



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ana Carolina Martins Gonçalves Dias da Costa

**Análise e simulação da qualidade do ar  
interior numa sala de cinema usando *CFD***



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Ana Carolina Martins Gonçalves Dias da Costa

**Análise e simulação da qualidade do ar  
interior numa sala de cinema usando *CFD***

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do:

**Professora Senhorinha de Fátima Capela Fortunas  
Teixeira**

**Professor Lúcio Manuel Alves Machado**

## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### **Licença concedida aos utilizadores deste trabalho**



**Atribuição-NãoComercial**

**CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa o final de uma etapa e o início de outra. O caminho percorrido até aqui só foi possível graças a todas as pessoas que me apoiaram e que, de uma forma ou de outra, realizaram esta caminhada ao meu lado.

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores. À Professora Senhorinha Teixeira por todo o apoio, disponibilidade e ajuda, mas principalmente por sempre ter acreditado em mim. Não tenho palavras para tamanha sensibilidade e compreensão. Ao Professor Lúcio Machado por toda a disponibilidade e auxílio ao longo deste percurso.

À minha amiga Ana Marta Carneiro, um verdadeiro ser incrível, que me orientou e auxiliou em todas as etapas do início ao fim.

Ao Doutor Nelson Rodrigues por todo o auxílio e apoio prestado, principalmente nas medições experimentais e com o *software Ansys Fluent*.

À Inês Teixeira pelo incentivo e auxílio prestado.

Ao Thiago Cardoso e ao complexo do Cinemax Penafiel pela disponibilidade, atenção e colaboração, uma vez que de outra forma este estudo não seria possível.

Ao Professor José Carlos Teixeira pelo incentivo e por toda a disponibilidade desde o início ao fim do estudo.

Às minhas amigas e companheiras de curso, Mariana Souto, Ana Carolina Pereira e Marisa Silva que sempre me ajudaram e me apoiaram.

Aos meus pais e aos meus irmãos por toda a motivação, carinho e apoio que me prestaram ao longo da minha vida, acreditando sempre em mim e fornecendo todas as condições para a realização desta dissertação.

À minha família que sempre esteve do meu lado e sempre teve uma palavra de incentivo e de conforto.

Aos meus amigos que fazem parte de mim, sem eles este percurso não teria sido a tamanha aventura fenomenal que se tornou.

E por último, ao CDRC Tebosa, a minha equipa e uma casa para mim.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

Atualmente existe uma necessidade cada vez maior de avaliar a qualidade do ar interior (QAI), uma vez que as pessoas passam grande parte do seu tempo dentro dos edifícios. A QAI é influenciada por fatores como a temperatura, humidade relativa, velocidade do ar e a existência de poluentes, odores e poeiras. Desta forma, um bom sistema de extração de ar é essencial para obter-se uma boa QAI, garantindo assim requisitos mínimos de saúde e de conforto.

A presente dissertação tem como objetivo analisar a QAI de uma sala de cinema, assim como avaliar o conforto térmico de um utilizador no espaço em questão. Desta forma, foi realizado um levantamento de informação a fim de permitir a caracterização do sistema de ventilação do complexo e de um conjunto de variáveis que podem afetar o conforto do ocupante. A recolha de informação incluiu a medição experimental das variáveis relacionadas com o ambiente térmico e o cálculo de índices de conforto térmico. O espaço foi modelado utilizando o *software Ansys Fluent*, ferramenta *CFD – Computational Fluid Dynamics*. Este estudo contempla três simulações, sendo que numa primeira instância realizou-se a simulação sem a presença de pessoas na sala e foi feita a validação dos resultados experimentais. A segunda simulação visa estudar a influência das pessoas nos resultados obtidos, assim considerou-se a temperatura e a humidade da superfície da pele dos ocupantes. Numa terceira fase, uma vez que o fluido foi considerado ar, sendo este uma mistura de espécies, foi então considerada a adição de  $\text{CO}_2$  libertada na expiração dos ocupantes. Assim, a insuflação de ar húmido esteve presente nas três simulações e destas resultaram os contornos dos campos de velocidade, temperatura, humidade relativa, frações mássicas de  $\text{H}_2\text{O}$  e de  $\text{CO}_2$  e do índice de conforto térmico, *PMV – Predicted Mean Vote*.

Considerando os resultados obtidos, é possível concluir que o *PMV* apresenta um valor mais elevado na presença de pessoas, uma vez que o valor de temperatura definido em cada lugar ocupado é  $33\text{ }^\circ\text{C}$ . Concluiu-se ainda que o ar insuflado facilita a dispersão de  $\text{CO}_2$ . Por fim verificou-se que o caudal à entrada se encontra dentro dos parâmetros requisitados pela legislação portuguesa de caudais mínimos de ar novo.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Qualidade do ar interior; Conforto Térmico; *CFD*; Sala de cinema

## **ABSTRACT**

Currently there is an increasing need to assess indoor air quality (IAQ), as people spend much of their time inside buildings. IAQ is influenced by factors such as temperature, relative humidity, air velocity and the existence of pollutants, odours and dust. This way, a good IAQ is essential for the extraction of pollutants, microorganisms, among others, thus ensuring minimum health and comfort requirements.

The present dissertation aims to analyse the IAQ of a movie theatre, as well as to evaluate the thermal comfort of a user in the space in question. Thus, a survey of information was conducted in order to allow the characterisation of the ventilation system of the complex and of a set of variables that may affect the occupant's comfort. The information collected included the experimental measurement of variables related to the thermal environment and the calculation of thermal comfort indices. Subsequently, the space was modelled using Ansys Fluent software, a CFD - Computational Fluid Dynamics. This study includes three simulations, being that the insufflation of humid air is present in all three. Firstly, the simulation was carried out without the presence of people in the room and the validation of the experimental results was performed. The second simulation was performed in order to study the influence of people on the results obtained, so the temperature and the humidity of the occupants' skin surface were considered. Since the fluid was considered to be air, which is a mixture of species, the third simulation took into account the CO<sub>2</sub> released during the exhalation of the occupants. From these simulations resulted the contours of the velocity fields, temperature, relative humidity, mass fractions of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> and the thermal comfort index, PMV - Predicted Mean Vote.

Considering the results obtained, it is possible to conclude that the PMV presents a higher value in the presence of people, since the temperature value defined in each occupied place is 33 °C. It was also concluded that the insufflated air facilitates the CO<sub>2</sub> dispersion. Finally, it was verified that the flow rate at the inlet is within the parameters required by the portuguese legislation for minimum flow rates of new air.

## **KEYWORDS**

Indoor Air Quality; Thermal comfort; CFD; Movie theatre

# ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas.....	x
Lista de Símbolos.....	x
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos da Dissertação.....	3
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. Qualidade do ar interior e conforto térmico.....	4
2.1. Qualidade do Ar Interior.....	4
2.2. Renovação do Ar Interior.....	7
2.3. Caudais de Ar Novo.....	7
2.4. Ventilação.....	9
2.5. Conforto Térmico.....	11
2.6. Enquadramento legal.....	15
2.6.1. Normas.....	15
2.6.2. Decretos-lei.....	16
2.6.3. Regulamentos.....	16
2.7. Revisão da literatura.....	17
3. Caso de Estudo.....	20
3.1. Descrição da sala do cinema.....	20



3.2.	Medições Experimentais .....	21
3.3.	Distribuição da Ocupação .....	24
4.	Simulação <i>CFD</i> .....	25
4.1.	<i>Computational Fluid Dynamics - CFD</i> .....	25
4.2.	Modelo matemático .....	28
4.2.1.	Equações de conservação .....	28
4.2.2.	Modelos de Turbulência .....	29
4.2.3.	Energia .....	31
4.2.4.	Transporte de Espécies .....	31
4.3.	Método dos Volumes Finitos .....	32
4.4.	Geometria e malha .....	32
4.5.	Casos Estudados .....	35
4.5.1.	<i>Setup</i> .....	35
4.5.2.	<i>Solver</i> .....	37
5.	Resultados e Discussão .....	39
5.1.	Sala com insuflação de ar húmido .....	39
5.1.1.	Resultados .....	39
5.1.2.	Validação experimental .....	42
5.2.	Influência da Ocupação .....	43
5.3.	Dispersão de CO <sub>2</sub> libertado .....	46
6.	Conclusões e trabalho futuro .....	48
6.1.	Principais conclusões .....	48
6.2.	Perspetivas e trabalhos futuro .....	49
	Bibliografia .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Sala 2 do complexo de cinema do Cinemax Penafiel.....	20
Figura 2 - Representação da geometria da sala de cinema, modelada no programa <i>Ansys Fluent</i> , com os pontos de medição selecionados a vermelho.....	21
Figura 3 - Representação da estação climática <i>Heat Shield</i> da marca LSI Lastem. ....	22
Figura 4 - Medição da velocidade do ar numa saída através do termoanemómetro TSI Velocicheck Modelo 8330.....	23
Figura 5 - Distribuição da ocupação na planta da sala (Rodrigues et al. 2019). ....	24
Figura 6 - Etapas de um código em <i>CFD</i> (Teixeira, 2021). ....	26
Figura 7 - Etapas de uma simulação (Carneiro, 2022). ....	27
Figura 8 - Representação da sala de cinema modelada e as respetivas condições de fronteira. ....	33
Figura 9 - Representação da malha utilizada na simulação da sala de cinema (Rodrigues et al., 2019). .....	35
Figura 10 - Planos analisados: A - Plano vertical na cota 8.5m (eixo z); B - Plano horizontal na fila F. .	39
Figura 11 - Contornos dos campos de velocidade na sala de cinema no plano vertical A. ....	40
Figura 12 - Contorno da humidade relativa no plano vertical A.....	40
Figura 13 - Campos de temperatura na sala de cinema no plano A. ....	41
Figura 14 - Campos de <i>PMV</i> simulados na sala de cinema no plano vertical A. ....	42
Figura 15 - Contorno da temperatura no plano horizontal B.....	43
Figura 16 - Contorno da velocidade com a presença de pessoas no plano vertical A. ....	44
Figura 17 – a) Campos de temperatura com a presença de pessoas no plano vertical A; b) Secção com <i>zoom</i> nos lugares. ....	44
Figura 18 - Campos de <i>PMV</i> simulados na sala de cinema com a presença de pessoas no plano vertical A.....	45
Figura 19 - Contorno da humidade relativa com a presença de pessoas no plano vertical A. ....	45
Figura 20 - Campos de velocidade simulados na sala de cinema com introdução de CO <sub>2</sub> no plano vertical A.....	46
Figura 21 - Campos de temperatura simulados na sala de cinema com a introdução de CO <sub>2</sub> no plano vertical A. ....	46
Figura 22 - Campos de concentração de CO <sub>2</sub> simulados na sala de cinema no plano vertical A. ....	47

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos (Portaria n.º 353-A/2013, 2013). .....	6
Tabela 2 - Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, [m³/(hora.ocupante)] (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020).....	8
Tabela 3 - Caudal mínimo de ar novo em função da carga poluente devida ao edifício [m³/(hora.m²)] (Portaria n.º 353-A/2013 2013). .....	8
Tabela 4 - Escala de <i>PMV</i> de sete pontos da sensação térmica (ISO 7730:2005, 2005). .....	14
Tabela 5 - Valores de <i>PPD</i> associados à escala <i>PMV</i> (ISO 7730:2005, 2005). .....	15
Tabela 6 - Revisão da literatura. ....	18
Tabela 7 - Resultados experimentais nos pontos selecionados. ....	23
Tabela 8 - Resultados do <i>PMV</i> e <i>PPD</i> . ....	24
Tabela 9 - Modelos de turbulência disponíveis no <i>Ansys Fluent</i> (Carneiro, 2022). ....	30
Tabela 10 - Comparação dos valores experimentais e simulados nos lugares. ....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Descrição</b>
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
<i>ASHRAE</i>	<i>American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CSV</i>	<i>Comma-separated values</i>
<i>DNS</i>	<i>Direct Numerical Simulation</i>
<i>ISIAQ</i>	<i>International Society of Indoor Air and Climate</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LES</i>	<i>Large Eddy Simulation</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
OMS	Organização Mundial de Saúde
<i>PMV</i>	<i>Predicted Mean Vote</i>
<i>PPD</i>	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
QAI	Qualidade do Ar Interior
<i>RANS</i>	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
<i>STT</i>	<i>Shear-Stress Transport</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
<i>Clo</i>	Isolamento do Vestuário	[clo]
<i>d</i>	Diâmetro	[m]
<i>D</i>	Diâmetro hidráulico	[m]
<i>D<sub>ω</sub></i>	Termo de difusão cruzada	[m]
<i>E</i>	Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]

$f_{cl}$	Fator da área superficial da roupa	[–]
$F_{jl}$	Fator de form correspondente à fração de energia que deixa a superfície $j$ e que incide na superfície $l$	[–]
$G_b$	Geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade	[kg/s · m <sup>3</sup> ]
$G_k$	Geração da energia cinética da turbulência devido aos gradientes da velocidade média	[kg/s · m <sup>3</sup> ]
$G_\omega$	Geração $\omega.r_\omega$	[kg/s · m <sup>3</sup> ]
$\vec{g}$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$H_a$	Humidade do ar	[g/m <sup>3</sup> ]
$h_c$	Coeficiente convectivo de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> · s]
$H_r$	Humidade relativa	[%]
$I$	Intensidade de turbulência	[%]
$i^{th}$	Espécies	[–]
$J$	Difusão de espécies	[W/m <sup>2</sup> · s]
$\vec{J}_i$	eFluxo de difusão da espécie $i$	[kg/m <sup>2</sup> s]
$k$	nergia turbulenta por unidade de massa	[m <sup>2</sup> · s <sup>2</sup> ]
$k_{eff}$	Condutibilidade efetiva	[W/m · K]
$k_t$	Condutibilidade térmica turbulenta	[W/m · K]
$l$	Superfície	[–]
$l_{cl}$	Isolamento da roupa	[m <sup>2</sup> · K/W]
$M$	Taxa metabólica gerada pelo organismo	[W/m <sup>2</sup> ]
$N$	Número total de espécies presentes no sistema	[–]
$N^{th}$	Espécie de preenchimento	[–]
$p_a$	Pressão parcial do vapor de água	[Pa]
$Re$	Número de Reynolds	[–]
$R_i$	Rácio de produção total da espécie $i$	[–]
$S_h$	Fonte externa de geração de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_i$	Rácio de criação por adição da espécie dispersa mais fontes definidas pelo utilizador	[–]
$S_n$	Fonte de massa adicionado à fase contínua em simulação	[kg/s · m <sup>3</sup> ]
$S_k$	Termo definido pelo utilizador	[W/m <sup>3</sup> ]
$S_\omega$	Termo definido pelo utilizador	[W/m <sup>3</sup> ]

SFP	Potência específica	[W/(m <sup>3</sup> /s)]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura absoluta	[°C]
$T_a$	Temperatura do ar	[°C]
$T_g$	Temperatura de globo	[°C]
$T_r$	Temperatura radiante	[°C]
$t_{cl}$	Temperatura superficial da roupa	[°C]
$u$	Direção da componente velocidade	[m/s]
$v_a$	Velocidade do ar	[m/s]
$v_{air}$	Velocidade relativa do ar	[m/s]
$\vec{v}$	Vetor velocidade	[m/s]
$Y_i$	Fração mássica das espécies $i$	[–]
$Y_M$	Variação da dilatação na turbulência compressível	[–]
$\overline{\tau_{eff}}$	Tensor de tensões efetivo	[Pa]

### Símbolos gregos

$\varepsilon$	Dissipação de turbulência por unidade de massa	[m <sup>2</sup> · s <sup>2</sup> ]
$\omega$	Taxa de dissipação específica	[s <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[Pa · s]
$\rho$	Massa volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de <i>Stefan-Boltzmann</i>	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

O mundo está ciente que a poluição do ar exterior provoca danos severos no ambiente e na saúde; porém não existe a mesma consciência em relação à poluição do ar interior que também pode causar efeitos bastante significativos. Até ao final dos anos 60, o foco na qualidade do ar estava centrado no exterior, pois a poluição do ar exterior era considerada responsável por provocar efeitos prejudiciais na saúde. No início dos anos 70, os cientistas começaram a investigar as possíveis causas de reclamações sobre ambientes de trabalho em espaços fechados. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency, EPA* ou *USEPA*) realizou estudos de exposição humana a poluentes do ar em que verificaram que os níveis internos de muitos poluentes podem ser duas a cinco vezes, e em alguns casos mais de 100 vezes, maiores do que os níveis externos (Zhang, 2004). Nas últimas décadas, a população mundial ficou cada vez mais exposta a poluentes do ar interior em virtude de diversos de fatores tais como a construção de edifícios mais herméticos, redução nas taxas de ventilação para economizar energia, utilização de materiais de construção, móveis sintéticos e uso de produtos de higiene pessoal formulados quimicamente (pesticidas, tintas de impressão, produtos de limpeza domésticos, entre outros). Estudos realizados pela *EPA* e pelo Conselho Científico, agora *Science Advisory Board (SAB)*, consideraram que a poluição do ar interior se encontra entre os cinco principais riscos ambientais para a saúde pública. No seguimento desses estudos, a população ganhou consciência que a qualidade do ar interior (QAI) é um fator determinante para o seu conforto e para a sua saúde (Zhang, 2004). Assim, torna-se então necessário avaliar a QAI com a finalidade de ventilar os espaços de forma adequada. Além da QAI, é também importante introduzir o conceito de ambiente térmico, uma vez que desempenha um papel fundamental do ponto de vista do conforto e desempenho dos indivíduos em espaços interiores. O ambiente térmico está interligado com um conjunto de variáveis térmicas que influenciam as trocas de calor entre o indivíduo e o ambiente em que este se encontra inserido (Rodrigues et al., 2019). As variáveis ambientais são a temperatura radiante, temperatura do ar, velocidade do ar e humidade relativa (Rodrigues et al., 2019). Além disso, o conforto térmico também é influenciado por variáveis pessoais, nomeadamente, taxa metabólica e isolamento do vestuário, bem como por fatores pessoais, como stress e medicação, entre outros (Rodrigues et al., 2019).

No caso em que o ambiente térmico não é o mais adequado, os indivíduos tendem a mudar o seu comportamento para se adaptarem ao ambiente, sendo que existe uma menor tolerância quanto à

inadequação do ambiente térmico em espaços climatizados quando comparados com espaços naturalmente ventilados (Brager & Dear, 1998). As pessoas passam a maior parte do tempo em ambientes fechados e muitos desses espaços são climatizados, cuja programação dos equipamentos deve ser devidamente regulada, levando em consideração a saúde, o conforto e a produtividade dos respectivos ocupantes (Rodrigues et al., 2019). Ambientes desconfortáveis provocam fadiga, sonolência e agitação que conduzem a uma redução da atenção e concentração.

O caso da atividade específica de assistir a um filme numa sala de cinema exige um ambiente tecnicamente preparado para ser relaxante e confortável. Uma vez que esta atividade resulta de uma experiência sensorial, um ambiente térmico inadequado ou elementos como o som, a iluminação, entre outros podem provocar interferências e quebrar a sintonia estabelecida entre o espectador e a narrativa. Particularmente na questão do ambiente térmico, as variáveis ambientais como o calor radiante, a temperatura, a humidade e a velocidade do ar, devem ser ajustadas através dos sistemas de climatização de acordo com a taxa de ocupação e a temperatura exterior, tendo em consideração que os indivíduos se encontram em repouso, sentados e que o vestuário estará de acordo com a temperatura exterior.

A computação dinâmica de fluidos, em inglês *Computational Fluid Dynamics*, sendo a sigla *CFD* a comumente utilizada, é uma ciência que, através de programas computacionais, produz previsões quantitativas de fenómenos de fluxo de fluido com base nas leis de conservação (conservação de massa, momento e energia) que governam o movimento do fluido. A *CFD* aumentou em importância e precisão, mas as suas previsões nunca são completamente exatas. Como muitas fontes potenciais de erro podem estar envolvidas, é preciso ter cuidado ao interpretar os resultados. Os resultados mostram que as simulações *CFD* são uma ferramenta importante devido à sua capacidade de avaliar o conforto térmico. Arya and Leephakpreeda (2015) com base em experiências *CFD* demonstrou que o nível de conforto térmico é deteriorado em algumas áreas específicas com a instalação de divisões e pode ser melhorado ajustando os parâmetros do ar no difusor de alimentação e localização das grelhas de extração. Aste et al. (2017) avaliaram, em termos de conforto térmico, o desempenho de uma solução de aquecimento local inovadora através do desenvolvimento de um modelo *CFD* 3D com o objetivo de estimar os efeitos de variáveis definidas no conforto térmico humano. Observou-se assim que a temperatura do ar na sala não é significativamente influenciada pelo sistema de aquecimento, no entanto o calor é irradiado diretamente para as pessoas, assegurando condições de conforto.



## **1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação tem como objetivo analisar a qualidade do ar interior (QAI) e o conforto térmico de uma sala de cinema, utilizando ferramentas de *Computational Fluids Dynamics (CFD)*. A simulação do escoamento de ar dentro da sala de cinema foi efetuada utilizando o *software Ansys Fluent*.

Este estudo foi complementado com medições experimentais das variáveis relacionadas com o ambiente térmico que inclui a temperatura do ar, humidade relativa, velocidade do ar e o cálculo dos índices de conforto térmico.

## **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Após ter sido feito o enquadramento do tema e de apresentar os objetivos do presente estudo, segue-se a apresentação da estrutura da dissertação que foi dividida em seis capítulos.

No segundo capítulo é feito um enquadramento teórico dos conceitos que se pretende abordar.

No terceiro capítulo é exposto o caso de estudo com a caracterização do espaço, apresentação das medições de experimentais e o cálculo da distribuição da ocupação.

No quarto capítulo é feita uma introdução às ferramentas de *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, onde são apresentados os modelos matemáticos e o *software Ansys Fluent* que foi utilizado neste estudo. Neste capítulo é apresentada a geometria e malha de apoio às simulações e são descritos os casos estudados com a metodologia *CFD* escolhida.

No quinto capítulo apresentam-se os resultados das simulações e a discussão dos mesmos.

O sexto e último capítulo apresenta um conjunto de conclusões e de perspectivas de trabalhos futuros para o espaço em estudo.

## 2. QUALIDADE DO AR INTERIOR E CONFORTO TÉRMICO

Atualmente, a necessidade de promover um ambiente agradável e fresco tornou-se uma prioridade, sendo que há uma maior exigência do utilizador de um espaço em relação ao conforto. É neste contexto que surge o termo qualidade do ar interior (QAI), diretamente relacionado com os poluentes gerados no interior e exterior capazes de empobrecer a qualidade ambiental de um espaço. No interior as principais fontes de poluição são os materiais utilizados na construção e na envolvente do edifício, assim como os materiais que o compõem no interior. Aliado a isto, a ocupação pelos utilizadores é uma fonte de degradação da qualidade do ar, nomeadamente pelos bioefluentes emitidos. A identificação de todas as possíveis fontes de poluição é essencial para lidar com a QAI, dado que se torna possível atuar de modo a reduzir essas fontes. A ventilação está diretamente associada à qualidade do ar, pois uma renovação do ar interior adequada e eficiente permite o fornecimento de ar fresco e remoção dos poluentes interiores. O conforto térmico também é um dos fatores a que se tem dado mais relevância, visto que os indivíduos passam a maior parte do tempo dentro dos edifícios, em atividades de carácter profissional e de lazer, assim como em repouso/descanso. Por esse motivo, é fundamental garantir as condições térmicas ideais de forma a não ter repercussões na sua produtividade e garantir o conforto e bem-estar dos ocupantes. Assim, é essencial avaliar estes dois parâmetros, a QAI e o conforto térmico, de forma a possibilitar uma intervenção, através da renovação do ar por meios de ventilação natural e/ou mecânica, que evite, previna ou reduza os impactos nos indivíduos, a curto e longo prazo.

### 2.1. QUALIDADE DO AR INTERIOR

A qualidade do ar interior não possui nenhuma definição normalizada, apesar de todos os esforços desenvolvidos pelas mais diversas organizações responsáveis pela elaboração de guias e normas que avaliam este parâmetro e que visam a criação de espaços aceitáveis pela maioria dos ocupantes. Segundo a OMS (Organização Mundial de Saúde) uma QAI aceitável é definida como aquela que contribui para um completo bem-estar, físico, mental e social, não podendo provocar absentismo, doenças ou debilidades, e que acarreta para a entidade benefícios socio-económicos diretos e indiretos (Lopes, 2016). A norma ASHRAE 62.1:2019 define a QAI aceitável como "ar em que não existem contaminantes conhecidos em concentrações nocivas, conforme determinado pelas autoridades competentes, e com o qual uma maioria substancial (80% ou mais) das pessoas expostas não exprime insatisfação" (Heinig, 2020; Lopes, 2016). A qualidade do ar interior é definida no Glossário da *International Society for Indoor Air & Climate (ISIAQ)* como "Um indicador dos tipos e quantidades de poluentes no ar interior que podem

causar desconforto ou risco de efeitos adversos na saúde humana e animal ou danos na vegetação”. Para a sua quantificação recorre-se geralmente ao valor da concentração média de um ou mais poluentes durante um determinado período de exposição, por exemplo, ao longo de um intervalo de tempo equivalente ao horário de trabalho de um dia, 8 horas. No entanto, no caso de poluentes tóxicos, em que um curto período de exposição a concentrações acima de um dado valor limite pode ser fatal, não chega apenas fazer a quantificação a partir do valor da média temporal da concentração, sendo que também é necessário utilizar o valor máximo dessa concentração em intervalos de tempo de referência com durações mais curtas (Júlio, 2020).

Para garantir uma boa QAI no interior dos edifícios existem estratégias, tais como:

- A remoção/diminuição de fontes poluentes;
- A extração localizada;
- A limpeza/filtragem do ar;
- A diluição dos poluentes em ar novo.

A primeira estratégia foca-se na utilização de materiais de construção, de revestimentos e de mobiliário com baixas taxas de emissão de contaminantes, ao passo que a segunda centra a sua atenção para as zonas com fontes de poluentes localizadas, no qual se sabe à partida que possui taxas de emissão elevadas (por exemplo, na zona do fogão numa cozinha). A filtragem e a limpeza do ar são necessárias quando o ar novo exterior apresenta concentrações de poluentes acima do que é recomendado e também no caso do ambiente interior conter múltiplas fontes poluentes de localização não conhecida ou não previsível. Nesta situação em que existem fontes de emissão dispersas e imprevisíveis quanto à sua localização, o tratamento também é feito através da diluição dos poluentes com ar novo, ou seja, por ventilação.

Com base no Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) contido no Decreto-Lei n.º 79/ 2006 (2006), os principais poluentes originados pela atividade humana são o vapor de água, a humidade relativa e o dióxido de carbono. O vapor de água dificilmente consegue sair para o exterior, aliado ao facto das superfícies impermeáveis e as pontes térmicas favorecerem bastante as condensações, torna-se assim um dos principais agentes responsáveis pela fraca qualidade do ar interior dos edifícios. A humidade relativa do ar interior pode influenciar direta ou indiretamente a atividade dos ocupantes. Elevados valores de humidade relativa provocam desconforto, dado que inibem a transpiração da pele, promovem o desenvolvimento de bolores e ácaros causadores de alergias, irritações e, em casos mais graves, asma. Enquanto que baixos valores de humidade relativa podem

provocar sensações de secura, infecções das vias respiratórias, irritação na pele e nas membranas mucosas.

Em relação ao dióxido de carbono que é produzido pelo metabolismo e atividade humana, em que o ser humano na respiração expira cerca de 4-6% de CO<sub>2</sub> do volume total da respiração, apresenta normalmente baixas concentrações no interior dos edifícios (Li et al., 2022). Porém, no caso de ocorrerem concentrações elevadas a respiração pode ser afetada e pode causar ainda dores de cabeça, sonolência, fadiga, náuseas, dificuldades de concentração, entre outros. Na Tabela 1 encontram-se os limiares de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos.

Tabela 1 - Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos (Portaria n.º 353-A/2013, 2013).

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância (MT) [%]
Partículas em suspensão (fração PM <sub>10</sub> )	[µg/m <sup>3</sup> ]	50	100
Partículas em suspensão (fração PM <sub>2,5</sub> )	[µg/m <sup>3</sup> ]	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVs)	[µg/m <sup>3</sup> ]	600	100
Monóxido de carbono (CO)	[mg/m <sup>3</sup> ]	10	-
	[ppmv]	9	-
Formaldeído (CH <sub>2</sub> O)	[µg/m <sup>3</sup> ]	100	-
	[ppmv]	0,08	-
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	[mg/m <sup>3</sup> ]	2250	30
	[ppmv]	1250	-
Radão	[Bq/m <sup>3</sup> ]	400	-

## Humidade

O nível de humidade é um fator determinante na qualidade do ar interior e consequentemente no conforto térmico, uma vez que o ser humano sente-se confortável numa determinada faixa de humidade e fora dessa faixa encontra-se em desconforto. Assim sendo torna-se essencial contabilizar os níveis de humidade para a qualidade do ar interior tanto para estudos experimentais, como para estudos numéricos (Rodrigues, 2017).

A humidade desempenha um papel crucial no bem-estar do ser humano, dado que contribui para a capacidade do corpo em arrefecer através da transpiração. Altos valores de humidade inibem a transpiração ao nível da pele, afetando assim o bem-estar, como também facilitam a propagação de microrganismos podendo assim causar podridão e odores desagradáveis. Nos edifícios, quando a humidade presente no ar interno é elevada podem gerar-se problemas como mofo e, consequentemente, o apodrecimento de materiais. Por outro lado, níveis baixos de humidade podem conduzir a um aumento de infecções do sistema respiratório. A baixa humidade também é responsável por choques devido à condutividade elétrica reduzida de roupas, sujidade, entre outros (Rodrigues, 2017).

## **2.2. RENOVAÇÃO DO AR INTERIOR**

O propósito de atingir uma boa qualidade do ar interior e de combater a prevenção de possíveis patologias associadas a humidade e condensações, faz com que seja necessário a renovação de ar interior. A renovação do ar interior pode ser realizada de forma natural ou mecânica e está diretamente associada ao intervalo de tempo que este ar vai estar no interior de um determinado espaço, dado que assim se encontra mais ou menos poluído. Em contrapartida, a renovação do ar interior origina perdas térmicas consideráveis, uma vez que retira ar “aquecido” e também porque introduz ar “fresco” à temperatura exterior.

Para que a qualidade do ar interior melhore através da renovação de ar deve ter-se em conta o conforto térmico. Assim, o caudal de ventilação do edifício deve ser tal que consiga assegurar a ausência de condensações superficiais, manter a humidade relativa dentro de valores de conforto e manter as concentrações máximas dos contaminantes dentro dos parâmetros da legislação em vigor.

## **2.3. CAUDAIS DE AR NOVO**

O caudal de ar novo, aquando do dimensionamento de um sistema de ventilação, deve ser o necessário para garantir a QAI e de maneira que os consumos de energia associados sejam os mais baixos possíveis, sendo que existem valores mínimos do caudal de ar novo que têm de ser respeitados.

Conforme previsto e nos termos apresentados na portaria prevista no n.º 12 do artigo 6.º do Decreto-Lei n.º 101 -D/2020 (2020) de 7 de dezembro, quando aplicável, os edifícios de habitação e os espaços dos edifícios de comércio e serviços encontram-se sujeitos ao cumprimento de requisitos no que respeita a caudais de ar novo.

O caudal mínimo de ar novo a que os espaços dos edifícios de comércio e serviços estão sujeitos corresponde ao valor máximo obtido através da comparação dos seguintes critérios, calculado de acordo com a metodologia prevista no Manual SCE (Sistema de Certificação Energética dos Edifícios) nos termos do n.º 4 do artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 101 -D/2020 (2020), de 7 de dezembro:

- (i) Critério de ocupação, determinado através de um dos seguintes métodos:
  - a) Método prescritivo, cujos valores de caudal mínimo de ar novo para diluição da carga poluente devida aos ocupantes devem ser obtidos através da Tabela 2 para diferentes tipos de espaço;

Tabela 2 - Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, [m<sup>3</sup>/(hora.ocupante)] (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020).

Tipo de espaço	Tipo de atividade	Caudal de ar novo [m <sup>3</sup> /(hora.ocupante)]
Quartos, dormitórios e similares . . . . .	Sono . . . . .	16
Salas de repouso, salas de espera, salas de conferências, auditórios e similares, bibliotecas.	Descanso . . . . .	20
Escritórios, gabinetes, secretarias, salas de aula, cinemas, salas de espetáculo, salas de refeições, lojas e similares, museus e galerias, salas de convívio, salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	Sedentária . . . . .	24
Salas de jardim de infância e pré-escolar e salas de creche . . . .		28
Laboratórios, <i>ateliers</i> , salas de desenho e trabalhos oficinais, cafés, bares, salas de jogos e similares.	Moderada . . . . .	35
Pista de dança, salas de ginásios, salas de <i>ballet</i> e similares . . .	Ligeiramente alta . . . . .	49
Salas de musculação, salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares.	Alta . . . . .	98

b) Método analítico, cujos valores de caudal mínimo de ar novo necessário para cumprir o limiar de proteção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante o período de ocupação, em função do respetivo perfil e das características físicas dos ocupantes, devem ser obtidos por aplicação da metodologia prevista no Manual SCE (Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios).

(ii) Critério do edifício, cujos valores de caudal mínimo de ar novo para diluição da carga poluente devido ao próprio edifício e em função do tipo de materiais usados na construção, nos revestimentos das superfícies e no mobiliário devem ser obtidos através da Tabela 3 para diferentes situações do edifício.

Tabela 3 - Caudal mínimo de ar novo em função da carga poluente devida ao edifício [m<sup>3</sup>/(hora.m<sup>2</sup>)] (Portaria n.º 353-A/2013 2013).

Situação do edifício	Caudal de ar novo [m <sup>3</sup> /(hora.m <sup>2</sup> )]
Sem atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos . . . . .	3
Com atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos <sup>(1)</sup> . . . . .	5
Com espaços em que a existência predominante (superior a 75 %) de materiais de baixa emissão poluente <sup>(2)</sup> . . . . .	2
Piscinas (em que a área de referência é a área do plano de água) . . . . .	20

<sup>(1)</sup> Lavandarias, perfumarias, farmácias, salões de beleza, lojas de animais, salas de aula de artes, laboratórios de escolas, estabelecimentos comerciais de mobiliário e de madeiras e outros similares.

<sup>(2)</sup> Para a verificação da existência predominante de materiais de baixa emissão poluente deve ser considerada apenas a área exposta de revestimento de paredes, pavimentos e tetos, incluindo superfície exposta de mobiliário fixo, considerando-se neste caso a seguinte tipologia de materiais:

(i) Que pela sua natureza não emitem poluentes, designadamente cerâmicos ou pétreos sem aplicação de produtos de revestimento, como tijoleira, azulejo e similares, com exceção do granito não selado, materiais metálicos, como aço, alumínio e similares, e vidro;

(ii) Apresentam certificado ou rótulo que demonstre explicitamente as suas características de baixa emissão poluente, emitido por sistemas reconhecidos no espaço comunitário, devendo a conformidade ser demonstrada pela apresentação de um relatório de ensaio, emitido por um laboratório acreditado para o efeito de acordo com a Norma EN ISO/IEC 17025.

## 2.4. VENTILAÇÃO

A ventilação surge como uma estratégia fundamental no controlo da qualidade do ar interior. Define-se ventilação como um processo em que se fornece ou se remove ar de um determinado espaço para controlar a qualidade do ar e o ambiente térmico. A ventilação é de extrema importância para fornecer o oxigénio ao metabolismo humano e para diluir as concentrações dos gases bioefluentes e de outros poluentes químicos, físicos ou biológicos que são emitidos ou admitidos no interior dos edifícios (Júlio, 2020).

No Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) são previstos valores de caudais mínimos, sendo que para serem cumpridos os edifícios de comércio e serviços devem ser dotados de um sistema de ventilação, podendo este ser um sistema de ventilação natural, sistema mecânico ou sistema misto, sendo este último uma combinação de ambos.

Um sistema de ventilação natural é formado por componentes tais como aberturas, passagens de ar interiores e condutas, permanentes ou controláveis, que proporcionam, em termos médios, a renovação do ar de forma natural exclusivamente promovida pelos efeitos da diferença de temperatura e ação do vento, sem qualquer tipo de sistema mecânico. Assim, o caudal de ar novo efetivo nos espaços está dependente dos efeitos naturais e da atuação dos ocupantes nas folhas móveis dos vãos (Portaria n.º 353-A/2013, 2013). Estes sistemas devem garantir uma distribuição adequada das aberturas do espaço de forma a proporcionar a renovação do ar interior e evitar zonas de estagnação, e ainda ser providos de meios que limitem a renovação excessiva de ar, por exemplo devida à ação do vento intenso (Portaria n.º 353-A/2013, 2013). No que concerne à ventilação mecânica, esta recorre a sistemas e equipamentos mecânicos que promovem a renovação do ar interior por extração e/ou insuflação de ar exterior ou de ar tratado numa mistura com ar novo vindo do exterior. Neste tipo de ventilação deve ser assegurada a distribuição homogénea do ar novo em toda a zona ocupada do espaço e ser dotado de sistemas apropriados para a renovação do ar interior que garantam o caudal mínimo de ar novo de acordo com o previsto no RECS. Assim, os sistemas mistos de ventilação são então uma combinação dos sistemas de ventilação natural e mecânica, sujeitos a controlo por parte dos utilizadores ou automático, em que os equipamentos mecânicos, designadamente, hote e extractores individuais de casas de banho, intensificam a ventilação nos compartimentos de serviço sempre que necessário (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020). Este tipo de sistema pode incluir um sistema de ventilação natural combinado com um sistema de ventilação mecânica totalmente independente do sistema num todo. Assim, a ventilação natural é utilizada e o sistema de ventilação mecânico é acionado quando a ventilação natural não for suficiente para manter uma boa QAI.

Para a verificação do requisito de caudal mínimo de ar novo ou de extração de ar, nos casos aplicáveis, é necessária a correta caracterização do sistema de ventilação e dos seus componentes, mediante os seguintes parâmetros:

- Características da envolvente que têm impacto nas infiltrações de ar;
- Características dos componentes do sistema de ventilação natural, designadamente, aberturas e condutas;
- Consumo de energia dos ventiladores e valores da potência específica de ventilação (*SFP*);
- Eficiência de sistemas de recuperação de calor;
- Arrefecimento gratuito, pela abertura de janelas e pelo controlo dos sistemas de ventilação, aplicável apenas em edifícios de comércio e serviços;
- Perfis de utilização e sistemas de controlo do funcionamento da ventilação, aplicável apenas em edifícios de comércio e serviços;
- Caudais de ar novo;
- Caudais de extração de ar;
- Eficácia de remoção de poluentes (Decreto-Lei n.º 101 - D/2020, 2020).

Posteriormente à seleção de uma solução de ventilação, diversos fatores afetam o desempenho final do sistema e a qualidade do ar interior. A má conceção inicial de uma solução de ventilação selecionada pode dever-se a várias razões, tais como erro no dimensionamento, desempenho reduzido devido à falta de manutenção, falta de conhecimento do operador ou a utilização intencional reduzida para poupar energia ou reduzir o ruído e tudo isto pode ser prejudicial para a saúde dos ocupantes.

Os sistemas de ventilação têm a função de fornecer ar novo para os ocupantes das habitações, para os aparelhos de combustão e assegurar a extração dos produtos da combustão. As condições insuficientes de ventilação transmitem reflexos bastante negativos na qualidade do ar interior. A admissão do ar exterior tem como objetivo diluir e/ou remover substâncias poluente e poluentes específicos de fontes especificadas, fornecer oxigénio aos ocupantes e controlar a humidade relativa interior.

Relativamente a estudos experimentais, a ventilação é geralmente associada à extração de poluentes e é estudada a eficiência do equipamento de extração, embora muitas vezes seja independente das condições térmicas (Teixeira, 2021). A ventilação é normalmente formulada levando em conta o tipo de atividade, espaço e número de pessoas, porém mais fatores podem ser tomados em consideração tais como diferentes tipos de sistemas de ventilação, tamanhos e aplicações, e ainda diferentes dinâmicas dos fluxos de ar resultantes (Nastase et al., 2017). Apesar do progresso, continua a ser um desafio utilizar de forma adequada um estudo numérico para prever as condições térmicas e



comportamento da ventilação numa sala, principalmente em grandes volumes, como átrios, onde existem diferentes estratégias de ventilação durante os períodos de insolação e ausência de luz solar (Teixeira 2021).

## 2.5. CONFORTO TÉRMICO

A sensação de conforto térmico pode ser definida como o estado de espírito em que um indivíduo se encontra satisfeito com o ambiente envolvente, isto é, uma pessoa está termicamente confortável quando não sente calor nem frio. A ASHRAE Standard 55 2004 define conforto térmico como a condição da mente que expressa a satisfação de um indivíduo com o ambiente térmico que o rodeia. Segundo Parsons (2002), as variáveis ambientais combinadas com os índices de metabolismo e vestuário (designados por parâmetros individuais), formam os elementos básicos que definem o conforto térmico. O conforto térmico resulta das condições de trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente. Assim, torna-se importante introduzir os conceitos de ambiente térmico e equilíbrio térmico.

O ambiente térmico resulta de um conjunto de variáveis térmicas que influenciam as trocas de calor entre o indivíduo e o meio em que este se encontra inserido (Dias, 2013). Yao et al. (2007) assegura que o ambiente térmico é o resultado da interação de parâmetros ambientais, sendo estes:

- Temperatura do ar ( $T_a$ ) - Segundo a ASHRAE Standard 55 (2004) representa a temperatura que envolve o ocupante, normalmente expressa em graus centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ). É um parâmetro ambiental que intervém na determinação das trocas de calor por convecção ao nível do indivíduo, podendo ser medida através de termómetros de dilatação de líquidos (mercúrio, álcool), termopares (baseados na geração de uma força eletromotriz), termístores (formados por semicondutores) e termómetros de resistência (Miguel, 2014);
- A temperatura radiante ( $T_r$ )- é definida pela ASHRAE Standard 55 (2004) como a temperatura de superfície uniforme de um invólucro imaginário preto em que um ocupante trocaria a mesma quantidade de calor radiante, como no espaço real não uniforme. A temperatura radiante média pode ser diferente da temperatura do ar, resultado da temperatura das superfícies, sendo que é uma variável calculada em função da temperatura de globo, temperatura do ar, velocidade do ar e coeficientes de ponderação (Miguel, 2014). Intervém nas trocas de calor por convecção ao nível do indivíduo e resume a exposição do indivíduo aos fluxos de radiação em um determinado ambiente (Cardoso, 2017);
- Velocidade do ar ( $v_a$ ) – corresponde à taxa de circulação de ar num determinado ponto, sem ter em consideração a sua direção (ASHRAE Standard 55, 2004). A velocidade do ar é expressa em metros

por segundo (m/s) e intervém na determinação das trocas de calor por convecção entre o indivíduo e o ambiente (ISO 7730:2005 2005);

- Humidade do ar ( $H_a$ ) - representa a quantidade de água no ar em termos absolutos, exprime-se normalmente em gramas por metro cúbico ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) e é um fator que intervém na determinação das trocas de calor por evaporação ao nível do indivíduo (Miguel, 2014). O teor real de vapor em relação ao teor máximo possível para uma determinada temperatura do ar e pressão atmosférica, designa-se de humidade relativa do ar ( $H_r$ ) (Cardoso, 2017).

Considerando que uma das condições para o bem-estar e conforto é manter o equilíbrio térmico entre o corpo humano e o meio ambiente, então a temperatura interior do corpo deve ser mantida aproximadamente a  $37^\circ\text{C}$ . A homeotermia é atingida sempre que o fluxo de calor produzido pelo organismo for igual ao fluxo de calor cedido ao ambiente (Miguel, 2014). No entanto, equilíbrio térmico não deve ser confundido com conforto térmico, uma vez que este pode ser atingido mesmo em condições de desconforto, devido aos mecanismos de termorregulação do organismo. Isto é, um indivíduo pode estar em neutralidade térmica, mas se estiver exposto a um campo assimétrico de radiação, não estará em conforto térmico. As trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente realizam-se através das seguintes formas:

- Convecção - calor trocado para o ambiente devido à diferença de temperatura entre a pele/roupa e o ar ambiente;
- Radiação - calor trocado diretamente entre a pele/roupa e as superfícies envolventes devido às respetivas diferenças de temperatura;
- Respiração - calor trocado com o ambiente devido à diferença de temperatura entre o ar que se inspira e o ar que se expira;
- Evaporação - Calor dissipado para o ambiente pela evaporação de água à superfície da pele (Dias 2013).

Em termos experimentais também é possível avaliar o conforto térmico através de sensores que avaliam a temperatura de operação, humidade relativa, temperatura do ar, velocidade do ar e taxa de corrente do ar para cada variável e estimar o conforto térmico em relação à vazão na superfície (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020).

No entanto, é possível através de métodos numéricos estimar o conforto térmico tendo em consideração a mistura de ar ventilado e o nível de humidade presente num determinado espaço (Portaria n.º 353-A/2013, 2013). Por outro lado, o estudo numérico também pode ser baseado na análise do ar fornecido, incluindo mudanças térmicas, radiação incidente e nível de humidade (Miguel, 2014).

Existem várias equações de avaliação de conforto térmico, porém o método mais utilizado em guias e normas de projeto é o desenvolvido por Fanger (1973). Este método baseia-se na teoria da termorregulação e equilíbrio térmico e define dois índices complementares, *PMV* – *Predicted Mean Vote* (Voto Médio Previsto) e *PPD* – *Predicted Percentage of Dissatisfied* (Porcentagem Prevista de Insatisfeitos).

### ***PMV – Predicted Mean Vote***

O *PMV* é um índice que prevê o valor médio dos votos de um grande grupo de pessoas numa escala de sensação térmica, baseada no equilíbrio térmico do corpo humano. O equilíbrio é alcançado quando o calor produzido e ganho no corpo é igual à perda de calor para o meio ambiente. Num ambiente moderado, o sistema termorregulador humano tenta automaticamente modificar a temperatura da pele e a secreção de suor para manter o equilíbrio térmico (Teixeira, 2021).

Com base na metodologia apresentada na norma ISO 7730:2005 (2005), o *PMV* pode ser calculado considerando variáveis referentes ao ambiente que envolve o corpo humano e variáveis relativas às características do corpo humano. As variáveis a considerar em relação ao ambiente são a temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e humidade. Em relação às características do corpo humano, as variáveis consideradas são a taxa metabólica e o isolamento térmico proporcionado pelo vestuário (Rodrigues, 2017).

O *PMV* pode ser calculado usando as equações 1 a 4, conforme expresso na norma ISO 7730:2005 (2005):

$$PMV = [0.303 \cdot e^{(-0.036 \cdot M)} + 0.028] \cdot (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{para } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290l_{cl} & \text{para } l_{cl} \leq 0.078 \\ 1.05 + 0.645l_{cl} & \text{para } l_{cl} > 0.078 \end{cases} \quad (4)$$

Em que:

$M$  corresponde à taxa metabólica ( $W/m^2$ );

$W$ , é a potência mecânica efetiva ( $W/m^2$ );

$I_{cl}$ , corresponde ao isolamento da roupa ( $m^2 \cdot K/W$ );

$f_{cl}$ , corresponde ao fator da área superficial da roupa;

$t_{cl}$ , temperatura superficial da roupa ( $^{\circ}C$ ).

$t_a$ , temperatura do ar ( $^{\circ}C$ );

$\bar{t}_r$ , temperatura radiante ( $^{\circ}C$ );

$p_a$ , pressão parcial do vapor de água (Pa);

$v_{ar}$ , velocidade do ar m/s;

$h_c$ , corresponde ao coeficiente convectivo de transferência de calor [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];

O resultado obtido é uma previsão do nível de satisfação de uma população para com o ambiente térmico a que estão expostas e este encontra-se compreendido numa escala de sete pontos, conforme apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Escala de *PMV* de sete pontos da sensação térmica (ISO 7730:2005, 2005).

<b>Escala <i>PMV</i></b>	<b>Sensação Térmica Subjetiva</b>
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Nesta escala o 0 corresponde à situação de neutralidade térmica, o -3 à sensação mais fria e o +3 à sensação mais quente. O nível de sensação térmica é subjetivo devido, essencialmente, ao erro associado ao modelo numérico do *PMV* e também à complexidade dos fatores pessoais (Rodrigues, 2017).

### ***PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied***

O *PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied* (Porcentagem Prevista de Insatisfeitos) representa a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas com um determinado ambiente térmico. Este índice encontra-se contemplado na ISO 7730:2005, 2005. A determinação do *PPD* a partir do *PMV* obtém-se através da equação 5 (Oliveira, 2008):

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.00353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)} \quad (5)$$

O *PPD* prevê assim o número de pessoas insatisfeitas com o ambiente térmico, isto é, pessoas que votam muito quente ou muito frio, no *PMV*. O resto das pessoas considera-o ligeiramente quente, neutro, ou ligeiramente frio (Oliveira, 2008). Mesmo numa situação ideal de  $PMV = 0$  existe uma percentagem de insatisfação de 5% (ASHRAE Standard 55, 2004). Na Tabela 5 estão representados os valores de *PPD* associados à escala *PMV*.

Tabela 5 - Valores de *PPD* associados à escala *PMV* (ISO 7730:2005, 2005).

Escaia <i>PMV</i>	Valor de <i>PPD</i> associado [%]
+2	75
+1	25
+0.5	10
0	5
-0.5	10
-1	25
-2	75

## 2.6. ENQUADRAMENTO LEGAL

### 2.6.1. NORMAS

**ISO 7730:2005** Esta norma é aplicada a ambientes térmicos moderados e tem como objetivo a determinação dos índices *PMV* e *PPD* e especificações das condições para conforto. De modo a definir o índice de conforto térmico *PMV* acima descrito, é necessário o conhecimento ou medição dos parâmetros físicos do ambiente (temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e humidade do ar), bem como dos parâmetros pessoais (atividade e vestuário). Nesta norma também é possível ficar a conhecer o índice *PPD* que se refere à percentagem de pessoas insatisfeitas com o meio envolvente.

O desconforto térmico resulta de um aumento ou diminuição de temperatura em várias zonas do corpo. Os fatores que se relacionam com este desconforto são as correntes de ar, assimetria radiante, temperatura do piso e diferença vertical de temperatura. Na versão anterior desta norma o único fator que era abordado eram as correntes de ar, mas com esta versão atualizada consegue-se observar como funciona cada parâmetro. Nesta nova versão também é apresentado um método para avaliação de conforto térmico para intervalos de tempo longos, devido ao ambiente térmico no interior de edifícios não

ser sempre o mesmo e não se conseguir colocar essa temperatura dentro dos limites recomendados (ISO 7730:2005, 2005).

**ANSI/ASHRAE 55:2004** O propósito da norma passa por especificar as combinações e as condições de fatores ambientais térmicos admissíveis para um determinado número de pessoas que frequentem o mesmo espaço. Esta norma foi atualizada em 2013, contendo também um método para determinar quais as condições térmicas aceitáveis em espaços ventilados (ASHRAE Standard 55, 2004).

### 2.6.2. DECRETOS-LEI

**Decreto-Lei n.º 101-D/2020** Este decreto-lei estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCEE), transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944 (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020).

**Decreto-Lei n.º 79/2006** O presente decreto-lei aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), sendo que o regulamento se encontra em anexo no próprio decreto-lei, fazendo parte integrante. Este decreto-lei transpõe parcialmente para a ordem jurídica nacional a Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios (Decreto-Lei n.º 79/2006, 2006).

### 2.6.3. REGULAMENTOS

O conforto térmico está relacionado com o desempenho energético dos edifícios na medida em que se torna importante o edifício ter determinadas características e determinados parâmetros que assegurem esse conforto. A temperatura de conforto térmico nem sempre é constante e varia entre 18 °C e 25 °C. Valores máximos de necessidades energéticas e valores mínimos de taxa de renovação de ar são outros exemplos de parâmetros importantes para se sentir conforto num edifício. Os regulamentos nacionais que têm como objetivo promover e assegurar um melhor desempenho energético são o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

**Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS)** Este regulamento consiste em estabelecer regras que sejam respeitadas no projeto, construção, alteração, operação e manutenção de comércio e serviços e nos seus sistemas técnicos. Determinados requisitos são adotados, nomeadamente para a prevenção de patologias, com o objetivo de promover

uma melhor qualidade do ar interior, uma melhor eficiência energética e de atingir o conforto térmico (Portaria n.º 353-A/2013, 2013).

## **2.7. REVISÃO DA LITERATURA**

Os conceitos teóricos apresentados foram o resultado da recolha de informação da revisão da literatura efetuada. De forma a avaliar a qualidade do ar interior de uma sala de cinema foi feita uma análise de diversos artigos e dissertações.

A Tabela 6 refere alguns dos estudos analisados, apresentando os principais conceitos, métodos utilizados e conclusões.

Tabela 6 - Revisão da literatura.

Autor	Conceitos	Metodologia	Conclusões
(Rodrigues, 2017)	Conforto térmico dos profissionais de saúde em salas de operações; Verificação da precisão dos métodos computacionais no processo.	Avaliação da sensação térmica efetiva através de um questionário; Cálculo do <i>PMV</i> aplicando o índice de Fanger; Medição local das variáveis ambientais; Construção de um modelo numérico para a previsão do ambiente térmico da sala utilizando ferramentas <i>CFD</i> .	A presença humana é um agente ativo no ambiente térmico da sala; Dados simulados para a sala de operações demonstraram uma boa aproximação aos dados medidos na sala de operações; A simulação demonstrou ser uma ferramenta eficaz na demonstração visual de zonas problemáticas para o conforto, através do mapeamento do <i>PMV</i> ; O valor da sensação térmica questionado para a população da sala de operações foi de -0,48 e o <i>PMV</i> calculado de 0,2, correspondendo a uma diferença total de 0,74 valores.
(Cardoso, 2017)	Ambiente térmico e consumo energético de uma sala de cinema; Variáveis ambientais e individuais e outros parâmetros que influenciam o conforto térmico do indivíduo; Índices de conforto térmico <i>PPD</i> e <i>PMV</i> .	Cálculo de índices de conforto térmico; Medição experimental das variáveis relacionadas com o ambiente térmico; Análise subjetiva do conforto térmico através de dois questionários; Simulação energética da sala de cinema recorrendo ao software <i>Energyplus</i> .	A uma temperatura de 20°C, os utilizadores da sala de cinema estariam em desconforto térmico segundo os valores calculados para o <i>PPD</i> e <i>PMV</i> ; O <i>Energy Plus</i> é um <i>software</i> adequado para efetuar simulações energéticas, porém não tem a capacidade de mostrar perfis de distribuição de temperatura na sala, assim como outras informações específicas relativas ao conforto térmico dos ocupantes.
(Alves et al., 2017)	Preocupação com a <i>QAI</i> por parte dos projetistas devido ao facto da população passar a maioria do seu tempo em espaços fechados; Renovação do ar interior é uma medida necessária à manutenção das condições de salubridade interior dos edifícios pelo que deve ser assegurado um mínimo recomendável.	Análise dos vários tipos de edifício de elevado desempenho energético; Exploração das tendências da arquitetura sustentável e de estratégias de ventilação; Metodologias e valores limites legais relativamente à <i>QAI</i>	Possibilidade de encontrar soluções para o desenvolvimento de edifícios sem descorar o conforto dos ocupantes a nível do ambiente interior; Ventilação, <i>QAI</i> e vãos envidraçados estão intrinsecamente relacionados com a arquitetura e projeto de edifícios sustentáveis; O sistema de ventilação e climatização de um espaço terá de manter os níveis da <i>QAI</i> , tendo a capacidade de eliminar possíveis poluentes e fazer a renovação do ar, evitando as correntes de ar frio.



Tabela 6 – Revisão da literatura (continuação).

<p>(Rodrigues et al., 2019)</p>	<p>O ambiente térmico desempenha um papel fundamental no conforto dos indivíduos;          Simulação do fluxo do ar no interior de uma sala de cinema para estudar o conforto térmico;          Caracterização do <i>PMV-PDD</i>.</p>	<p>Medição experimental das variáveis relacionadas com o ambiente térmico;          Questionários; <i>CFD</i>.</p>	<p>Os resultados proporcionaram uma previsão de conforto térmico próximo à neutralidade térmica;          A simulação forneceu informações sobre o ambiente térmico localizado e sobre a influência da presença de pessoas;          A metodologia <i>CFD</i> provou ser uma ferramenta valiosa para o estudo, uma vez que os parâmetros de conforto podem ser facilmente alterados e o efeito conhecido.</p>
<p>(Teixeira, 2021)</p>	<p>Conforto térmico associado a utentes e profissionais de saúde de uma Unidade Hospitalar;          Avaliação da eficácia do sistema de ventilação na remoção de poluentes e extração de partículas;          Determinação do <i>PMV</i>.</p>	<p>Medição experimental das variáveis relacionadas com o ambiente térmico;          Elaboração de três estudos numéricos, um relacionado com o estudo de partículas, outro com o estudo 2D de análise e validação das variáveis necessárias à análise do conforto e um que coloca em prática o estudo feito anteriormente para uma sala existente;          Simulações utilizando <i>CFD</i>.</p>	<p>O trabalho de campo teve um grande contributo na validação dos dados estudados em 2D e permitiu também avaliar a influência de variáveis numa sala de espera, com uma geometria real, assimetrias e condições;          Aumentar o número de amostras e a variabilidade dos dias de experimentação permitem uma maior quantidade de dados para a análise, o que reduz significativamente os erros associados às medições;          Necessidade de considerar a humidade na simulação, pois afeta o conforto térmico e não foi implementado devido a restrições de tempo;          Limitação do estudo devido à entrada e saída de pacientes e funcionários da sala, que influenciam os valores medidos.</p>
<p>(Cabovská et al., 2022)</p>	<p>Estratégias de ventilação daa QAI em escolas com diferentes sistemas de ventilação sendo divididas em categorias: ventilação natural (categoria A), ventilação mecânica balanceado com volume de ar constante (categoria B) ou balanceado com volume de ar variável (categoria C).</p>	<p>Seleção de edifícios e agrupamento em três categorias; Medições experimentais de parâmetros como a temperatura do ar, humidade relativa e concentrações de CO<sub>2</sub>;</p>	<p>As salas de aula obtiveram um desempenho igualmente bom em relação à temperatura e humidade relativa, independentemente do sistema de ventilação; O índice de poluição integrando as concentrações de vários poluentes foi significativamente maior nas salas de aula de categoria A, refletindo uma QAI pior; Os sistemas de ventilação mecânica balanceados com volume de ar variável não teve um desempenho significativamente melhor em relação à QAI do que os sistemas com volume de ar constante.</p>

## 3. CASO DE ESTUDO

### 3.1. DESCRIÇÃO DA SALA DO CINEMA

O espaço em estudo é uma sala do complexo do cinema do Cinemax Penafiel aberto desde 2002, sendo que atualmente é explorado pelo exibidor Cenário Casual Unipessoal, LDA, empresa que iniciou a sua atividade em abril de 2014. O Cinemax Penafiel é formado por 3 salas de cinema com um total de 366 lugares e está inserido no nº 104 de uma galeria comercial na Rua D. António Ferreira Gomes no centro da cidade de Penafiel.

A sala escolhida foi a sala 2, apresentada na Figura 1, pelo facto de ser a maior sala deste complexo, com 170 lugares, estando a sua lotação próxima da capacidade média das Salas Nacionais, 188 lugares (Cardoso, 2017).



Figura 1 – Sala 2 do complexo de cinema do Cinemax Penafiel.

A renovação do ar da sala é realizada através de equipamentos de ar condicionado, uma vez que esta não possui meios que permitam a renovação natural do ar durante as sessões de cinema. A insuflação de ar é efetuada através de seis pontos localizados no teto da sala e a extração através de orifícios sob os assentos das cadeiras. O sistema AVAC é constituído por um equipamento MCQUAY Modelo 75 19 e encontra-se instalado junto à fachada no exterior do edifício. Este equipamento não contém sistema de reaproveitamento ou recirculação de ar, assim o ar da sala é sempre ar novo do

exterior. A temperatura ambiente é fixada em 22 °C e o equipamento apenas é acionado cerca de 10 a 15 min antes do início da sessão.

### 3.2. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

A caracterização do ambiente térmico do espaço em estudo foi realizada através de medições experimentais em setembro de 2022, em pontos previamente selecionados. As medições foram efetuadas sem a presença de pessoas na sala, uma vez que não foi possível, em termos de logística, que estas fossem realizadas durante uma sessão de cinema. Os pontos de medição foram escolhidos com o objetivo de captar as medições em diferentes áreas da sala de cinema, sendo que foi definido a fila F como uma linha média, dado que as filas existem da letra A à letra L (fila mais próxima do ecrã). Desta forma, foram então selecionados os seguintes pontos: A8, local ao centro no ponto mais distante do ecrã; F8 lugar mais central geometricamente da sala; F1 e F15; J8, local ao centro na fila mais em baixo, mais próxima do ecrã. As medições foram feitas ao nível do peito, considerando um cliente no lugar sentado, num tripé de forma a permanecer estável. Na Figura 2 encontra-se a geometria do espaço modelada no *DesignModeler*®, em que estão identificadas as colunas de um a quinze, as filas de A a J e os locais de medição assinalados com os pontos a vermelho.

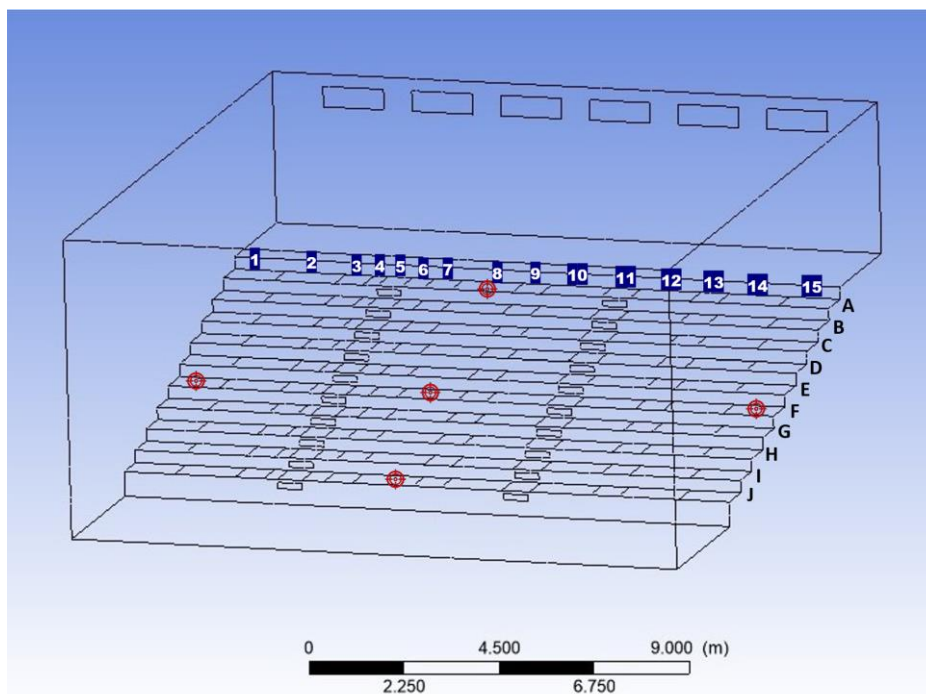


Figura 2 - Representação da geometria da sala de cinema, modelada no programa *Ansys Fluent*, com os pontos de medição selecionados a vermelho.

Para a medição de variáveis em tempo real, é necessário a utilização de alguns instrumentos em que a sua calibração tem muita relevância na precisão dos resultados obtidos. Os instrumentos utilizados

para as medições foram cedidos pelo Departamento de Produção e Sistemas da Universidade do Minho, não havendo alterações na sua calibração. Para as medidas experimentais, foram utilizados os seguintes instrumentos:

Estação climática *Heat Shield* da marca LSI Lastem, sendo que é um sistema de medição compacto que inclui sensores de temperatura radiante, temperatura de bolbo húmido, temperatura relativa e humidade para o cálculo e exibição da temperatura do globo ( $T_g$ ), temperatura de bolbo húmido ( $T_{nw}$ ), temperatura de bolbo seco ( $T_a$ ), humidade relativa ( $H_r$ ) E velocidade do ar ( $v_a$ ). Além disso, se o anemómetro ESV125A estiver conectado, o *Heat Shield* pode calcular diretamente o índice de conforto *PMV-PPD* (LSI, 2022). A estação climática foi colocada com o auxílio de um tripé, considerando um indivíduo sentado num lugar, ao nível do peito. Na Figura 3 encontra-se a estação climática na preparação para as medições.



Figura 3 - Representação da estação climática *Heat Shield* da marca LSI Lastem.

- Termoanemómetro TSI Velocicheck Modelo 8330 que permite medir a velocidade e a temperatura com precisão, confiabilidade e rapidez. O equipamento possui as vantagens de ser pequeno, usufruir de um manuseamento fácil e de obter uma visualização rápida das medidas (Yumpus, 2013). O aparelho contém uma faixa de velocidade de 0 a 20 m/s e encontra-se equipado com um sonda telescópica com altura máxima de 94 cm, permitindo assim o fácil acesso a áreas menos acessíveis (Yumpus, 2013). No estudo em questão o termoanemómetro foi utilizado para medir a velocidade do ar nas saídas e na conduta de ar. Na Figura 4 encontra-se o termoanemómetro a efetuar a medição da velocidade numa saída.



Figura 4 - Medição da velocidade do ar numa saída através do termoanemómetro TSI Velocichек Modelo 8330.

As medições experimentais foram realizadas nos locais já descritos anteriormente, com início às 10h45 e término às 12h15 do dia 28 de setembro de 2022. Na Tabela 7 apresenta-se a média dos valores medidos dos índices em cada local de medição. O cálculo da média foi efetuado com base em 12 medições por cada ponto.

Tabela 7 - Resultados experimentais nos pontos seleccionados.

	<b>A8</b>	<b>F8</b>	<b>F1</b>	<b>J8</b>	<b>F15</b>
<b><math>T_g</math> (°C)</b>	22,83	19,80	18,87	17,85	17,87
<b><math>T_{nw}</math> (°C)</b>	18,53	15,80	14,73	13,90	13,70
<b><math>T_a</math> (°C)</b>	22,47	20,10	18,40	17,30	17,57
<b><math>H_r</math> (%)</b>	48,77	50,53	54,00	56,00	54,83
<b><math>v_a</math> (m/s)</b>	0,00	0,10	0,13	0,45	0,00

A média da temperatura do ar de todas medições dos vários pontos foi de 19,17 °C, a humidade relativa de 52,83 % e a velocidade do ar de 0,14 m/s.

Para o cálculo dos índices *PPD* e *PMV* foi utilizado como referência o valor metabólico médio de um homem de 70 kg com superfície cutânea de 1,8 m<sup>2</sup>, sentado num ambiente confortável (*met* = 1), e isolamento térmico de 0.7 clo que representa uma combinação típica de roupa de utilização diária num espaço interior durante o Outono (roupa interior, meias, calças, camisa e sapatos) (ISO 7730:2005, 2005). Os valores dos parâmetros ambientais utilizados para calcular os índices foram aqueles

registrados durante as medições. A Tabela 8 resume os resultados dos índices calculados, identificando o máximo, valores mínimos, médios e desvios padrão dos valores obtidos.

Tabela 8 - Resultados do *PMV* e *PPD*.

	<i>PMV</i>	<i>PPD (%)</i>
<b>Média</b>	-1.68	58,67
<b>Máximo</b>	-0.60	96.70
<b>Mínimo</b>	-2.70	12.80

Os valores medidos podem ter sido influenciados pelo facto de não ter sido atingida uma situação estacionária do aquecimento do ar interior, afetando assim os resultados obtidos do *PMV/PPD*.

### 3.3. DISTRIBUIÇÃO DA OCUPAÇÃO

Apesar das medições experimentais terem sido efetuadas sem ocupação, será importante a presença de pessoas para o presente estudo onde se pretende estudar a QAI da sala. Assim, efetuou-se o cálculo da distribuição de ocupação por assento com base em 6.041 ingressos vendidos no período entre 1 de dezembro de 2016 e 31 de janeiro de 2017, para a sala de estudo (Rodrigues et al., 2019). A Figura 5 representa a distribuição da ocupação na planta da sala.

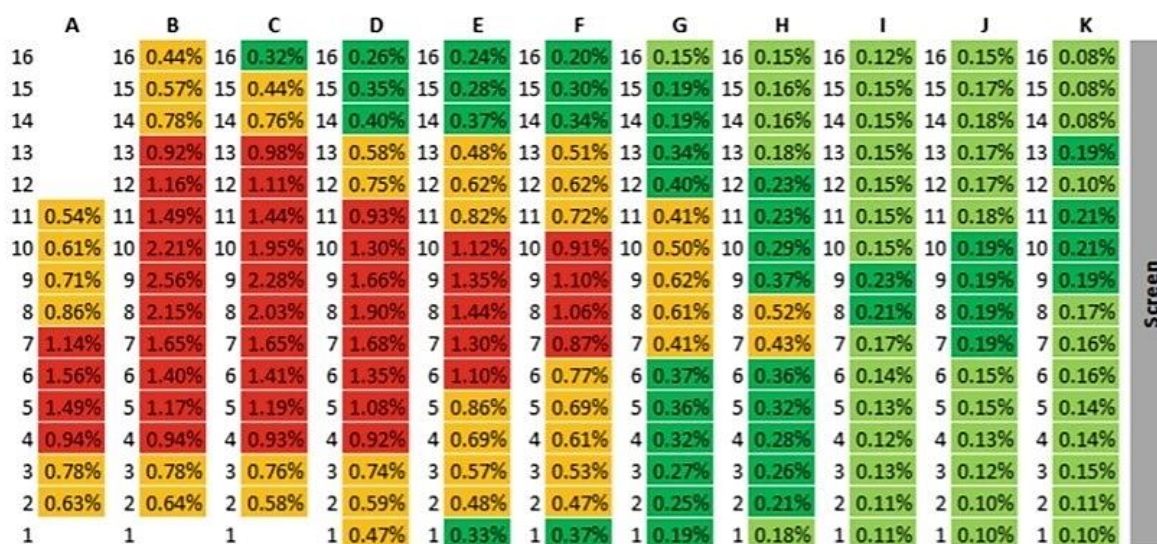


Figura 5 - Distribuição da ocupação na planta da sala (Rodrigues et al. 2019).



## 4. SIMULAÇÃO *CFD*

### 4.1. *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS - CFD*

Na atualidade recorre-se cada vez mais ao poder computacional na área da investigação para a resolução de problemas, dado que possuem inúmeras vantagens na automação e detalhe. Assim, introduz-se o conceito *Computational Fluid Dynamics – CFD* (Computação Dinâmica de Fluidos), que consiste na análise de sistemas que englobam escoamento de fluidos, transferência de calor e massa, e fenómenos associados como reações químicas através de simulação baseada em computação (Versteeg & Malalasekera, 1995). Esta técnica é extremamente poderosa, comumente utilizada por engenheiros e contém uma vasta gama de aplicações, tanto no que concerne na área industrial como em áreas não industriais, tais como:

- Aerodinâmica de Aviões e veículos: impulsão e arrasto;
- Hidrodinâmica de navios;
- Centrais elétricas: motores de combustão interna e turbinas a gás;
- Turbo-maquinaría: escoamentos em rotores, difusores, entre outros;
- Engenharia eletrónica e de eléctrica: arrefecimento de equipamento incluindo microcircuitos;
- Engenharia de processos químicos: chamas, mistura e separação, moldes de polímeros;
- Ambientes externos e internos de edifícios: carga do vento, aquecimento e ventilação;
- Engenharia marítima: cargas em estruturas marítimas;
- Engenharia ambiental: distribuição de poluentes e efluentes;
- Engenharia biomédica: escoamento de sangue pelas artérias e veias; e do ar pelas vias respiratórias (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995).

Existem diversas vantagens desta técnica sobre as abordagens baseadas em experimentos, tais como a redução de custos na fase do projeto, uma vez que não é necessário a construção de modelos físicos, as simulações podem ser efetuados num intervalo de tempo relativamente curto e contém a facilidade de mudar a situação de teste; capacidade de avaliar situações perigosas na vida real; capacidade de simular condições ideais (adiabáticas, fluxos constantes, entre outros); e nível quase ilimitado de detalhe dos resultados. Porém, o *CFD* também contém limitações dado que só pode ser tão preciso quanto os modelos em que o mesmo é baseado, contém erros numéricos e encontra-se dependente da precisão na definição do problema que muitas vezes é aproximado (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Um código *CFD* é formulado com base em algoritmos numéricos, tendo como função resolver os problemas de escoamento de fluidos. Assim, os códigos *CFD* contêm três etapas principais: pré-processamento, *solver* e pós-processamento (Teixeira, 2021). A Figura 6 ilustra as etapas e os processos que as constituem.

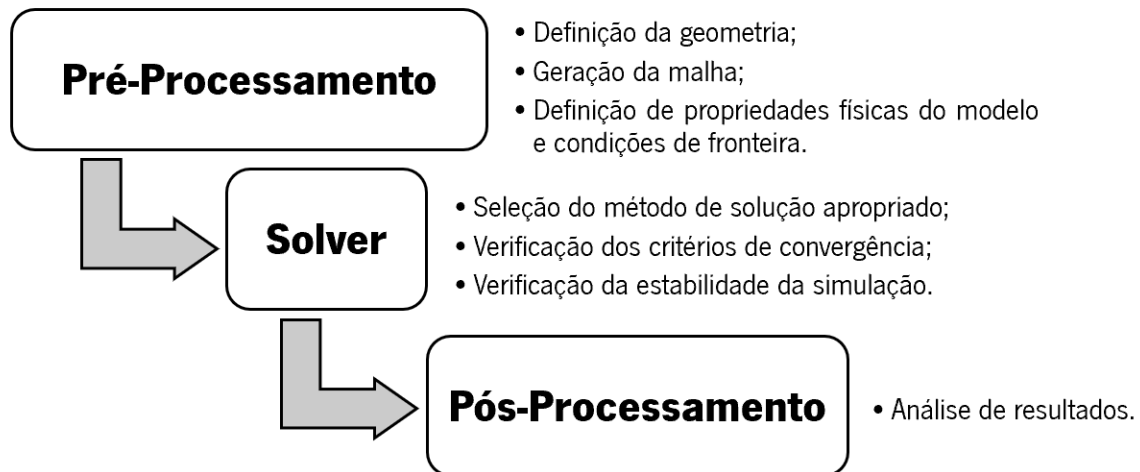


Figura 6 - Etapas de um código em *CFD* (Teixeira, 2021).

Assim, um problema com *CFD* precisa de passar por estas etapas para ser definido. O ponto inicial de qualquer método numérico é a descrição do modelo matemático, isto é, a definição das equações diferenciais, a implementação das condições de contorno e outros parâmetros que possam ser modelados (Teixeira, 2021). Na etapa de pré-processamento, é necessário definir o espaço em estudo que consiste no desenho de uma geometria. Nesta mesma etapa é também necessário gerar a malha, selecionar os fenômenos físicos e químicos que se pretende estudar, especificar as propriedades dos fluidos e definir as condições de fronteira. A solução do problema é definida nos nós de cada elemento, assim esta fase tem grande relevância na precisão dos resultados, uma vez que estes vão depender do refinamento da malha. A segunda etapa, o *solver*, processa-se em três fases: a aproximação das variáveis desconhecidas do fluido através de funções simples; a discretização do domínio criado fazendo a substituição das aproximações efetuadas nas equações que regem o fluxo do fluido; e, após efetuados esses cálculos obtém-se a solução das equações algébricas. No *solver* é necessário escolher o método de resolução, sendo que o mais utilizado na maior parte dos códigos *CFD* é o método dos volumes finitos (MVF). Considerando o método escolhido, o *solver* integra as equações que regem o fluxo do fluido através de todos os volumes finitos de controlo que se encontram no domínio. Em seguida faz a discretização, substituindo as aproximações pelos termos nas equações e forma assim um sistema algébrico de equações. Posteriormente, resolve esse sistema de forma iterativa. Após a solução ser determinada, os resultados computacionais obtidos podem ser analisados no pós-processamento através



da demonstração da geometria, malha, vetores, linhas e contornos, gráficos 2D e 3D, entre outros (Versteeg & Malalasekera, 1995).

A ferramenta utilizada para efetuar a simulação foi o *Ansys Fluent* que corresponde a um *software* de *CFD* que contém uma vasta gama de recursos capazes de modelar escoamentos, turbulência, transferência de calor e reações químicas de inúmeras aplicações na indústria. Modelos especiais permitem ao software ter a capacidade de modelar a combustão, a aeroacústica, as turbomáquinas e sistemas multifásicos alargando assim o seu alcance. Nos dias de hoje, as empresas acarretam grandes benefícios com a utilização do *Ansys Fluent* dado que é parte integrante no desenvolvimento e otimização de novos produtos (Silva, 2021). Na Figura 7 é possível observar as etapas de uma simulação no programa.

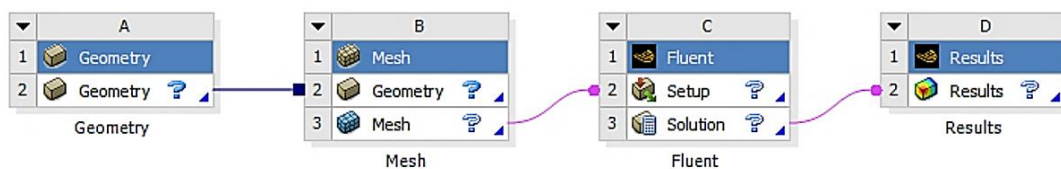


Figura 7 - Etapas de uma simulação (Carneiro, 2022).

Assim, a elaboração de uma simulação inicia-se com a modelação geométrica do espaço a ser estudado, sendo então necessário um bloco relativo à geometria. De seguida, insere-se o bloco da malha que obrigatoriamente tem que estar ligado ao bloco da geometria. A malha é o conjunto de todas os elementos que constituem o domínio e deve ser refinada de forma a que as propriedades dentro do volume não variem. O *Fluent* é extremamente sensível à malha gerada, sendo que no caso desta não apresentar uma qualidade adequada, alguns problemas podem surgir numa fase mais avançada da simulação. Desta forma, o refinamento da malha é uma particularidade que deve ser analisada com especial atenção, com o objetivo de impedir que a malha tenha influência nos resultados obtidos. No entanto, é importante realçar que quanto mais refinada for a malha maior será o tempo de simulação. Assim, torna-se necessário que exista, no processo de otimização da malha, um compromisso entre a qualidade dos resultados e o tempo necessário para efetuar a simulação. Uma vez que a malha pode ter um grande impacto nos resultados da simulação, é então crucial perceber as características que esta deve conter. As características são o tipo de elemento a considerar e a qualidade da malha. Dado que o objetivo é obter uma malha estruturada, com os elementos perfeitamente alinhados, que não dificulte os cálculos. A qualidade da malha é determinada através dos parâmetros:

- Qualidade do elemento - Um fator de qualidade é calculado para cada elemento de um modelo (excluindo elementos de linha e ponto). A opção de qualidade do elemento fornece uma métrica de

qualidade composta que varia entre 0 e 1, sendo esta métrica baseada na proporção do volume para o comprimento da aresta de um determinado elemento. Um valor de 1 indica um cubo ou quadrado perfeito, enquanto um valor de 0 indica que o elemento tem um volume zero ou negativo;

- *Skewness* - É calculado a partir do desvio dos ângulos dos elementos em relação a um elemento ótimo. O valor varia entre 0 e 1, sendo que 0 corresponde a um valor ideal e 1 a um valor péssimo;
- *Aspect Ratio* - corresponde ao rácio entre a maior aresta e a menor aresta do elemento, podem ser elementos triangulares ou quadriláteros. O valor ideal é 1, quanto mais estiver afastado de 1, maior a probabilidade de afetar negativamente os resultados;
- *Orthogonal Quality* - Mede a variação dos ângulos dos vetores centrais do elemento. O valor varia entre 0 e 1, sendo que 0 corresponde a um valor péssimo e 1 a um valor ideal (Carneiro, 2022).

Posteriormente, o bloco selecionado para definir as condições e as especificações necessárias ao estudo deve ser o *Fluent*. Com base numa análise do caso a ser estudado, devem então ser definidas as condições de forma a efetuar o cálculo que se pretende obter. Desta forma, o *setup* deve ter em conta todas as condições e elementos que tenham a capacidade de afetar os resultados. Por último, tem-se o bloco correspondente aos resultados onde pode ser feita a análise e interpretação dos valores obtidos (Carneiro, 2022).

## 4.2. MODELO MATEMÁTICO

### 4.2.1. EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

As equações de conservação dominam o fluxo do fluido e representam os princípios matemáticos das leis de conservação da física, sendo estes o de conservação da massa de fluido e o de conservação de *momentum* segundo a 2ª lei de Newton.

#### **Conservação da Massa**

A conservação da massa define que a quantidade de massa que entra num determinado volume de controlo é igual à que sai, existindo assim um equilíbrio entre os fluxos de entrada e de saída para o volume considerado. No que concerne à modelação numérica, esta definição é adaptada para introduzir um termo de fonte no caso em que exista adição ou remoção de material no volume. Este conceito é matematicamente expresso pela equação 6 (Versteeg & Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_n \quad (6)$$

A variável  $S_n$  é o termo de fonte de massa adicionado à fase contínua em simulação. O termo  $\rho$  corresponde à massa volúmica do fluido,  $t$  corresponde ao tempo e  $\vec{v}$  representa o vetor de velocidade.

### **Conservação de *Momentum***

A conservação do *momentum* pode ser representada pela taxa de alteração da quantidade de movimento de uma partícula do fluido e é igual ao somatório das forças que atuam nessa partícula (Rodrigues, 2017). Este princípio pode ser descrito pela equação 7.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (7)$$

A variável  $\vec{v}$  representa o vetor velocidade,  $\mu$  a viscosidade,  $\rho$  a massa volúmica,  $p$  a pressão estática,  $\vec{g}$  a aceleração gravitacional e  $\vec{F}$  corresponde à força gravitacional do corpo e às forças externas do corpo.

#### **4.2.2. MODELOS DE TURBULÊNCIA**

A turbulência é um fenómeno importante nos problemas da mecânica de fluidos. Este estado é caracterizado por um comportamento caótico do escoamento com rápidas variações de pressão e velocidade. Atualmente, existem três tipos de modelos de turbulência utilizados em *CFD*, nomeadamente, *Direct Numerical Simulation (DNS)*, *Large Eddy Simulation (LES)* e *Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)*. A escolha dos modelos de turbulência a utilizar é dependente das características físicas do escoamento, o tipo de problema a resolver, o nível de precisão pretendido, os recursos computacionais disponíveis e a quantidade de tempo disponível para a simulação (Hansraj, 2019). O modelo *DNS* resolve as equações exatas de Navier-Stokes analisando todas as escalas de turbulência através de malhas muito refinadas, considerando uma vasta gama de escalas de tempo e de comprimento do escoamento turbulento, tornando-o num modelo com um elevado custo computacional. O modelo *LES* baseia-se no estudo dos turbilhões de maior dimensão de determinado escoamento e é considerado dispendioso, apesar de necessitar de um menor poder computacional que o *DNS*. A necessidade de malhas muito refinadas para a resolução das escalas e de curtos passos de tempo na simulação de escoamentos transientes torna as simulações longas e com grandes volumes de informação obtida. O *RANS* é o modelo onde as equações de Navier-Stokes são aproximadas por médias de Reynolds (método matemático que elimina os pequenos termos lineares, conservando os termos não-lineares associados ou afetados por turbulência) e o campo de escoamento é decomposto em componentes flutuantes médios. Existem vários tipos de modelos de viscosidade turbulenta que podem ser utilizados em simulações *RANS*, nomeadamente, o modelo *Spalart & Allmaras*, *k-epsilon (k - ε)*, *k-omega (k - ω)*, *RSM*, entre outros (Hansraj, 2019).

O *Ansys Fluent* disponibiliza os modelos de turbulência representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Modelos de turbulência disponíveis no *Ansys Fluent* (Carneiro, 2022).

Equações	Modelo
1	<i>Spalart-Allmaras</i>
2	$k - \varepsilon$
	$k - \omega$
3	<i>Transition <math>k - kL - k\omega</math></i>
4	<i>Transition SST</i>
5	<i>Reynolds Stress (RSM)</i>
-	<i>Scale-Adaptive Simulation (SAS)</i>
-	<i>Detached Eddy Simulation (DES)</i>

A complexidade aumenta conforme o número de equações dos modelos vai aumentando, consequentemente o custo por iteração sobe (Carneiro, 2022). No presente estudo não é necessária uma complexidade computacional elevada e o modelo escolhido recaiu sobre o modelo  $k - \omega$ , uma vez que incorpora modificações para efeitos de baixo número de Reynolds e compressibilidade (Thakare & Parekh, 2014).

### **Modelo *Standard k-omega***

Para resolver o escoamento turbulento este modelo utiliza as equações 8 e 9 (Hansraj, 2019).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( r_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

Onde  $G_k$  representa a energia cinética turbulenta relacionada com os gradientes da velocidade média,  $G_b$  refere-se à energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade e  $G_k$  representa a geração de energia cinética de turbulência devido à variação da velocidade média. Já  $G_\omega$  representa a geração de  $\omega$ .  $r_\omega$  e  $r_\omega$  representa a difusividade efetiva de  $\omega$ . Em relação a  $Y_\omega$ , este representa a dissipação de  $\omega$  devido à turbulência, enquanto que  $Y_M$  é a variação da dilatação na turbulência compressível. Por fim,  $S_k$  e  $S_\omega$  são termos de origem definidos pelo utilizador (Teixeira, 2021).

### 4.2.3. ENERGIA

O modelo da energia é importante para ter em consideração os fenômenos de temperatura e de transferência de calor que ocorrem numa simulação. A equação da energia considera que a taxa de alteração da energia de uma partícula de fluido é igual à soma da taxa de calor adicionado às partículas de fluido e da taxa de trabalho realizado na partícula (Rodrigues, 2017). A equação é representada pela equação 10 (Versteeg & Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (10)$$

em que os três primeiros termos da equação 12 dizem respeito à transferência de energia devido à condução, difusão de espécies e dissipação viscosa, respetivamente.  $k_{eff}$  representa a condutibilidade efetiva ( $k + k_t$ ) sendo  $k_t$  a condutibilidade térmica por turbulência, definida de acordo com o modelo de turbulência que está a ser utilizado,  $J_j$  o fluxo de difusão da espécie  $j$ ,  $\nabla$  representa o vetor velocidade,  $T$  a temperatura e  $\overline{\tau_{eff}}$  representa o tensor de tensões efetivo. Por último,  $S_h$  representa uma fonte externa de geração de calor naquela célula, tal como calor de uma reação ou por radiação (Rodrigues, 2017).

### 4.2.4. TRANSPORTE DE ESPÉCIES

O modelo de espécies permite considerar o fluido modelado como um fluido composto por diferentes componentes. Desta forma, em vez de simular o ar como um fluido com propriedades médias e constituído apenas por uma entidade, este modelo possibilita considerar diferentes componentes para o ar e defini-lo como uma mistura de nitrogênio, oxigênio e dióxido de carbono. A possibilidade de considerar o dióxido de carbono como um elemento constituinte do ar na simulação permite verificar se a concentração de dióxido de carbono se encontra dentro dos limites estipulados por lei. Na solução numérica para conservação e transporte de espécies, o Fluent® resolve uma equação para espécies convecção-difusão para a  $i^{ésima}$  ( $i^{th}$ ) espécie (Rodrigues, 2017). A equação para a conservação das espécies é dada pela equação 11:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (11)$$

Onde  $R_i$  é o rácio de produção total da espécie  $i$  por reação química e  $S_i$  é o rácio de criação por adição da espécie dispersa mais fontes definidas pelo utilizador. Esta equação é resolvida para  $N - 1$  espécies, em que  $N$  corresponde ao número total de espécies existentes no sistema. A razão que leva à

resolução do balanço  $N - 1$  para espécies é que o total do balanço deverá ser 1. Desta forma, a última fase terá como valor de balanço o valor da diferença entre 1 e as  $N - 1$  espécies, evitando-se assim a acumulação de erros numéricos por arredondamentos durante os processos iterativos. Em termos gerais, a espécie de preenchimento ( $N^{th}$ ), deve ser a que tem uma maior fração mássica (Teixeira, 2021).

### 4.3. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos (MVF) é uma técnica numérica utilizada para transformar as equações diferenciais parciais de fluxo em equações algébricas lineares baseadas em leis de conservação. Este método consiste essencialmente em dividir o domínio em um número finito de elementos que são subsequentemente usados para construir volumes finitos ou de controlo, representando o domínio original. Em seguida, a conservação é aplicada a cada volume e as equações governantes são discretizadas e resolvidas através de técnicas iterativas. Estes elementos assumem diversas formas, de triangulares a quadradas e podem formar uma malha estruturada ou não estruturada.

O procedimento de discretização neste método envolve duas etapas, sendo que numa primeira instância as equações diferenciais parciais são integradas e transformadas em equações de equilíbrio sobre um elemento, obtendo posteriormente um conjunto de equações semi-discretas. Na segunda etapa, determinadas interpolações são escolhidas para aproximar a variação das variáveis dentro do elemento de forma a relacionar estas com os valores de superfície, transformando as relações algébricas em equações algébricas. Nestas duas etapas as aproximações têm influência na precisão e robustez dos resultados obtidos (Gonçalves, 2022).

Este método é muito utilizado em *CFD* devido ao facto de oferecer flexibilidade no método da discretização, ter a capacidade de lidar com malhas não estruturadas e problemas físicos complexos. Assim, o MVF assume um papel de destaque na simulação de problemas de escoamento e fenómenos de transporte.

### 4.4. GEOMETRIA E MALHA

A primeira instância de uma simulação de *CFD* consiste então na definição do domínio de estudo e para tal foi utilizado um programa de modelação, o *DesignModeler®*. O modelo 3D da sala de cinema foi gerado com base na planta da sala e com o apoio da observação local. De forma a completar o domínio é então necessário a incorporação de condições de contorno. A Figura 8 representa o domínio com as respetivas condições de contorno definidas.

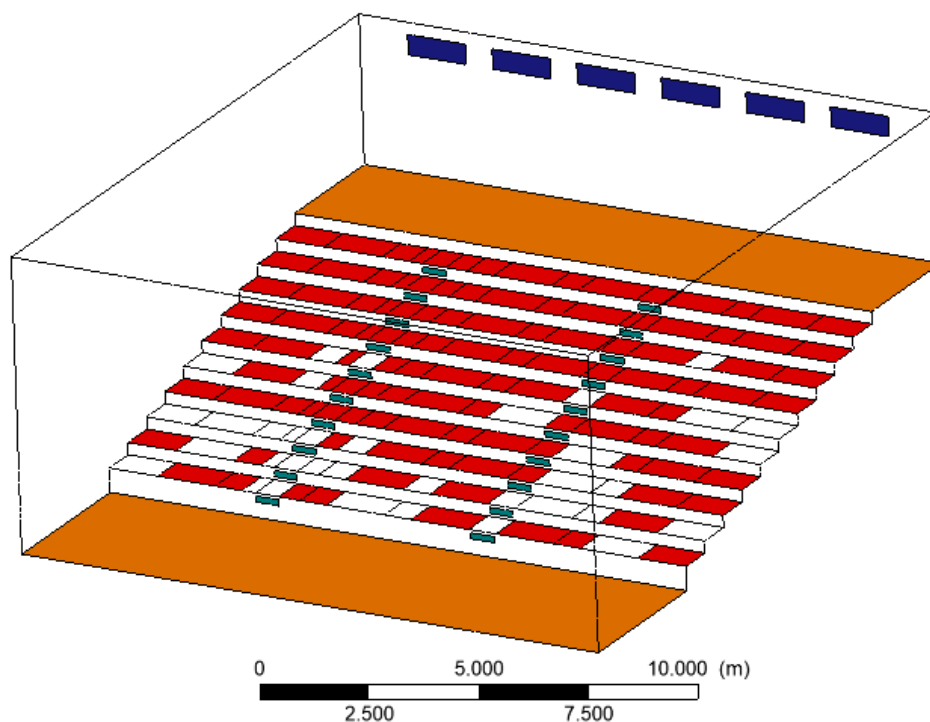


Figura 8 - Representação da sala de cinema modelada e as respetivas condições de fronteira.

As condições de fronteira são representadas por cada cor em que as entradas de ar são representadas a azul escuro, as saídas a verde, o vermelho corresponde aos assentos ocupados por pessoas e o laranja representa o chão da sala de cinema. O presente estudo efetua simulações sem a presença de pessoas e com a presença de pessoas, de modo a estudar a sua influência. Assim, foi considerado que a sala se encontrava vazia, numa segunda e terceira instância foi assumido que a sala de cinema se encontrava com uma lotação de 76% da sua capacidade total. As entradas foram definidas com base nas especificações dos sistemas AVAC e a normativa portuguesa Portaria n.º 353-A/2013, 2013 sendo que foram definidas uma entrada de velocidade de 0,25 m/s, uma temperatura de 22 °C e uma humidade relativa de 50%.

O cinema em estudo está inserido num edifício e por essa razão, de forma a simplificar, as suas paredes foram consideradas adiabáticas. As saídas de ar do cinema foram definidas como passivas, utilizando limites de saída de pressão com pressão relativa de 0 Pa. Relativamente às temperaturas do interior do cinema, devido ao facto das pessoas serem uma fonte de principal de calor do domínio, foi considerado o valor de temperatura de 33 °C nos lugares que estivessem ocupados, uma vez que corresponde à temperatura da pele de um indivíduo no estado de conforto térmico (Rodrigues, 2017). Considerou-se então num dos cenários a lotação de 76%, porém, os clientes não se sentam uniformemente pelo cinema, sendo que existe uma preferência por determinados lugares. Assim, origina-se uma concentração de pessoas e, com isso, de calor que pode influenciar a distribuição da temperatura

e afetar o conforto térmico localizado. Com base nessa evidência, utilizou-se um mecanismo de seleção realizado por meio de um *script Python*<sup>®</sup>, de forma a selecionar os assentos tendo em consideração a probabilidade de um assento ser ocupado (Rodrigues et al., 2019). Este mecanismo passou por três etapas. A primeira etapa consistiu em exportar a Figura 5 com as frequências relativas de ocupação de cada assento em um arquivo *CSV*, sendo que foi importado de seguida para uma estrutura de dados *NumPy*. Numa segunda fase as frequências relativas foram transformadas em valores inteiros para criar uma lista de frequências. Assim, cada frequência foi multiplicada por 100 e arredondada para um valor inteiro. Esta etapa permitiu manter a probabilidade relativa dos assentos e a informação dos valores de baixa frequência, isto é, nos assentos onde a ocupação foi de apenas 0,08%, essa informação seria perdida se arredondada diretamente. A terceira etapa consistiu na criação de uma lista de frequências. A lista constituída por um identificador único e uma referência a um assento, repetido o número de vezes que correspondia à sua frequência. Uma vez criada a lista, foi gerado um número aleatório compreendido entre o tamanho da lista, dando um índice de um assento. Assim que um assento é ocupado, todas as suas referências são removidas da lista. Este último passo é repetido até que todas as pessoas sejam colocadas em assentos (Rodrigues et al., 2019).

Um problema *CFD* define-se pela resolução das equações diferenciais, implicando o uso da metodologia de volumes discretos para discretizar o domínio. Este método divide o volume global em elementos menores até que se considere que as propriedades do fluido, dentro dos pequenos volumes, não são consideráveis. A geração da malha foi criada com o foco em reduzir a deformação do elemento, mantendo desta forma uma boa qualidade para reduzir o tempo de computação e facilitar a convergência numérica. O domínio foi dividido em geometrias regulares menores para acomodar melhor os blocos da malha, sendo que no total foi dividido em 3604 corpos.

Para assegurar uma boa definição da camada limite, é fundamental obter uma boa representação dos fenómenos próximos à parede, como a transferência de calor. Assim, cada parede teve um refinamento de malha com elementos de tamanho reduzido, seguido de um gradiente crescente. No total, a malha final representada na Figura 9 teve um total de 1.254.690 elementos.



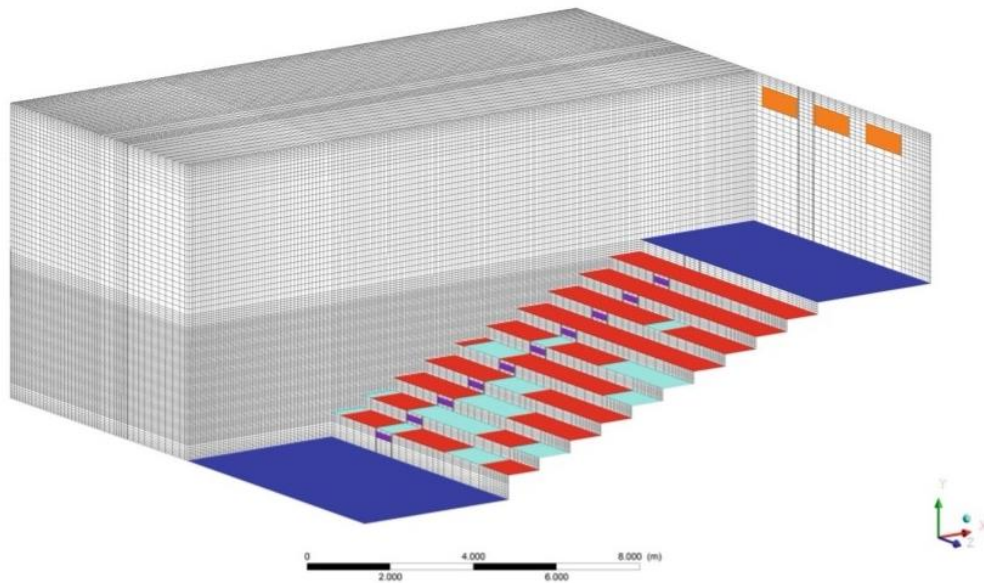


Figura 9 - Representação da malha utilizada na simulação da sala de cinema (Rodrigues et al., 2019).

Em virtude do facto de uma boa malha afetar de forma bastante positiva a solução numérica e a velocidade de simulação, torna-se crucial determinar a sua qualidade através de diferentes índices de qualidade, tais como a qualidade do elemento, *orthogonal quality* e *skewness*. Os dois primeiros índices variam entre os valores de 0 e 1, em que 0 é um elemento de má qualidade e 1 representa uma boa qualidade. O valor médio para a qualidade do elemento e *orthogonal quality* foram 0,48 e 1, respetivamente. Em relação ao índice *skewness*, um bom elemento que não está distorcido é representado por 0 e, no limite, o valor 1 expressa um elemento completamente distorcido. Para este índice, valor médio obtido foi 0.

## 4.5. CASOS ESTUDADOS

No presente estudo foram abordados três cenários distintos. Numa primeira instância foi efetuada a simulação da sala com insuflação de ar húmido sem a presença de pessoas. De seguida, realizou-se uma simulação com as mesmas condições, porém com lugares preenchidos por pessoas. Numa terceira fase, realizou-se a simulação tendo em consideração também o CO<sub>2</sub> libertado pelas pessoas através da expiração.

### 4.5.1. SETUP

Na elaboração da simulação é necessário definir as condições do problema, desta forma são então definidas as condições de fronteira e alguns elementos que possam afetar o domínio. Para além disso, também se define os modelos de turbulência mais adequados à resolução do problema e os fenómenos

que se pretende estudar. Numa primeira instância são selecionados os parâmetros do *solver*, sendo que este apresenta dois métodos de solução, o *pressure-based* e o *density-based*. Apesar de atualmente ambos os métodos conseguirem ser aplicados a uma grande variedade de escoamentos, no passado existiam algumas diferenças entre eles. O *pressure-based* foi desenvolvido para fluidos incompressíveis ou ligeiramente compressíveis a baixa velocidade e o *density-based* para fluidos compressíveis a alta velocidade. No entanto, nos dias de hoje ambos os métodos conseguem ser aplicados a uma grande variedade de escoamentos. O método numérico de resolução escolhido foi o *pressure-based*. A formulação da velocidade foi definida como absoluta uma vez que esta opção é aplicada quando grande parte do domínio não está em rotação. Posteriormente é necessário definir se o estudo depende ou não do tempo. A simulação foi definida como transiente para de forma a convergir mais rapidamente para o estado estacionário. No que concerne à gravidade, esta opção foi ativada.

Na parte dos modelos, foi acionada a equação da energia de modo a incluir a temperatura e a transferência de calor. Para modelar corretamente a transferência e os seus mecanismos, foi ainda inserido o modelo de radiação *Surface to Surface* que permite contabilizar os fluxos radiantes térmicos. De modo a ter em consideração a turbulência no escoamento foi selecionado o modelo  $k - \omega$ , uma vez que este considera escoamentos com números de Reynolds baixos (Rodrigues et al., 2019). Como o estudo envolve a insuflação de ar húmido e numa fase posterior analisa a dispersão de CO<sub>2</sub>, a equação de transporte de espécies foi ativada.

Os materiais foram selecionados, sendo que nas paredes e no chão o material foi definido como betão e nos lugares como pano.

As entradas foram definidas de acordo com as especificações dos sistemas AVAC e da regulamentação portuguesa (Portaria n.º 353-A/2013, 2013), como tal, foi então aplicada uma entrada de velocidade de 0,25 m/s. As fronteiras foram definidas como *velocity-inlet*. Além da magnitude da velocidade, também é necessário definir a intensidade da turbulência. Em primeiro lugar é necessário calcular o número de *Reynolds* através da equação 12 (ANSYS Inc., 2015).

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (12)$$

Em que Re representa o número de *Reynolds*,  $\rho$  é a massa específica, U é a velocidade, D é o diâmetro hidráulico e  $\mu$  refere-se à viscosidade dinâmica do fluido. Assumindo o valor de 1,225 kg/m<sup>3</sup> para a massa volúmica e que o diâmetro hidráulico depende da zona para onde se pretende calcular estes parâmetros. Os valores destas propriedades foram retirados da base de dados do *Fluent*. Tendo

obtido o valor do número de Reynolds, calculou-se a intensidade de turbulência pela equação 13 (ANSYS Inc., 2015).

$$I = 0,16. (Re_{Dh})^{-\frac{1}{8}} \quad (13)$$

Uma vez que diâmetro hidráulico corresponde à secção de entrada ou de saída, dependendo do pretendido, os cálculos necessários podem então ser efetuados. Desta forma, para a zona de entrada foi calculado que a intensidade de turbulência é de 5% e o diâmetro hidráulico de 0.75 m. Assim ficaram definidas as condições na entrada.

Dado que o ar insuflado no presente estudo é ar húmido, ativou-se a equação das espécies com as respetivas frações mássicas de O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. O ar é uma mistura de diversos gases sendo os componentes dominantes o O<sub>2</sub> (21%) e o N<sub>2</sub> (78,96%) (Toolbox, 2022). Considerando a sua composição, a humidade relativa à entrada de 50% e as respetivas massas moleculares, foi efetuado o cálculo das frações

Para a saída foi estabelecida a fronteira *pressure-outlet* a intensidade de turbulência para esta condição é igualmente 5%.

De seguida estabelecem-se as condições das paredes, porém, numa primeira instância do estudo foram apenas considerados os parâmetros definidos por defeito.

Assim, ficam definidas todas as condições de fronteira que representam o problema.

Uma segunda simulação foi efetuada nas mesmas condições, porém com a presença de pessoas com o objetivo de estudar a sua influência. Assim, nos lugares ocupados, a temperatura da parede foi definida como 33 °C, dado que é a temperatura média da pele de um indivíduo em estado de conforto (Liu et al., 2015).

Foram também definidas as frações mássicas de O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, sendo que O<sub>2</sub> corresponde à fração libertada na expiração e H<sub>2</sub>O à fração libertada pela pele. A fração de O<sub>2</sub> foi calculada tendo em consideração que o ar expirado por uma pessoa contém 17% de oxigénio do volume total (Gnat, 2022). No que concerne à humidade relativa, foi considerado um valor constante de 65% na superfície da pele, sendo assim retirada a fração mássica de H<sub>2</sub>O (Rodrigues, 2017).

Numa terceira simulação, foi considerado o CO<sub>2</sub> libertado por uma pessoa na expiração, sendo que corresponde a 5% do volume total (Li et al., 2022). Desta forma, nos lugares ocupados foram definidas nas espécies as frações mássicas de 0.074643 de CO<sub>2</sub> e 0.184528756 de O<sub>2</sub>.

#### **4.5.2. SOLVER**

O *pressure-based solver* permite resolver o problema de duas formas distintas, de forma segregada ou acoplada. O algoritmo segregado resolve as equações que regem o fluido de forma sequencial,

podendo assim a convergência levar mais tempo até ser atingida. Enquanto que o algoritmo acoplado resolve simultaneamente a equação do *momentum* e a equação da continuidade, o que leva a que a convergência seja atingida mais rapidamente (ANSYS Inc., 2015). Deste modo, foi definida a opção do algoritmo acoplado para realizar a simulação. Em termos de discretização espacial, os gradientes são utilizados para construir os valores dos escalares nas faces da célula, para determinar os termos secundários da difusão e as derivadas da velocidade. A opção escolhida foi a *Least Squares Cell Based* dado que a sua precisão é semelhante à de outros gradientes e a capacidade computacional requerida não é tão elevada. O esquema de discretização selecionado foi o *Second-Order Upwind*, uma vez que é atingida uma ordem mais alta de precisão nas faces das células e não existem problemas de convergência usando esta opção (ANSYS Inc., 2015). No que concerne à formulação transiente foi selecionada a primeira ordem implícita, pois a precisão alcançada é suficiente para a análise deste problema.

A inicialização deve ser sempre efetuada antes de se iniciar um cálculo e existem dois métodos de inicialização, padrão e híbrido. Para este estudo utilizou-se o método padrão de inicialização.

No cálculo para o avanço de tempo foi definido o tipo adaptativo. Como o tempo final não pode ser determinado pela multiplicação do número de intervalos de tempo por um tamanho de intervalo de tempo fixo, é necessário especificá-lo explicitamente. A tolerância de erro especifica o valor limite ao qual o erro de truncamento calculado é comparado. Aumentando este valor levará a um aumento no tamanho do passo de tempo e uma redução na precisão da solução. Enquanto que diminuindo levará a uma redução no tamanho do passo de tempo e a um aumento na precisão da solução, embora o cálculo exigirá mais tempo computacional (ANSYS Inc., 2015). Na maioria dos casos, o valor padrão de 0.01 é aceitável e foi este o definido. Os limites superior e inferior para o tamanho do intervalo de tempo foram especificados tendo em consideração que se o intervalo de tempo for muito pequeno, a despesa computacional pode ser muito alta, e se o intervalo de tempo se tornar muito grande, a precisão da solução pode não ser aceitável (ANSYS Inc., 2015).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo encontram-se os resultados das três simulações efetuadas, assim como a validação dos resultados experimentais com a primeira simulação. De forma a melhorar a visualização dos resultados encontram-se representados, na Figura 10, os planos A e B que serão utilizados na demonstração dos contornos dos elementos a serem analisados.

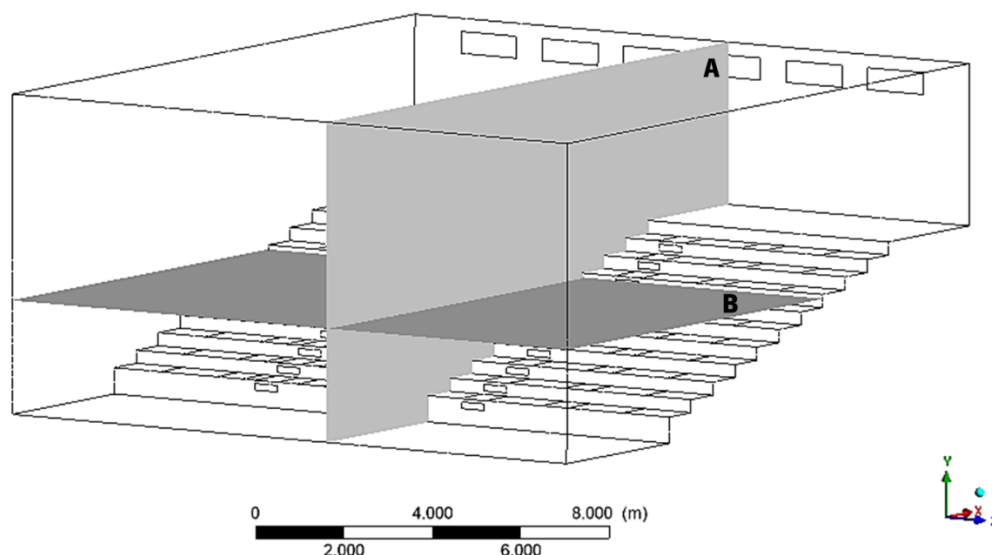


Figura 10 - Planos analisados: A - Plano vertical na cota 8.5m (eixo z); B - Plano horizontal na fila F.

O plano A foi escolhido por ser próximo de um plano médio da sala e por se encontrar próximo de uma entrada. O plano B foi selecionado pela proximidade a um plano médio horizontal da sala e para analisar os contornos junto das paredes.

### 5.1. SALA COM INSUFLAÇÃO DE AR HÚMIDO

#### 5.1.1. RESULTADOS

Numa primeira fase foi efetuada uma simulação com a insuflação de ar húmido, sem a presença de pessoas na sala. O resultado para o campo de velocidade calculado está representado na Figura 11.

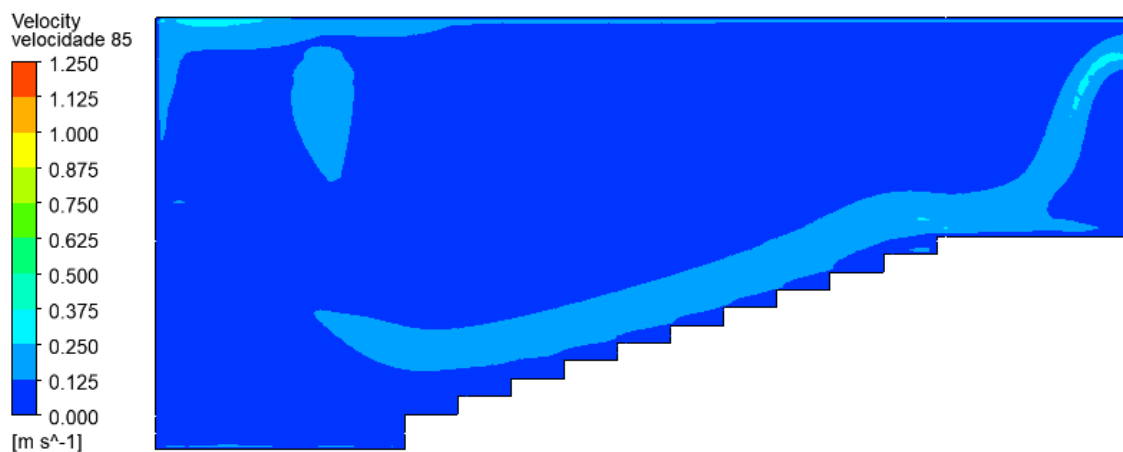


Figura 11 - Contornos dos campos de velocidade na sala de cinema no plano vertical A.

Estes contornos permitem entender como o ar se move ao longo do cinema, com uma velocidade do ar maior localizada na altura da entrada de ar. Este comportamento é esperado uma vez que as condições de contorno nas entradas foram definidas como 0.25 m/s proporcionando ao ar uma maior energia cinética. Os resultados mostram que existem regiões onde o ar está estagnado (com velocidade zero), sendo que pode reduzir a eficácia e a qualidade da ventilação. As zonas próximas aos assentos de cinema apresentaram uma velocidade média próxima de 0.18 m/s.

A humidade relativa é outra variável interessante para o estudo e o contorno encontra-se representado na Figura 12.

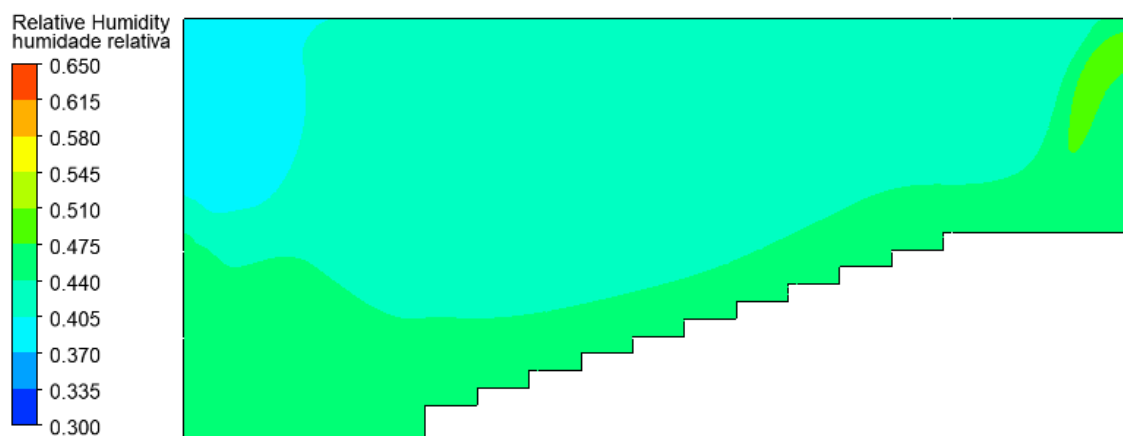


Figura 12 - Contorno da humidade relativa no plano vertical A.

Uma vez que a humidade relativa definida na entrada foi de 50%, verifica-se que corresponde ao demonstrado no contorno. É possível visualizar que a humidade relativa é maior junto ao chão e aos assentos e diminui com a altitude da sala.

A mesma representação foi aplicada ao campo de temperatura no cinema apresentado na Figura 13.

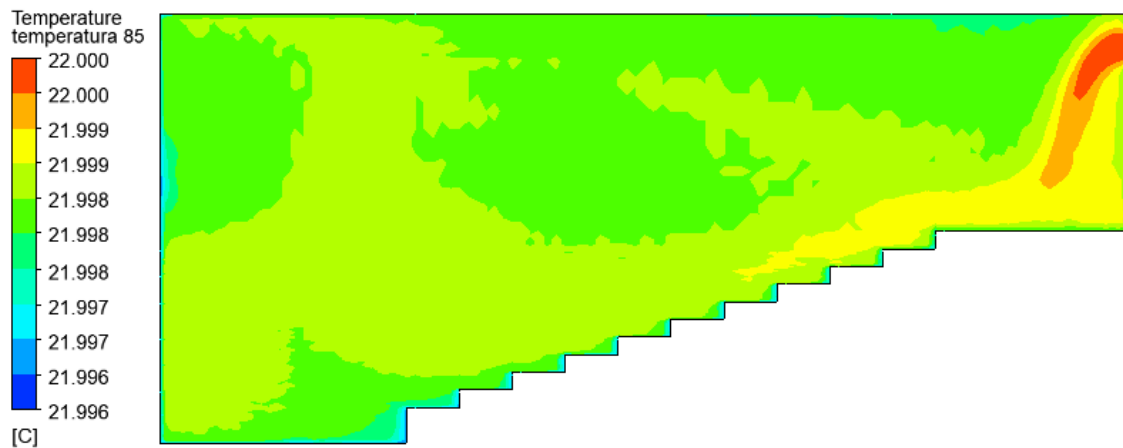


Figura 13 - Campos de temperatura na sala de cinema no plano A.

O ar fornecido pelo sistema de ventilação foi definido como tendo 22 °C. No presente caso, pode afirmar-se que a temperatura média ambiente está muito próxima da temperatura de ventilação, sendo que apresenta uma diferença mínima e irrelevante em termos de percepção. No geral, a temperatura média simulada do volume foi próxima de 22 °C.

Foi ainda possível determinar os campos de valores de *PMV* locais. Para o cálculo foram utilizadas variáveis retiradas das medições experimentais, a humidade relativa com valor de 60%, a taxa metabólica de 1 met e o isolamento da roupa de 0.7 clo. As variações ocorreram nas velocidades, temperatura do ar e temperatura radiante. Quanto a este último parâmetro, como não havia uma fonte principal de temperatura radiante, no cálculo o seu valor foi igual à temperatura do ar. Os campos de *PMV* locais foram calculados usando um script *Python*® que, através dos valores de temperatura e velocidade de cada elemento da malha e, juntamente com os outros parâmetros do ambiente térmico, calcula o valor de *PMV* para cada elemento. O campo resultante está representado na Figura 14.

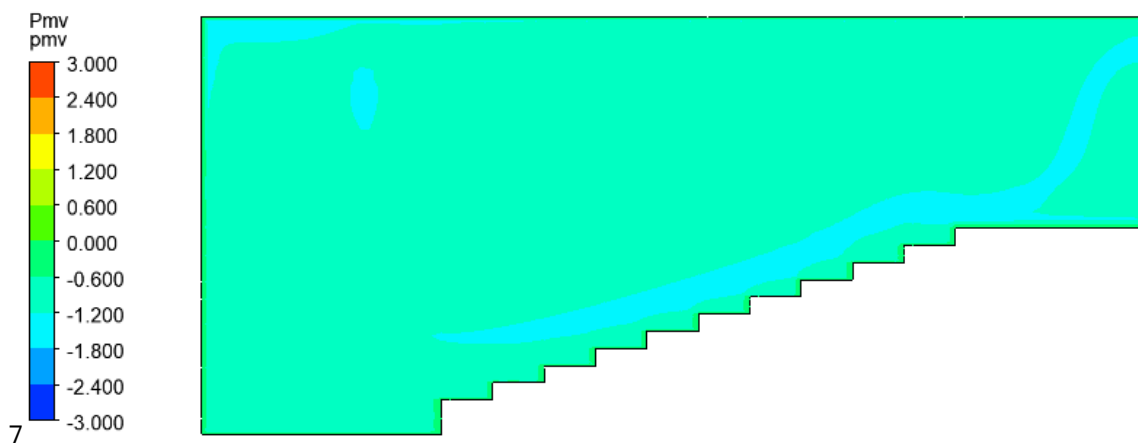


Figura 14 - Campos de *PMV* simulados na sala de cinema no plano vertical A.

As simulações realizadas previram um valor médio de *PMV* para a sala de aproximadamente -1 (ligeiramente frio). A simulação também agrega a vantagem de poder verificar zonas de desconforto locais, sendo que é possível verificar que junto aos lugares atinge valores de aproximadamente -1.5.

### 5.1.2. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

De seguida é apresentada a comparação entre os dados experimentais e os dados simulados na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação dos valores experimentais e simulados nos lugares.

	Velocidade (m/s)		Temperatura (°C)		Humidade relativa (%)	
	Experimental	Simulada	Experimental	Simulada	Experimental	Simulada
<b>A8</b>	0.00	0.20	22.47	22.00	48.77	45.61
<b>F1</b>	0.13	0.20	18.40	22.00	54.00	44.87
<b>F8</b>	0.10	0.19	20.10	22.00	50.53	44.42
<b>F15</b>	0.00	0.11	17.57	22.00	54.83	44.34
<b>J8</b>	0.45	0.08	17.30	22.00	56.00	45.28
<b>Desvio padrão</b>	0.19	0.06	2.15	0.00	3.05	0.55

Em relação à velocidade, torna-se possível identificar um comportamento diferente, uma vez que os valores da velocidade simulados ditam que a velocidade diminuiu desde a entrada até ao local J8. Enquanto que o valor da velocidade retirado experimentalmente no lugar J8 foi o valor mais elevado, 0.45 m/s.

No que concerne à temperatura, existe uma diferença considerável entre as temperaturas retiradas da simulação com as temperaturas medidas experimentalmente. Os valores de temperatura na



simulação foram de 22 °C nos cinco pontos retirados, enquanto que os valores experimentais apresentaram uma variação. No ponto J8 verifica-se a maior diferença entre os resultados, sendo que a temperatura medida experimentalmente apresenta um valor mais baixo de temperatura de 4.70 °C.

Quanto à humidade relativa, esta apresenta valores maiores nos resultados experimentais que nos simulados. Os valores simulados de humidade relativa apresentam um intervalo de valores mais curto que os valores experimentais. No ponto de medição no lugar J8 regista-se a maior diferença, 10.72%.

De forma a auxiliar a comparação dos resultados simulados com os resultados experimentais, foi também retirado o contorno da temperatura do plano horizontal B conforme representado na Figura 15.

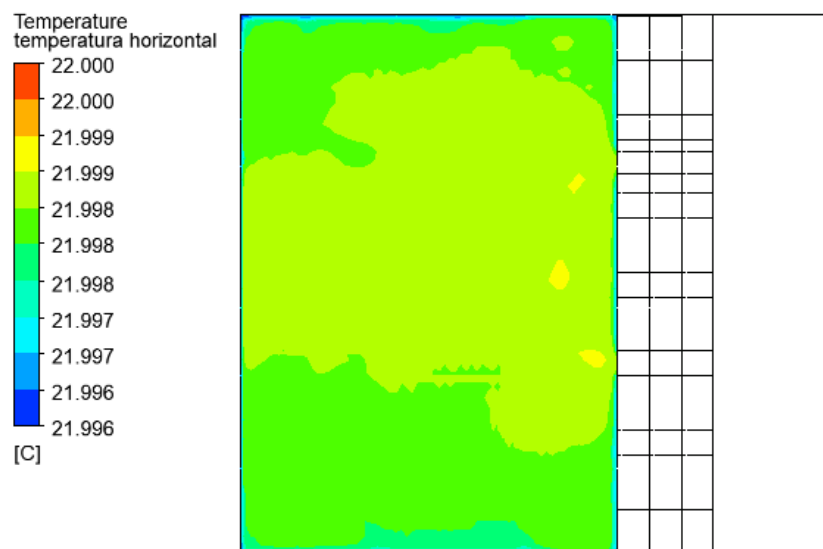


Figura 15 - Contorno da temperatura no plano horizontal B.

Comparando com os valores experimentais que se encontram na Tabela 7, é possível verificar que existe uma concordância no facto da temperatura junto das paredes diminuir.

Quanto aos campos de *PMV*, o valor médio de *PMV* calculado através das medições experimentais foi de -1.68. Este valor vai de encontro ao valor de *PMV* simulado próximo dos lugares, por isso, existe concordância nos valores de *PMV*.

## 5.2. INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO

A segunda simulação efetuada no presente estudo visa estudar a influência das pessoas nos resultados dos contornos analisados. Na Figura 16 está representado o contorno da velocidade da simulação que assume a presença de pessoas na sala.

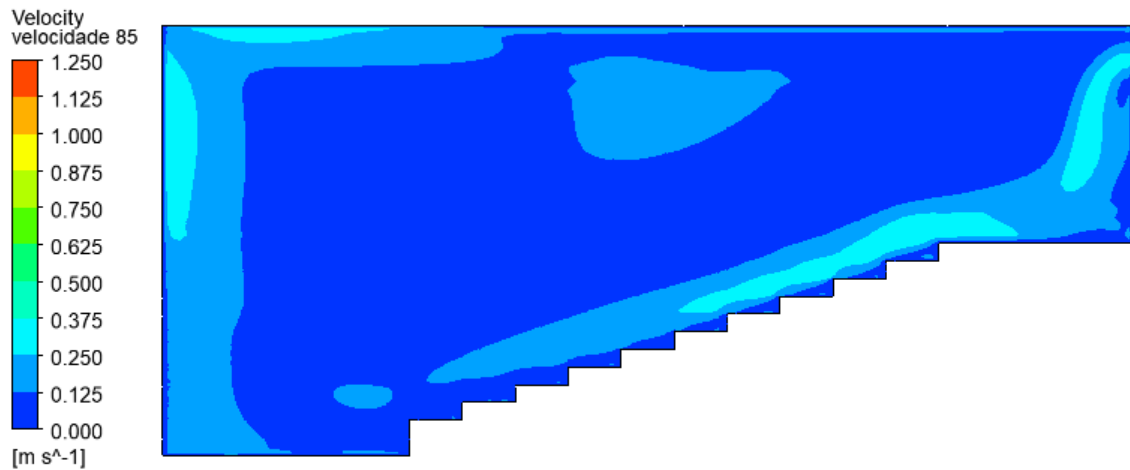


Figura 16 - Contorno da velocidade com a presença de pessoas no plano vertical A.

Comparando estes resultados com os resultados da primeira simulação representados na Figura 11, verifica-se que são semelhantes, porém a velocidade próxima dos lugares e do ecrã é ligeiramente maior. Assim, a ventilação poderá ser ligeiramente melhor, no entanto existe de igual forma uma área significativa em que o ar está estagnado.

De seguida foram retirados os contornos dos campos de temperatura como apresentado na Figura 17.

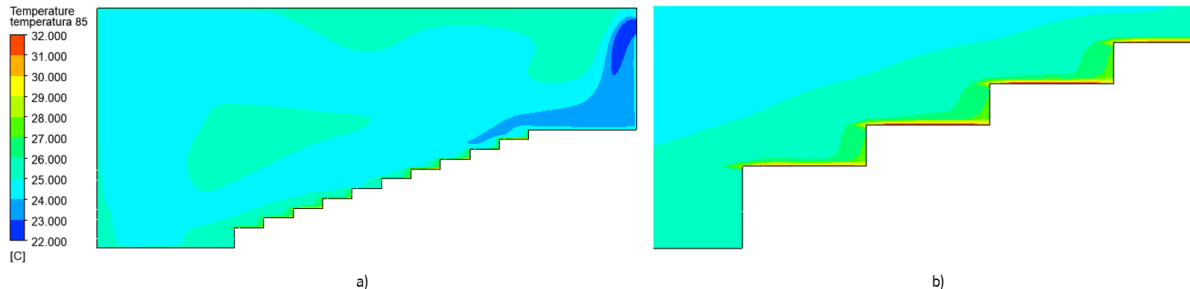


Figura 17 – a) Campos de temperatura com a presença de pessoas no plano vertical A; b) Secção com zoom nos lugares.

Como referido anteriormente, as pessoas são a principal fonte de calor na sala de cinema e o seu contributo é suficiente para alterar o ambiente térmico. Na Figura 17, é possível verificar este comportamento com temperaturas mais elevadas na proximidade dos lugares e o consequente gradiente ao longo da altura do cinema. No geral, a temperatura média simulada foi próxima de 24.5 °C, aproximadamente mais 2.5 °C que a temperatura média simulada sem a presença de pessoas.

Os campos de *PMV* foram também retirados como se demonstra na Figura 18.

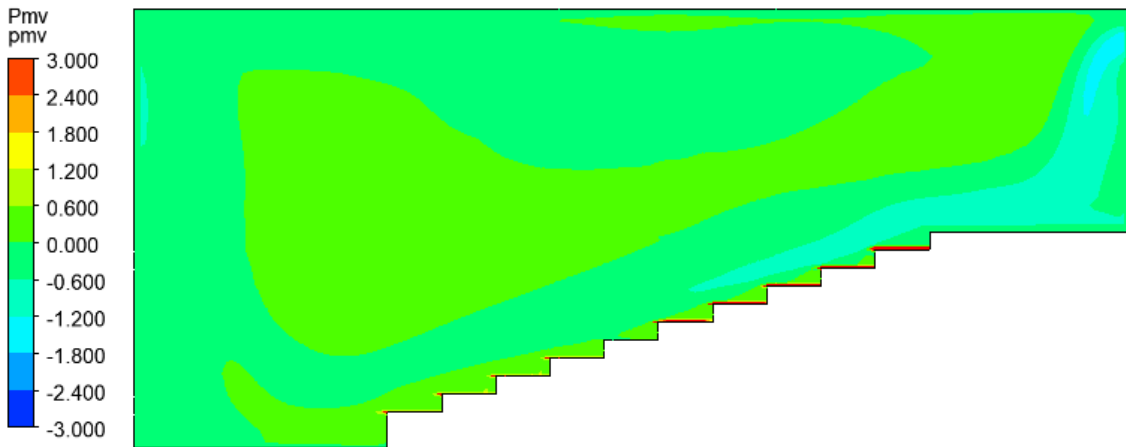


Figura 18 - Campos de *PMV* simulados na sala de cinema com a presença de pessoas no plano vertical A.

Próximo da entrada de ar, o *PMV* é de aproximadamente -1.5, no entanto o *PMV* assume valores entre -0.5 e 0.5 de forma predominante. Assim, é possível verificar um aumento significativo dos valores de *PMV* à medida que a distância aumenta da entrada. Este comportamento é esperado uma vez que o *PMV* também depende da velocidade. É possível verificar que o contorno dos campos de *PMV* apresenta uma concordância com o contorno do campo da velocidade apresentado na Figura 16.

Considerando que esta segunda simulação assumiu que, nos lugares ocupados, era libertada a fração mássica de H<sub>2</sub>O devido à humidade relativa de 65% na superfície da pele de uma pessoa, foi então relevante retirar o contorno da humidade relativa representado na Figura 19.

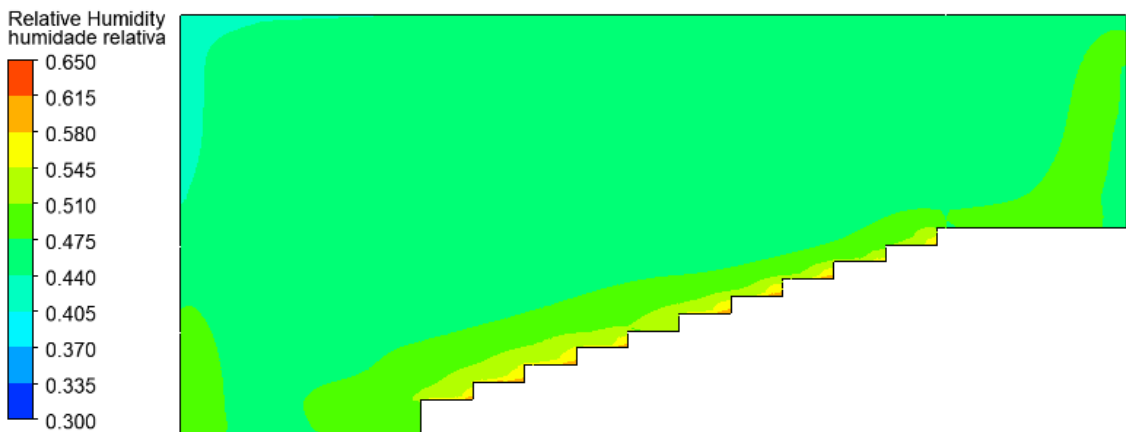


Figura 19 - Contorno da humidade relativa com a presença de pessoas no plano vertical A.

É possível verificar uma humidade de 65% nos assentos, o que valida assim a presença de pessoas nos lugares. No geral há um aumento da humidade relativa em relação à simulação efetuada sem a presença de pessoas apresentada na Figura 12.

### 5.3. DISPERSÃO DE CO<sub>2</sub> LIBERTADO

Uma análise fundamental para avaliar a QAI é a da dispersão das espécies pelo ambiente. Assim, considerou-se que as espécies, mais concretamente o CO<sub>2</sub>, seria o resultado da expiração dos ocupantes. A forma encontrada para representar este fenómeno foi definir a libertação de uma percentagem de CO<sub>2</sub> dos lugares considerados ocupados.

O contorno da velocidade obtido nesta simulação encontra-se na Figura 20.

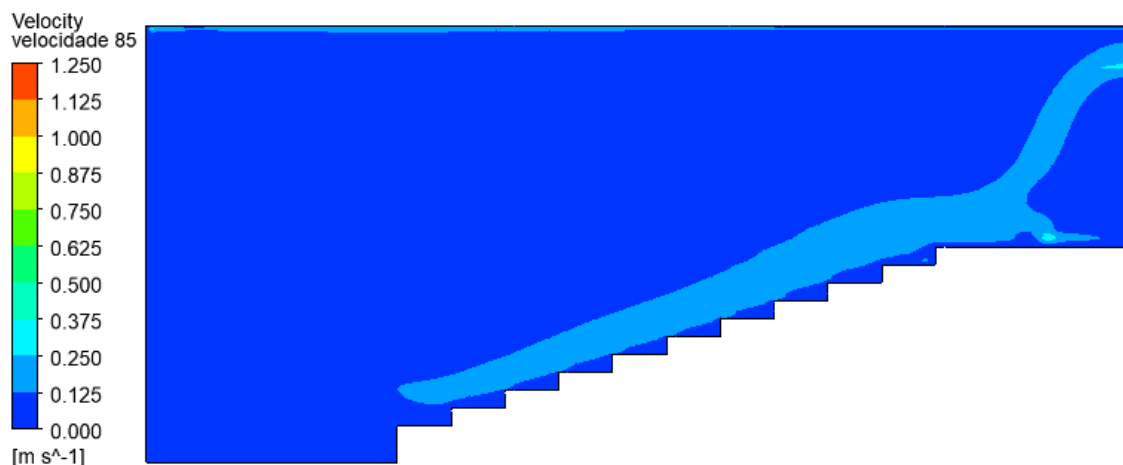


Figura 20 - Campos de velocidade simulados na sala de cinema com introdução de CO<sub>2</sub> no plano vertical A.

Como é possível observar, o ar insuflado entra e dirige-se para a zona dos lugares, o que permite uma dispersão mais rápida das espécies.

Outra variável interessante para o estudo é a temperatura, cujo contorno se encontra na Figura 21.

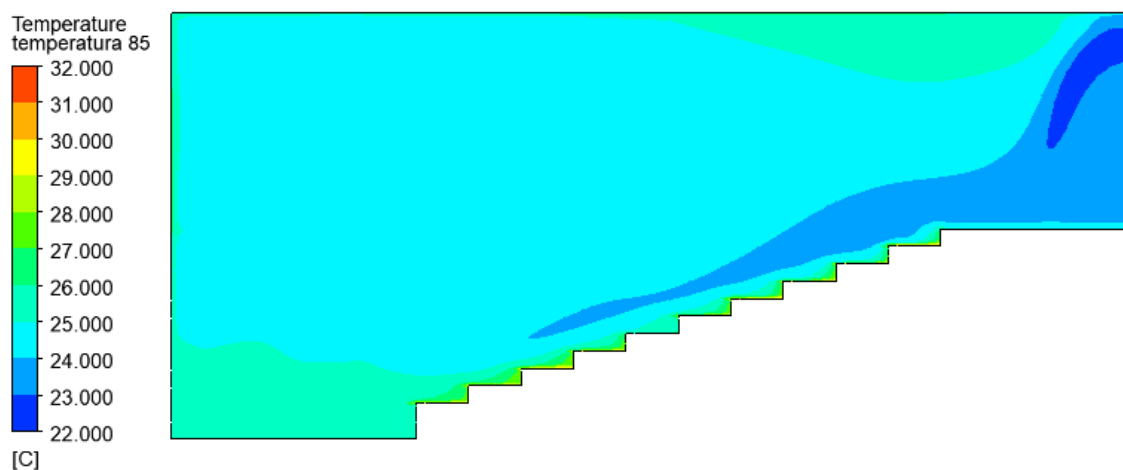


Figura 21 - Campos de temperatura simulados na sala de cinema com a introdução de CO<sub>2</sub> no plano vertical A.

A partir deste contorno observa-se que o ar insuflado apresenta uma temperatura mais baixa e que a zona junto ao teto apresenta uma temperatura mais elevada, o que era esperado devido à

densidade do ar. Este contorno é semelhante ao contorno da temperatura apresentado na Figura 17 sem a dispersão de CO<sub>2</sub>.

Por fim, o contorno relativo à concentração de CO<sub>2</sub> apresentado na Figura 22 foi analisado.

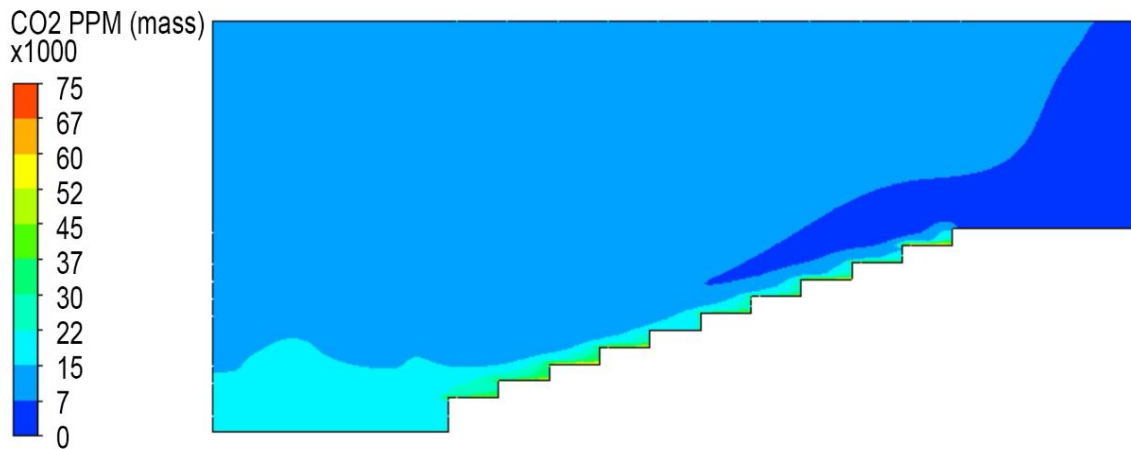


Figura 22 - Campos de concentração de CO<sub>2</sub> simulados na sala de cinema no plano vertical A.

Com o contorno da concentração de CO<sub>2</sub>, é possível perceber que a concentração de CO<sub>2</sub> é maior junto aos lugares ocupados, uma vez que é esse o local de libertação dessa espécie. Conclui-se também que o ar insuflado facilita a dispersão das espécies, uma vez que a zona de maior ocupação é aquela que é mais afetada pelo ar novo que entra.

Foi retirado o caudal de ar novo à entrada sendo este 1.34043 kg/s, ou seja, 3929.22 m<sup>3</sup>/hora. Com base na metodologia prevista no Manual SCE (Sistema de Certificação Energética dos Edifícios) nos termos do n.º 4 do artigo 4.º do (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020), de 7 de dezembro, obteve-se o caudal mínimo de ar novo requerido de 2736 m<sup>3</sup>/hora. Comparando-se os valores, verifica-se que o caudal de ar novo à entrada encontra-se dentro dos parâmetros requisitados, uma vez que é maior que o requisitado.

A fração mássica de CO<sub>2</sub> à entrada foi de 0.000610267 e à saída foi de 0.0136485.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

### 6.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Através da comparação entre as medições experimentais e os resultados simulados foi possível verificar diferenças e algumas delas significativas. Estas diferenças podem ser resultado do facto das medições experimentais terem sido registadas sem que a renovação do ar interior atingisse um estado estacionário. Com base nas medições experimentais foi possível verificar que o ambiente térmico na sala de cinema estava longe da neutralidade térmica com um *PMV* médio de -1.68. Este valor prevê que cerca de 58,67% das pessoas que frequentam o cinema estariam satisfeitas em relação ao ambiente térmico. O contorno do *PMV* simulado junto dos lugares é semelhante, validando assim os resultados. As simulações foram capazes de fornecer uma melhor visão sobre o sistema de ventilação do cinema, principalmente em relação aos detalhes localizados. Em termos de ventilação, havia zonas com ar estagnado e a temperatura era maioritariamente uniforme no caso simulado sem a presença de pessoas. Comparando os resultados simulados com os dados medidos experimentalmente nas mesmas condições, sem a presença de pessoas, obteve-se uma diferença de 2,83 °C da média de 19,17 °C medidos, para os 22 °C obtidos da simulação. No entanto, como o conforto térmico depende de outros parâmetros, como a velocidade, foram calculados os valores locais de *PMV*. Esses campos permitiram um melhor entendimento da sensação térmica prevista em todo o cinema e a verificação de que as pessoas no cinema alteram os valores de previsão, portanto, essa adição de energia deve ser incluída na aplicação do cálculo do *PMV*. A média do *PMV* calculado a partir dos resultados experimentais foi de -1.68, valor este que vai de encontro ao analisado no contorno dos campos de *PMV* simulados nas mesmas condições dos resultados experimentais. Posteriormente foram calculados os campos de *PMV* na simulação que tem em consideração a presença de pessoas, sendo que o valor médio foi de 0. Nesse sentido, é possível concluir que a presença de pessoas eleva o valor do *PMV*. Esta alteração pode ser consequência da adição de temperatura nos lugares ocupados.

Considerando os resultados da simulação que tem em conta o CO<sub>2</sub> libertado na expiração de um ocupante, é possível concluir que o ar insuflado facilita a dispersão de CO<sub>2</sub>. Com base no resultado obtido na simulação do caudal de ar novo à entrada, foi possível verificar que se encontra dentro dos parâmetros requisitados pela legislação portuguesa de caudais mínimos de ar novo (Decreto-Lei n.º 101 -D/2020, 2020).

A metodologia *CFD* também provou ser uma ferramenta valiosa para o estudo e melhoria dos parâmetros de conforto, uma vez que podem ser facilmente alterados e o efeito conhecido. Para melhor avaliar a simulação realizada, devem ser acrescentados mais pontos de comparação, bem como um melhor estudo das condições de entrada e saída.

## **6.2. PERSPETIVAS E TRABALHOS FUTURO**

Este trabalho não contempla alguns fenómenos que, no futuro, podem ser estudados e realizados. Assim, alguns dos seguintes trabalhos podem ser alvo de estudo no futuro:

- Estudo da libertação das espécies utilizando uma função;
- Verificar as zonas de insuflação de forma a garantir que não se encontram com algum tipo de obstrução;
- Realização das medições experimentais durante uma sessão de cinema, considerando assim a presença de pessoas;
- Registar um número maior de medições experimentais.

## BIBLIOGRAFIA

- Alves, H., Alves, L., & Lobarinhas, P. (2017). Ventilation and energy efficiency of buildings. *International Congress on Engineering*.
- ANSYS Inc. (2015). *ANSYS Fluent User's Guide*. <http://www.ansys.com>
- Arya, P., & Leephakpreeda, T. (2015). CFD analysis on thermal comfort and energy consumption effected by partitions in air-conditioned building. In *Energy Procedia* (Vol. 27, pp. 183–188).
- ASHRAE Standard 55. (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Aste, N., della Torre, S., Adhikari, R. S., Buzzetti, M., del Pero, C., Leonforte, F., & Huerto Cardenas, H. E. (2017). CFD comfort analysis of a sustainable solution for church heating. In *Energy Procedia* (Vol. 105, pp. 2797–2802).
- Brager, G. S., & Dear, R. J. de. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. In *Energy and Buildings* (Vol. 27, pp. 83–96).
- Cardoso, T. (2017). *Avaliação do conforto térmico e análise do comportamento energético de uma sala de cinema* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.
- Carneiro, A. (2022). *Simulação CFD do processo de desenfumagem de um parque de estacionamento* [Dissertação de mestrado]. Universidade do Minho.
- Decreto-Lei n.º 101 -D/2020. (2020). *Decreto-Lei que contém o Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE)*.
- Decreto-Lei n.º79/2006. (2006). *Decreto-lei referente ao regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE)*. Diário da República Eletrónico (DRE).
- Dias, A. A. C. (2013). *Avaliação da perceção da influência do conforto térmico na produtividade* [Mestrado]. Universidade do Minho.
- Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. In *British Journal of Industrial Medicine* (Vol. 30).
- Gnat, M. (2022). *Exhaled and Inhale Air - what is made of? | Air Quality Tracker Airly | Air Quality Tracker Airly*. <https://airly.org/en/the-composition-of-inhaled-and-exhaled-air/>
- Gonçalves, I. (2022). *Thermochemical Modeling of the Forest Fire Spread* [Dissertação de mestrado]. Universidade do Minho.



- Hansraj, H. S. (2019). *Análise CFD de modelos de turbulência durante a combustão no motor CFM56-3* [Mestrado]. Universidade da Beira Interior.
- Heinig, M. A. (2020). *Ventilação natural e saúde*. Ministério da Educação Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica Instituto Federal Catarinense. <http://www.camboriu.ifc.edu.br/wp-content/uploads/2020/05/Ventila%C3%A7%C3%A3o-Natural-e-Sa%C3%BAde-.pdf>
- ISO 7730:2005. (2005). *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*.
- Júlio, E. (2020). *Guia FNRE fundo nacional de reabilitação do edificado*. Fundiestamo.
- Li, M., Bekö, G., Zannoni, N., Pugliese, G., Carrito, M., Cera, N., Moura, C., Wargocki, P., Vasconcelos, P., Nobre, P., Wang, N., Ernle, L., & Williams, J. (2022). Human metabolic emissions of carbon dioxide and methane and their implications for carbon emissions. *Science of the Total Environment*, 833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155241>
- Liu, W., Lian, Z., & Deng, Q. (2015). Use of mean skin temperature in evaluation of individual thermal comfort for a person in a sleeping posture under steady thermal environment. *Indoor and Built Environment*, 24(4), 489–499. <https://doi.org/10.1177/1420326X14527975>
- Lopes, A. (2016). *Qualidade do ar interior em ambiente hospitalar*. Instituto Politécnico de Viana do Castelo.
- LSI, L. (2022). *Manual do anemómetro - Heat Shield, marca LSI*. <https://www.lsi-lastem.com/PDF/MW9002/MW9002-ENG-00-Intro-Heat-Shield-WBGT-meter.pdf>
- Miguel, A. S. S. R. (2014). *Manual de Higiene e Segurança do Trabalho* (13ª). Porto Editora.
- Nastase, I., Croitoru, C., Dan, M., Ursu, I., & Meslem, A. (2017). Experimental Study for the Integration of an Innovative Air Distribution System in Operating Rooms. *Energy Procedia*, 112, 613–620. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1127>
- Oliveira, A. (2008). *Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD*. Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra.
- Parsons, K. (2002). *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance* (3rd ed.). CRC Press.
- Portaria n.º 353-A/2013. (2013). *Portaria referente ao regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS) requisitos de ventilação e qualidade do ar interior*. Diário da República (DRE).

- Rodrigues, N. (2017). *Modelação computacional e avaliação experimental do conforto térmico ocupacional em salas de operação* [Tese de Doutoramento]. Universidade do Minho.
- Rodrigues, N., Silva, J., Teixeira, J., & Teixeira, S. (2019). Assessment of Indoor Thermal Conditions in a Cinema Room Using CFD Simulation: A Case Study. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11624 LNCS, 40–51. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24311-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24311-1_3)
- Silva, D. (2021). *CFD analysis of the air flow through horizontal axis wind turbines* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.
- Teixeira, I. M. B. (2021). *Energy and Comfort in Hospital Environment* [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Minho.
- Thakare, H. R., & Parekh, A. D. (2014). CFD analysis of energy separation of vortex tube employing different gases, turbulence models and discretisation schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.083>
- Toolbox, T. E. (2022). *Air - Composition and Molecular Weight*. [https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d\\_212.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-composition-d_212.html)
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method*.
- Yao, Y., Lian, Z., Liu, W., & Shen, Q. (2007). Experimental study on skin temperature and thermal comfort of the human body in a recumbent posture under uniform thermal environments. *Indoor and Built Environment*, 16(6), 505–518. <https://doi.org/10.1177/1420326X07084291>
- Yumpus. (2013). *VelociCheck Model 8330 and 8340 Air Velocity Meters - Field*. <https://www.yumpu.com/en/document/view/15444201/velocicheck-model-8330-and-8340-air-velocity-meters-field>
- Zhang, Y. (2004). *Indoor air quality engineering*.