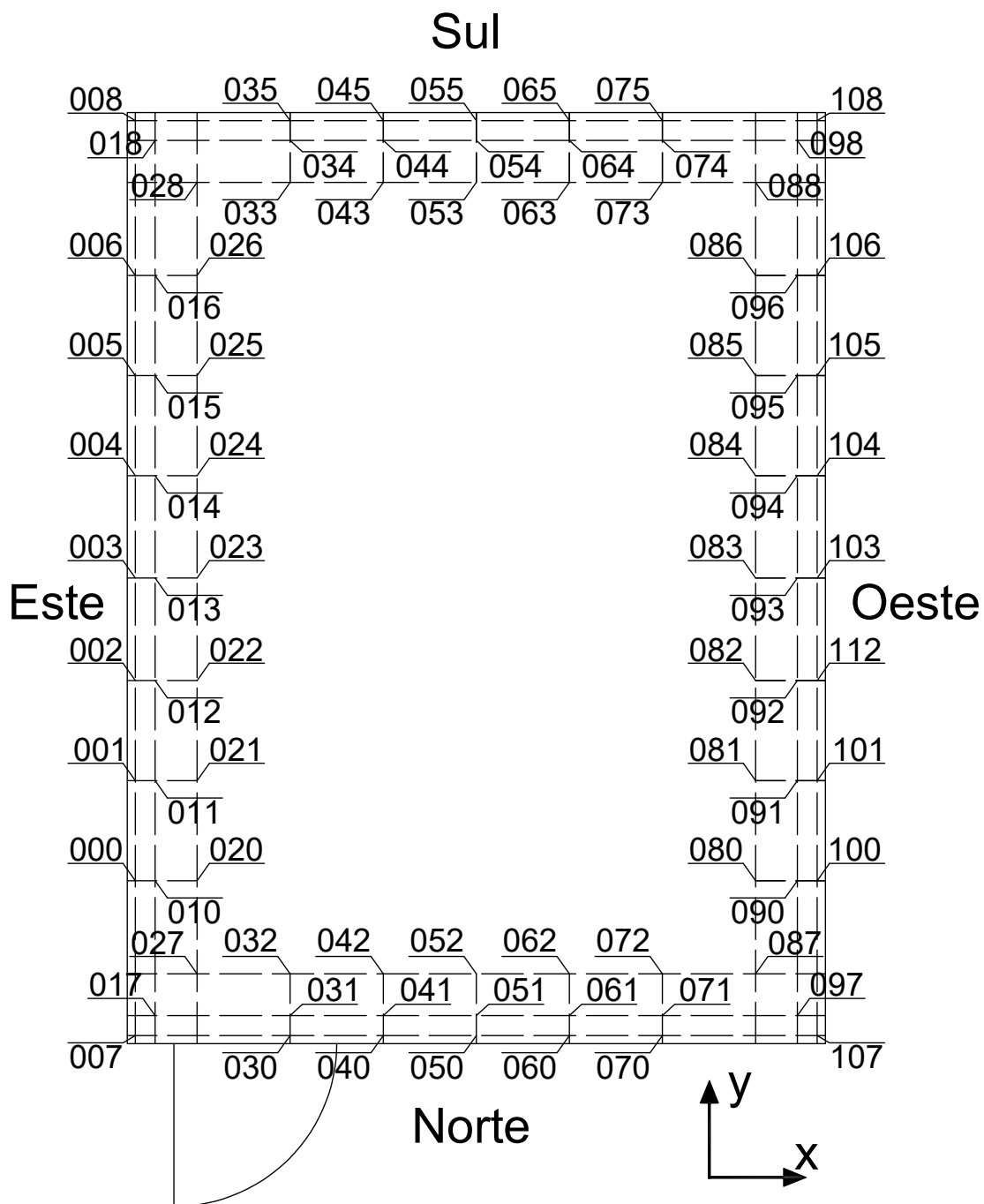


Figura 3.3 – Modelo da Malha Exterior.

As coordenadas dos pontos de medição da ME no plano apresentam-se nas tabelas 3.3 e 3.4.

Tabela 3.3 – Coordenadas dos pontos de 000 a 052 da ME, em cm.

Malha Exterior								
Pontos	$x$	$y$	Pontos	$x$	$y$	Pontos	$x$	$y$
000	4	70	015	12	287	031	70	12
001	4	113	016	12	330	032	70	30
002	4	157	017	12	12	033	70	270
003	4	200	018	12	388	034	70	288
004	4	243	020	30	70	035	70	296
005	4	287	021	30	113	040	110	4
006	4	330	022	30	157	041	110	12
007	4	4	023	30	200	042	110	30
008	4	396	024	30	243	043	110	270
010	12	70	025	30	287	044	110	288
011	12	113	026	30	330	045	110	296
012	12	157	027	30	30	050	150	4
013	12	200	028	30	370	051	150	12
014	12	243	030	70	4	052	150	30

Tabela 3.4 – Coordenadas dos pontos de 053 a 108 da ME, em cm.

Malha Exterior								
Pontos	$x$	$y$	Pontos	$x$	$y$	Pontos	$x$	$y$
053	150	270	075	230	296	094	288	243
054	150	288	080	270	70	095	288	287
055	150	296	081	270	113	096	288	330
060	190	4	082	270	157	097	288	12
061	190	12	083	270	200	098	288	388
062	190	30	084	270	243	100	296	70
063	190	270	085	270	287	101	296	113
064	190	288	086	270	330	102	296	157
065	190	296	087	270	30	103	296	200
070	230	4	088	270	370	104	296	243
071	230	12	090	288	70	105	296	287
072	230	30	091	288	113	106	296	330
073	230	270	092	288	157	107	296	4
074	230	288	093	288	200	108	296	396

Para avaliar a influência da obstrução física do suporte foi criada ainda uma terceira malha, a Malha Central (MC), que se apresenta na figura 3.4 e cujas coordenadas estão listadas na tabela 3.5. Esta malha é uma submalha da MI, em que os seus pontos são coincidentes com os nove pontos centrais da MI.

O ensaio para o qual será usada esta malha tem o intuito de avaliar a interferência que o suporte tem nas medições consoante a sua orientação. Para o avaliar serão feitas 4 medições em cada ponto da malha, alterando a orientação do suporte face à sonda para as paredes Norte, Sul, Este e Oeste.

Tabela 3.5 - Coordenadas de pontos da MC, em cm.

<b>Malha Central</b>								
<b>Pontos</b>	<i>x</i>	<i>y</i>	<b>Pontos</b>	<i>x</i>	<i>y</i>	<b>Pontos</b>	<i>x</i>	<i>y</i>
000	157	110	010	157	150	020	157	190
001	200	110	011	200	150	021	200	190
002	243	110	012	243	150	022	243	190

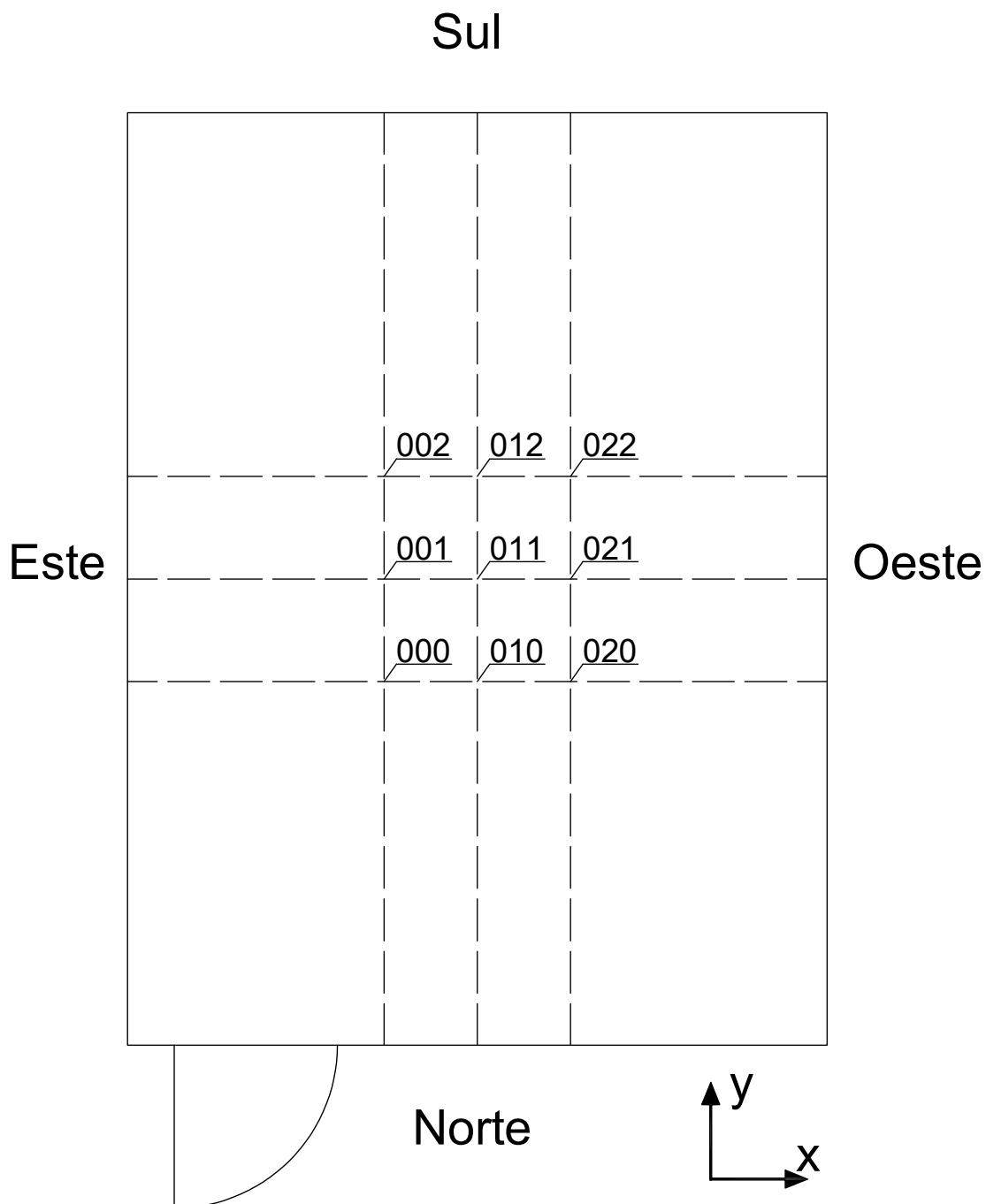


Figura 3.4 – Modelo da Malha Central.

Para a determinação de alturas a medir, considerou-se o número de sondas disponível, as normas existentes e os pontos de medição no plano. Desta forma, foram definidas três alturas próximas ao chão, com afastamento deste igual ao usado para as paredes, ou seja, 4, 12 e 30 cm.

Para as alturas superiores, consultaram-se as alturas propostas na norma ASHRAE 55 [11], sendo estas 10, 60, 110 e 170 cm. Estas alturas não foram usadas pois destinam-se à avaliação de conforto térmico, mas definiram-se as alturas de 110 e 170 cm para se avaliar a velocidade a alturas superiores neste caso de estudo. Assim, poderão ser usadas para um possível estudo de conforto térmico na sala.

O espaço da sala a altura superior a 170 cm não foi avaliado, uma vez que não demonstra tanto interesse, pois preveem-se velocidades muito reduzidas, e o número de sondas disponível não o permite.

Desta forma, foram definidas as cinco alturas a usar. Como só se conta com três sondas, estas terão duas configurações de alturas diferentes, A e B, cujas alturas de cada se apresentam na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Altura das sondas das configurações A e B, em cm.

Sonda	Configuração	
	A	B
1	170	30
2	110	12
3	30	4

Como se pode observar na tabela, há uma repetição de altura entre os dois ensaios. Esta altura comum permite uma comparação entre as medições nas duas distribuições, uma vez que estas serão feitas com alguns dias de intervalo para o mesmo ponto.

### 3.3.2 Definição da nomenclatura de cada ponto de medição

Para apoiar a organização e registo de dados, definiu-se uma nomenclatura que identifique cada ponto de medição. Esta também será também usada para a criação de programas de visualização de resultados, pois a descrição de cada ponto por meio desta nomenclatura determina a sua localização, permitindo atribuir valores medidos a coordenadas espaciais.

Para o objetivo anterior, a nomenclatura tem de definir o número de ensaio em que o ponto se insere, as suas coordenadas e a orientação do suporte. Com estes critérios em vista, definiu-se a seguinte:  $nn\_x_1x_2yz\_c$

Sendo:

- $nn$  - número da malha. Neste trabalho estão previstas três malhas, em que:

- 00 - Nomenclatura da Malha Exterior;
  - 01 - Nomenclatura da Malha Interior;
  - 02 - Nomenclatura da Malha Central.
- $x_1x_2$  - localização do ponto na coordenada  $x$ , com valores variantes entre 00 e 10;
  - $y$  - localização do ponto na coordenada  $y$ , com valores variantes entre 0 e 8;
  - $z$  - localização do ponto na coordenada  $z$ , com valores variantes entre 0 e 1, em que:
    - 0 - alturas de 4, 12 e 30 cm, configuração A;
    - 1 - alturas de 30, 110 e 170 cm, configuração B;
  - $c$  - orientação do suporte relativamente ao ponto de medição, com valores variantes entre 0 e 4. As orientações foram definidas sem base na orientação real, em que:
    - 0 - utilizado quando não há diferentes orientações para esse mesmo ponto no ensaio;
    - 1 - orientação a Norte, lado onde se encontra a porta de acesso;
    - 2 - orientação a Este;
    - 3 - orientação a Sul;
    - 4 - orientação a Oeste.

Os pontos na MI foram medidos com o suporte orientado a Sul, por ser a orientação oposta à zona de insuflação, prevendo-se que cause menos obstrução. Os pontos da ME foram medidos com o suporte orientado oposto à parede mais próxima, por ser fisicamente impossível fazer medições nesses pontos com qualquer outra orientação.

### 3.3.3 Definição do tempo de medição

Os casos revistos no capítulo 2 apresentaram diferentes intervalos de tempo para medição da velocidade e temperatura. Alguns autores seguiram a norma ASHRAE 113 [14], tais como Magnier [41], Ameen [45], Kalmár [40] e Liu [38] em que foram feitas medições de pelo menos 3 minutos e repetidas pelo menos 3 vezes para validação de resultados. Outros optaram por longas medições de várias horas, medindo menos pontos e sem repetição de ensaios, como Hodder [43].

Por outro lado, estudos principalmente relacionados à qualidade do ar, como é o caso de Jahanbin [51], ou a casos não estacionários, tal como o de Kandzia [59], utilizaram a constante de tempo nominal da sala, que define o tempo necessário para que o volume

de ar seja totalmente renovado pelo caudal de insuflação, como referência no tempo de medição.

Uma vez que a discrepância de intervalos de tempo usados é elevada, variando com a especificidade do caso e do equipamento usado, foram realizados alguns ensaios prévios para se determinar o intervalo de tempo de medição ótimo a usar. Os dois fatores usados para determinar esta variável foram a precisão das sondas e a constante de tempo nominal da sala.

Previamente à determinação do tempo de ensaio, definiu-se o tempo necessário para o início das medições após a interrupção de ensaio para reposicionamento e preparação das sondas, com o intuito de estabilizar as condições da sala. O estudo compreendeu um ensaio em que foi medida a velocidade ao longo de 3 horas e 45 minutos.

Este ensaio iniciou-se com a estabilização da sala durante meia hora. Após a estabilização, abriu-se a porta e simulou-se o reposicionamento de suporte durante 5 minutos. Seguidamente fechou-se a porta e mediu-se a velocidade na hora seguinte. Este processo foi repetido 3 vezes. O registo de intervalos de tempo usados encontra-se no apêndice A.

Para este estudo, calculou-se o erro relativo da média das medições de velocidade, que consiste na relação entre a média de velocidades desde o início da medição até ao instante de tempo a medir com a média de ensaio, sendo este erro calculado a cada 10 segundos. Este erro relativo é então comparado com o erro da precisão das sondas associado à medição, 3%, considerando-se este o limite abaixo do qual a medição é fiável. Na equação 3.1 apresenta-se este cálculo.

$$e_i = |(\bar{U}_i - \bar{U}_t)| * 100 / \bar{U}_t \quad (3.1)$$

Em que:

- $e_i$  - erro relativo no instante  $i$ , [%];
- $\bar{U}_i$  - velocidade média no intervalo  $[0;i]$ , [m/s];
- $\bar{U}_t$  - velocidade média do ensaio, [m/s].

A partir dos valores medidos, foram analisados os resultados, estando apresentada na figura 3.5 um exemplo da variação do erro após uma das interrupções para um dos intervalos. Na mesma figura está assinalado o erro relativo de 3% a rosa e a amarelo o valor de referência.

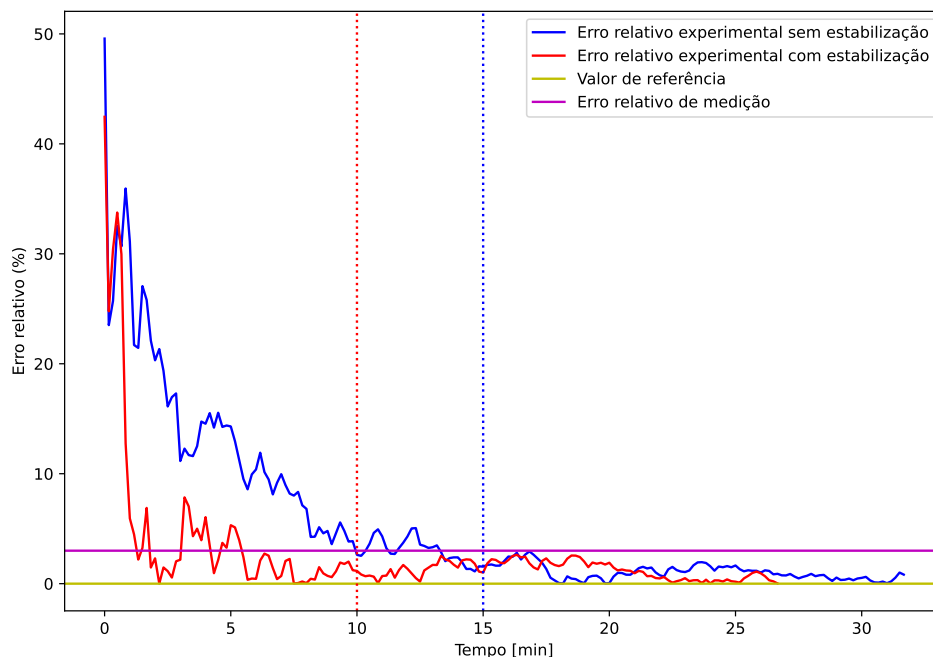


Figura 3.5 – Variação de erro relativo da média acumulada ao longo do tempo para determinação do tempo de tempo de estabilização.

Na figura 3.5 mostra-se a azul a variação do erro relativo de medição logo após o fecho da porta, em que apenas 15 minutos após o fecho da porta se conseguiu erros dentro do limite estabelecido.

Por esse motivo, avaliou-se o comportamento do erro de medição 5 minutos após o fecho da porta, a vermelho, verificando-se um erro inferior a 3 % aos 10 minutos de ensaio, concluindo-se que o tempo de estabilização a usar é o de 5 minutos.

Para determinar o intervalo de tempo de medição ótimo a utilizar, ou seja, o mínimo intervalo de tempo cuja média de valores represente a velocidade do ar nesse ponto, realizaram-se várias medições de uma hora em pontos diferentes e aplicou-se a mesma comparação de erros relativos que a usada para a determinação do tempo de estabilização.

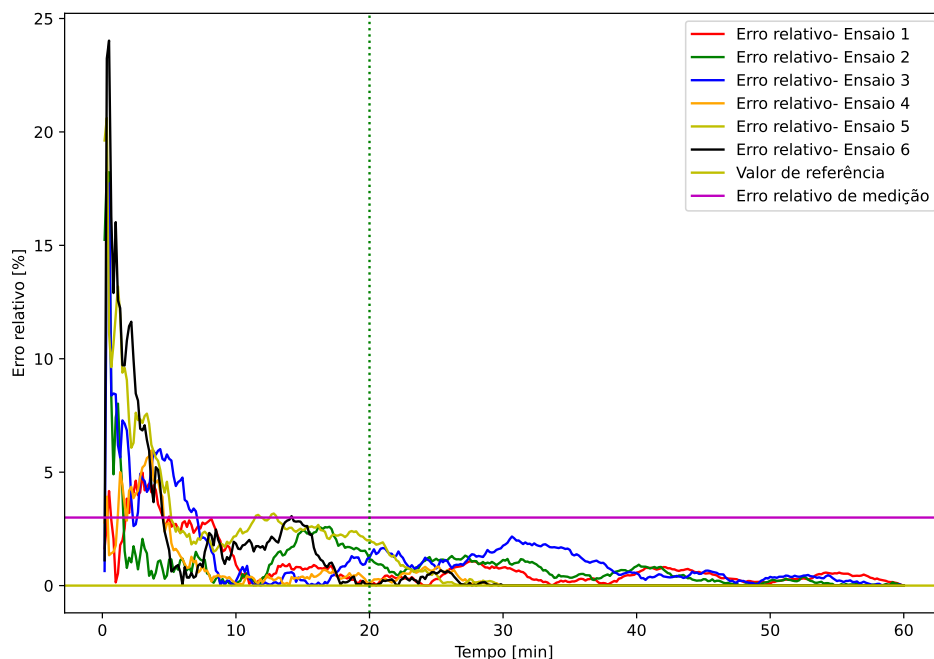


Figura 3.6 – Variação de erro relativo da média acumulada ao longo do tempo para determinação do tempo de medição.

Na figura 3.6 demonstra-se a variação deste erro ao longo dos diferentes ensaios realizados, estando as coordenadas do ponto de medição correspondente a cada ensaio apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Coordenadas de pontos de medição de ensaios para determinação de tempo de medição, em cm.

Ensaio	$x$	$y$	$z$
1	38	136	15
2	38	87	15
3	38	176	15
4	38	136	115
5	38	87	115
6	38	176	115

Deste estudo, verificou-se que a partir de cerca de 20 minutos a diferença entre as médias é inferior a 3%.

Apesar deste erro ser mais diminuto em intervalos de tempo superiores, considerou-se este intervalo como suficiente a fim de evitar períodos de ensaio muito extensos para o número de pontos necessários a medir.

Adicionalmente, para se evitar erros associados à periodicidade da renovação de ar

da sala, considerou-se que o intervalo de tempo de medição deveria ser também superior a 2 períodos de renovação de ar da sala, ou seja, superior ao dobro da constante de tempo nominal da sala ( $\tau_s$ ). Esta foi calculada por meio da equação 3.2. Esta equação permite concluir que  $\tau_s = 6.5$  minutos.

$$\tau_s = V/Q \quad (3.2)$$

Sendo:

- $\tau_s$  - Constante de tempo da sala. Representa o tempo necessário para que todo o ar da sala seja renovado [ $s^{-1}$ ];
- $Q_{ins}$  - Caudal de insuflação, aproximadamente 281 [ $m^3/s$ ];
- $V$  - Volume da sala, aproximadamente 30.72 [ $m^3$ ].

Destes valores, definiu-se o intervalo de 20 minutos para as medições, sendo superior a três constantes de tempo da sala e o intervalo de tempo tem um erro de medição face à média muito reduzido. Este intervalo de medição consiste em 1200 medições de cada ponto.

### 3.3.4 Condições de ensaio

Cada um dos ensaios tem o intuito de avaliar e descrever a velocidade do ar na sala em situação isotérmica, pelo que ambos foram realizados nas mesmas condições.

Para este objetivo, as condições estipuladas foram a temperatura de insuflação e caudal de insuflação constante. A temperatura de insuflação definida foi a de 24 °C e o caudal usado corresponde ao máximo permitido pela UTA.

Para evitar variação de caudal, foi insuflado 100% ar novo, isto porque ao existir retorno de ar, a temperatura da sala pode fazer variar o caudal insuflado por conta do registo para *bypass* na UTA. A insuflação e extração são ambas feitas por ranhuras retangulares com 115 milímetros de largura e 315 milímetros de comprimento, sem presença de registo ou grelha. As posições das ranhuras estão apresentadas na figura 3.1, sendo a insuflação a mais próxima da entrada.

As condições de ensaio foram controladas entre medições. Inicialmente a medição e registo de temperatura e caudal era só feita na insuflação, pois eram estas as condições regentes, no entanto estas variáveis foram eventualmente medidas também no ponto de extração. As medições na extração revelaram que o caudal de extração era superior ao

de insuflação, ou seja, a sala encontrava-se em depressão face ao exterior, condição que não era pretendida. No entanto, devido à quantidade de medições realizada até à altura, optou-se por se manter as condições constantes. Os valores registados encontram-se no apêndice B, e os valores médios de cada variável na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Condições de ensaio medidas experimentalmente.

Condições de Ensaio		
	Insuflação	Extração
Temperatura [°C]	23.4	23.7
Caudal [m <sup>3</sup> /h]	281	345

A temperatura de insuflação real demonstrou ser um pouco menor que a pretendida. Isto deve-se ao facto de a temperatura de insuflação da UTA ser controlada por um sensor que se encontra na conduta de insuflação afastado da entrada do ar na sala. Por este motivo, apesar de o ar se encontrar à temperatura pretendida nesse ponto, até entrar na sala perdeu alguma carga térmica consoante a temperatura exterior no momento de ensaio.

### 3.3.5 Procedimento

Em cada campanha de medições é estabilizada a temperatura do ar no interior da sala e do ar de insuflação da UTA, sendo a variação destes valores acompanhada no sistema de controlo da UTA e confirmados com medições com o caudalímetro *KIMO DBM – 610*.

Nesta primeira estabilização de temperatura do interior da sala, o sistema de controlo, ligado à UTA, utiliza as temperaturas de insuflação e extração medidas nas sondas das condutas para corrigir a temperatura de insuflação. A variação de temperatura de insuflação depende da carga térmica cedida ou retirada pelas baterias de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, sendo estas, por sua vez, reguladas pelo caudal de água cedido pela bomba de calor e pelo *chiller*. Nesta fase, é recuperado ar do interior da sala, para que as condições sejam atingidas mais rapidamente. A partir do sistema de controlo da UTA é possível consultar as temperaturas de insuflação e extração, quando estas apresentarem os valores desejados, considera-se que as condições da SATEC estão estabilizadas e satisfeitas.

Após as condições de ensaio estarem todas satisfeitas, preparam-se as sondas, sendo posicionadas no local de medição pretendido, de acordo com o plano de medição previamente definido. Os dados das medições são armazenados no computador que liga às sondas através de um Data-Logger, com frequência de 1 Hz, como demonstrado na figura 3.7.

Por fim, são realizadas as medições de velocidade e temperatura de ar, que como referido anteriormente, corresponde a 25 minutos, 5 minutos para a estabilização da câmara devido à interferência causada na preparação da medição e 20 minutos de medição de dados.

A cada duas horas, sensivelmente, são medidas as temperaturas e caudais de insuflação e extração após a medição, com o caudalímetro *KIMO DBM – 610*, de modo a existir um acompanhamento das condições da sala que complemente o acompanhamento das condições da sala no sistema de controlo da UTA.

Na figura 3.7 são apresentados os principais componentes utilizados para cada ensaio.

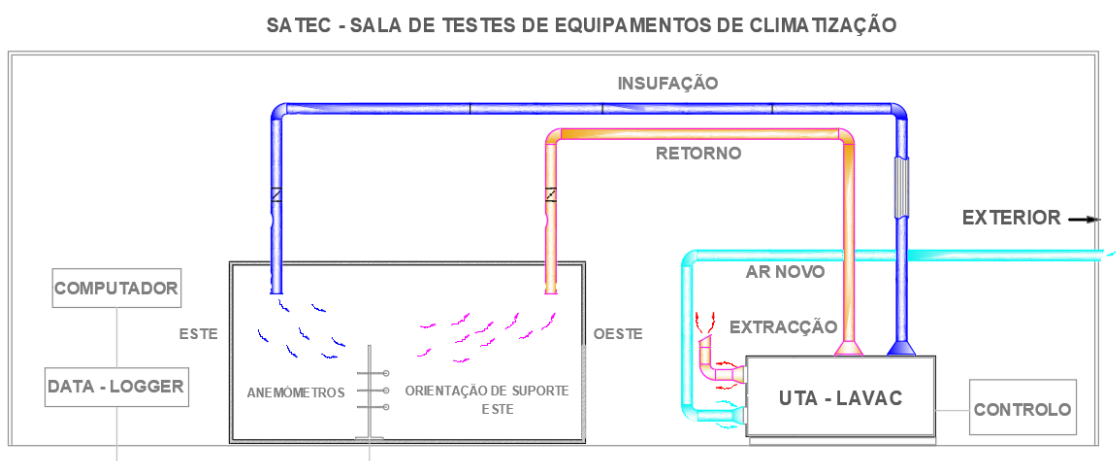


Figura 3.7 – Esquema de Instalação da SATEC.

## 3.4 Tratamento e Análise de Dados

### 3.4.1 Tratamento de Dados

Os dados medidos são retirados do ensaio a partir do Data-Logger e armazenados em ficheiros de texto no computador, formato *.csv*. Para ler os dados utilizou-se o Pandas, no Python, para ler todos os ficheiros. O mesmo programa atribui cada um desses ficheiros à respetiva localização, utilizando a nomenclatura do ficheiro para atribuir os valores de cada uma das coordenadas. Este programa apresenta-se no apêndice E.

Na figura 3.8 apresentam-se, como exemplo, os valores de velocidade adquiridos ao longo dos 20 minutos de ensaio em função do tempo, a azul, no ponto 011 da Malha Interior a 4 cm de altura, cujas coordenadas podem ser consultadas na tabela 3.2.

Como se pode observar no exemplo da figura, o sinal representado pelo valor retirado a cada segundo apresenta uma oscilação acentuada.

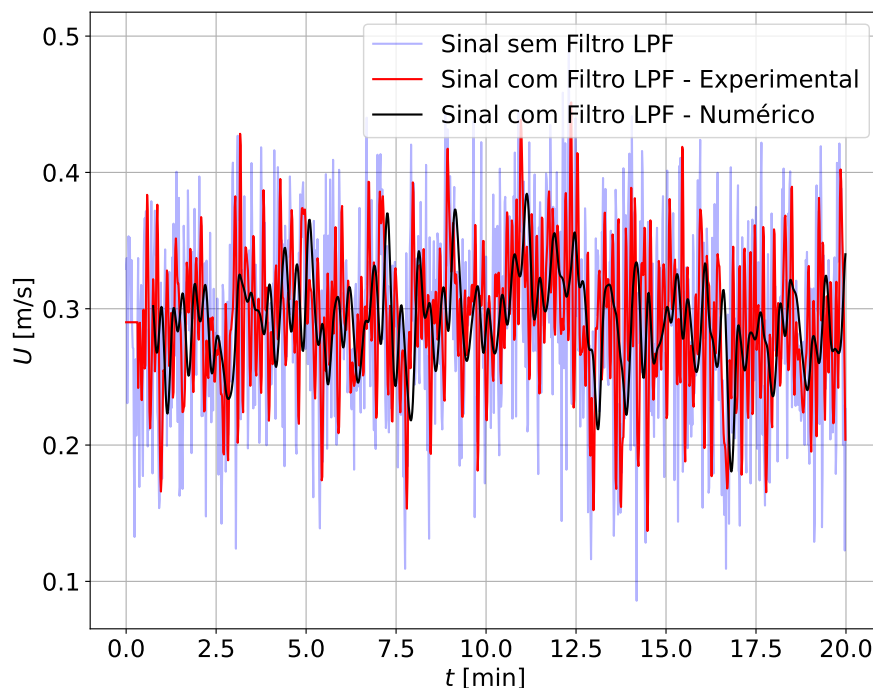


Figura 3.8 – Medição de velocidade no ponto 011 da Malha Interior sem filtro LPF, com filtro LPF = 0.15625 Hz e com filtro LPF = 0.02 Hz.

Para atenuar esta oscilação aplicou-se o comando *scipy.signal.butter* para se aplicar um filtro passa-baixo (LPF). Este filtro permite definir a maior frequência do sinal permitida e permite a passagem do sinal com apenas as frequências abaixo desta. Devido à elevada constante de tempo dos anemómetros,  $\tau_a = 1.6$  segundos, optou-se por filtrar o sinal com uma frequência de corte correspondente a um quarto da  $\tau_a$ , 0.15625 Hz.

O sinal com este filtro apresenta-se na figura 3.8 a vermelho. Para efeitos de comparação de séries temporais obtidas numericamente [60] e experimentalmente, os resultados experimentais foram filtrados com um filtro passa-baixo com frequência de corte de 0.02 Hz, evidenciando assim as frequências mais baixas, que mais contribuem para o campo médio produzido nas simulações.

Para melhor análise de dados, observou-se a distribuição de frequências e o impacto de cada uma delas no sinal. Nesta análise, utilizou-se o sinal apresentado na figura 3.8 e aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), ferramenta que calcula a Transformada Discreta de Fourier (DFT), decompondo o sinal anterior em ondas sinusoidais de diferentes frequências [61]. Desta forma, o sinal anterior, que se apresentava em função do tempo, apresenta-se agora em função da frequência.

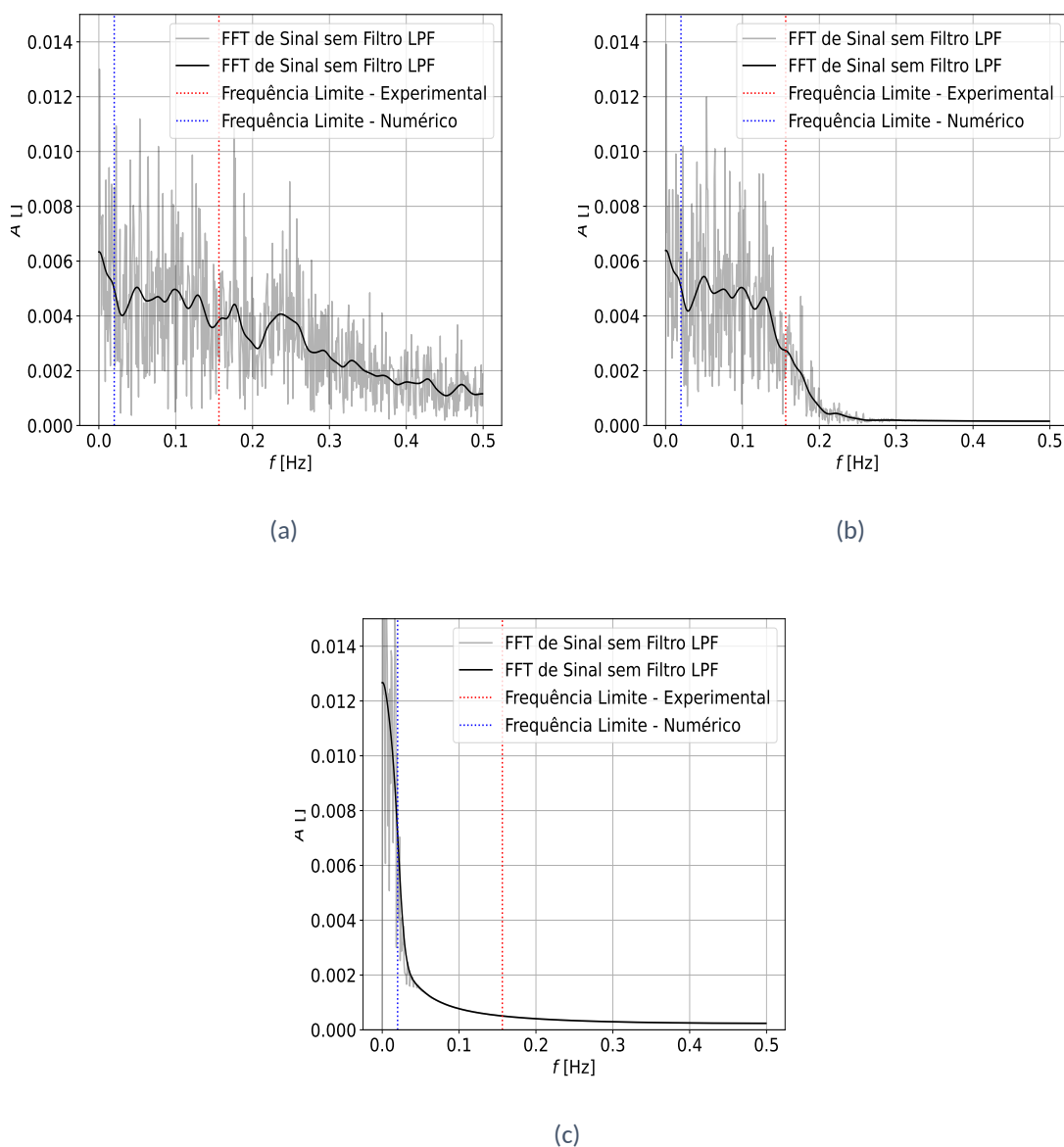


Figura 3.9 – FFT de sinal do ponto 011 da Malha Interior (a) sem LPF, (b) com LPF de frequência limite 0.15625 Hz e (c) com LPF de frequência limite 0.02 Hz.

A distribuição de frequências apresenta também oscilação elevada, pelo que foi criado um filtro para suavizar o sinal por meio de interpolação linear. Este filtro aplica várias passagens ao sinal, em que cada uma delas calcula o valor médio de cada dois pontos consecutivos, substituindo-os no sinal. Para este caso foram necessárias 200 passagens até existir estabilização de sinal entre elas, semelhante à suavização proposta por Downey em [61]. Na figura 3.9 observa-se a distribuição de frequências do sinal e a sua influência, onde se realça o efeito do filtro de baixas frequências anteriormente mencionado.

### 3.4.2 Análise de Dados

Para análise de dados, criou-se o programa descrito no apêndice E. Neste programa foram atribuídos os valores médios de temperatura e velocidade após a aplicação do LPF às respectivas coordenadas por meio da nomenclatura definida na secção 3.3.2.

Paralelamente, foi criada uma malha tridimensional, regular e estruturada. Esta malha é dividida em 500 células por cada coordenada. Por fim, inseriram-se os pontos medidos experimentalmente nesta malha. Para as células da malha regular que não tiveram valores atribuídos, por não corresponderem às coordenadas de pontos de medição, foram linearmente interpolados valores de temperatura e velocidade.

Com esta organização, é possível criar planos de corte de qualquer coordenada que se deseje. Na figura 3.10 apresentam-se exemplos de cada tipo de corte feito para posterior análise.

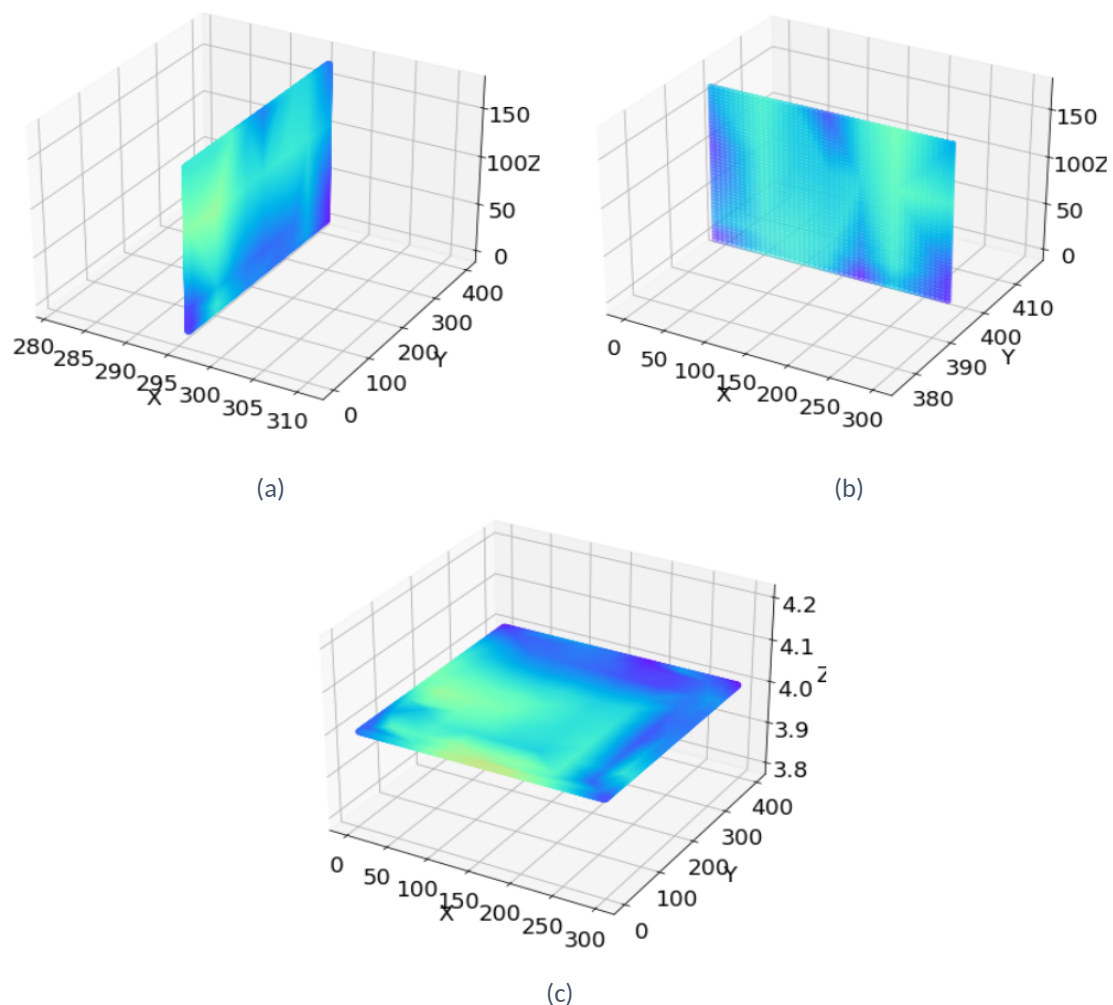


Figura 3.10 - Projeções tridimensionais da distribuição de velocidade nos Cortes (a)  $x = 296$  cm, (b)  $y = 396$  cm e (c)  $z = 4$  cm.

Estas projeções foram convertidas, por meio do comando *matplotlib.pyplot.contour* para imagens a duas dimensões, como se verifica na figura 3.11, criando os *contour* desejados.

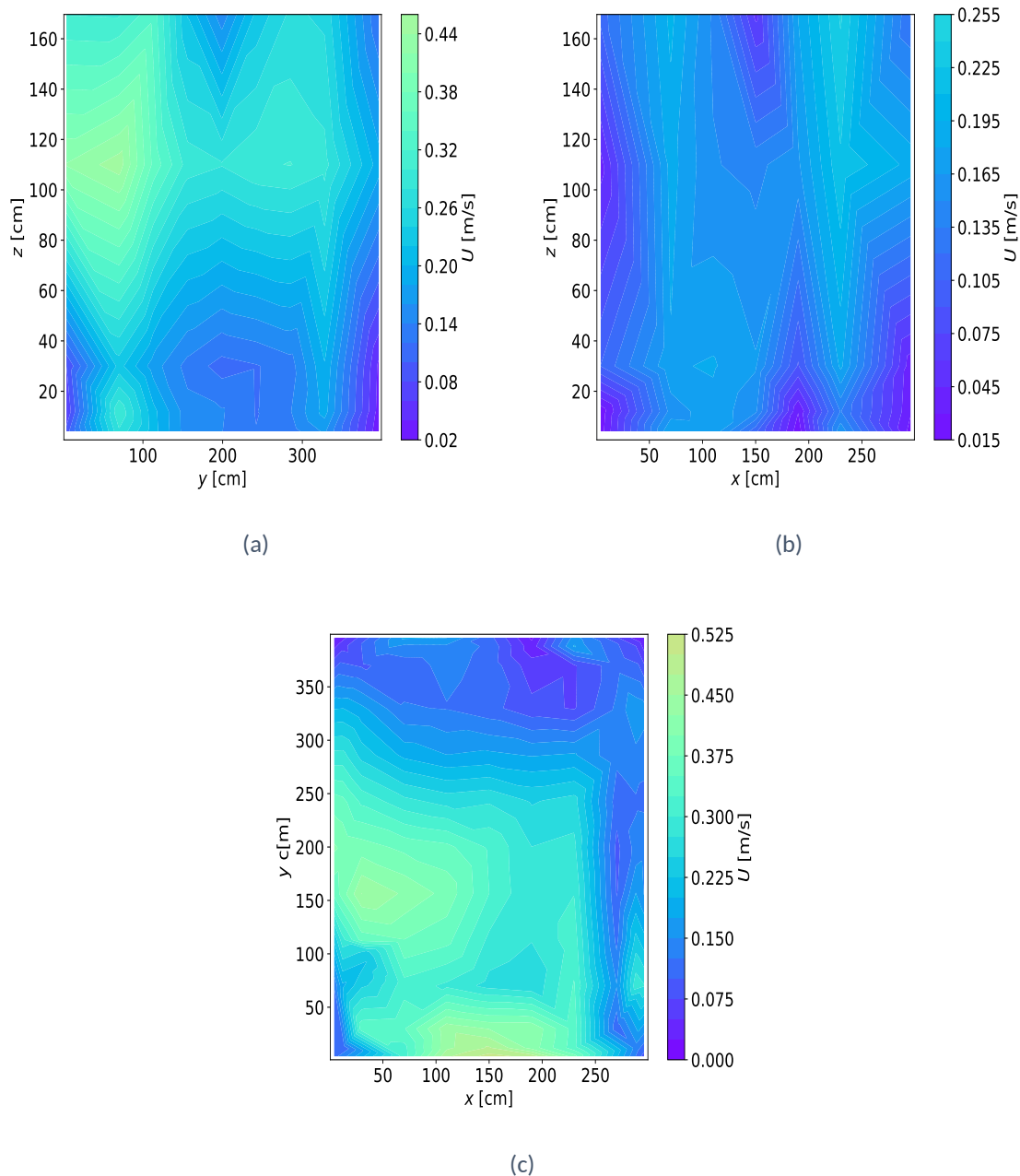


Figura 3.11 - Distribuição de Velocidade ao longo dos planos de corte de: (a)  $x = 296$  cm , (b)  $y = 396$  cm e (c)  $z = 4$  cm.

## 4 VALIDAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Após a definição do procedimento de ensaio, é necessário avaliar se o procedimento e equipamento utilizados vão ao encontro dos objetivos definidos. Neste ensaio estamos a pressupor um escoamento com regime permanente que pode ser estabelecido a qualquer altura.

Assim, a validação do procedimento compreende três critérios, a coerência de resultados para diferentes dias de medição, em que serão comparadas as velocidades medidas à altura de 30 cm, o uso das condições de ensaio desejadas, sendo avaliada a uniformidade de temperatura pretendida na sala, e a obstrução física do suporte, onde se determinará se o posicionamento do suporte face às sondas influencia as medições.

### 4.1 Comparação de velocidades

Como referido na secção 3.3.1, o equipamento conta apenas com três sondas dispostas verticalmente, ou seja, para as medições das cinco alturas definidas, torna-se necessário alterar as posições das sondas uma vez para cada ponto de medição.

Como a alteração de posições implica aperto e desaperto do suporte, esta alteração foi realizada após a medição de todos os pontos na primeira configuração das sondas. Consequentemente, as medições das alturas superiores, configuração A, e inferiores, configuração B, de um mesmo ponto no plano XY foram realizadas com alguns dias de diferença, pelo que se repetiu uma das alturas, 30 cm, para se confirmar que os valores de velocidade para o mesmo ponto nas duas configurações se aproxima.

Uma vez que as sondas têm o seu erro relativo associado à precisão da medição de

velocidade, isto é,  $3\% \pm 0.03$  m/s, como referido na tabela 3.1, utilizou-se esse erro como limite máximo para aprovação dos dados.

Para a comparação das velocidades de cada ponto, faz-se a diferença absoluta de velocidades  $e_a$  entre a configuração B e a configuração A, que matematicamente se traduz na equação 4.1.

$$e_a = (|U_b - U_a|) \quad (4.1)$$

Em que:

- $U_b$  - velocidade medida na altura de 30 cm na configuração B;
- $U_a$  - velocidade medida na altura de 30 cm na configuração A;

O resultado desta diferença é apresentado em 4.1.a, em que se verifica que os valores de  $e_a$  mais elevados encontram-se naqueles em que a velocidade do ar é também mais elevada.

O valor de velocidade acima do limite do erro da sonda ( $e_r$ ) é dado pela equação condicional:

$$e_r = \begin{cases} e_a - e_s, & \text{se } e_a - e_s \geq 0 \\ 0, & \text{se } e_a - e_s < 0 \end{cases}$$

Sendo  $e_s$  o maior erro absoluto da sonda, dado por:

$$e_s = |0.03 * U_b + 0.03| \quad (4.2)$$

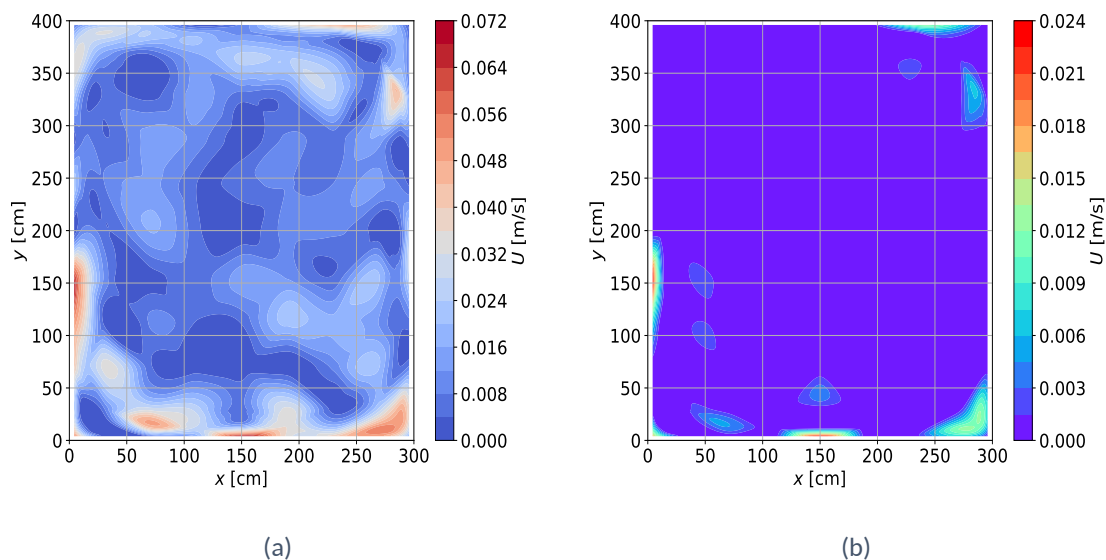


Figura 4.1 – Comparação de velocidades para  $z = 30$  cm da Malha Exterior e Interior: (a) Diferença de velocidades -  $e_a$  e (b) comparação da diferença de velocidade com o erro relativo das sondas -  $e_r$ .

Em 4.1.b apresentam-se os valores de  $e_r$  para cada um dos pontos. Com estes confirma-se que praticamente todos os pontos se encontram dentro do limite estabelecido, concluindo-se que as medições são viáveis, apesar da distância cronológica entre as medições.

Para confirmar a viabilidade de ensaio da malha central, foram também comparadas as velocidades à altura de 30 cm entre as duas configurações para as orientações Norte, Sul, Este e Oeste, com o mesmo método que o usado para a MI e ME.

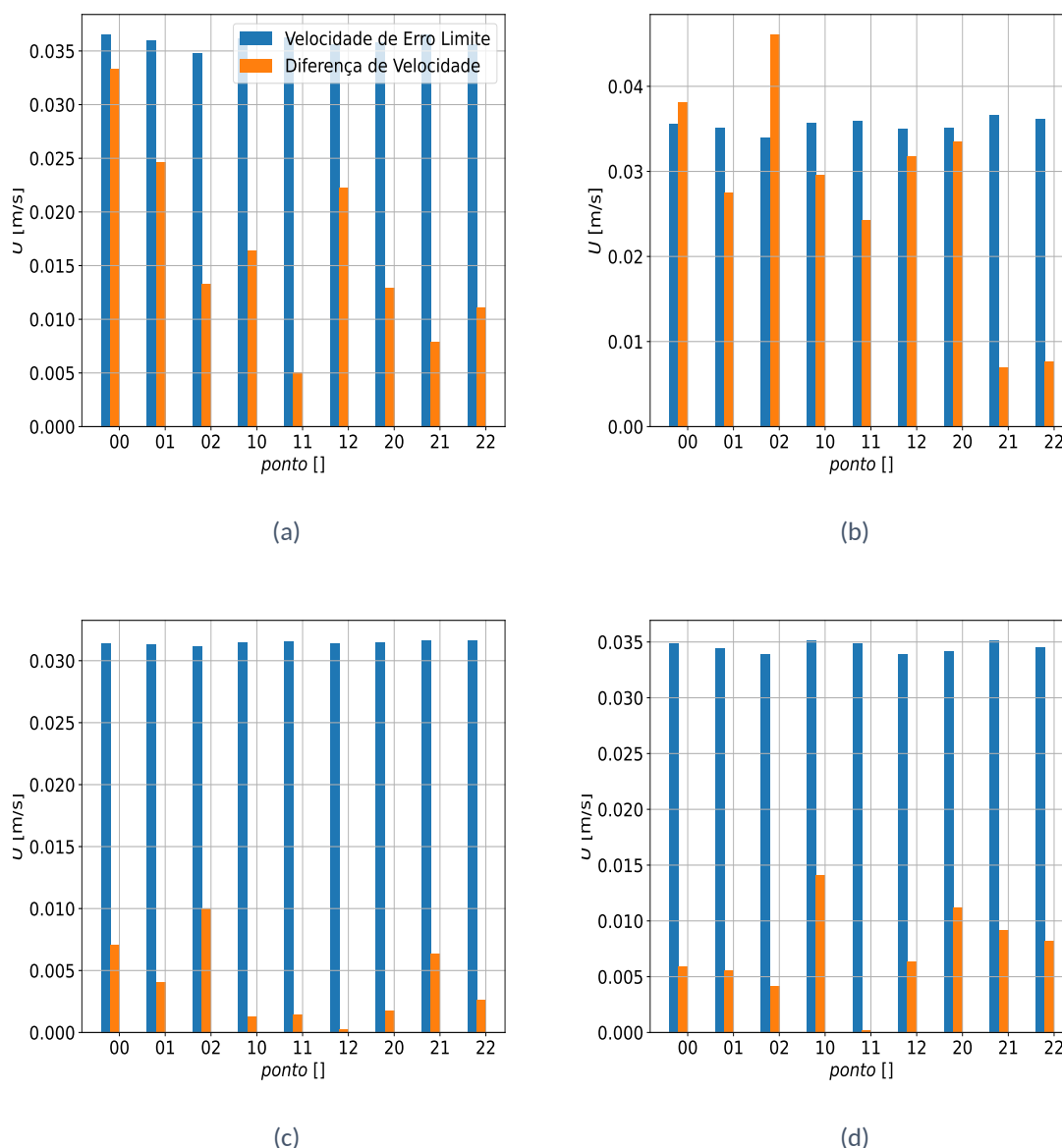


Figura 4.2 – Comparação da diferença de velocidades das configurações,  $e_a$ , a laranja, com diferença de velocidades limite,  $e_s$ , a azul, na Malha Central, com orientação a: (a) Norte, (b) Sul, (c) Este e (d) Oeste.

Na figura 4.2 apresentam-se os gráficos de cada uma das orientações aplicando a equação 4.2, demarcado a azul a diferença de velocidade limite associada ao erro das sondas, calculado pela equação 4.2 e a laranja a diferença de velocidades entre medições a essa altura para cada um dos pontos, calculado na equação 4.1.

Com a mesma figura 4.2 pode-se observar que apenas dois dos pontos ultrapassam o limite estabelecido pelo erro das sondas. Desta forma, é possível confirmar que, referente à velocidade, ambos os ensaios demonstraram coerência de resultados. Os pontos apresentados têm as suas localizações listadas na tabela 3.5.

## 4.2 Uniformidade de temperatura

Uma das condições do ensaio é apresentar temperatura constante em toda a sala. Para tal insuflou-se ar a temperatura constante e foi-se registando as temperaturas de insuflação e extração com um caudalímetro. Para se analisar a variação da temperatura ao longo da sala apresentam-se os valores de temperatura, na figura 4.3, de cada uma das alturas.

Com estes valores constata-se que há variação de temperatura ao longo da sala, numa amplitude de 2 °C. Esta amplitude é considerada reduzida face ao equipamento usado.

Esta pequena variação, no entanto, pode ser justificada por três motivos, a diferença com a temperatura exterior, a estratificação de temperatura na sala, e a variação da temperatura de insuflação.

Em primeiro lugar, os ensaios ocorreram em diferentes dias, em que a temperatura exterior variou. Dessa forma, mesmo com a temperatura de insuflação igual entre esses momentos, houve diferentes perdas de calor para o exterior, influenciando a temperatura da sala.

Em segundo lugar, observa-se na sala estratificação de temperatura, isto é, com o aumento da altura, o ar encontra-se a uma temperatura mais elevada. Isto pode ser observado no conjunto das três alturas superiores e inferiores, presentes na figura 4.3, em que as medições foram realizadas simultaneamente. Esta diferença pode ser justificada pelas diferentes envolventes da sala, pois as paredes e teto apresentam maior isolamento que o solo, e conseqüentemente têm menos perda de calor associada.

Em terceiro lugar, apesar de se ter em consideração uma temperatura de insuflação constante no ensaio, há uma pequena variação de temperatura ao longo do tempo.

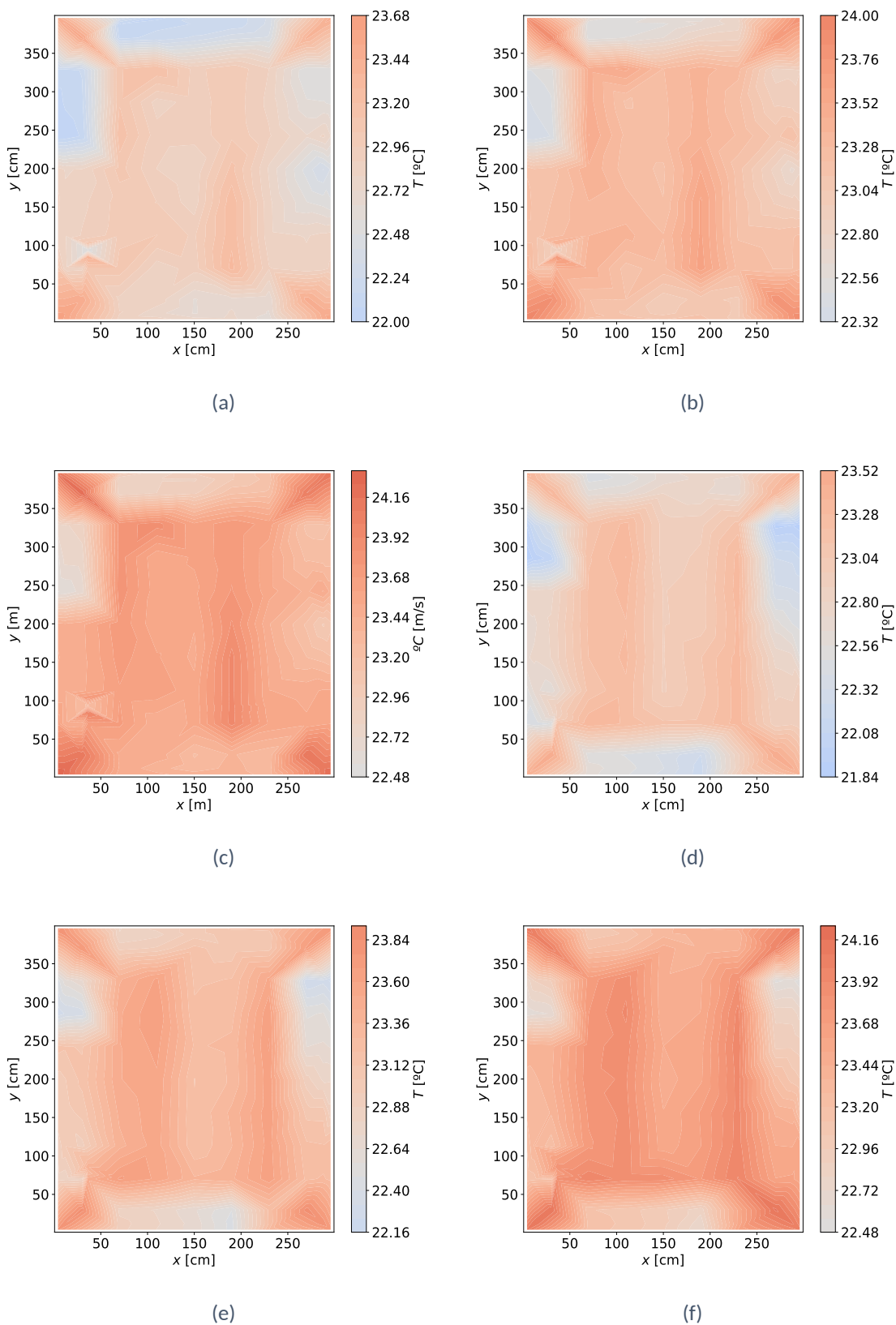


Figura 4.3 – Distribuição de Temperatura no Plano XY com altura de: (a) 4 cm , (b) 12 cm, (c) 30 cm com configuração B, (d) 30 cm com configuração A, (e) 110 cm e (f) 170 cm.

Esta variação deve-se ao uso de um controlador Proporcional, Integral, Derivativo (PID) pelo sistema de ventilação da sala para regular a temperatura. Ou seja, as baterias de arrefecimento e aquecimento aquecem ou arrefecem o ar consoante o tempo de resposta do controlador, pelo que há sempre variação de temperatura em torno da temperatura de insuflação pretendida. Esta variação pode ocorrer num período maior ou menor de tempo, o que pode alterar a temperatura média da sala. Na figura 4.4 apresentam-se as temperaturas medidas ao longo do tempo nos pontos 001, 002 e 012, cujas localizações podem ser consultadas na tabela 3.3, à altura de 4 cm.

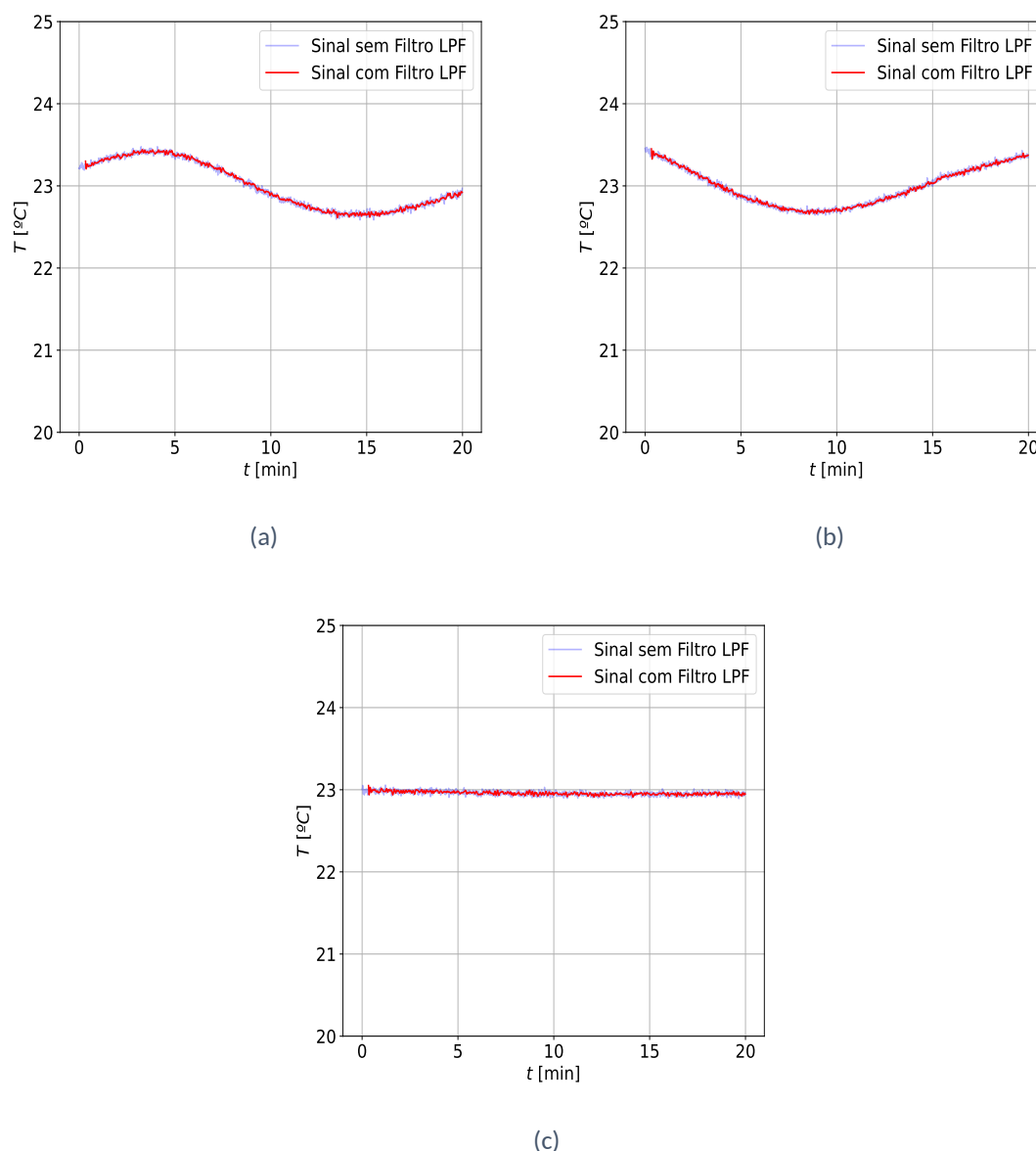


Figura 4.4 - Variação de Temperatura ao longo do tempo de medição nos pontos (a) 001, (b) 002 e (c) 012 da ME.

Os três pontos apresentados na figura 4.4 foram medidos no mesmo dia, no entanto apresentam variações de temperatura diferentes. Esta variação de temperatura de insuflação não foi considerada, o que pode ter interferido nas medições de temperatura.

Assim, apesar de existir esta variação, considerou-se que a variação de temperatura é aceitável para o caso de estudo em questão, pois a amplitude é reduzida, no entanto reconhece-se que há possibilidade de um melhoramento de equipamento e estratégia de medição para que se consigam variações ainda menores em futuros casos de estudo.

### 4.3 Obstrução Física do Suporte

O ensaio da MC teve como objetivo o estudo da obstrução física do suporte. Para tal mediram-se as velocidades de nove pontos no centro da sala. Em cada um destes pontos foram feitas 4 medições, orientando o suporte para cada uma das quatro orientações, estando a porta de entrada a Norte. As orientações podem ser consultadas na figura 3.4 e as coordenadas dos seus pontos encontram-se na tabela 3.5.

Na figura 4.5 apresentam-se as velocidades nos nove pontos medidos para cada orientação e altura, comparando as quatro orientações em cada altura.

A partir da análise dos resultados da imagem conclui-se que nas alturas inferiores, até 30 cm, onde se encontram maiores velocidades, a orientação do suporte a Este apresenta velocidades muito inferiores às registadas com o suporte posicionado noutras orientações.

As orientações restantes apresentam-se com valores próximos entre si, pelo que seriam necessários mais estudos para se concluir qual a orientação ótima a usar.

Relativamente às alturas de 110 e 170 cm, as velocidades medidas têm valores muito inferiores, como observado na figura 4.5, pelo que a diferença de velocidades é pouco relevante face à incerteza das sondas associada a essas medições.

É de realçar que a insuflação se encontra a Nordeste de todos os pontos medidos nesta malha, concluindo-se que, a alturas baixas onde se encontra maior velocidade do ar, a orientação do suporte a Este aparenta ter influência na medição de velocidade.

Apesar da influência na medição ter sido confirmada, este assunto deve ser aprofundado posteriormente com mais detalhe. Neste trabalho prosseguimos com a aparente coerência entre medições em diferentes momentos e pontos apresentados na secção 4.1.

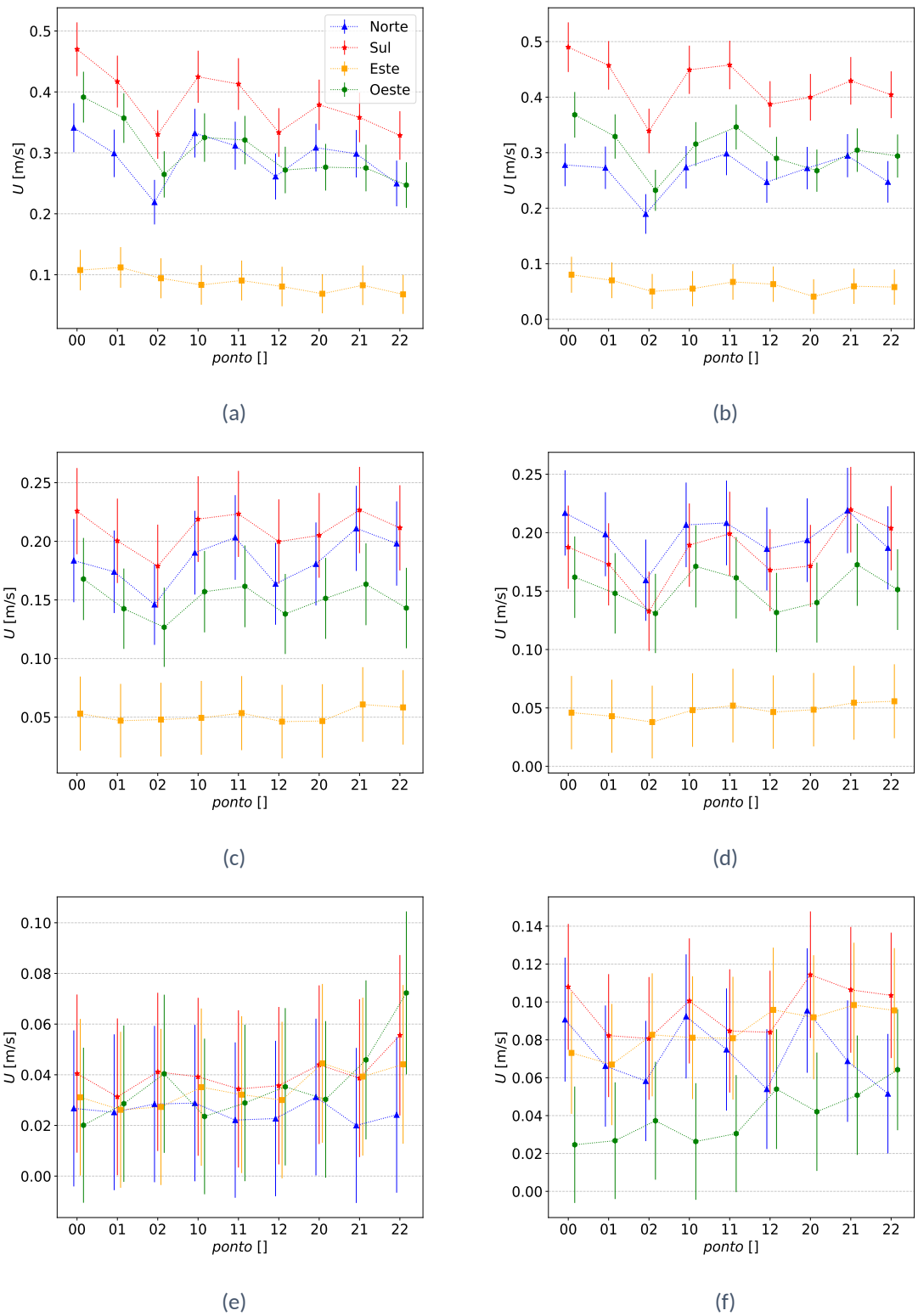


Figura 4.5 – Comparação de velocidades de cada Orientação de Suporte à altura de: (a) 4 cm , (b) 12 cm, (c) 30 cm na configuração B, (d) 30 cm na configuração A, (e) 110 cm e (f) 170 cm.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 5.1 Resultados

No capítulo 3 demonstrou-se todo o processo entre a aquisição de dados até à apresentação dos mesmos. Neste capítulo são apresentados todos os resultados das medições, por meio dos planos resultantes do tratamento de dados apresentado na secção 3.4.2, referentes à distribuição de velocidade do ar e temperatura.

#### 5.1.1 Análise de Distribuição de Velocidades

Como referido no capítulo 3, é possível retirar qualquer plano que se deseje, sendo uma das coordenadas de valor constante. Os planos escolhidos para análise foram aqueles que continham pontos medidos experimentalmente. Os planos XY correspondem a cada uma das alturas, enquanto os XZ (A-K) e YZ (L-Z) apresentam-se na figura 5.1. As coordenadas destes planos estão na tabela 5.1

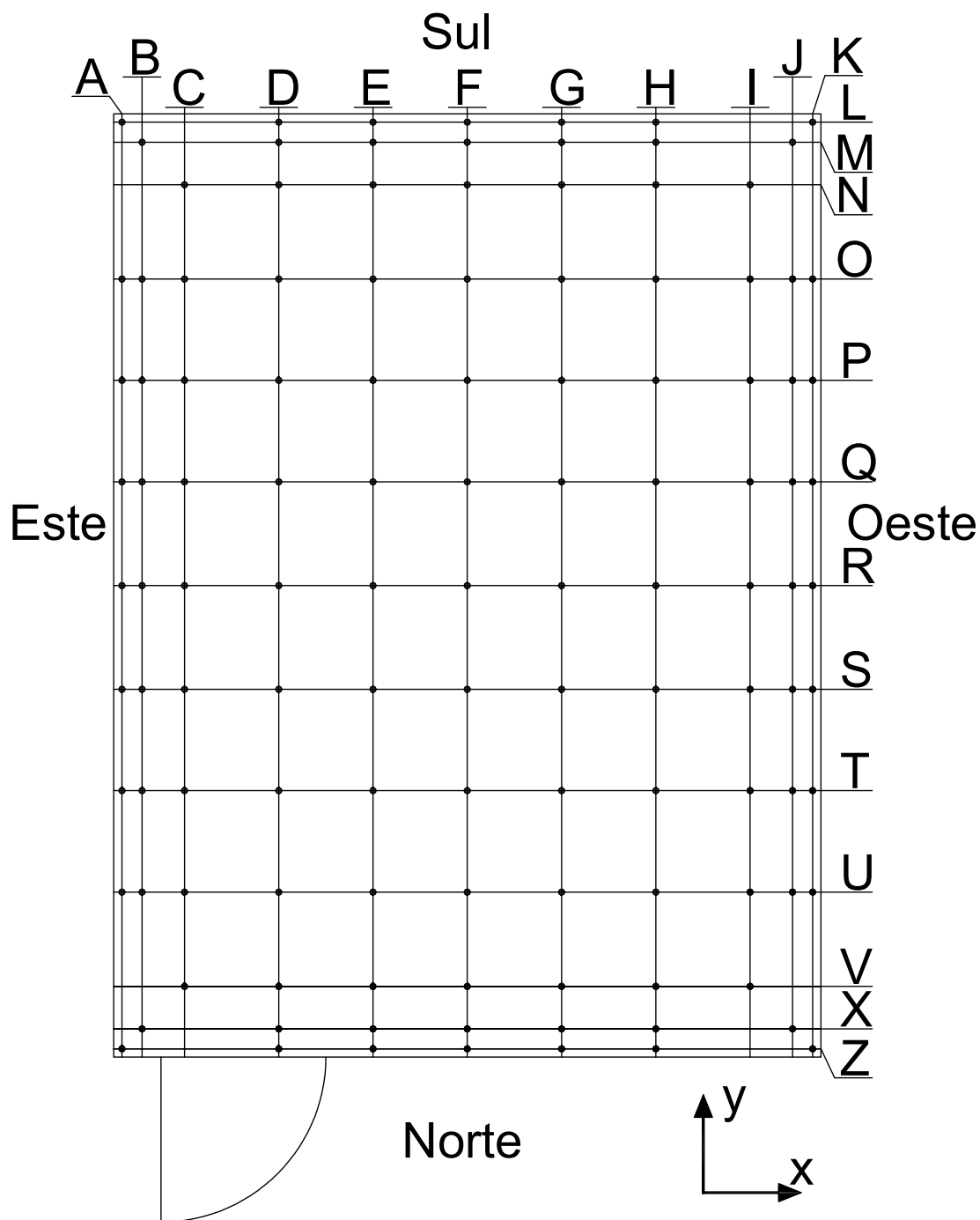


Figura 5.1 - Localização em malha de planos de corte analisados.

Os resultados de todos os planos que representam a distribuição de velocidade e temperatura são apresentados no apêndice C.

Tabela 5.1 – Coordenadas de planos de corte utilizados para análise de velocidades, em cm.

Localização de Planos							
<i>x</i>				<i>y</i>			
A	4	F	150	L	396	R	200
B	12	G	190	M	388	S	157
C	30	H	230	N	370	T	113
D	70	I	270	O	330	U	70
E	110	J	288	P	287	V	30
		K	296	Q	243	X	12
						Z	4

Com a análise destes planos de corte, observaram-se os principais pontos de interesse, sendo estes a zona de insuflação, as zonas próximas às paredes, a zona próxima ao chão e a zona central.

Uma vez que, como referido no capítulo 3, os anemómetros usados são omnidirecionais, estes medem apenas a magnitude da velocidade do ar, ou seja, não reconhecem a sua direção. A comparação dos dados experimentais com os dados numéricos permite validar os resultados numéricos, por um lado. Por outro lado a riqueza dos dados numéricos ajuda na interpretação dos dados experimentais. Por este motivo, foram requisitados dados provenientes de simulações numéricas deste caso de estudo, realizadas por Miranda [60].

A figura 5.2 apresenta em (a) e (c) a distribuição de velocidades nos cortes O ( $y = 70$  cm) e C ( $x = 30$  cm) por meio dos dados experimentais. Nestes dois cortes é possível observar o jato insuflado próximo à parede e a sua dissipação pelo chão. Em 5.2.a observa-se ainda um escoamento próximo à parede Oeste. É de realçar que o jato se encontra mais próximo à parede do que à saída da insuflação.

Este fenómeno é também verificável nos mesmos cortes para os dados numéricos, 5.2.b e 5.2.d, onde se observa, em 5.2.b, que o jato se aproxima da parede ao longo da sua descida. Na mesma apresenta-se a dissipação do ar num nível inferior e velocidades superiores na parede Oeste, estando de acordo com os resultados experimentais. Estes dados numéricos, no entanto, permitem inferir a direção da velocidade do ar nessa zona, concluindo-se que a velocidade nessa zona é proveniente do fluxo de ar disperso pelo chão. Este efeito também é observável na parede Norte, como demonstra a figura 5.2.d, mas não da zona próxima à parede Sul, que se encontra mais distante.

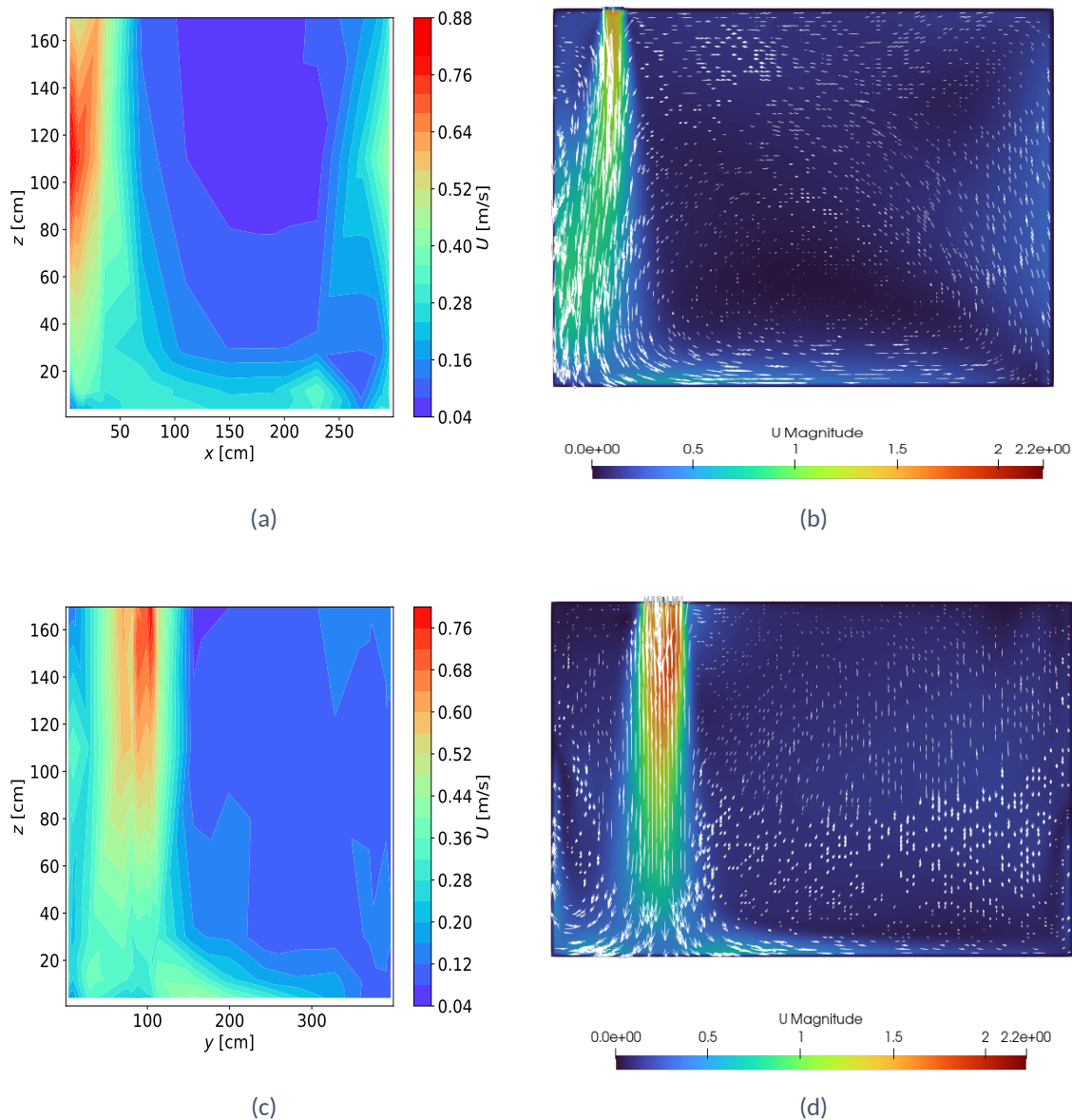


Figura 5.2 – Distribuição de velocidade nos planos de  $y = 70$  cm (plano O): (a) experimental e (b) numérico [60] e de  $x = 30$  cm (plano C): (c) experimental e (d) numérico [60].

A mudança de trajetória do jato de ar insuflado deve-se ao efeito Coanda. Este efeito acontece quando um fluido é insuflado a velocidades elevadas próximo a uma superfície, num espaço preenchido com um fluido com uma densidade semelhante. Neste caso o fluido com velocidade é atraído para essa superfície devido ao gradiente de pressão existente [62].

Por outro lado, na mesma figura 5.2 verifica-se que este fluxo de ar altera a sua trajetória ao encontrar o solo. No entanto, a partir dessa mudança, o fluido propaga-se pela sala a baixa altura. Isto deve-se ao efeito Coanda Expandido [10], em que o ar que flui próximo do solo mantém-se a altura baixa, pois o gradiente de pressão atrai o fluido a essa superfície.

Este efeito é notório na zona mais próxima do chão, para  $z = 4$  cm e  $z = 12$  cm, onde é possível verificar uma maior velocidade do ar por quase toda a sala, comparativamente a zonas de maior altura, como se pode ver na figura 5.3. Nesta figura são apresentados os resultados experimentais com a velocidade nos planos XY com  $z = 4$  cm e  $z = 12$  cm. Na mesma figura também se apresentam os resultados numéricos para os mesmos planos obtidos por Miranda [60]. Esta figura permite ainda observar zonas de estagnação de ar, ou seja, zonas onde a velocidade do ar é muito inferior, quase nula, face ao espaço circundante. Estas zonas encontram-se próximas ao canto entre as paredes Norte e Este a baixo nível.

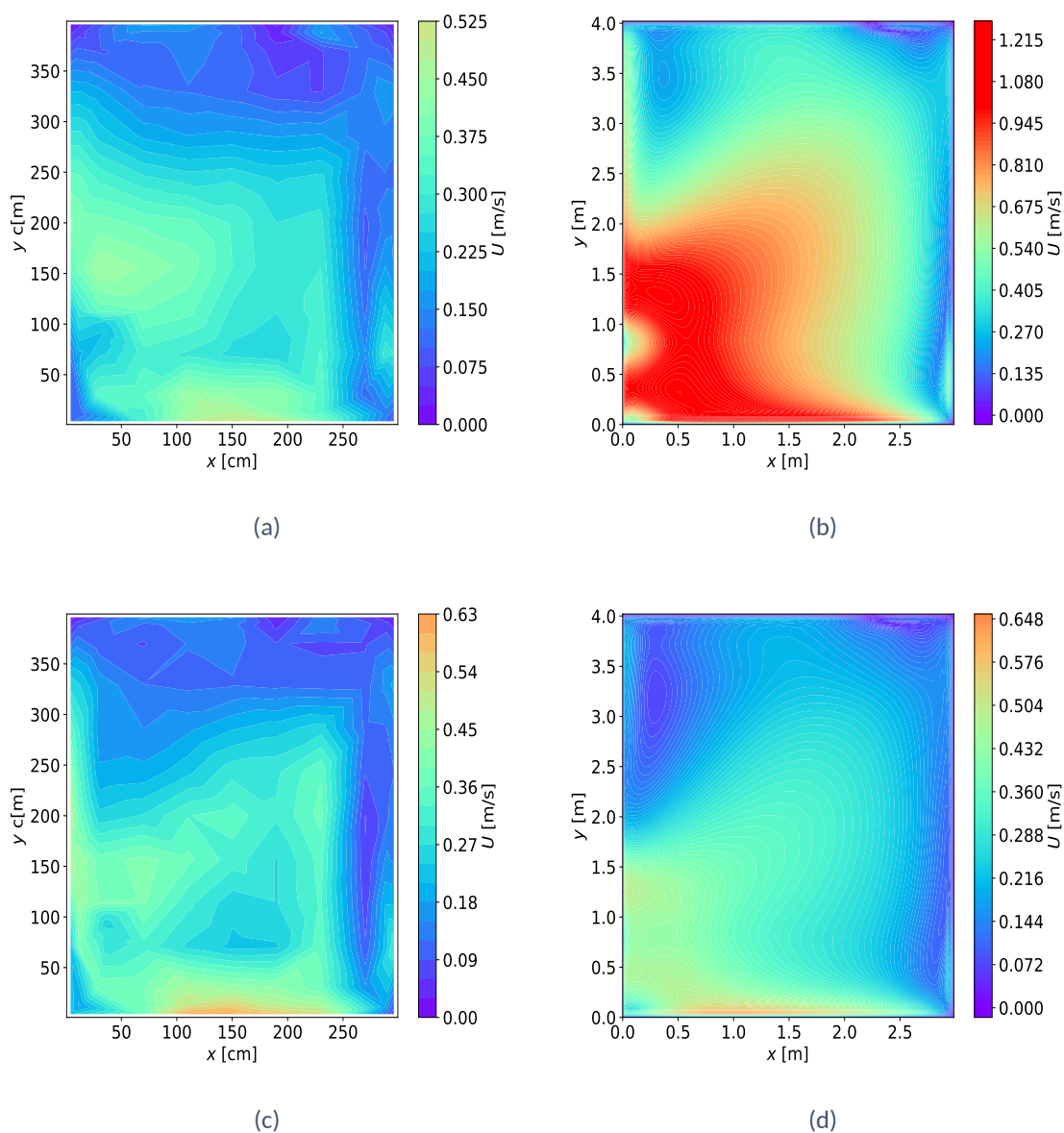


Figura 5.3 - Distribuição de velocidade no plano de  $z = 4$  cm: (a) experimental e (b) numérico [60] e no plano de  $z = 12$  cm: (c) experimental e (d) numérico [60].

Por fim, devido aos fenômenos referidos que os fluxos de ar com maiores velocidades são próximos às superfícies, paredes e solo, a zona central de alturas superiores, é a que apresenta velocidades mais reduzidas, quase nulas. Esta região pode-se observar na figura 5.4. Esta zona encontra-se a altura superior a 30 cm e com afastamento de 70 cm da parede. Esta zona também é verificada nos dados numéricos [60].

Esta zona é de grande interesse a nível de conforto térmico, pois é na zona central da sala, denominada zona ocupada, onde é avaliado o conforto térmico sentido pelos ocupantes. A zona ocupada é definida por Pennycook [12] como o espaço central espaçado 10 cm do solo, 60 cm da parede e com altura máxima de 200 cm. Esta zona é considerada aquela onde haverá ocupantes, por isso é importante que a velocidade do ar nessa zona seja baixa para que não afete negativamente a avaliação de conforto térmico do espaço ocupado. Isto confirma-se na figura 5.4 onde se verifica que apenas na zona abaixo da insuflação é que se encontram velocidades elevadas, mas esta não se encontra na zona ocupada.

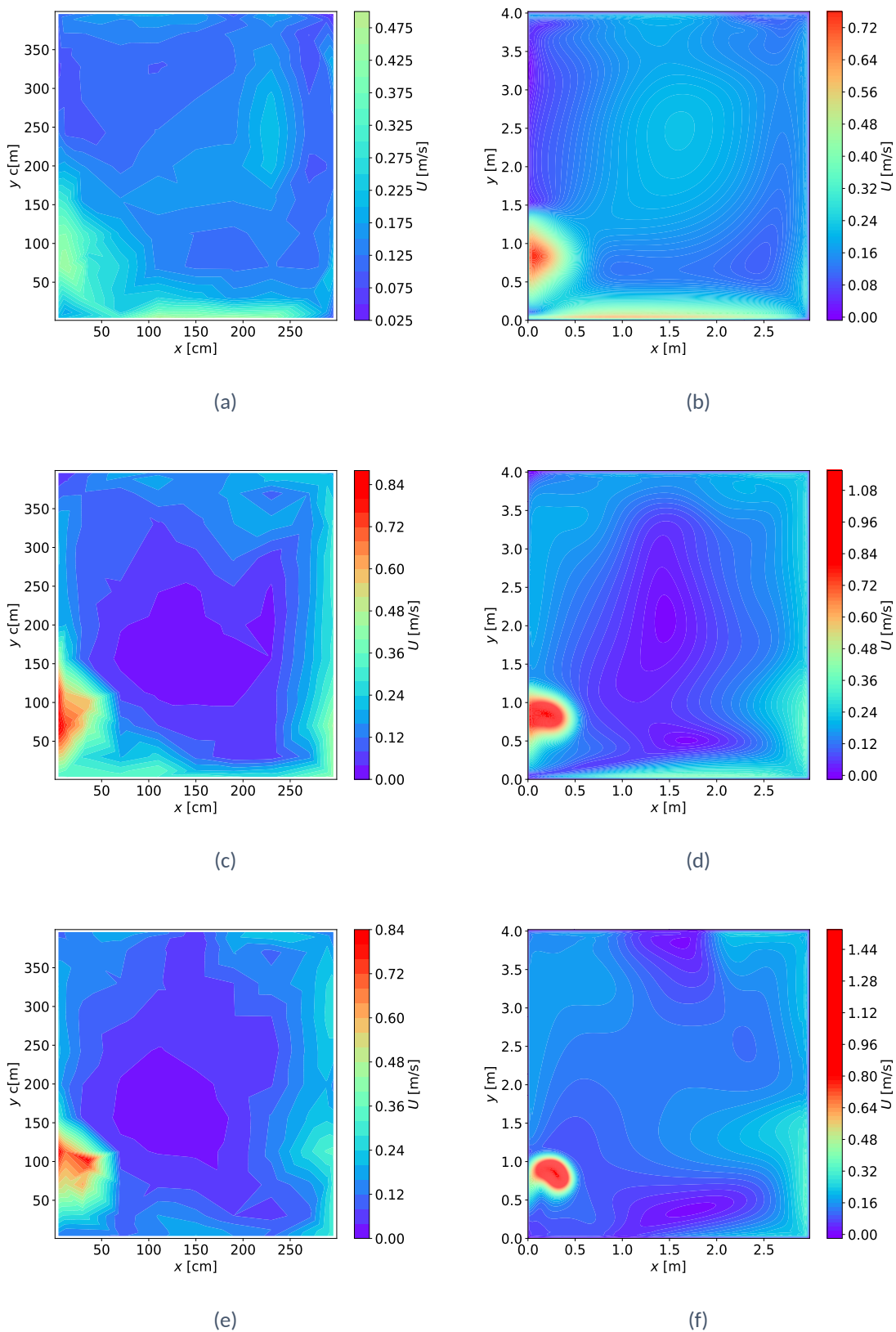


Figura 5.4 - Planos de  $z = 30$  cm: (a) experimental e (b) numérico [60],  $z = 110$  cm: (c) experimental e (d) numérico [60] e de  $z = 170$  cm: (e) experimental e (f) numérico [60].

Para assimilar melhor a análise das diferentes zonas da sala, a figura 5.5 apresenta o comportamento do ar à saída da sala um modelo tridimensional, utilizando a ferramenta *ParaView* com os dados numéricos de Miranda [60].

Neste modelo tridimensional visualizam-se e confirmam-se os efeitos referidos anteriormente pelos resultados experimentais. Na figura, as linhas correspondem ao percurso do ar com origem em pontos próximos à insuflação. Com isto, é facilmente observável o escoamento próximo às paredes, evitando a referida zona ocupada.

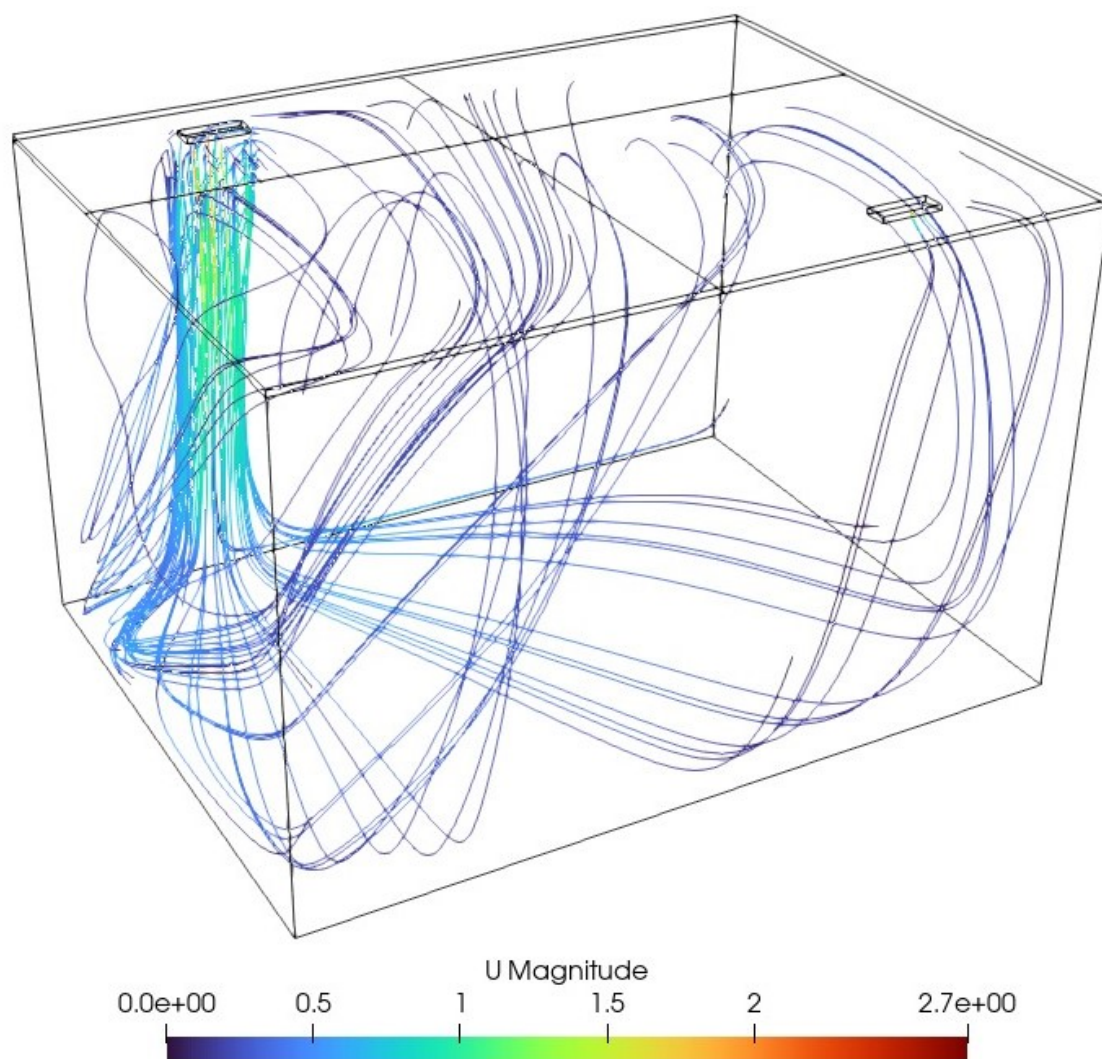


Figura 5.5 – Esquema 3D para descrição do comportamento do ar à entrada da sala utilizando a ferramenta *ParaView* com dados numéricos de [60].

### 5.1.2 Caracterização de Ventilação

Como abordado no capítulo 2, há diferentes estratégias de ventilação com diferentes vantagens e desvantagens associadas. Neste caso de estudo, foram previamente decididas as condições de ensaio, para posteriormente se entender qual a ventilação consequente destas condições.

Apesar das condições de ensaio serem conhecidas, que o ar é insuflado e extraído pelo teto e que tem elevada velocidade inicial, não é certo o tipo de ventilação que ocorre na sala. No entanto, com a análise qualitativa feita anteriormente aos planos de corte referidos, foi possível associar a ventilação da sala a uma estratégia de ventilação existente.

Inicialmente, a aproximação do fluxo de ar à parede, desviando-se da trajetória inicial, aponta para a Ventilação Aderente à Parede (WAV). Sendo esta parede vertical, a estratégia é de Ventilação Aderente à Parede Vertical (VWAV).

A VWAV, como abordado no segundo capítulo, consiste na injeção de ar do teto para o chão com a insuflação próxima ou junto à parede. Esta divide-se, segundo [10], em três regiões, sendo elas:

- Região I : Região de aproximação e anexação do ar à parede. Após a insuflação, o fluxo sofre o efeito Coanda [63]. Este efeito acontece no momento de injeção de um fluido num espaço por meio de uma ranhura com uma superfície sólida adjacente, em que o fluido injetado com velocidade é atraído para essa superfície devido ao gradiente de pressão existente [62]. Como referido por Yang [63], este efeito é por vezes desejado para afastar velocidades de insuflação elevadas de zonas ocupadas, onde poderiam causar desconforto;
- Região II : Região de afastamento da parede. Esta região compreende o espaço em que a parede contacta o chão. É aqui que o ar se afasta da parede, variando a direção até se mover horizontalmente ao chão;
- Região III : Região após a total mudança de direção no ar. O fluxo de ar, graças à velocidade inicial, é espalhado pela sala a nível baixo.

Na figura 5.6, retirado de [10], apresenta-se o comportamento característico deste tipo de ventilação e as regiões explicadas anteriormente.

Este tipo de ventilação tem a vantagem de conseguir dispersar ar pela zona climatizada a nível baixo, permitindo uma dispersão de ar novo por todo o espaço e evitando assim a zona ocupada, onde a velocidade do ar poderia causar desconforto térmico.

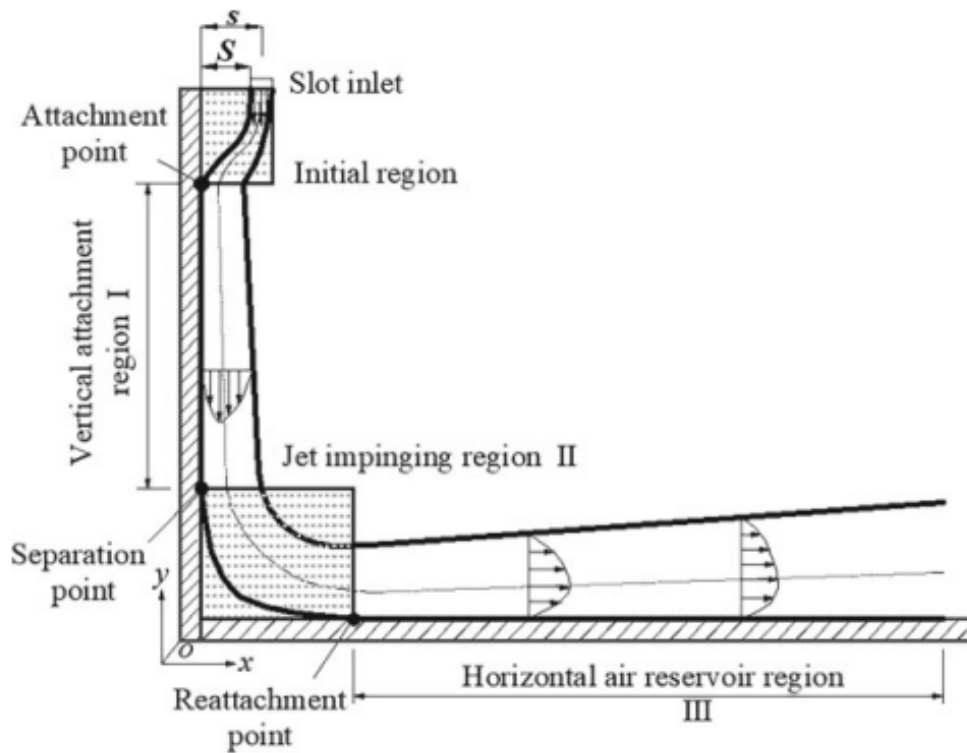


Figura 5.6 - Diagrama de descrição de estratégia de Ventilação - VWAV, adaptado de [10].

Estas três regiões confirmam-se neste caso de estudo como referido na análise de resultados, pelo que se pode concluir, a partir dos dados experimentais, que a ventilação presente é a VWAV.

## 5.2 Discussão de Resultados

A análise dos dados abordada nos capítulos anteriores permitiu tirar resultados referentes à viabilidade de ensaio, ao estudo da obstrução do suporte, ao estudo da temperatura na sala e à caracterização da ventilação.

### 5.2.1 Validação de ensaio

Os resultados retirados demonstram-se viáveis, no que respeita à medição da velocidade, sendo coerentes ao longo do tempo em todos os ensaios.

Por sua vez, as medições de temperatura demonstram que as condições isotérmicas na sala foram alcançadas face às condições existentes. Foi reportada uma amplitude térmica máxima de cerca de 2°C podendo esta dever-se às razões referidas no capítulo 3.

Os resultados medidos permitem também observar a influência do suporte, tendo-se determinado a orientação de suporte que mais afeta as medições de velocidade. Contudo, mantendo a posição de medição, as medições são consistentes.

### 5.2.2 Análise de velocidades e Caracterização de estratégia de ventilação

Os dados numéricos permitem validar o procedimento numérico de Miranda [60], pois em termos qualitativos existe um bom acordo entre os resultados experimentais e os numéricos. Adicionalmente, a coerência entre ambos reforça a validade de ambos os procedimentos.

Devido à omnidirecionalidade dos anemómetros só foi possível criar mapas com a magnitude da velocidade tendo-se recorrido a dados numéricos para complementar a análise do escoamento. Seria de interesse a medição das componentes da velocidade de forma a podermos verificar as direções de velocidade.

Contudo, esta avaliação permite entender o comportamento do ar desde a sua insuflação até à sua total dispersão, sendo observáveis também zonas de aderência às paredes e estagnação de ar.

Com esta análise foi possível encontrar elementos característicos de uma estratégia de ventilação existente, a VWAV.



## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 Conclusões finais

Este estudo permitiu desenvolver uma metodologia que pode ser aplicada em ensaios isotérmicos futuros. Esta metodologia baseou-se em ensaios anteriores e normas aplicáveis ao objeto de estudo.

O procedimento de ensaio demonstrou-se viável em termos de medição de velocidade ao longo do tempo neste caso de estudo em que há escoamento pressuposto em regime permanente. A viabilidade justifica-se pela coerência de resultados para ensaios com intervalos de vários dias.

Com os dados adquiridos foi possível avaliar a distribuição de ar pela sala até à altura de 170 cm e confirmou-se que, apesar de as medições terem sido feitas ao longo de vários dias, as medições de velocidade mantiveram-se coerentes ao longo do tempo.

Foi possível caracterizar a estratégia de ventilação utilizada como Ventilação Aderente à Parede e observaram-se alguns efeitos característicos da mesma, nomeadamente o efeito Coanda.

O ensaio da Malha Central também permitiu concluir que o suporte físico dos anemómetros influencia as medições de velocidade, sendo esta influência dependente da sua orientação e da velocidade do ar a medir. No entanto, este assunto ainda necessita de ser aprofundado.

As condições isotérmicas consideraram-se atingidas no sentido em que se considerou a amplitude encontrada reduzida, tendo em conta o equipamento usado, o intervalo de

mais de um mês entre o início e fim de medições e a amplitude térmica de cada dia, pois as medições realizaram-se em todas as alturas do dia.

Os dados experimentais conseguidos das medições realizadas permitem a validação qualitativa de simulações numéricas referentes à sala na situação de caudal constante.

## **6.2 Limitações**

### **6.2.1 Equipamento**

O número de sondas disponível foi um fator que limitou os ensaios estudados. Na possibilidade de se usar um maior número de sondas, podem ser realizados mais ensaios e conseqüentemente ser testados mais casos para o mesmo tempo de ensaios experimentais.

As sondas também apresentam constantes de tempo elevadas, quer de velocidade quer de temperatura, pelo que não permitiram estudar a turbulência.

### **6.2.2 Condições Térmicas**

Neste caso de estudo foi conseguida uma baixa variação de temperatura pela sala. No entanto apesar de serem cedidas instalações próprias para o estudo de Ventilação, estas instalações sofriam de alguns defeitos, nomeadamente algumas fugas da sala para o exterior, o que pode ter fomentado esta variação.

Por outro lado, apesar de se programar a UTA para insuflar ar a temperatura constante, esse caso não foi observado pelo funcionamento da mesma, como explicado no capítulo 4.

Assim, apesar de se terem encontrado bons resultados de temperatura, considera-se que é possível uma variação térmica menor se se usar equipamento mais rigoroso.

## **6.3 Trabalhos futuros**

O trabalho realizado permitiu definir uma metodologia que pode, por um lado, vir a ser melhorada e que por outro pode ser usada para ensaios futuros que não foram aqui abordados e que podem ser relevantes.

### 6.3.1 Estudos de Velocidade do Ar

A metodologia utilizada permitiu uma medição fiável da velocidade do ar pela sala. No entanto esta medição foi apenas realizada para uma altura máxima de 170 cm, sendo parte da sala não avaliada. Por este motivo propõem-se medições posteriores para as mesmas condições em alturas superiores que permitam a análise de velocidade e temperatura de toda a sala sem recurso a simulações numéricas.

As simulações numéricas de Miranda [60] apoiaram a análise não apenas nas alturas superiores. Estas foram também usadas para a análise do comportamento do ar em toda a sala, isto porque as medições de velocidade foram omnidirecionais. Por este motivo é recomendado o uso de equipamento de medição que possa captar as diferentes componentes de velocidade para permitir uma avaliação experimental mais completa e posterior validação numérica mais fiável.

### 6.3.2 Estudos de Humidade Relativa do Ar

Como abordado no capítulo 2, muitos dos casos analisados avaliam o conforto térmico da sala, sendo para tal necessárias diferentes variáveis para analisar essa componente num espaço. Dessas componentes, não foi medida a humidade relativa, componente que, adaptada e complementada na metodologia criada, permitiria avaliar o conforto térmico do espaço em estudo, pelo que se recomendam medições desta variável. Contudo, na instalação atual não é possível porque a UTA não possibilita este controlo.

### 6.3.3 Estudos de Turbulência

Devido à elevada constante de tempo ( $\tau_a = 1.6$  s) e omnidirecionalidade dos anemómetros, não se considerou viável a caracterização do campo turbulento da SATEC. Por este motivo é proposto num estudo futuro, ter-se em conta na escolha de equipamento a sua constante de tempo para que seja possível esta caracterização.

### 6.3.4 Estudos Térmicos

A metodologia testada teve como principal foco o estudo da distribuição de velocidade do ar pela sala, tendo em conta uma sala com condições isotérmicas. Apesar de se encontrar uma variação térmica ao longo da sala reduzida, é recomendado um estudo relativo às perdas térmicas da sala que poderá diminuir esta variação para que o caso

experimental esteja mais próximo ao simulado.

Para além disso, a variação da temperatura de insuflação também deve ser estudada, quer em termos de perdas térmicas nas condutas de insuflação, quer em termos de controlo de temperatura por meio do controlador PID, para que esta variação de temperatura seja a menor possível.

### **6.3.5 Estudos de Caudal**

Por fim, é pertinente um futuro estudo para se entender se a diferença indesejável de caudais que se verificou ao longo dos ensaios, levando a sala a um estado de depressão face ao exterior, tem influência no comportamento da ventilação. Assim, propõem-se a repetição deste estudo com correção de caudais, igualando o caudal de extração ao de insuflação.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA, “Buildings,” Paris, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/buildings>
- [2] P. V. Nielsen, “Fifty years of cfd for room air distribution,” *Building and Environment*, vol. 91, pp. 78–90, 9 2015.
- [3] Z. Cao, Y. An, Y. Wang, Y. Bai, T. Zhao, and C. Zhai, “Energy consumption of intermittent ventilation strategies of different air distribution modes for indoor pollutant removal,” *Journal of Building Engineering*, vol. 69, 6 2023.
- [4] H. Chen, “Experimental and numerical investigations of a ventilation strategy : impinging jet ventilation for an office environment,” pp. 25–34, 2014.
- [5] T. Catalina, J. Virgone, and F. Kuznik, “Evaluation of thermal comfort using combined cfd and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling,” *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1740–1750, 8 2009.
- [6] X. Yang, X. Ye, B. Zuo, K. Zhong, and Y. Kang, “Analysis of the factors influencing the airflow behavior in an impinging jet ventilation room,” *Building Simulation*, vol. 14, pp. 749–762, 6 2021.
- [7] “Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2002.
- [8] G. Cao, H. Awbi, R. Yao, Y. Fan, K. Sirén, R. Kosonen, and J. J. Zhang, “A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings,” *Building and Environment*, vol. 73, pp. 171–186, 3 2014.
- [9] M. Fan, Z. Fu, J. Wang, Z. Wang, H. Suo, X. Kong, and H. Li, “A review of different ventilation modes on thermal comfort, air quality and virus spread control,” *Building and Environment*, vol. 212, 3 2022.
- [10] A. Li, *Attachment Ventilation Theory*. Springer Nature Singapore, 2023.
- [11] *ANSI/ASHRAE Standard 55: ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010.

- 
- [12] K. A. Pennycook, *The illustrated guide to mechanical cooling*. BSRIA, 2010.
- [13] *EN ISO 7730 1995. Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. CEN, 2005.
- [14] *ANSI/ASHRAE Standard 113: Method Of Testing For Room Air Diffusion*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.
- [15] “Qualidade do ar em espaços interiores um guia técnico,” *Agência Portuguesa do Ambiente*, 2010.
- [16] “Saúde e ambiente e ação climática. portaria n.º 138-g/2021,” *Diário da República*, pp. 128–129, 2021.
- [17] *NAAQS, Ambient air quality monitoring and health research: summary of April 16-17, 2008 workshop to discuss key issues*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development and Air Quality and Assessment Division, Health and Environmental Impacts Division, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air Radiation, 2008.
- [18] OSHA. Code of Federal Regulations. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration., Title 29, Part 1910.1000-1910.1450.
- [19] MAKs, *Deutsche Forschungsgemeinschaft, List of MAK and BAT Values 2005: Maximum Concentrations and Biological Tolerance Values at the Workplace*. Journal of Hazardous Materials, 8 2006.
- [20] *ANSI/ASHRAE Standard 62.1: ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2011.
- [21] M. Henriksson and H. Nilsson, “Ventilation efficiency measurements - a comparison between three supply air methods,” 2016.
- [22] W. K. Chow, W. Y. Fung, and L. T. Wong, “Preliminary studies on a new method for assessing ventilation in large spaces,” *Building and Environment*, vol. 37, pp. 145–152, 2002.
- [23] P. Raftery, J. Fizer, W. Chen, Y. He, H. Zhang, E. Arens, S. Schiavon, and G. Paliaga, “Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements,” *Building and Environment*, vol. 155, pp. 210–223, 5 2019.
- [24] H. Howard, *Fluid Mechanics*, 5th ed., 2012.
- [25] A. University, “Cfd benchmarks,” 1 2023. [Online]. Available: <https://www.cfd-benchmarks.com/>
- [26] L. Yan, “Application research of computational fluid mechanics based on cnki database,” vol. 1600. Institute of Physics Publishing, 8 2020.

- 
- [27] I. Babuska and J. T. Oden, "Verification and validation in computational engineering and science: Basic concepts," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, pp. 4057–4066, 9 2004.
- [28] P. V. Nielsen, "Flow in air conditioned rooms: Model experiments and numerical solution of the flow equations." 1974.
- [29] P. V. Nielsen and J. Whitelaw, "The velocity characteristics of ventilated rooms," *Journal of Fluids Engineering*, 1978.
- [30] J. H. Whitelaw, "The calculation of near-wake flows," *J. Fluid Mech*, vol. 73, pp. 9–32, 1976.
- [31] K. D. Jensen, "Flow measurements," vol. 16, pp. 400–418, 2004.
- [32] J. S. A. Zhang, A. G. J. Member, P. E. Wu, and A. Member, "Detailed measurements of room air distribution for evaluating numerical simulation models," 1992.
- [33] T. Karimipناه and H. B. Awbi, "Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation," pp. 1329–1342, 2002.
- [34] E. Bjørn and P. Nielsen, "Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms," *Indoor Air*, 2002.
- [35] J. D. Posner, C. R. Buchanan, and D. Dunn-Rankin, "Measurement and prediction of indoor air flow in a model room," *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 515–526, 2003.
- [36] S. J. Payne, R. W. Ainsworth, R. J. Miller, R. W. Moss, and N. W. Harvey, "Unsteady loss in a high pressure turbine stage," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 24, pp. 698–708, 2003.
- [37] G. Cao, M. Sivukari, J. Kurnitski, M. Ruponen, and O. Seppänen, "Particle image velocimetry (piv) application in the measurement of indoor air distribution by an active chilled beam," *Building and Environment*, vol. 45, pp. 1932–1940, 9 2010.
- [38] S. Liu, A. Lipczynska, S. Schiavon, and E. Arens, "Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans," *Building and Environment*, vol. 142, pp. 342–360, 9 2018.
- [39] Y. Gao, H. Zhang, E. Arens, E. Present, B. Ning, Y. Zhai, J. Pantelic, M. Luo, L. Zhao, P. Raftery, and S. Liu, "Ceiling fan air speeds around desks and office partitions," *Building and Environment*, vol. 124, pp. 412–440, 11 2017.
- [40] T. Kalmár, F. Szodrai, and F. Kalmár, "Experimental study of local effectiveness in the case of balanced mechanical ventilation in small offices," *Energy*, vol. 244, 4 2022.
- [41] L. Magnier, R. Zmeureanu, and D. Derome, "Experimental assessment of the velocity and temperature distribution in an indoor displacement ventilation jet," *Building and Environment*, vol. 47, pp. 150–160, 1 2012.

- 
- [42] T. Karimipannah, M. Sandberg, and H. B. Awbi, "A comparative study of different air distribution systems in a classroom," *ROOMVENT*, vol. 2, pp. 9–12, 2000.
- [43] S. Hodder, D. Loveday, K. Parsons, and A. Taki, "Thermal comfort in chilled ceiling and displacement ventilation environments: vertical radiant temperature asymmetry effects of building studies, demonstration," pp. 167–173, 1998.
- [44] W. Zhao, P. Mustakallio, S. Lestinen, S. Kilpeläinen, J. Jokisalo, and R. Kosonen, "Numerical and experimental study on the indoor climate in a classroom with mixing and displacement air distribution methods," *Buildings*, vol. 12, 9 2022.
- [45] A. Ameen, M. Cehlin, U. Larsson, and T. Karimipannah, "Experimental investigation of the ventilation performance of different air distribution systems in an office environment—cooling mode," *Energies*, vol. 12, 2019.
- [46] T. Karimipannah, H. B. Awbi, C. Blomqvist, and M. Sandberg, "Effectiveness of confluent jets ventilation system for classrooms," *Indoor Air*, 2005.
- [47] E. Arens, A. Ghahramani, R. Przybyla, M. Andersen, S. Min, T. Pepper, P. Raftery, M. Zhu, V. Luu, and H. Zhang, "Measuring 3d indoor air velocity via an inexpensive low-power ultrasonic anemometer," *Energy and Buildings*, vol. 211, p. 109805, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819331044>
- [48] I. J. Walker, "Physical and logistical considerations of using ultrasonic anemometers in aeolian sediment transport research," *Geomorphology*, vol. 68, pp. 57–76, 5 2005.
- [49] A. Ghahramani, M. Zhu, R. J. Przybyla, M. P. Andersen, P. J. Galicia, T. E. Pepper, H. Zhang, and E. Arens, "Measuring air speed with a low-power mems ultrasonic anemometer via adaptive phase tracking," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, pp. 8136–8145, 9 2019.
- [50] W. Qian, M. Tang, H. Gao, J. Dong, J. Liang, and J. Liu, "Improving indoor air flow and temperature prediction with local measurements based on cfd-enkf data assimilation," *Building and Environment*, vol. 223, 9 2022.
- [51] A. Jahanbin and G. Semprini, "On the optimisation of age of the air in the breathing zone of floor heating systems: The role of ventilation design," *Energy and Built Environment*, 2 2022.
- [52] M. D. Atkins, "Chapter 5 - velocity field measurement using particle image velocimetry (piv)," pp. 3–31, 2016.
- [53] "Hot wire anemometer," *Nature*, vol. 133, p. 953, 1934.
- [54] N. Silin, D. Cuscueta, and A. Clause, "Experimental assessment on the performance of hot wire anemometry in and around a permeable medium by comparison with

- 
- particle image velocimetry,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 78, 4 2021.
- [55] K. Siren, G. Rosén, J. Vad, and P. V. Nielsen, “Experimental techniques,” pp. 1105–1195, 2001.
- [56] D. M. Whelpdale, “Hot wire and sonic anemometry, a description and comparison,” *Atmosphere*, vol. 5, pp. 20–27, 1967.
- [57] B. Knobloch and S. Mierzwinski, “Comparatory tests of omnidirectional and hot wire anemometers,” *Roomvent*, 1990.
- [58] Y. Huang, X. Shen, J. Li, B. Li, R. Duan, C. H. Lin, J. Liu, and Q. Chen, “A method to optimize sampling locations for measuring indoor air distributions,” *Atmospheric Environment*, vol. 102, pp. 355–365, 2 2015.
- [59] C. Kandzia, M. Schmidt, and D. Muller, *Room Airflow effects applying unsteady boundary conditions*. Roomvent, 2011.
- [60] J. Miranda, “Simulação numérica de ventilação instacionária em espaços interiores - em desenvolvimento,” Master’s thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023.
- [61] A. B. Downey, *Think DSP Digital Signal Processing in Python*, I. O. Media, Ed., 2016.
- [62] I. Cîrciu and S. Dinea, “Review of applications on coandă effect. history, theories, new trends,” 2010.
- [63] B. Yang, A. K. Melikov, A. Kabanshi, C. Zhang, F. S. Bauman, G. Cao, H. Awbi, H. Wigö, J. Niu, K. W. Cheong, K. W. Tham, M. Sandberg, P. V. Nielsen, R. Kosonen, R. Yao, S. Kato, S. C. Sekhar, S. Schiavon, T. Karimipannah, X. Li, and Z. Lin, “A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions,” *Energy and Buildings*, vol. 202, 11 2019.



## APÊNDICE A

### A.1 Apêndice A - Registo temporal de ensaio para determinação de tempo de estabilização

Neste apêndice estão descritos os momentos de ensaio para determinação de tempo de estabilização. Os intervalos da tabela A.1 correspondem aos momentos de ensaio com porta fechada, enquanto as interrupções correspondem aos momentos em que houve simulação de alteração das sondas, sendo a porta da sala aberta e o equipamento movido.

Tabela A.1 – Registo temporal de ensaio para determinação de tempo de estabilização.

Registo Temporal	
Etapa	Hora
Intervalo 1	16:10
Interrupção 1	16:40
Intervalo 2	16:45
Interrupção 2	17:45
Intervalo 3	17:50
Interrupção 3	18:50
Intervalo 4	18:55
Fim de Ensaio	19:55



## APÊNDICE B

### B.1 Apêndice B - Registo de Medições e Tratamento de Dados

Nesta secção são apresentados os valores medidos de temperatura e caudal de insuflação e extração ao longo dos ensaios.

Tabela B.1 – Registo de condições da sala.

<b>Dia</b>	$Q_{ins}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{ext}$ [m <sup>3</sup> /s]	$T_{ins}$ [°C]	$T_{ext}$ [°C]
2023-05-10	282.0	---	23.4	---
	280.0	---	23.5	---
	275.0	---	23.1	---
	281.0	---	23.1	---
	282.0	---	23.4	---
2023-05-11	290.0	---	23.2	---
	275.0	---	22.9	---
	277.0	---	23.3	---
	280.0	---	23.2	---
	285.0	---	23.7	---
	277.0	---	23.6	---
	281.0	---	23.3	---
2023-05-12	286.0	---	22.9	---
	288.0	---	23.1	---
	277.0	---	23.8	---
	278.0	---	23.6	---
	281.0	---	23.7	---
	276.0	---	23.1	---
2023-05-16	281.0	---	23.6	---
	290.0	344.0	23.1	23.2
	281.0	342.0	23.0	23.2
	280.0	344.0	23.1	23.3
	291.0	346.0	23.9	23.7
	282.0	337.0	21.9	22.6
	279.0	347.0	24.0	23.7
2023-05-17	282.0	346.0	23.7	23.7
	282.0	346.0	23.0	23.6
	283.0	349.0	24.4	23.6
	280.0	347.0	22.7	23.6
	280.0	349.0	22.3	23.8
	282.0	345.0	24.2	24.1

Tabela B.2 – Registo de condições da sala.

<b>Dia</b>	$Q_{ins}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{ext}$ [m <sup>3</sup> /s]	$T_{ins}$ [°C]	$T_{ext}$ [°C]
2023-05-18	282.0	345.0	22.7	23.2
	281.0	345.0	23.4	23.3
	284.0	342.0	23.0	23.5
	279.0	347.0	22.9	23.5
	284.0	343.0	22.3	23.9
	281.0	344.0	22.3	23.9
2023-05-19	285.0	342.0	24.2	24.3
	281.0	348.0	23.3	23.8
	284.0	345.0	23.9	23.9
	285.0	344.0	22.4	23.8
	281.0	349.0	23.3	23.4
	284.0	341.0	22.3	23.9
2023-05-22	285.0	343.0	22.2	23.3
	279.0	344.0	24.8	24.4
	285.0	344.0	23.0	24.5
2023-05-23	277.0	345.0	22.8	23.8
	278.0	347.0	23.8	23.9
	280.0	344.0	22.4	23.9
	277.0	346.0	24.9	24.4
	282.0	346.0	24.2	24.6
2023-05-24	279.0	344.0	23.7	23.7
	277.0	344.0	24.0	24.0
	282.0	344.0	24.8	24.4
	281.0	345.0	24.1	24.5
	285.0	343.0	23.8	24.6
2023-05-25	278.0	345.0	24.3	24.4
	283.0	346.0	24.4	24.7
	279.0	344.0	23.5	24.7
	279.0	346.0	22.7	24.6
	286.0	345.0	24.4	24.8



## APÊNDICE C

### C.1 Apêndice C - Planos de corte analisados

Os planos de corte analisados referidos no capítulo 5 são apresentados seguidamente, sendo divididos nos planos XY, XZ e YZ.

#### C.1.1 Planos XY

Os planos XY retirados têm coordenada em z de 4, 12, 30, 110 e 170 cm.

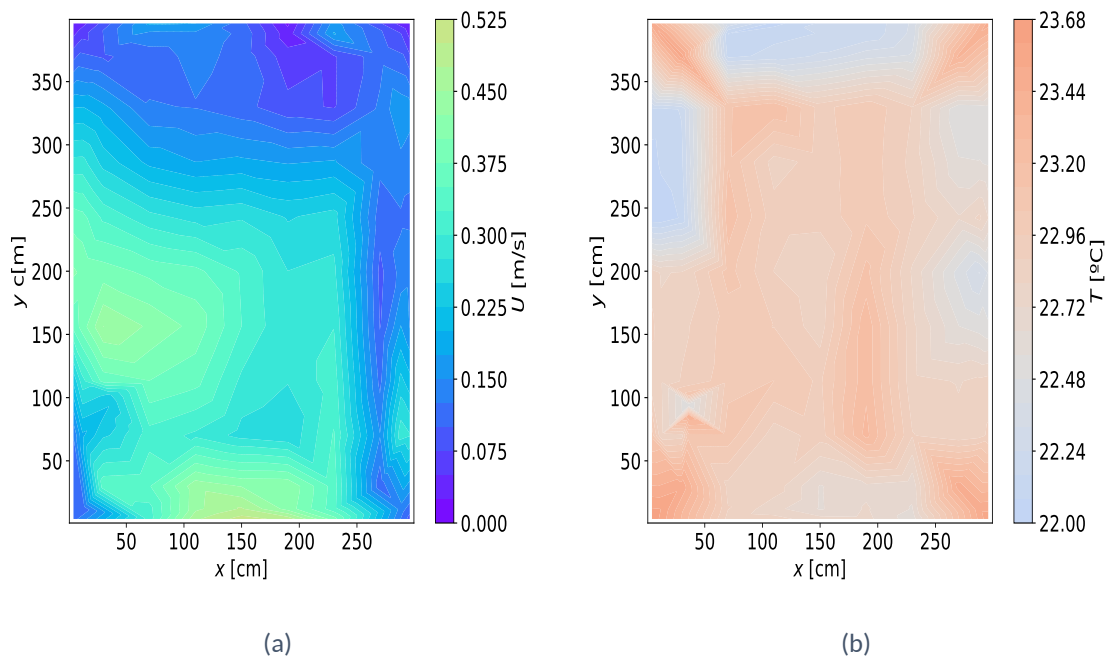


Figura C.1 – Plano de corte de Z = 4 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

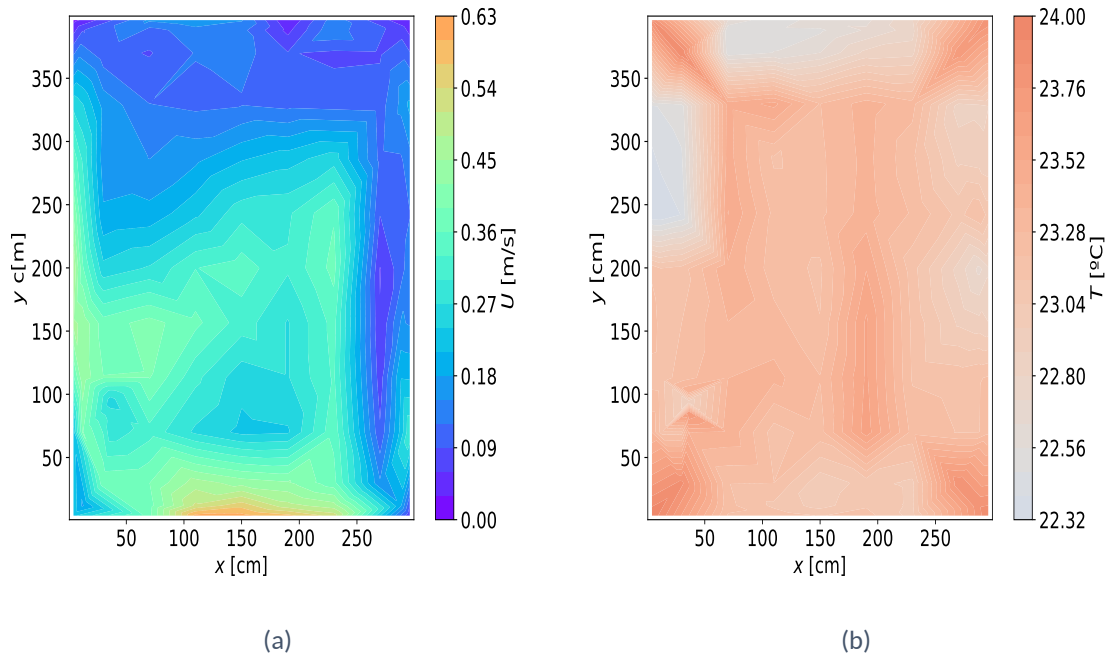


Figura C.2 – Plano de corte de  $Z = 12$  cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

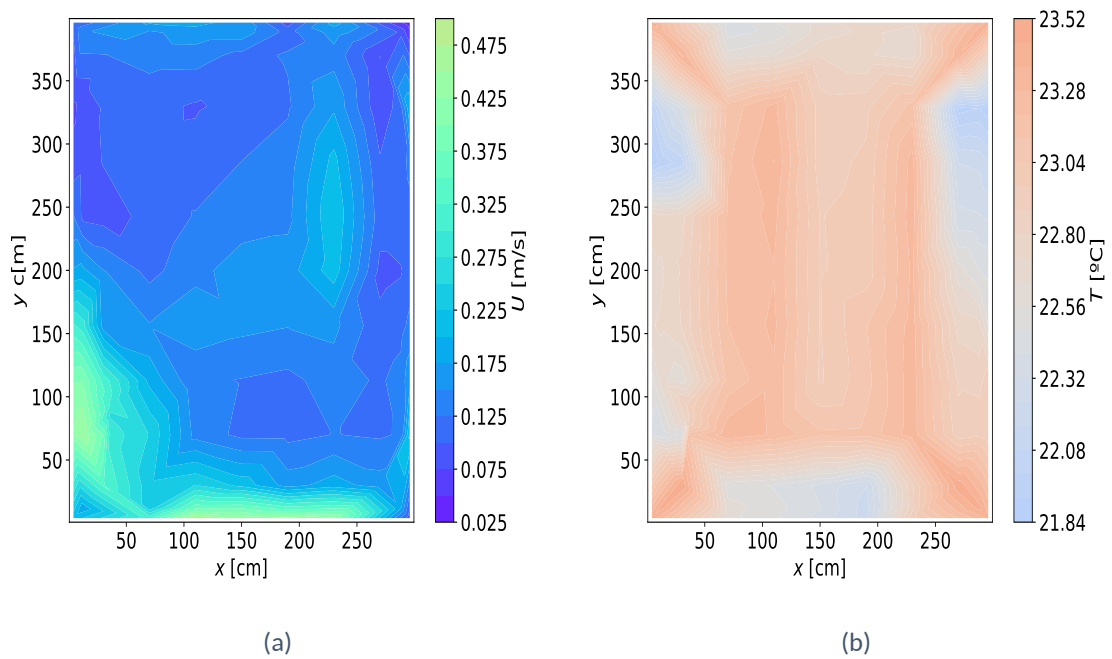


Figura C.3 – Plano de corte de  $Z = 30$  cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

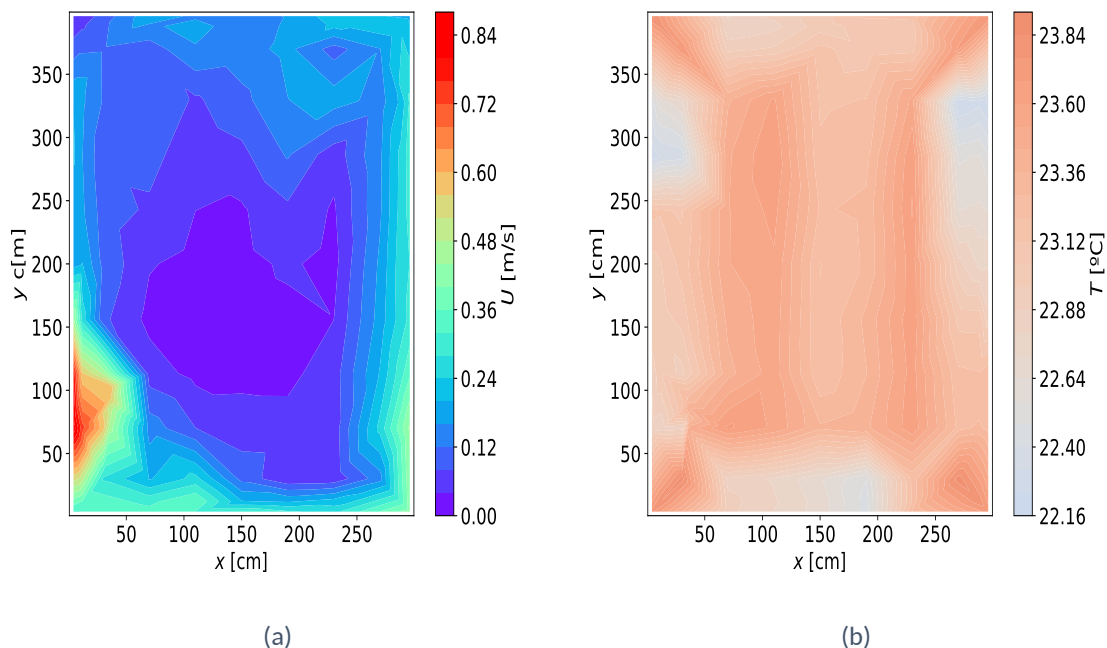


Figura C.4 - Plano de corte de Z = 110 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

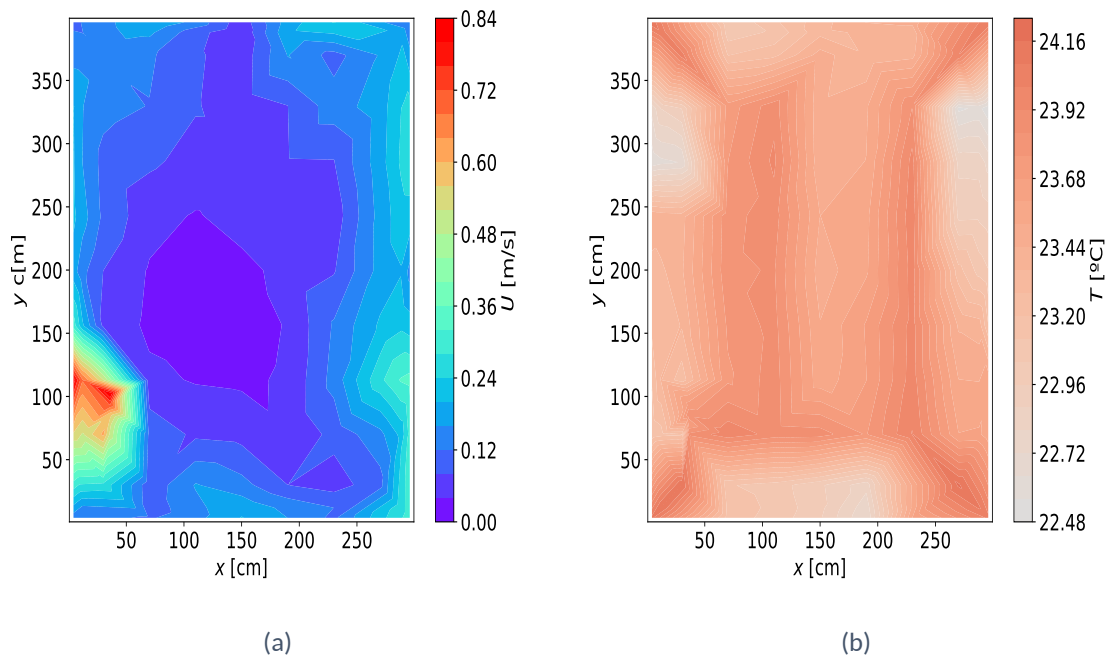


Figura C.5 - Plano de corte de Z = 170 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

### C.1.2 Planos XZ

Os planos XZ retirados têm coordenada em Y de 4, 12, 30, 70, 113, 157, 200, 243, 287, 330, 370, 388 e 396 cm.

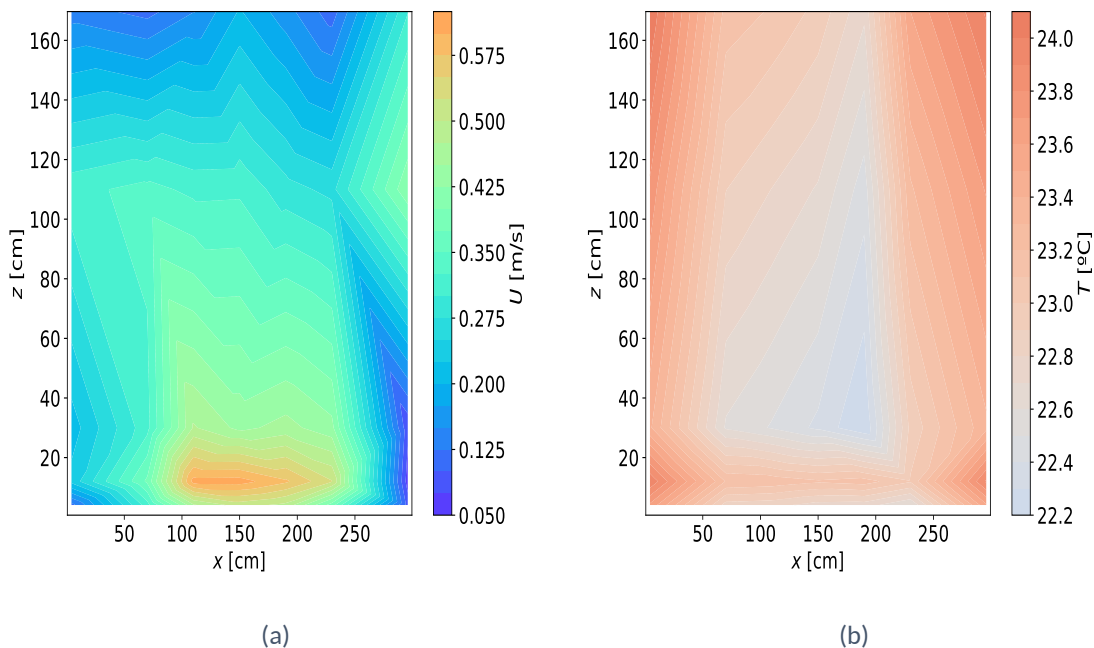


Figura C.6 – Plano de corte de Y = 4 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

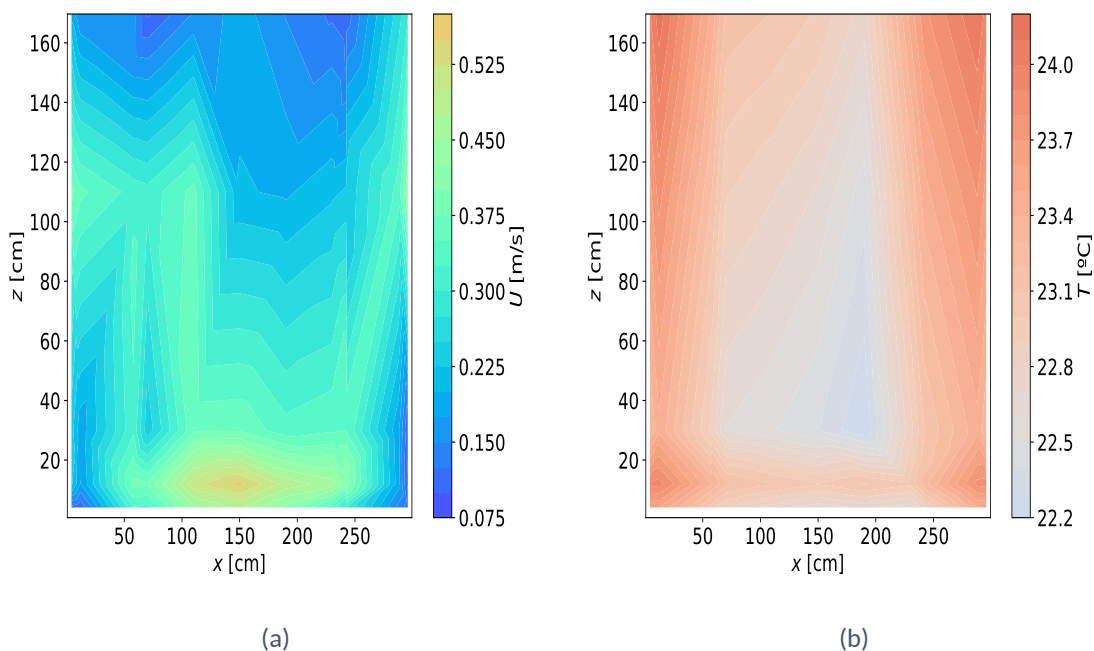


Figura C.7 – Plano de corte de Y = 12 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

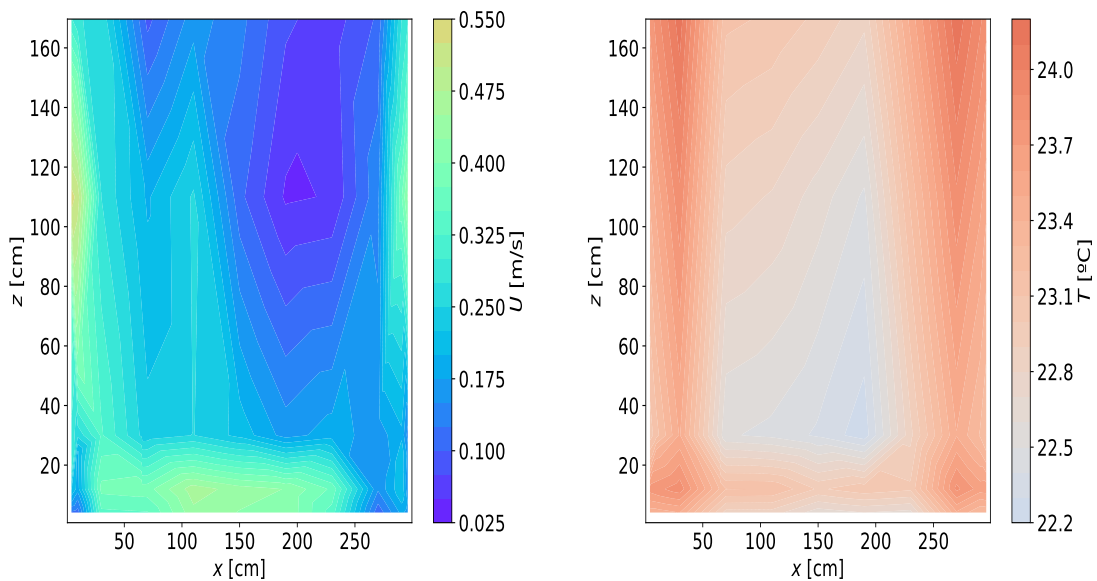


Figura C.8 – Plano de corte de Y = 30 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

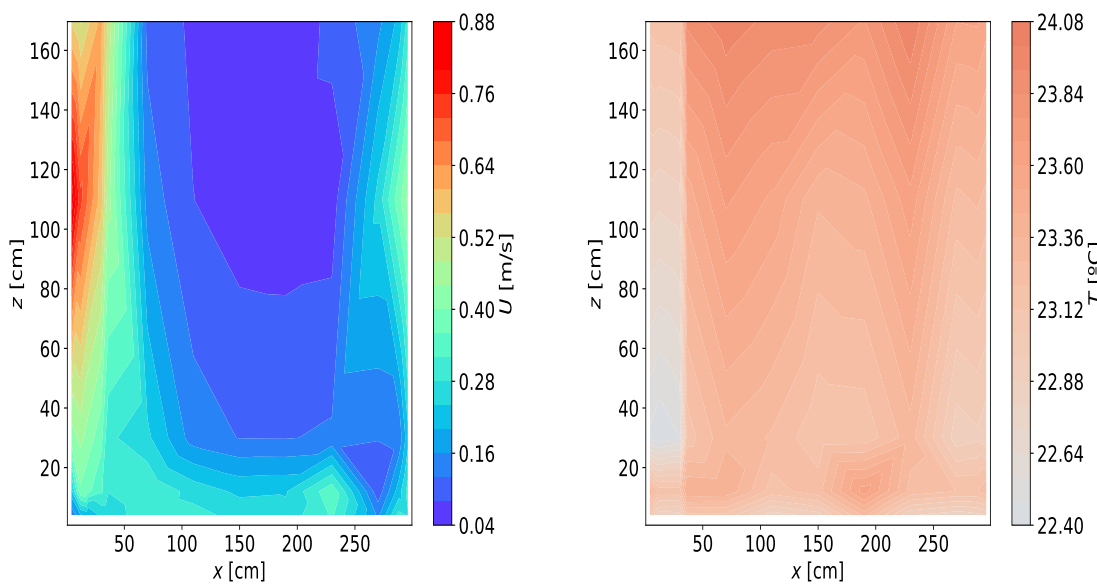


Figura C.9 – Plano de corte de Y = 70 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

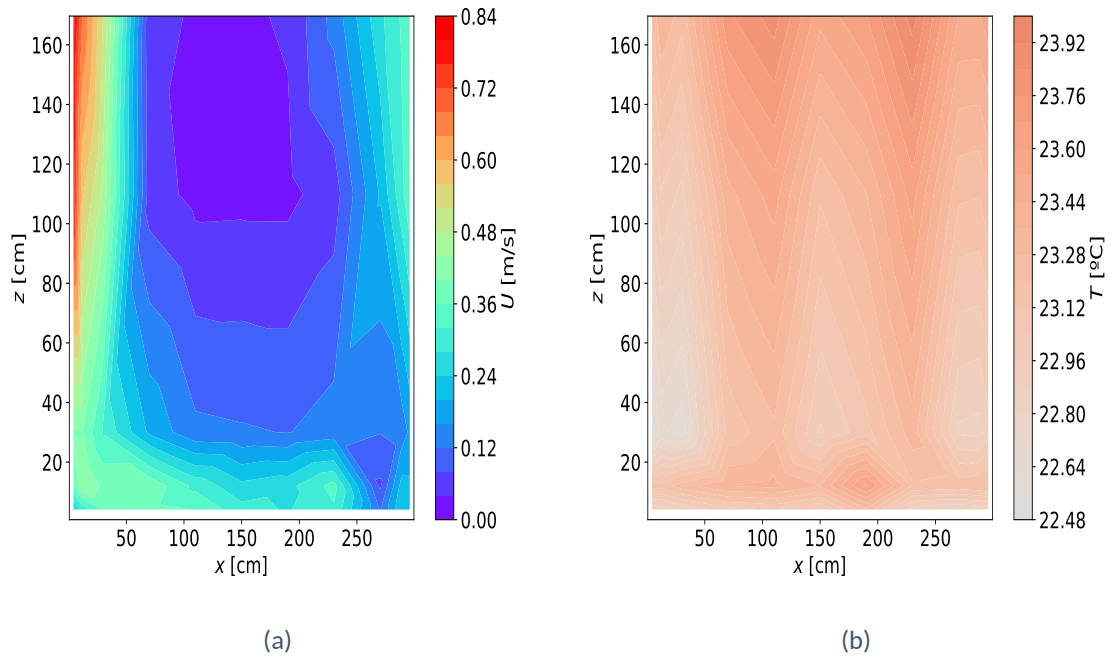


Figura C.10 – Plano de corte de  $Y = 113$  cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

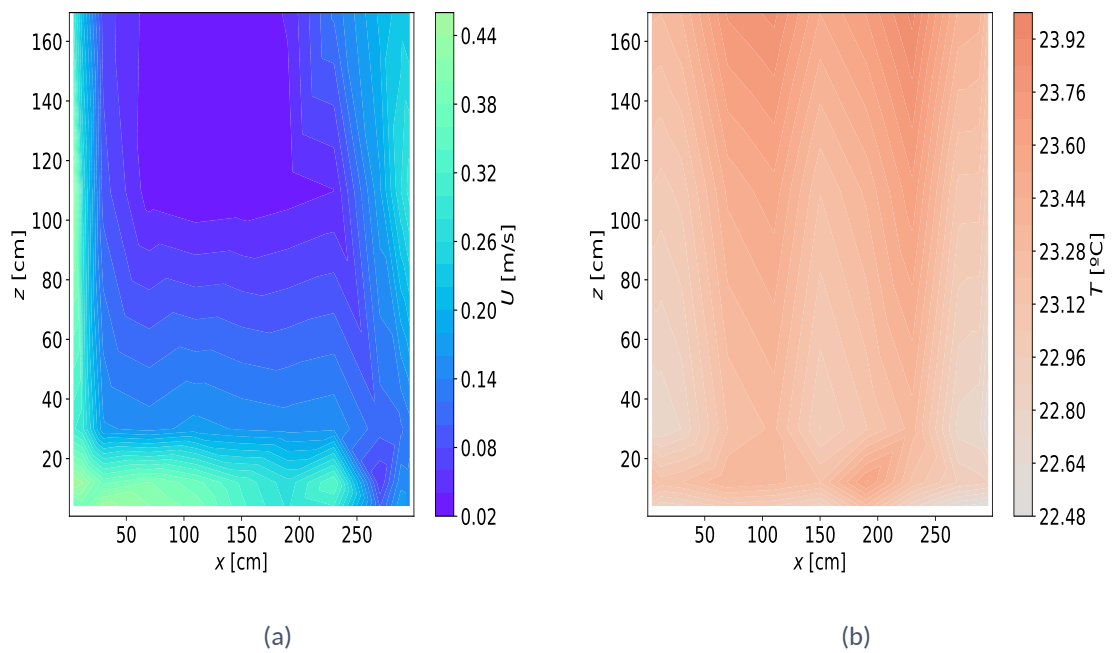


Figura C.11 – Plano de corte de  $Y = 157$  cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

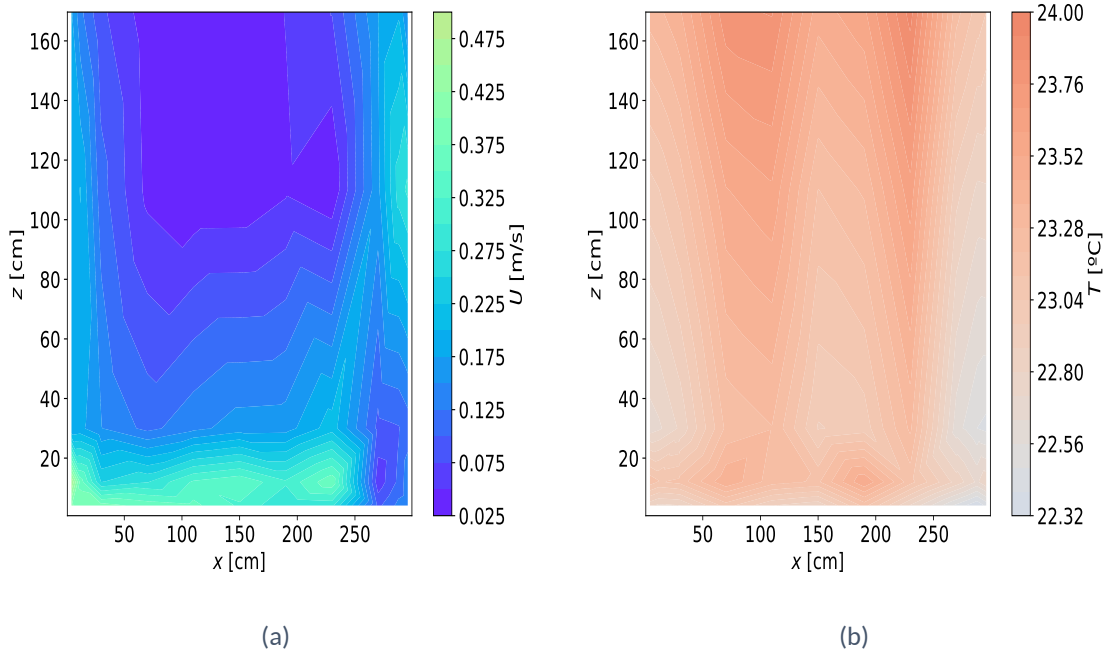


Figura C.12 – Plano de corte de Y = 200 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

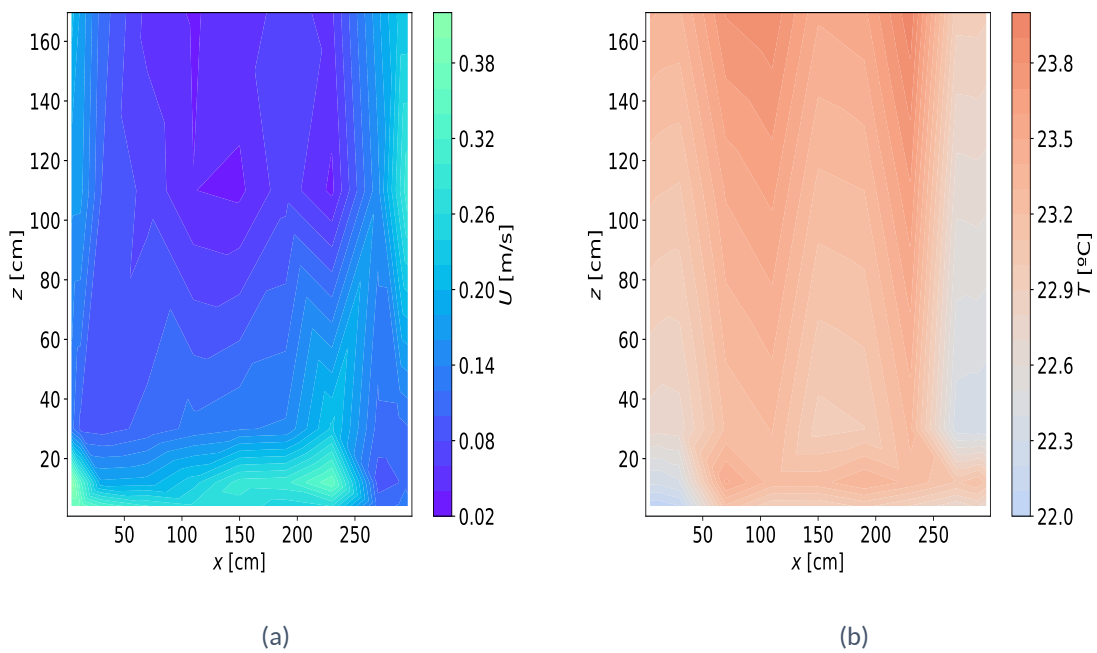


Figura C.13 – Plano de corte de Y = 243 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

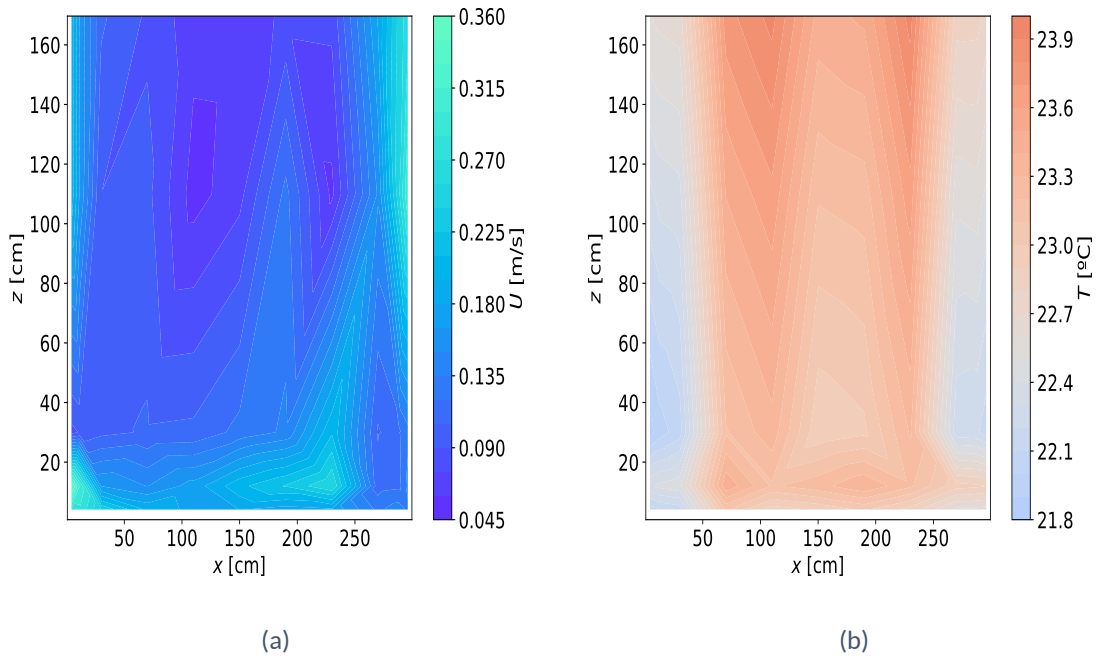


Figura C.14 – Plano de corte de Y = 287 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

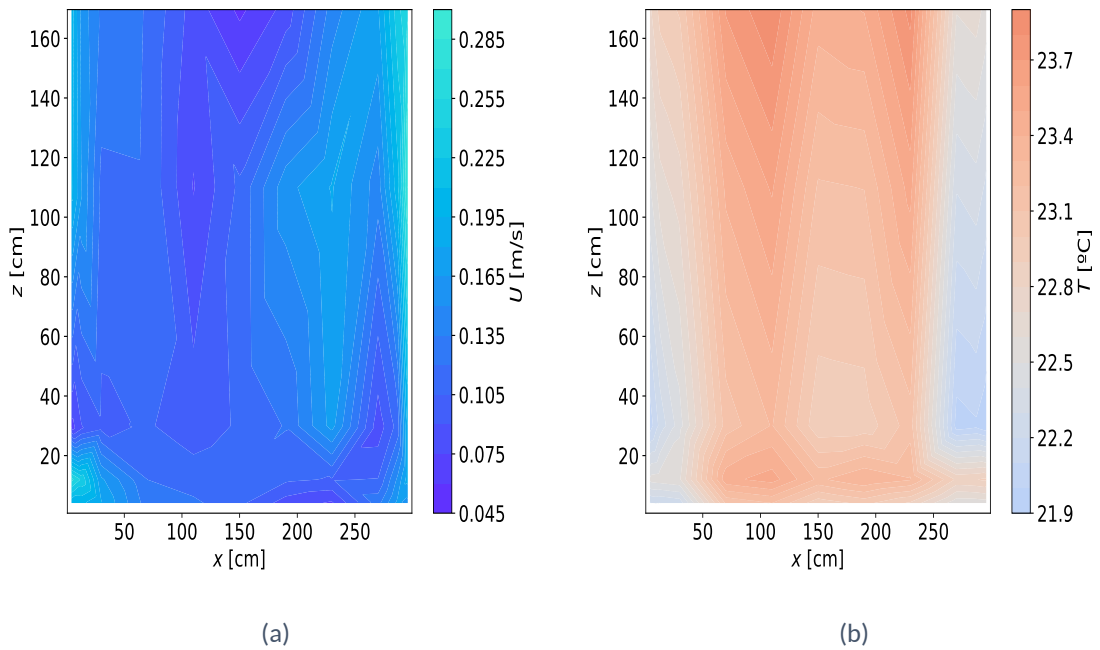
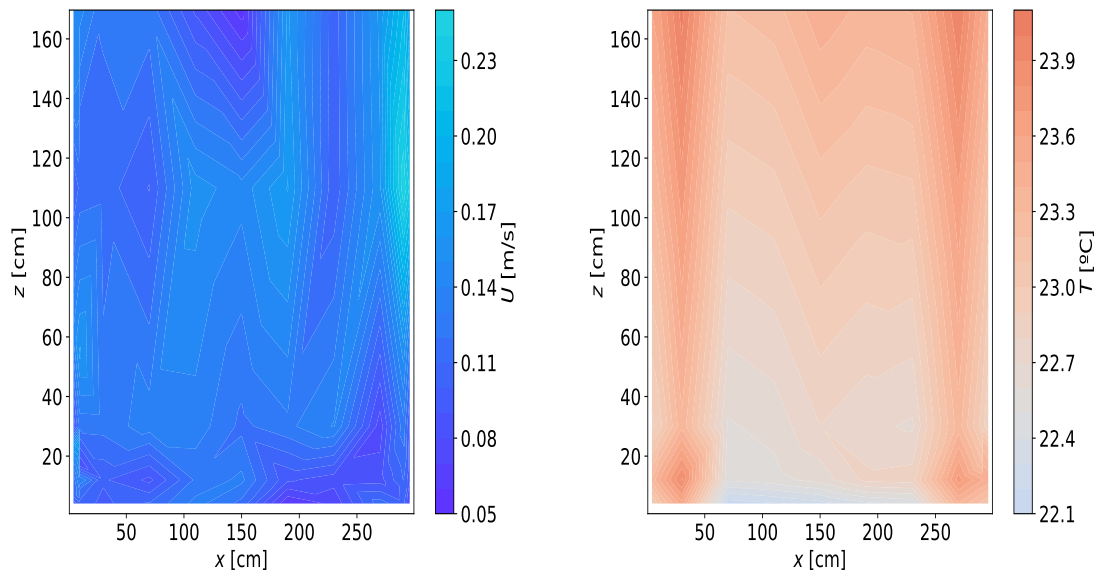


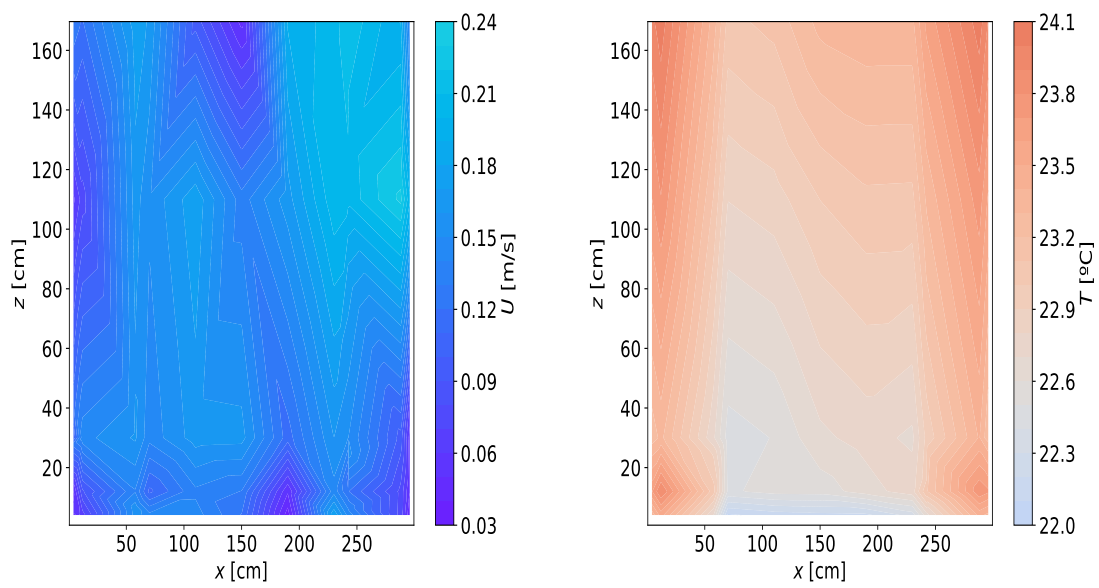
Figura C.15 – Plano de corte de Y = 330 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).



(a)

(b)

Figura C.16 – Plano de corte de Y = 370 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).



(a)

(b)

Figura C.17 – Plano de corte de Y = 388 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

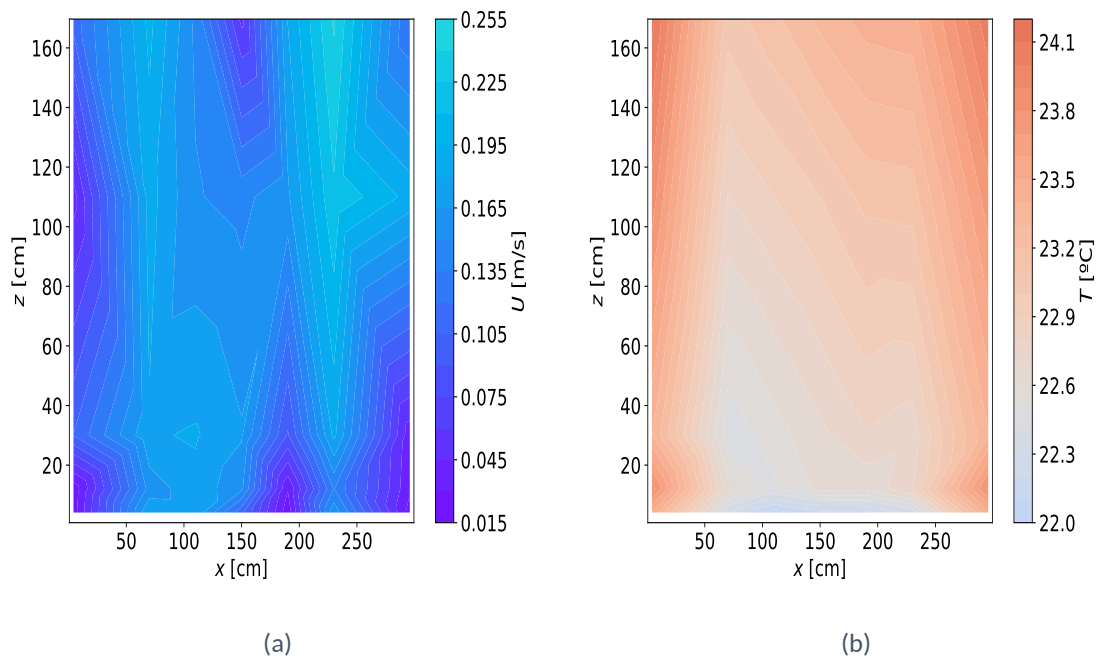


Figura C.18 – Plano de corte de  $Y = 396$  cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

### C.1.3 Planos YZ

Os planos YZ retirados têm coordenada em X de 4, 12, 30, 70, 110, 150, 190, 230, 270, 288 e 296 cm.

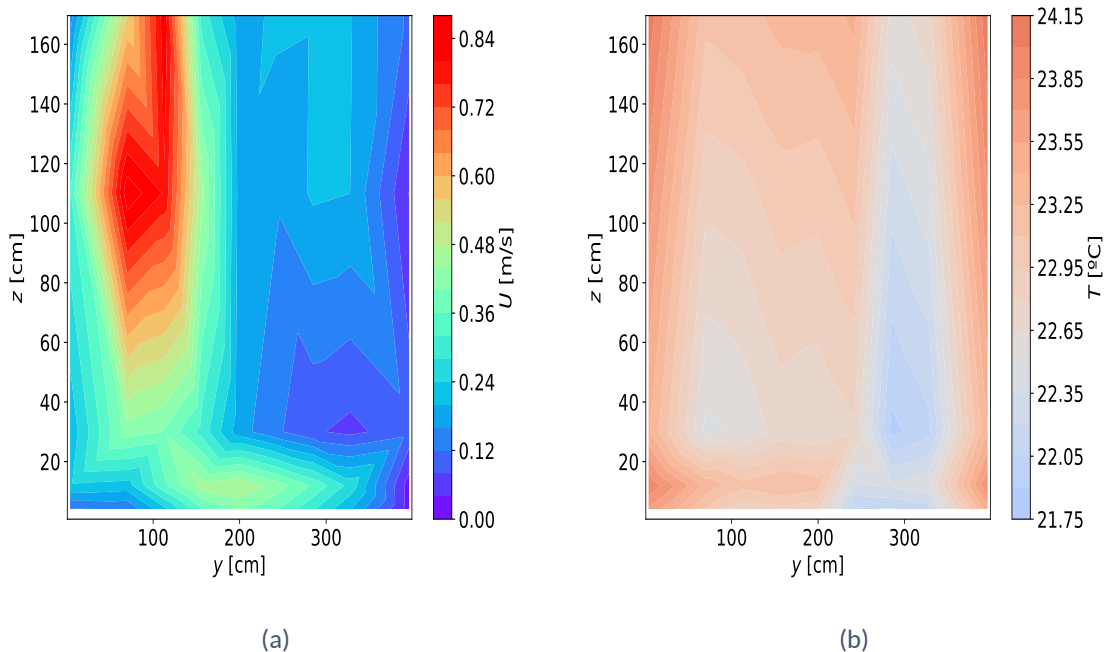


Figura C.19 – Plano de corte de X = 4 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

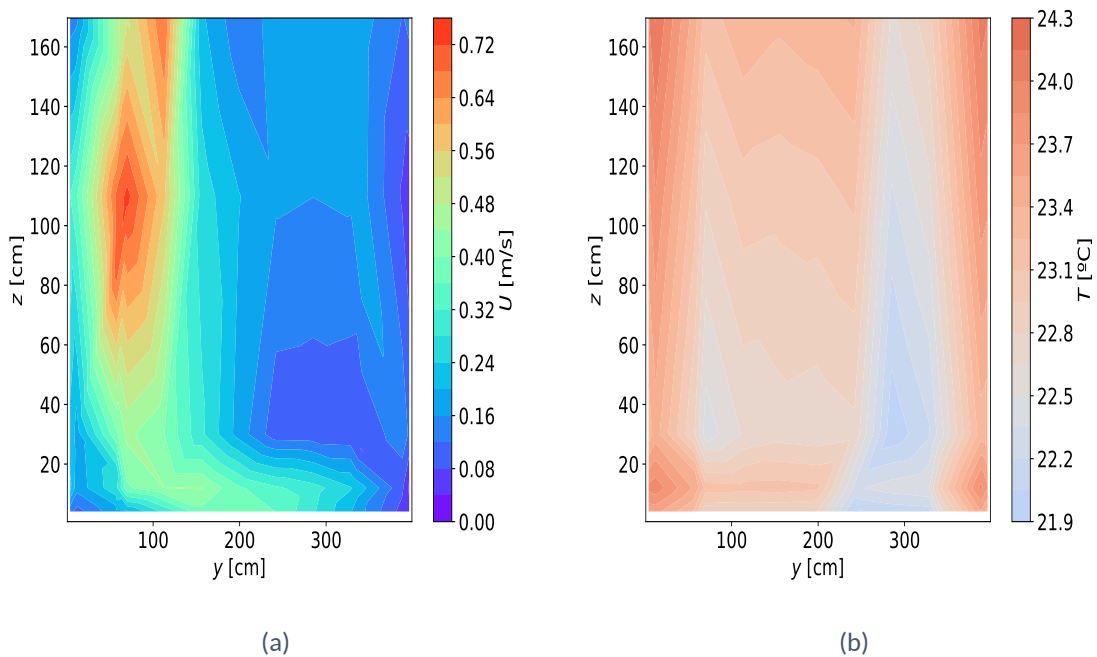


Figura C.20 – Plano de corte de X = 12 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

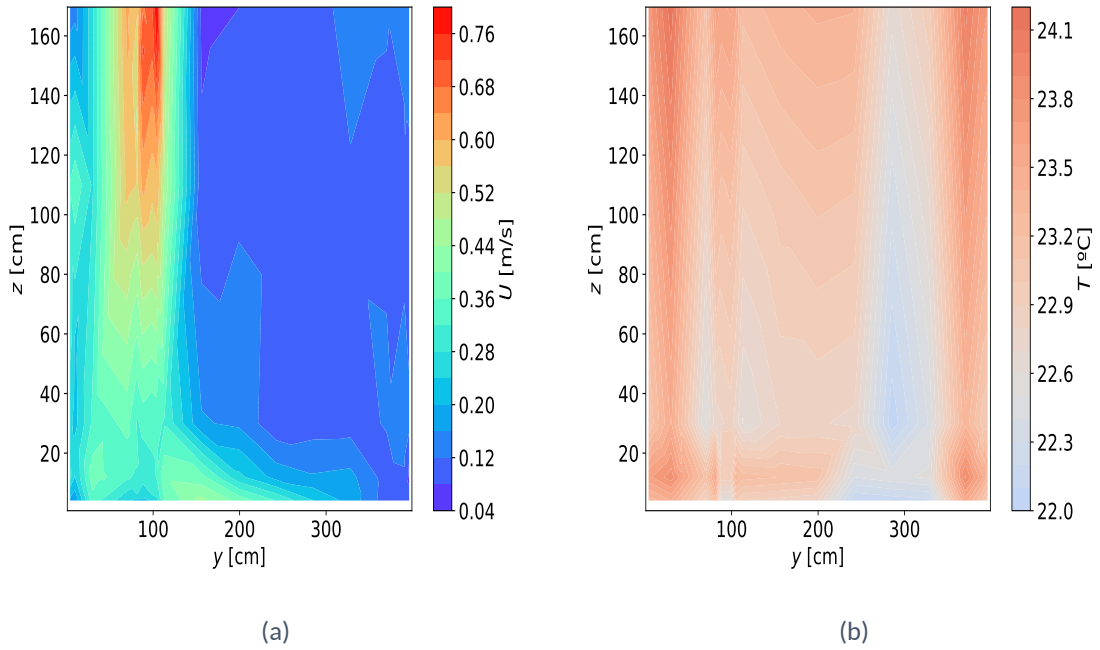


Figura C.21 – Plano de corte de X = 30 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

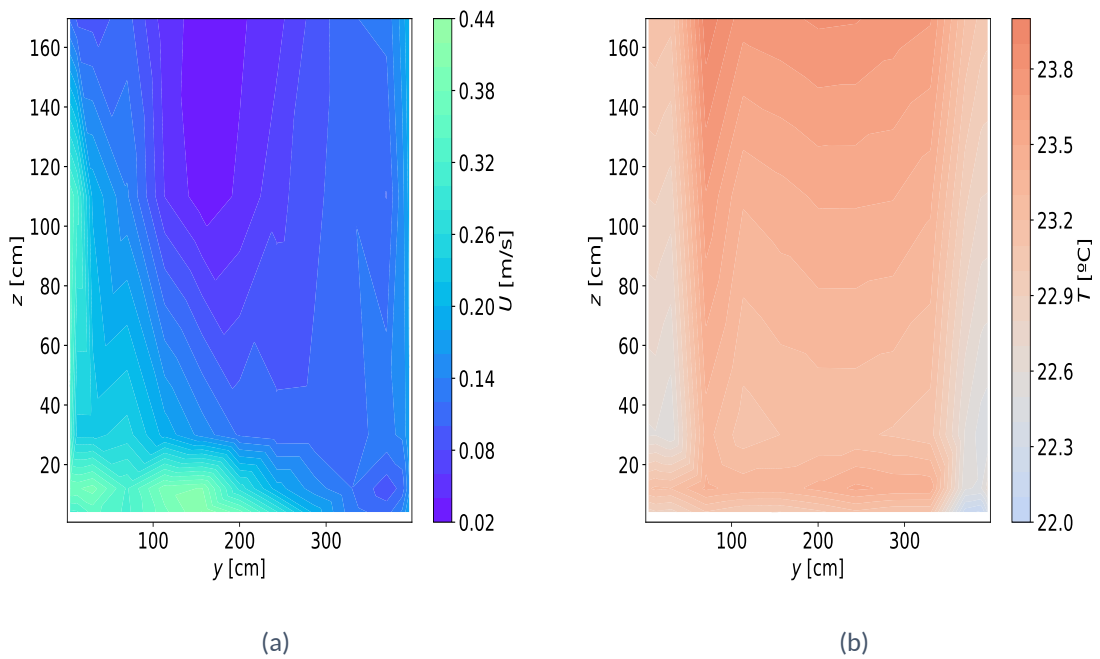


Figura C.22 – Plano de corte de X = 70 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

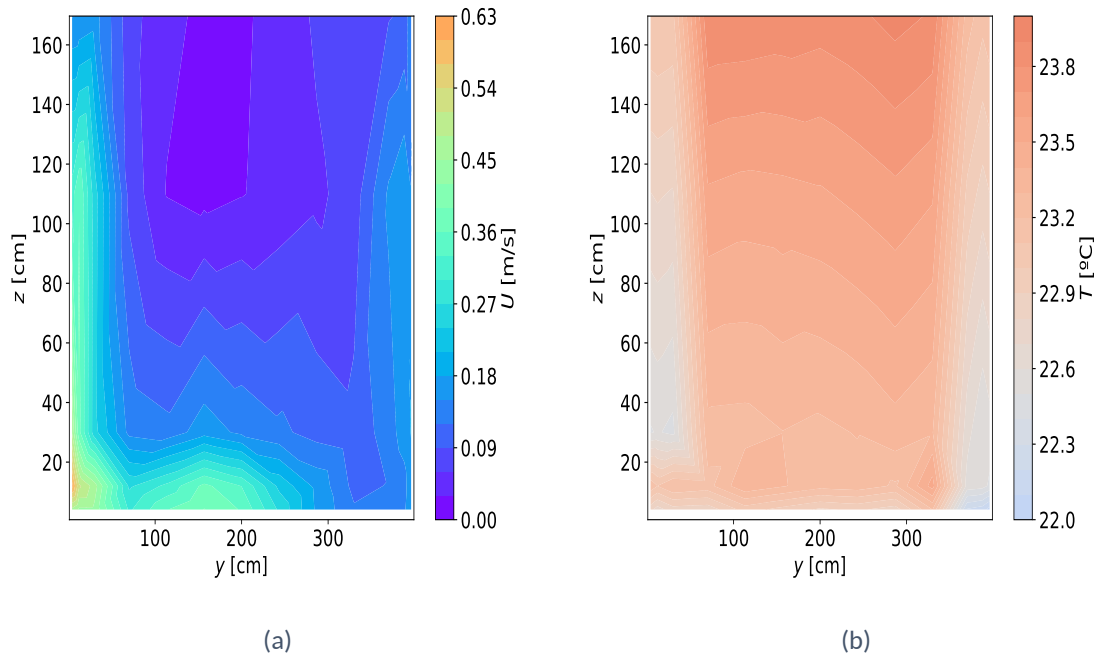


Figura C.23 – Plano de corte de X = 110 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

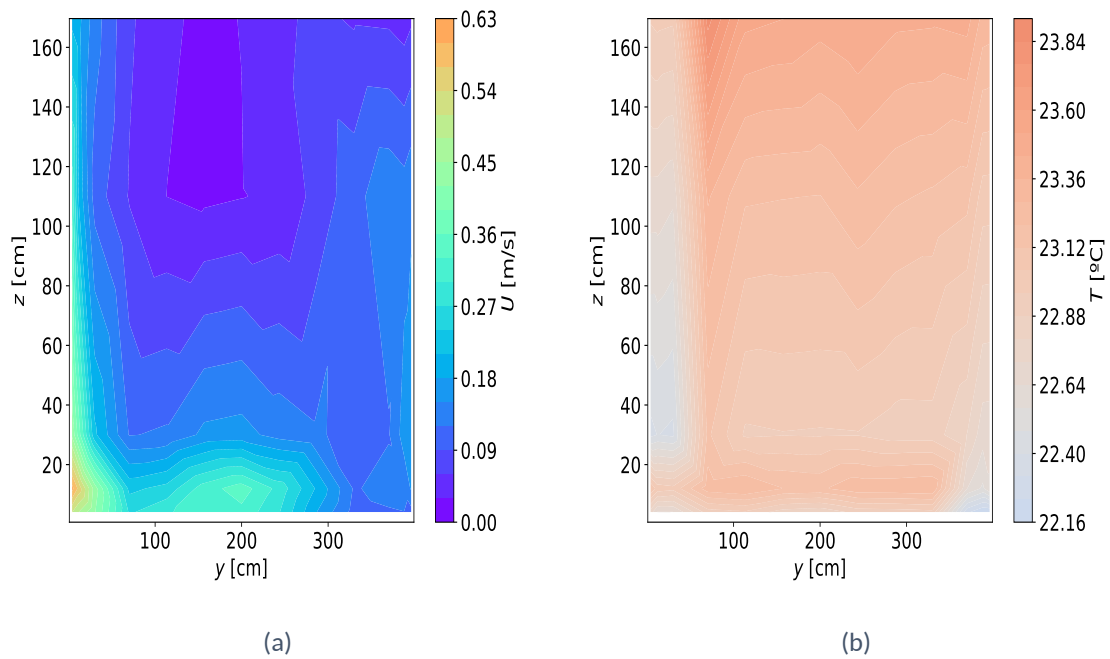


Figura C.24 – Plano de corte de X = 150 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

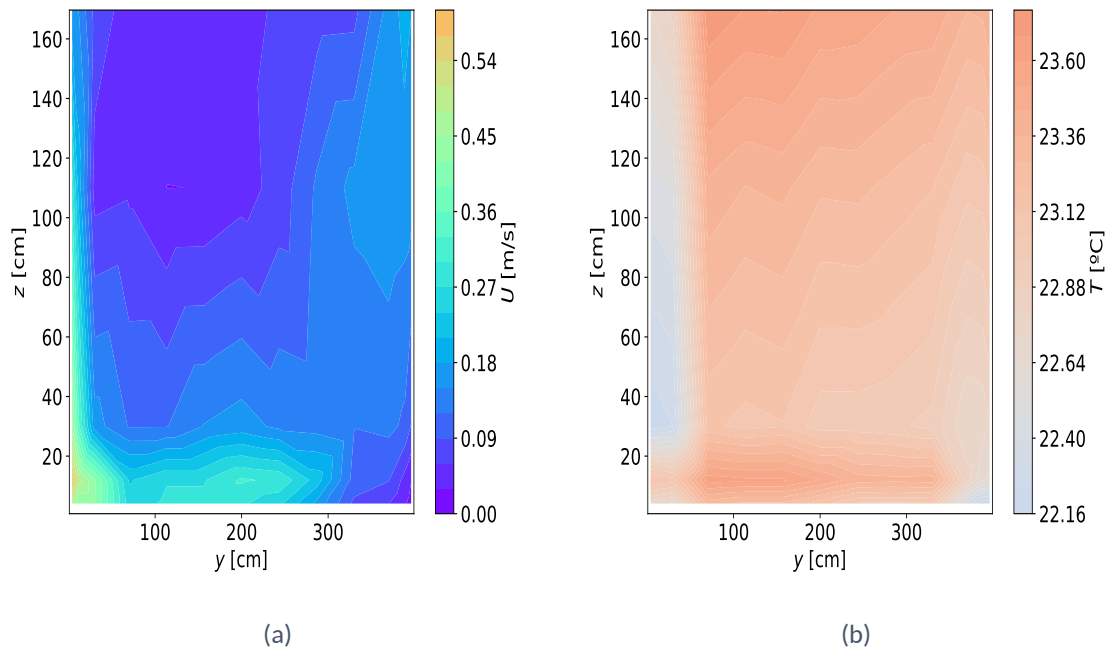


Figura C.25 – Plano de corte de X = 190 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

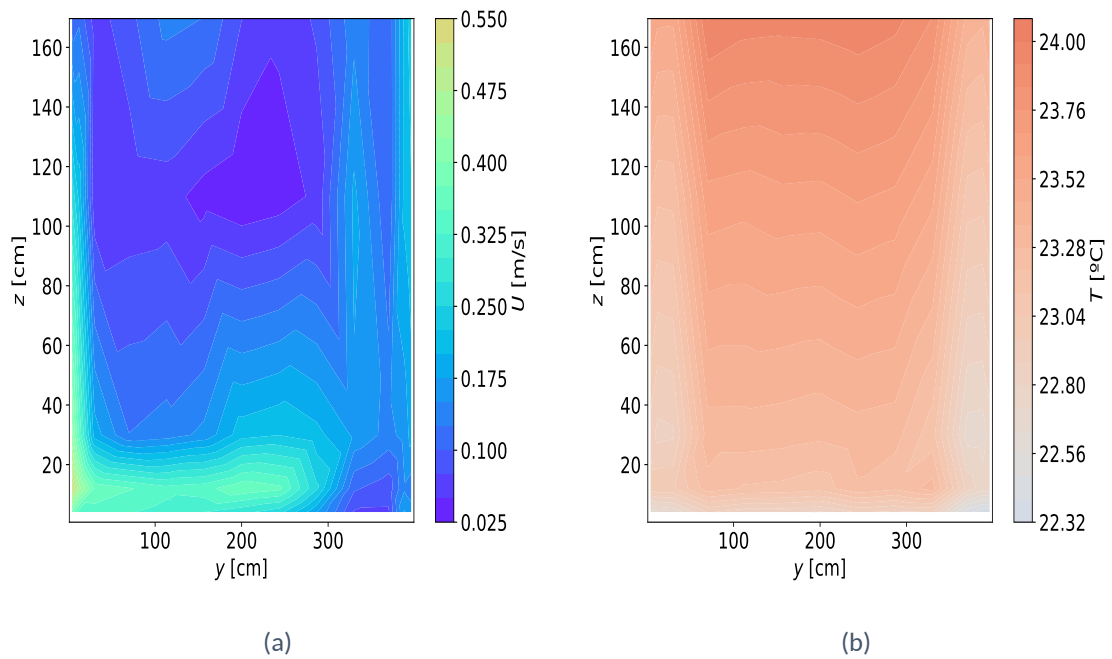


Figura C.26 – Plano de corte de X = 230 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

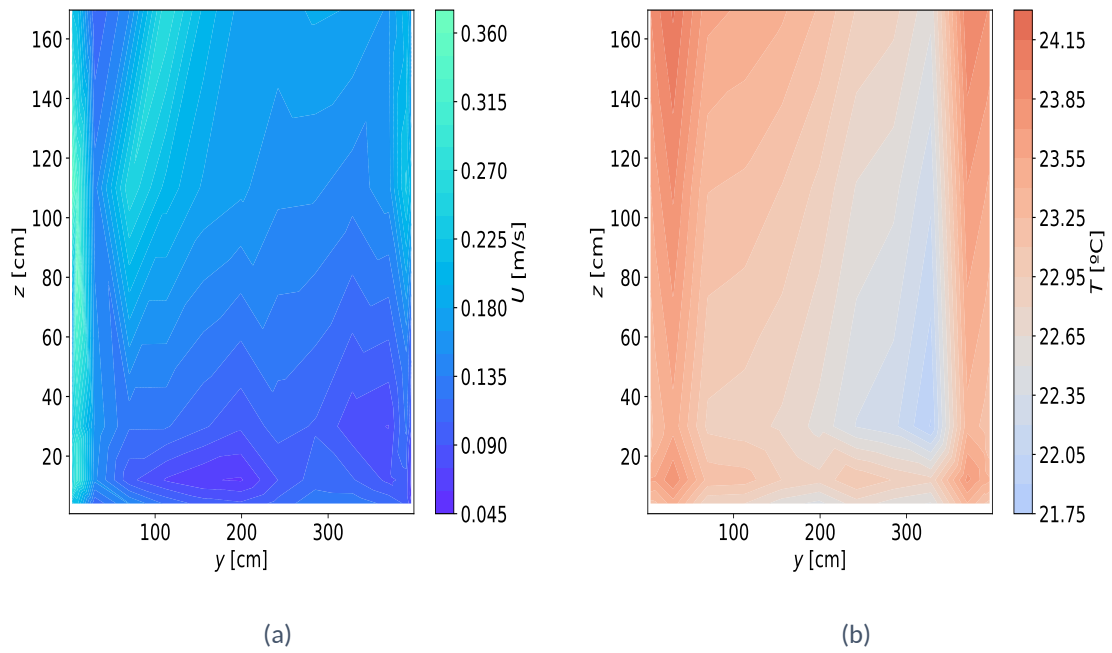


Figura C.27 – Plano de corte de X = 270 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

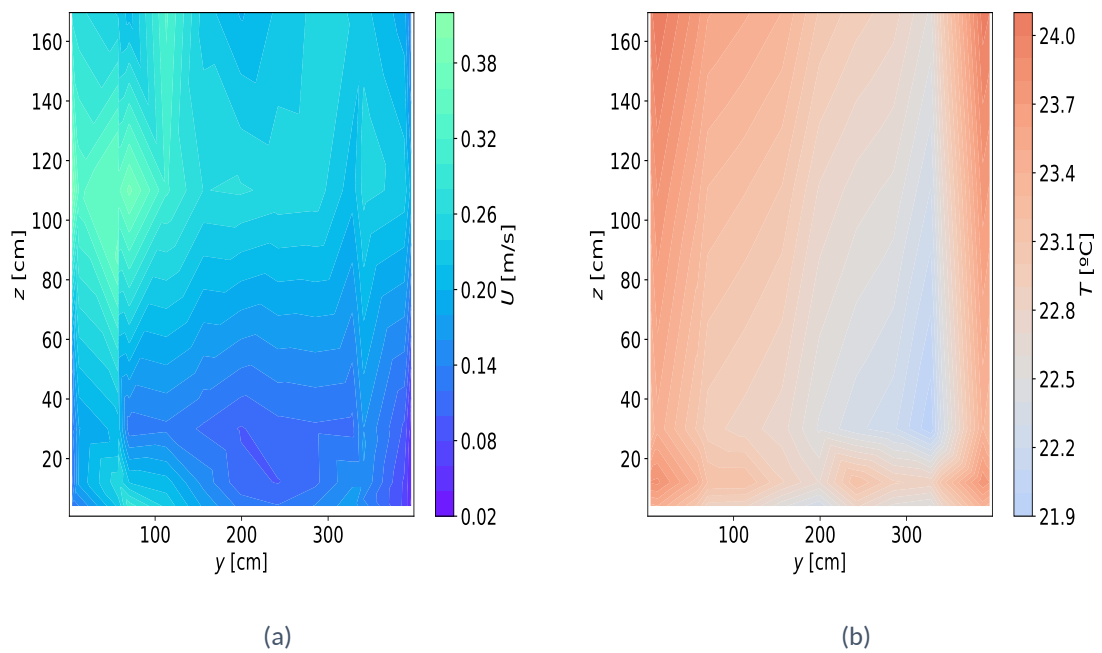


Figura C.28 – Plano de corte de X = 288 cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

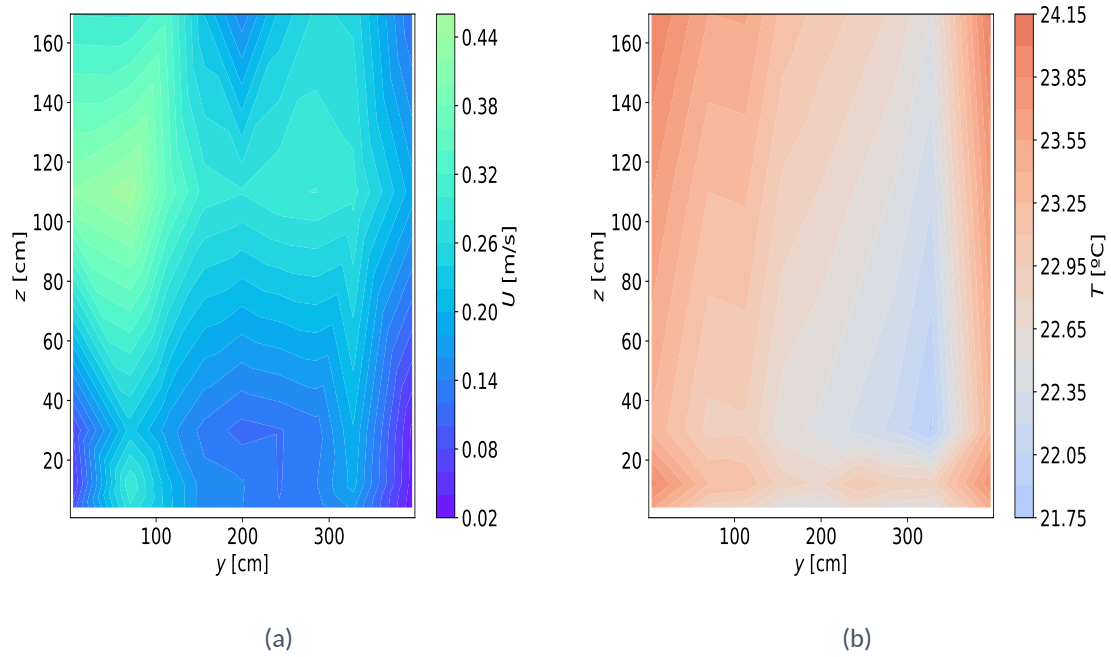


Figura C.29 – Plano de corte de  $X = 296$  cm : Velocidade (a) e Temperatura (b).

## APÊNDICE D

### D.1 Apêndice D - Esquema de Principio - SATEC

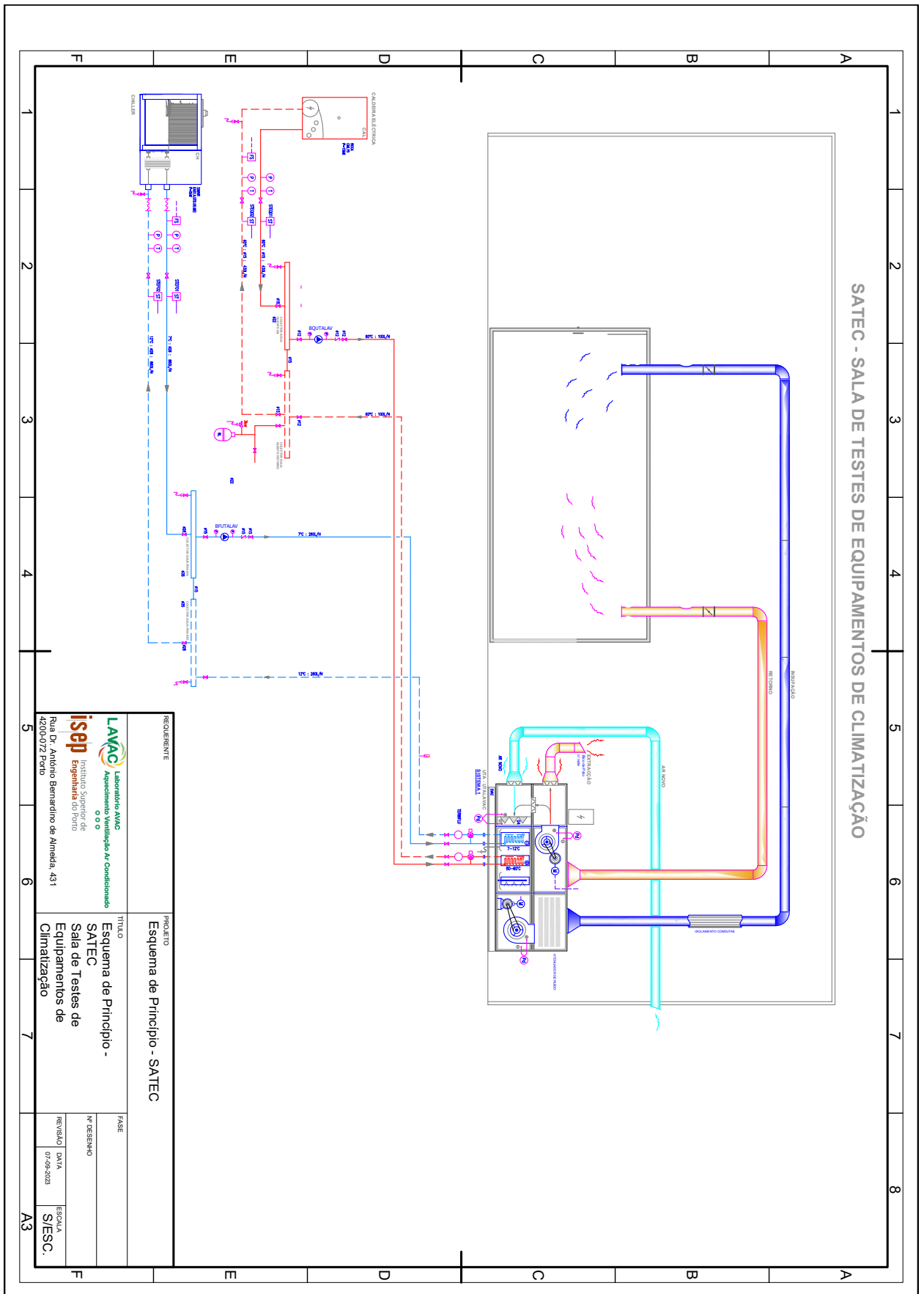


Figura D.1 – Esquema de Princípio - SAT-EC, adaptado de esquema de princípio requisitado a LAVAC.

## APÊNDICE E

### E.1 Apêndice E - Código python para processamento e tratamento de dados

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```
In [1]: from numpy import *
from scipy.optimize import fsolve
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.pyplot import figure
from iapws import humidAir
from scipy.signal import butter, lfilter, freqz
import numpy as np
import pandas as pd
import os
from scipy.interpolate import griddata
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

### pi
pi=arctan(1.)*4.
## g
g=9.81
Tf=24.+273.15
```

```
In [2]: #create array
x_poss=[]
y_poss=[]
z_poss=[]

x_p = 4
x_poss.append(x_p)
x_p = 12
x_poss.append(x_p)
x_p = 30
x_poss.append(x_p)
x_p = 70
x_poss.append(x_p)
x_p = 110
x_poss.append(x_p)
x_p = 150
x_poss.append(x_p)
x_p = 190
x_poss.append(x_p)
x_p = 230
x_poss.append(x_p)
x_p = 270
x_poss.append(x_p)
x_p = 288
x_poss.append(x_p)
x_p = 296
x_poss.append(x_p)

y_p = 4
y_poss.append(y_p)
y_p = 12
y_poss.append(y_p)
y_p = 30
y_poss.append(y_p)
y_p = 70
y_poss.append(y_p)
y_p = 113.33
y_poss.append(y_p)
y_p = 156.66
y_poss.append(y_p)
```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaios - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false

1/8

Figura E.1 – Código *Python* - Página 1.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```

y_p = 199.99
y_poss.append(y_p)
y_p = 243.32
y_poss.append(y_p)
y_p = 286.65
y_poss.append(y_p)
y_p = 329.98
y_poss.append(y_p)
y_p = 370
y_poss.append(y_p)
y_p = 388
y_poss.append(y_p)
y_p = 396
y_poss.append(y_p)

z_p = 170
z_poss.append(z_p)
z_p = 110
z_poss.append(z_p)
z_p = 30
z_poss.append(z_p)
z_p = 12
z_poss.append(z_p)
z_p = 4
z_poss.append(z_p)

```

In [3]:

```

#create list

v=[]

t=[]
ti=[0]

num=[]

xi=[]
yi=[]
zi=[]

```

In [ ]:

```

for m in range(0,5):
    for i in range(0,11):
        for j in range(0,9):
            for n in range(0,2):
                namefile = '0'+ str(m) + '_' + '%02d' % i + str(j) + str(n) + '_0'
                name = str(namefile)
                if os.path.exists(name)==True:

                    if m == 0:
                        if i == 0:
                            x = 4
                        if i == 1:
                            x = 12
                        if i == 2:
                            x = 30
                        if i == 8:
                            x = 270
                        if i == 9:
                            x = 288

```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaio - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 2/8

Figura E.2 – Código *Python* - Página 2.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```

y_p = 199.99
y_poss.append(y_p)
y_p = 243.32
y_poss.append(y_p)
y_p = 286.65
y_poss.append(y_p)
y_p = 329.98
y_poss.append(y_p)
y_p = 370
y_poss.append(y_p)
y_p = 388
y_poss.append(y_p)
y_p = 396
y_poss.append(y_p)

z_p = 170
z_poss.append(z_p)
z_p = 110
z_poss.append(z_p)
z_p = 30
z_poss.append(z_p)
z_p = 12
z_poss.append(z_p)
z_p = 4
z_poss.append(z_p)

```

In [3]:

```

#create list

v=[]

t=[]
ti=[0]

num=[]

xi=[]
yi=[]
zi=[]

```

In [ ]:

```

for m in range(0,5):
    for i in range(0,11):
        for j in range(0,9):
            for n in range(0,2):
                namefile = '0'+ str(m) + '_' + '%02d' % i + str(j) + str(n) + '_0'
                name = str(namefile)
                if os.path.exists(name)==True:

                    if m == 0:
                        if i == 0:
                            x = 4
                        if i == 1:
                            x = 12
                        if i == 2:
                            x = 30
                        if i == 8:
                            x = 270
                        if i == 9:
                            x = 288

```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaio - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 2/8

Figura E.3 – Código *Python* - Página 2.

15/09/23, 17:14

```
3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar
if i == 10:
    x = 296

if j in range(0,7):
    y = 70+j*43

if j == 7:
    if i ==0:
        y = 4
    if i ==1:
        y = 12
    if i ==2:
        y = 30

    if i ==8:
        y = 30
    if i ==9:
        y = 12
    if i ==10:
        y = 4

if j == 8:
    if i ==0:
        y = 396
    if i ==1:
        y = 388
    if i ==2:
        y = 370

    if i ==8:
        y = 370
    if i ==9:
        y = 388
    if i ==10:
        y = 396

if i in range(3,8):
    x =70+(i-3)*40

    if j == 0:
        y=4
    if j == 1:
        y=12
    if j == 2:
        y=30
    if j == 3:
        y=370
    if j == 4:
        y=388
    if j == 5:
        y=396

if m == 1:
    x = 70 + i*40
    y = 70 + j*43.33

if m == 4:
    x = 36
    y = 70 + j*8
```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaio - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 3/8

Figura E.4 – Código *Python* - Página 3.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```

if n == 0:
    za = 30
    zb = 12
    zc = 4

    tabb = pd.read_csv(name)
    list_v1b = tabb.iloc[:, [2]]
    list_v2b = tabb.iloc[:, [6]]
    list_v3b = tabb.iloc[:, [10]]

    list_t1b = tabb.iloc[:, [3]]
    list_t2b = tabb.iloc[:, [7]]
    list_t3b = tabb.iloc[:, [11]]

    a = list_v1b.iloc[300:1500].mean()
    b = list_v2b.iloc[300:1500].mean()
    c = list_v3b.iloc[300:1500].mean()

    d = list_t1b.iloc[300:1500].mean()
    e = list_t2b.iloc[300:1500].mean()
    f = list_t3b.iloc[300:1500].mean()

    #v.append(float(a))
    v.append(float(b))
    v.append(float(c))

    #t.append(float(d))
    t.append(float(e))
    t.append(float(f))

    xi.append(x)
    xi.append(x)
    #xi.append(x)
    yi.append(y)
    yi.append(y)
    #yi.append(y)
    #zi.append(za)
    zi.append(zb)
    zi.append(zc)

    num.append(name)
if n == 1:
    zd = 170
    ze = 110
    zf = 30

    taba = pd.read_csv(name)
    list_v1a = taba.iloc[:, [2]]
    list_v2a = taba.iloc[:, [6]]
    list_v3a = taba.iloc[:, [10]]

    list_t1a = taba.iloc[:, [3]]
    list_t2a = taba.iloc[:, [7]]
    list_t3a = taba.iloc[:, [11]]

    a = list_v1a.iloc[300:1500].mean()
    b = list_v2a.iloc[300:1500].mean()

```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaio - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 4/8

Figura E.5 – Código *Python* - Página 4.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```
c = list_v3a.iloc[300:1500].mean()
```

```
d = list_t1a.iloc[300:1500].mean()
```

```
e = list_t2a.iloc[300:1500].mean()
```

```
f = list_t3a.iloc[300:1500].mean()
```

```
v.append(float(a))
```

```
v.append(float(b))
```

```
v.append(float(c))
```

```
t.append(float(d))
```

```
t.append(float(e))
```

```
t.append(float(f))
```

```
xi.append(x)
```

```
xi.append(x)
```

```
xi.append(x)
```

```
yi.append(y)
```

```
yi.append(y)
```

```
yi.append(y)
```

```
zi.append(zd)
```

```
zi.append(ze)
```

```
zi.append(zf)
```

```
num.append(name)
```

```
num.append(name)
```

```
num.append(name)
```

In [ ]:

```
ftsize = 17
```

```
plt.rcParams['font.size'] = ftsize
```

```
for d_z in z_poss:
```

```
    x = np.linspace(0,300,500)
```

```
    y = np.linspace(0,400,500)
```

```
    z = np.zeros(500)
```

```
    z=d_z
```

```
    z_c=float(z)
```

```
    xx , yy , zz = np.meshgrid(x,y,z)
```

```
    vb1 = griddata((xi, yi, zi), v, (xx , yy , zz))
```

```
    tb1 = griddata((xi, yi, zi), t, (xx , yy , zz))
```

```
fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(8, 7))
```

```
# Define custom contour Levels
```

```
custom_levels = np.linspace(0, 0.8, 21)
```

```
# Include 0.2 in the custom contour Levels
```

```
custom_levels_with_0_2 = np.insert(custom_levels, np.searchsorted(custom_levels,
```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaio - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 5/8

Figura E.6 – Código *Python* - Página 5.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```

cs1 = ax1.contourf(xx[1:499,1:499,0], yy[1:499,1:499,0], vb1[1:499,1:499,0], 21,
cs1.cmap.set_under('black')
cs1.set_clim(0,0.8)
cbar1 = fig1.colorbar(cs1, ax=ax1)
cbar1.set_label('$u$ [m/s]', rotation=90)
ax1.set_xlabel('$x$ [m]')
ax1.set_ylabel('$y$ [m]')

#plt.savefig( 'Velocidade em z = ' + str(z_c) + '_baixo cm.pdf')

fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(8, 7))

cs2 = ax2.contourf(xx[1:499,1:499,0], yy[1:499,1:499,0], tb1[1:499,1:499,0], 21,

cs2.set_clim(20,25)
cbar2 = fig1.colorbar(cs2, ax=ax2)
cbar2.set_label('$\theta C$ [m/s]', rotation=90)
ax2.set_xlabel('$x$ [m]')
ax2.set_ylabel('$y$ [m]')

#plt.savefig( 'Temperatura em z = ' + str(z_c) + ' baixo cm.pdf')

```

```

In [ ]: # Create a 3D plot
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot the interpolated data
scatter = ax.scatter(xx, yy, zz, c=vb1, cmap='rainbow')

# Add Labels and title
ax.set_xlabel('X')
ax.set_ylabel('Y')
ax.set_zlabel('Z')
ax.set_title('z = ' + str(z_c) + ' cm')
scatter.set_clim(0, 0.8)

#plt.savefig( 'z = ' + str(z_c) + ' cm.pdf')

```

```

In [ ]: for d_y in y_poss:
x = np.linspace(0,300,500)
y = np.zeros(500)
y=d_y
z = np.linspace(0,170,500)
y_c=float(y)

xxx , yyy , zzz = np.meshgrid(x,y,z)
vb2 = griddata((xi, yi, zi), v, (xxx , yyy , zzz))
tb2 = griddata((xi, yi, zi), t, (xxx , yyy , zzz))

```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaio - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 6/8

Figura E.7 – Código *Python* - Página 6.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```

fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(8, 7))
cs1 = ax1.contourf(xxx[0,1:499,2:499], zzz[0,1:499,2:499], vb2[0,1:499,2:499], 2
cs1.set_clim(0,0.8)
cbar1 = fig1.colorbar(cs1, ax=ax1)
cbar1.set_label('$u$ [m/s]', rotation=90)
ax1.set_xlabel('$x$ [m]')
ax1.set_ylabel('$z$ [m]')

#plt.savefig( 'Velocidade em y = ' + str(y_c) + ' cm.pdf')

fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(8, 7))
cs2 = ax2.contourf(xxx[0,1:499,2:499], zzz[0,1:499,2:499], tb2[0,1:499,2:499], 2
cs2.set_clim(18,30)
cbar2 = fig1.colorbar(cs2, ax=ax2)
cbar2.set_label('$\text{C}$ [m/s]', rotation=90)
ax2.set_xlabel('$x$ [m]')
ax2.set_ylabel('$z$ [m]')

#plt.savefig( 'Temperatura em y = ' + str(y_c) + ' cm.pdf')

```

```

In [ ]: # Create a 3D plot
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot the interpolated data
scatter = ax.scatter(xxx, yyy, zzz, c=vb2, cmap='rainbow')

# Add Labels and title
ax.set_xlabel('X')
ax.set_ylabel('Y')
ax.set_zlabel('Z')
ax.set_title('Y = ' + str(y_c) + ' cm')
scatter.set_clim(0, 0.5)

# Show the plot
#plt.savefig( 'y = ' + str(y_c) + ' cm.pdf')

```

```

In [ ]: for d_x in x_poss:
y = np.linspace(0,400,500)
x = np.zeros(500)
x = d_x
z = np.linspace(0,170,500)
x_c=float(x)

xxxx , yyy , zzz = np.meshgrid(x,y,z)
vb3 = griddata((xi, yi, zi), v, (xxxx , yyy , zzz))
tb3 = griddata((xi, yi, zi), t, (xxxx , yyy , zzz))

fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(8, 7))
cs1 = ax1.contourf(yyyy[1:499,0,2:499], zzzz[1:499,0,2:499], vb3[1:499,0,2:499],
cs1.set_clim(0,0.8)
cbar1 = fig1.colorbar(cs1, ax=ax1)

```

localhost:8888/nbconvert/html/Desktop/Ensaios - Tese/Malha Interior e Exterior/3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar.ipynb?download=false 7/8

Figura E.8 – Código *Python* - Página 7.

15/09/23, 17:14

3D interpolation xyz-SINGLE LOOP-3d bar

```

cbar1.set_label('$u$ [m/s]', rotation=90)
ax1.set_xlabel('$y$ [m]')
ax1.set_ylabel('$z$ [m]')

#plt.savefig( 'Velocidade em x = ' + str(x_c) + ' cm.pdf')

fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(8, 7))
cs2 = ax2.contourf(yyyy[1:499,0,2:499], zzzz[1:499,0,2:499], tb3[1:499,0,2:499],
cs2.set_clim(18,30)
cbar2 = fig1.colorbar(cs2, ax=ax2)
cbar2.set_label('$°C$ [m/s]', rotation=90)
ax2.set_xlabel('$y$ [m]')
ax2.set_ylabel('$z$ [m]')

#plt.savefig( 'Temperatura em x = ' + str(x_c) + ' cm.pdf')

```

In [ ]:

```

# Create a 3D plot
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

# Plot the interpolated data
scatter = ax.scatter(xxxx, yyyy, zzzz, c=vb3, cmap='rainbow')

# Add Labels and title
ax.set_xlabel('X')
ax.set_ylabel('Y')
ax.set_zlabel('Z')
ax.set_title('X = ' + str(x_c) + ' cm')
scatter.set_clim(0, 0.8)

# Show the plot
#plt.savefig( 'x = ' + str(x_c) + ' cm.pdf')

```

# ANEXO A



## FICHE DE DONNÉES TECHNIQUES



### Capteur / transmetteur de vitesse et température CTV 210-R

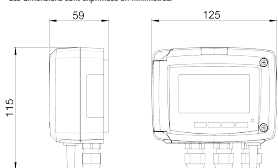
#### LES PLUS DE LA GAMME

- Gamme configurable de 0 à 30 m/s avec sonde fil chaud
- Gamme configurable de 0 à 50 °C en température
- Fonction débit
- Sortie analogique 4 fils 0-5/10 V ou 0/4-20 mA
- Alimentation 24 Vdc/Vac ou 100-240 Vac
- Indicateur de tendance
- Boîtier ABS V0 IP65, avec ou sans afficheur
- Montage 1/2 tour sur platine de fixation murale
- 2 sorties relais



#### CARACTÉRISTIQUES DU BOÎTIER

Les dimensions sont exprimées en millimètres.



**Matériau :** ABS V0 selon UL94  
**Indice de protection :** IP65  
**Afficheur :** 75 x 40 mm, LCD 20 digits 2 lignes.  
**Hauteur des caractères :** Valeurs : 10 mm ; Unités : 5 mm  
**Presse étoupe :** Pour câbles Ø 8 mm maximum  
**Poids :** 340 g

#### RÉFÉRENCES

La codification ci-dessous permet de construire la référence d'un capteur :

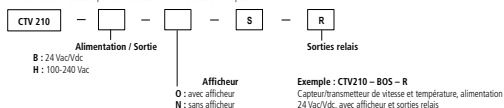


Figura A.1 – Catálogo da Sonda CTV 210-R - Página 1.

#### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES EN TEMPÉRATURE

Étendue de mesure	De 0 à +50 °C
Unité de mesure	°C / °F
Exactitude*	±0.3 % de la lecture ±0.25 °C
Temps de réponse	T <sub>90</sub> = 0.9 seconde pour V <sub>0</sub> = 1 m/s
Résolution	0.1 °C / 0.1 °F
Type de capteur	PT100 1/3 Din selon IEC751
Type de fluide	Air et gaz neutres

#### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES EN VITESSE

Étendue de mesure	De 0 à 30 m/s
Unité de mesure	m/s, fpm, km/h
Exactitude*	De 0 à 3 m/s : ±3 % de la lecture ±0.03 m/s De 3 à 30 m/s : ±3 % de la lecture ±0.1 m/s
Résolution	De 0 à 3 m/s : 0.01 m/s De 3 à 30 m/s : 0.1 m/s
Temps de réponse	T <sub>90</sub> = 1.6 s
Type de fluide	Air propre

\* Établies dans des conditions de laboratoire. Les exactitudes prélevées dans ce document seront maintenues sous réserve d'appliquer les compensations d'altitude ou de la densité de des conditions climatiques.

#### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE LA SONDE FIL CHAUD

Matériau de la sonde	Inox 316 L
Dimensions	Ø 8 mm, longueur 300 mm
Température d'utilisation	De 0 à +50 °C
Câble	PVC Ø 4.8 mm, longueur 2 m



#### SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

**Alimentation**  
 24 Vac / Vdc ±10 %  
 100-240 Vac, 50-60 Hz  
**Attention risque choc électrique** ⚠

**Sortie**  
 2 x 4-20 mA ou 2 x 0-20 mA ou 2 x 0-5 V ou 2 x 0-10 V (4 fils)  
 Tension de mode commun <-30 VAC  
 Charge maximale : 500 Ohms (0/4-20 mA)  
 Charge minimale : 1 K Ohms (0-5/10 V)  
 2 relais immerseurs 3 A / 230 V

**Isolation galvanique**  
 Entrées et sorties (modèles 100-240 Vac)  
 Appareil entièrement protégé par DOUBLE ISOLATION ou ISOLATION RENFORCÉE  
 Sorties (modèles 24 Vac/Vdc)

**Consommation**  
 CTV210-S : 6 VA  
 CTV210-H : 8 VA

**Directives européennes**  
 2014/30/UE CEM  
 2014/53/UE Base Tension  
 2011/65/UE RoHS II  
 2012/19/UE DEEE

**Raccordement électrique**  
 Bornier à vis pour câble 2.5 mm<sup>2</sup>  
 Réalisé suivant les règles de l'art

**Communication PC**  
 Câble USB-Mini Din

**Environnement**  
 Air et gaz neutres

**Type de fluide**  
 Air et gaz neutres

**Conditions d'utilisation (°C/%)RH(r/m)**  
 De -10 à +50 °C.  
 En condition de non condensation.  
 De 0 à 2000 m.

**Température de stockage**  
 De -10 à +70 °C

**Sécurité**  
 Classe de protection II ; Degré de pollution 2 ;  
 Catégorie de surtension 2 (OVCI)

#### FONCTION

Les capteurs de la classe 210 possèdent deux sorties analogiques qui correspondent aux deux paramètres affichés. Il est possible d'activer une ou deux sorties et de choisir pour chaque sortie entre la vitesse, la température et le débit.

Fonction	Caractéristiques	Étendues de mesure	Unités et résolutions
Débit		De 0 à 99 999 dm <sup>3</sup> /h (selon vitesse et section)	1 m <sup>3</sup> /h – 0.1 m <sup>3</sup> /s – 1 dm <sup>3</sup> /h 0.1 l/s – 1 dm

Figura A.2 – Catálogo da Sonda CTV 210-R - Página 2.



# ANEXO B



**DBM610**  
Airflow meter

**Technical Data Sheet**

Pressure / Temperature / Humidity / Air Velocity / Airflow / Sound level



**KEY POINTS**

- Measuring range from 40 to 3500 m<sup>3</sup>/h
- Quick and simple hood changes
- Software for data processing on computer
- Sturdy, lightweight and easy to handle
- Removable measuring unit
- Interchangeable hoods

**AVAILABLE HOODS**

DBM610 airflow meter comes in standard with a 610 x 610 mm hood. 4 others hoods are available as options:

- 1020 x 1020 mm
- 720 x 720 mm
- 720 x 1320 mm
- 420 x 1520 mm

Hoods are airtight and have a transparent part on each side allowing the user to see through the vent and ensure that the hood is in a good position. The rods, made of fiberglass, provides a good hoods sturdiness.

**FLOW AREA**

The flow area is attached to the base and allows the measurement on 48 points, all over the surface of the flow area.

Measurement is performed using a differential pressure sensor, calibrated and compensated in atmospheric pressure and in temperature.

**AUTONOMOUS MICROMANOMETER**

Once removed, the measuring unit can be used as a micromanometer:

- With a Pitot tube, it allows measurement of airflow in a duct
- With two silicone tubes, it allows to check filters fouling.

**FUNCTIONS OF THE AIRFLOWMETER**

- Simultaneous display of airflow and temperature
- Automatic airflow direction (extraction or air blast)
- Automatic averaging or point by point averaging
- HOLD function
- Removable measuring unit (micromanometer function)
- Data processing on computer with USB port
- Different languages available





Figura B.1 – Catálogo do Caudalímetro DBM 610 - Página 1.

**TECHNICAL FEATURES**

• **AIRFLOW**

Measuring range	From 40 to 3500 m <sup>3</sup> /h
Accuracy*	3% of the measurement ±10 m <sup>3</sup> /h
Resolution	1 m <sup>3</sup> /h

• **AIR VELOCITY**

Measuring range	From 0.2 to 10 m/s
Accuracy*	±3% of the measured value ±0.04 m/s
Resolution	0.01 m/s up to 3 m/s and 0.1 m/s above

• **TEMPERATURE (on the base)**

Measuring range	From 0 to 50°C
Accuracy*	2% of the measured value ±0.1 °C
Resolution	0.1°C


• **TEMPERATURE THERMOCOUPLE (on the micromanometer)**

Thermocouple type	K, J, T, S
Measuring range	K : from -200 to 1300°C J : from -100 to 750°C T : from -200 to 400°C S : from 0 to 1760°C
Accuracy*	K, J, T : from -200 to 0 °C : ±0.4°C ±0.3 % of reading from 0 to 1300 °C : ±0.4°C S : ±0.6 °C
Resolution	0.1°C

• **PRESSURE**

Measuring range	From -2500 to +2500 Pa
Accuracy*	±0.2% of reading ±2Pa
Resolution	From 0.001 to 0.1 Pa

\*All accuracies indicated in this document were stated in laboratory conditions and can be guaranteed for measurements carried out in the same conditions, or carried out with required compensation.



**FUNCTIONS OF THE MICROMANOMETRE HOUSING**

The electronic housing has the following functions when it is used alone :

**In air velocity and airflow :**

- Selection of the Pitot tube, DeBimo blades, coefficient or measurement grid
- Selection of the section
- Selection of units
- Point/point, automatic or automatic point/point average
- Manual compensation in temperature
- Hold, minimum and maximum values
- Standardized airflow

**In pressure :**

- Manual or automatic autozero
- Selection of units
- Integration of the pressure (from 0 to 9)
- Point/point, automatic or automatic point/point average
- Hold, minimum and maximum values




Figura B.2 – Catálogo do Caudalímetro DBM 610 - Página 2.



