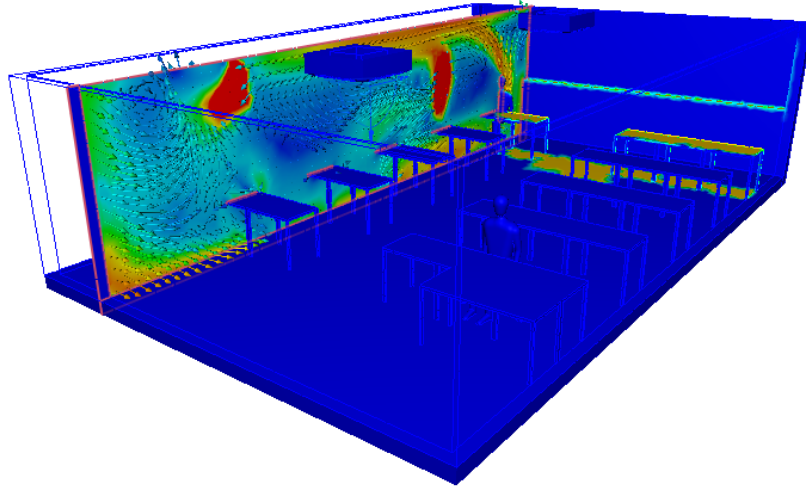




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



A Influência da Radiação Solar nas Condições de Conforto em Espaços Climatizados para Ocupação Humana

Ricardo André Tomé Alves
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa Moura e Silva

Vogais:

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra
Doutor Viriato Sérgio de Almeida Semião

Setembro de 2021

Resumo

Os sistemas de climatização são projetados para proporcionar um ambiente confortável para os seus ocupantes. De forma a mensurar o nível de conforto destes utiliza-se, de entre outros, o PMV, um índice que permite prever o nível de conforto térmico sentido pelos ocupantes quando sujeitos a um conjunto de estímulos desencadeados pelas condições termo-cinemáticas da envolvente. É no entanto evidente, da análise bibliográfica realizada, que este indicador, na sua versão original, não prevê de forma adequada os níveis de conforto reportado pelos ocupantes quando sujeitos a radiação solar direta. Tornando-se por tal necessário ajustar este indicador à condicionante térmica. O presente estudo foca-se na avaliação do conforto no interior de uma sala de aula em que a radiação solar direta é considerada nas condições de fronteira e o seu impacte avaliado. Aplicam-se, para tal, ferramentas numéricas, como CFD, que permitem prever os fenómenos físicos no interior da sala e assim obter os indicadores de conforto térmico correspondentes (PMV, PMV-ERF e PMV-RAD). O estudo aborda duas situações distintas, uma em que existe radiação solar direta no interior da sala e a segunda, em que a mesma não existe devido à aplicação de sombreamento. As propriedades das janelas nas duas situações são díspares, em que na primeira apresenta um fator solar de 0,2 e na segunda de 0,7. Os dados mostram que a utilização de sombreamento oferece melhores condições de conforto e uma potência energética inferior.

Palavras chave: PMV, PPD, ERF, conforto térmico, radiação solar

Abstract

HVAC systems are designed to provide comfortable built environment. To assess the occupants comfort level the PMV index is used allowing the designer to predict the thermal comfort felt by occupants when subjected to a set of stimuli triggered by the thermo-kinematic conditions of the surroundings. However, it is evident from the bibliographical review that this indicator, in its original version, does not adequately predicts the comfort levels reported by occupants when subjected to direct solar radiation. Therefore, it is necessary to adjust this indicator to this thermal condition. The present study focuses on the assessment of comfort inside a classroom where direct solar radiation is considered in the boundary conditions and its impact is evaluated. For this purpose, numerical tools such as CFD are used to predict the physical phenomena inside the room and the corresponding thermal comfort indexes (PMV, PMV-ERF and PMV-RAD). For that, two distinct situations are addressed herein, the first one considers direct solar radiation inside the room and for the second only indirect solar radiation is considered, due to the use of passive shading. Different solar glass properties are used, solar factors of 0.2 and 0.7, and its impact on the predicted comfort indexes are assessed and discussed. The data shows that the use of shading offers better comfort conditions and, at the same time, lower energy consumption.

Keywords: PMV, PPD, ERF, thermal comfort, solar radiation

Agradecimentos

Ao longo das várias etapas que são alcançadas ao longo da vida, é bom saber que há quem nos apoie e ajude. O trabalho realizado apenas foi alcançado com o contributo de várias pessoas, pelo apoio, ajuda e colaboração disponibilizada.

Ao professor Nuno Serra, meu orientador, agradeço a ajuda, os conselhos e orientações fornecidas. A disponibilidade e prontidão em contribuir com conselhos pertinentes que elevaram a qualidade do trabalho.

Aos meus pais e à minha irmã pelo apoio e motivação na realização desta dissertação. Pelo fornecimento das ferramentas necessárias à realização da mesma e pelos conselhos prontamente oferecidos.

À minha família, pelo apoio que demonstraram em toda esta fase da minha vida.

Ao João, amigo de infância, pelo incentivo, ânimo positivo e contagiante ao longo dos desafios enfrentados na realização do trabalho.

Ao Rui, colega de curso, por realizar um percurso académico semelhante ao meu, contribuído para o enriquecimento da dissertação pelas suas sugestões, empenho e motivação.

Índice

Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos	v
Índice	vii
Índice de Tabelas	ix
Índice de Figuras	ix
Glossário	xii
1 Introdução	1
1.1 Âmbito do trabalho	1
1.2 Climatização para o conforto sujeito a radiação solar – conceitos fundamentais	2
1.2.1 Conforto	3
1.2.2 Radiação Solar em Edifícios	7
1.3 Revisão bibliográfica	11
1.3.1 CFD	11
1.3.2 Conforto	13
1.3.2.1 O conforto e radiação solar.....	15
1.3.2.2 Conforto e CFD	19
1.3.2.3 Conforto sob a incidência de radiação solar – aplicação de CFD	20
1.4 Objetivos e contribuição do trabalho	23
1.5 Estrutura e organização do trabalho.....	24
2 Modelação matemática e numérica	25
2.1 Introdução	25
2.2 Equações matemáticas de processos físicos	25
2.2.1 Equações que governam o escoamento de fluidos	25

2.2.2	Modelo de turbulência.....	27
2.2.3	Condições de fronteira físicas nas paredes.....	33
2.2.4	Modelo de radiação	34
2.2.5	Índices de conforto térmico.....	36
2.3	Modelação Numérica.....	37
2.3.1	Método dos elementos finitos	37
2.3.2	O método de solução	40
2.3.3	Características da solução por métodos numéricos.....	44
3	Aplicação ao estudo do conforto sob a incidência da radiação solar	47
3.1	Geometria.....	47
3.2	Condições de fronteira aplicadas	50
3.3	Considerações computacionais	56
3.3.1	Malha.....	56
3.3.2	Convergência e tempo de cálculo.....	56
3.3.3	Ferramenta computacional	57
3.4	Resultados.....	59
3.4.1	Radiação solar	60
3.4.2	Caso 1 – Índices de conforto térmico sob exposição de radiação solar direta	61
3.4.3	Caso 2 – Utilização de sombreamento ou vão envidraçado de elevado desempenho	67
3.4.4	Caso 3 – Potência energética para condições ambientais de conforto sob exposição de radiação solar direta	75
4	Conclusão.....	81
4.1	Síntese conclusiva.....	81
4.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	85
	Referências	87

Anexo	101
Anexo A - Propriedade dos materiais	101
Anexo B – Radiação difusa.....	104
Anexo C – Código dos programas computacionais	105

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Constantes do modelo RNG k- ϵ (Autodesk CFD help, 2020)	31
Tabela 2- Condições de Fronteira.....	55
Tabela 3 - Consumo energético	80

Índice de Figuras

Figura 1 - Curva empírica do PPD (ISO 7730, 2005)	5
Figura 2 – Distribuição espectral da radiação solar (Incropera et al., 2007).....	9
Figura 3 - Escoamento na camada limite (Efros, 2006)	32
Figura 4 - Funções de teste e peso lineares (Zienkiewicz et al.,2005)	39
Figura 5 - Petrov-Galerkin funções de peso (Zienkiewicz et al.,2005).....	39
Figura 6 - Geometria da sala.....	47
Figura 7 - Computational Thermal Manikin	48
Figura 8 – Cassete (unidade milímetros).....	49
Figura 9 - Edifício do departamento de Engenharia Mecânica do ISEL (google maps)	49
Figura 10 - Posição geométrica dos planos	59
Figura 11 - Fluxo de radiação solar direta (plano horizontal localizado a 1,1 metros do chão)	60
Figura 12 - Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão.....	61
Figura 13 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A)	62
Figura 14 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão	63

Figura 15 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A).....	63
Figura 16 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo PMV-ERF	64
Figura 17 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo Conforto térmico - PMV-RAD	64
Figura 18 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo Conforto térmico - PMV-ERF	66
Figura 19 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo Conforto térmico - PMV-RAD	66
Figura 20 - Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão – SCS	68
Figura 21 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) – SCS	68
Figura 22 – Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-S.....	69
Figura 23 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-S	69
Figura 24 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão – SCS	70
Figura 25 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SCS	70
Figura 26 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-S.....	71
Figura 27 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-S	71
Figura 28 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico – SCS	72
Figura 29 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico PMV-ERF – SR-S	73
Figura 30 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico – SCS.....	74

Figura 31 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico - PMV-ERF - SR-S.....	74
Figura 32 - Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-E.....	76
Figura 33 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-E	76
Figura 34 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-E	77
Figura 35 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-E.....	77
Figura 36 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico PMV-ERF - SR-E.....	79
Figura 37 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico - PMV-ERF - SR-E	79

Glossário

Símbolos

A	Área
a	Aceleração
A_{ii}	Coefficiente algébrico resultante da discretização dos termos de advecção e difusão
$a_p, a_{1,p}$	Coefficientes da discretização
B	Constante empírica relacionada com a espessura da subcamada viscosa
C	Calor perdido por convecção
C_{dn}	Coefficiente dia-noite
C_p	Calor específico a pressão constante
C_{res}	Calor perdido por convecção devido à respiração
C_S^{in}	Coefficiente associado à estrutura do edifício
C_μ	Constante empírica do modelo de turbulência
C_1, C_2	Constantes do modelo de turbulência
D	Diâmetro
E_{bi}	Poder emissivo de um corpo negro
E_{diff}	Energia da radiação solar difusa proveniente do céu
E_{dir}	Energia solar direta proveniente do sol
E_{refl}	Energia solar refletida no chão que é direcionada para a superfície do corpo
E_{res}	Calor evaporado pela respiração
E_{sk}	Calor perdido pela evaporação na pele
F	Força
F_{ij}	Fator de forma
f_{bes}	Fração do corpo exposta à radiação solar
f_{cl}	Razão entre a área do homem vestido com a despido
f_{eff}	Fração do corpo exposta à radiação solar
f_p	Fator de área projetada do individuo na direção dos raios solares
f_{svv}	Fração do céu que se encontra visível a partir do centro do corpo
$F_{S \rightarrow i}$	Fator de forma entre o individuo e as i superfícies isotérmicas

$F_{S \rightarrow j}$	Fator de forma entre o individuo e as j superfícies transparentes
G_i	Radiação incidente na face
h	Entalpia
h_c	Coefficiente de transferência de energia por convecção
HR	Humidade relativa
h_r	Coefficiente de transferência de energia por radiação
I	Intensidade turbulenta
I_{diff}	Intensidade da radiação solar difusa
I_{dir}	Intensidade da radiação solar direta
$I_{d,j}^{in}$	Radiação solar difusa que entra no ambiente a partir das superfícies transparentes
I_{bn}^{in}	Radiação solar direta que entra no ambiente a partir das superfícies transparentes
I_{TH}	Intensidade da radiação solar, direta e difusa no horizonte no exterior
I_{cl}	Resistência térmica da roupa
J_i	Radiosidade
K	Calor perdido por condução
k	Energia cinética turbulenta
k_d	Coefficiente de difusão
k_t	<i>Clearness index</i>
k_{VK}	Constante adimensional de Von Karman
l	Escala de comprimento turbulenta
M	Produção de calor devido ao metabolismo
m	Massa
\dot{m}_{ar}	Caudal mássico de ar
N_a	Funções de forma
p	Pressão
p_a	Pressão parcial de vapor de água
p_s	Pressão de saturação
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor
q	Calor
$q_{emitida}$	Potência emitida

Q_f	Termo de fonte
Q_p	Termo de fonte em P
q_{ri}	Taxa de transferência de calor por radiação que irradia o elemento i
Q_s	Calor sensível
\dot{q}_w	Fluxo de calor na condição de fronteira
R_1	Radiação de comprimento de onda elevado
R_2	Radiação de comprimento de onda curto
R_{floor}	Refletividade no chão
R_ϕ	Valor dos resíduos
S	Energia armazenada no corpo
T	Temperatura
t_a	Temperatura do ar
t_{cl}	Temperatura da superfície da roupa
t_f	Temperatura do chão
T_p	Temperatura da superfície da condição de fronteira
\bar{t}_r	Temperatura radiante média
T_{sol}	Transmissão solar total pelo vão envidraçado
Tu	Intensidade de turbulência do ar
V	Velocidade
v	Velocidade na coordenada y
\bar{v}	Velocidade média
v_{ar}	Velocidade relativa do ar em relação ao corpo humano
u	Velocidade na coordenada x
u_i	Velocidade nas diferentes coordenadas
U^+	Velocidade adimensional tangencial à superfície sólida
\bar{u}_t	Velocidade tangencial à superfície sólida
\dot{W}	Trabalho realizado pelo corpo
w	Velocidade na coordenada z
W_a	Funções de peso
y^+	Distancia normal adimensional

Carateres Gregos

α	Absorsividade à radiação solar
$\alpha_{irr,b}$	Absorsividade solar direta
$\alpha_{irr,d}$	Absorsividade solar difusa
α_{LW}	Absorsividade espectral de elevado comprimento de onda
α_p	Coefficiente de sub-relaxação da pressão
α_{SW}	Absorsividade espectral de baixo comprimento de onda
α_u	Coefficiente de sub-relaxação da velocidade
β	Constante do modelo de turbulência
β_s	Altitude da posição do sol
δ	Distancia à superfície
$\Delta_{a,v}$	Variação da temperatura entre os pés e a cabeça
Δ_{pr}	Assimetria de temperatura radiante
λ	Comprimento de onda da radiação
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
ε_r	Emissividade
η	Valor do modelo de turbulência
η_0	Constante do modelo de turbulência
μ_t	Viscosidade turbulenta
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa volúmica
σ	Tensão normal
σ_{SB}	Constante de Stefan-Boltzmann
σ_t	Número de Prandtl
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Números de Schmidt para escoamento turbulento
τ	Tensão de corte
τ_{ij}	Tensor das tensões de Reynold
Γ_q	Condição de fronteira de Neumann
$\tau_{r,i}$	Transmissividade
ϕ	Escalar

Abreviaturas

APMV	<i>Ajusted Predicted Mean Vote</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BES	<i>Building Energy Simulation</i>
CFD	Dinâmica de fluidos computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CPMV	<i>Corrected Predict Mean Vote</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
DR	<i>Draft Rating</i>
ERF	<i>Effective Radiant Field</i>
FLIC	<i>Fluid in Cell</i>
LES	<i>Large-Eddy Simulation</i>
MAC	<i>Marker and cell</i>
PD	<i>Percentage Dissatisfied</i>
PIC	<i>Particle in cell</i>
PMV	<i>Predict Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted percentage of dissatisfied</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
SIMPLE	<i>Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent</i>
SIMPLER	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations -Revised</i>
UDF	<i>User Define Function</i>

1 Introdução

1.1 Âmbito do trabalho

Atualmente na Europa existe grande preocupação em relação à eficiência energética. Segundo a Agência Europeia do Ambiente (Energia, 2019), referindo-se à energia, esta diz o seguinte: “Fundamental para a produção de riqueza industrial, comercial e social, a energia proporciona igualmente conforto e mobilidade pessoal. No entanto, a sua produção e o seu consumo exercem uma pressão considerável sobre o ambiente: emissões de gases com efeito de estufa e de poluentes atmosféricos, uso dos solos, geração de resíduos e derrames de petróleo. Esta pressão contribui para as alterações climáticas, danifica ecossistemas naturais e o ambiente antropogénico, e tem efeitos adversos na saúde humana”.

Nas atividades diárias, praticadas pelos humanos, muitas vezes é necessário a utilização de energia. Os combustíveis fósseis tornaram-se, em muitos países desenvolvidos, a base de produção de energia. Na Europa, cerca de 77% das necessidades energéticas do europeu médio são satisfeitas com recurso ao petróleo, ao gás natural e ao carvão (Energia, 2019). A sua combustão resulta na libertação poluentes atmosféricos, um destes o dióxido de carbono. O aumento destes poluentes na atmosfera resulta em problemas da qualidade do ar e o aumento do efeito de estufa (Martins *et al.*, 2018).

Ao longo do tempo diversas políticas energéticas foram sendo implementadas na Europa (ver por exemplo diretiva 2001/77/CE, diretiva 2018/2001, Conselho da União Europeia 11052/12). Nos últimos anos, pretendeu-se alcançar os objetivos definidos no plano de estratégia energética estipulada para 2020. Os pontos principais deste plano incidem na obtenção de 20% da energia consumida na Europa a partir de fontes renováveis e o aumento de 20% na eficiência energética. As políticas implementadas visam melhorar a segurança do aprovisionamento energético, competitividade económica e disponibilidade energética, fomentar o desenvolvimento do mercado e tributação de produtos energéticos (Energia, 2020). Tendo em vista o futuro, já se encontram marcos de revisão energética com objetivos estipulados, um destes para 2030 (diretiva 2018/2001). Seguindo as diretivas europeias, em Portugal são implementadas medidas

tendo em vista os objetivos Europeus (exemplo deste: Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030).

Em 2016, na União Europeia, perto de 40% da energia final era utilizada em edifícios (Rousselot, 2018). Simultaneamente, é de amplo conhecimento que nos edifícios equipados com sistemas de climatização e/ou ventilação a radiação solar pode afetar o consumo energético destes sistemas de forma significativa. Isto porque o ganho térmico proveniente da radiação solar tem de ser removido pelo sistema de climatização. Associado ao enunciado, numa tentativa de manter a temperatura na zona de incidência da radiação solar dentro de valores aceitáveis, é provável que os espaços adjacentes sejam sobre arrefecidos. É ainda necessário considerar o impacto desta quando incide diretamente num ocupante da divisão, uma vez que afeta substancialmente o nível de conforto experienciado por este (Arens *et al.*, 2014).

Vários estudos abordam o conforto térmico utilizando diversas metodologias para o caracterizar. No entanto, a metodologia de aquisição de dados que permite caracterizar as condições ambientais, além de morosa, requer a utilização de instrumentos específicos, que nem sempre estão disponíveis. Uma alternativa consiste na utilização de ferramentas computacionais de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que permitem prever por meio de procedimentos numéricos o valor do conforto térmico. O estudo do conforto térmico no interior de edifícios revela a sua importância, quando se tem em mente a quantidade de horas que as pessoas passam no interior de espaços confinados. Na maioria dos quais, a obtenção das condições térmicas requeridas é realizada artificialmente recorrendo a sistemas de climatização e/ou ventilação, de forma a atingir-se o conforto térmico (Buratti *et al.*, 2017). Por um lado, condições ambientais (no interior do espaço) desadequadas podem causar doenças e sintomas de desconforto térmico. Contrariamente, boas condições de conforto térmico e de qualidade de ar contribuem para a produtividade, perceção de satisfação e felicidade (Shan *et al.*, 2019).

1.2 Climatização para o conforto sujeito a radiação solar – conceitos fundamentais

Deve ser objeto de um projeto de climatização e ventilação minimizar os custos energéticos e maximizar o conforto térmico que o sistema proporciona. Para se perceber a importância do tema é imprescindível o correto entendimento dos conceitos

associados ao mesmo. Deste modo, pretende-se explicar os conceitos mais importantes para o presente estudo.

1.2.1 Conforto

O aumento das condições de trabalho, associadas ao desenvolvimento tecnológico, resulta num estilo de vida superior e mais adequado à vida moderna. Os sistemas de climatização ou de condicionamento das condições de conforto são os que mais contribuem para este incremento, no que se refere aos edifícios. Neste âmbito, surge a crescente preocupação energética com os mesmos vertida em diversas ferramentas legais e técnicas das quais se destacam o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, RCCTE (Decreto-lei nº80/2006) e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios, RSECE (Decreto-lei nº79/2006). Observa-se nestes a preocupação da conjugação do consumo energético com o conforto térmico no interior dos edifícios. Correlacionado com o apresentado, identifica-se a preocupação pela produtividade e a saúde, por parte dos utilizadores de um edifício sujeito a climatização por um sistema dedicado. Prova dessa preocupação é consubstanciada, por exemplo, no trabalho de Akimoto *et al.* (2009) que versa a influência que o controlo das condições ambientais tem no local de trabalho, fazendo notar que o seu controlo por um sistema focado a cada trabalhador – *task ambient conditioning* - conduz a níveis de cansaço inferiores.

Na sociedade moderna, a grande maioria das horas utilizadas durante o dia decorrem dentro de edifícios. No interior destes, encontram-se os sistemas de climatização artificial que controlam as condições térmicas do espaço. Com o passar do tempo e do desenvolvimento tecnológico, verifica-se o aumento do entendimento e conhecimento dos sistemas de climatização. Indissociável destes, e principalmente à sua função, surge o conceito de conforto térmico. O conforto térmico pode ser definido, segundo a ASHRAE 55 (2017), como a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico envolvente decorrente de uma avaliação subjetiva. Correlacionado com este conceito, Ole Fanger (1977) ainda desenvolve como sendo uma sensação térmica neuronal neutra, onde o corpo não identifica se prefere uma temperatura ambiente superior ou inferior. Este autor ainda acrescenta, que o conforto térmico necessita de ser expresso no corpo inteiro, estando o indivíduo isento de desconforto local associado a

assimetrias de radiação, correntes de ar, chão quente ou frio, gradientes de temperatura verticais, tipos de vestuário não uniforme, entre outros. Contrariamente identifica-se como sendo fundamental para se atingir condições de conforto térmico aceitável, a consideração de parâmetros como o metabolismo corporal, utilização da roupa, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e humidade (ASHRAE 55, 2017).

Diferentes estudos têm sido conduzidos com o intuito de determinar os parâmetros de conforto térmico e a adaptabilidade de modelos utilizados. Neste campo de estudo, os índices mais utilizados são os provenientes do trabalho de Fanger (1972), o PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Apesar da sua ampla utilização, esta tem de ser realizada de uma forma consciente e cautelosa, nomeadamente nos valores assumidos referentes ao tipo de vestuário e ao metabolismo. O enorme sucesso deste modelo é provavelmente devido à maneira como o problema foi concebido em primeiro lugar, onde a solução do mesmo vai de encontro aos requisitos de projeto de sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). O projeto e os critérios de dimensionamento de um sistema de AVAC de um edifício podem ser definidos nas variáveis do modelo. Deste modo o engenheiro possui quatro variáveis ambientais para trabalhar e atender aos critérios de conforto térmico, a saber, temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade do ar e humidade (Dear, 2004). Com o seu trabalho, Fanger pretendia apresentar um método para prever, dependendo do tipo de vestuário, da atividade e para diferentes condições ambientais, qual a percentagem de pessoas, num grupo alargado, que se sentiria confortável (Hoof, 2008). Para alcançar tal objetivo, Fanger introduziu, como já referido, dois indicadores, o PMV e o PPD. O PMV foi obtido a partir de experiências realizadas numa câmara térmica, com mais de 1300 pessoas e tem como objetivo determinar a sensação térmica. A escala associada a este indicador varia de +3 – muito calor, a -3 – muito frio e representa a média dos votos referentes à sensação térmica no corpo todo (ASHRAE 55, 2017). Apesar de a maioria das pessoas num grupo alargado experienciar neutralidade térmica quando este valor é 0, existem pessoas que reportam desconforto térmico. Por forma a determinar-se a percentagem de pessoas que provavelmente pode experienciar desconforto térmico, sentindo-se desconfortavelmente quente ou frio, aplica-se o indicador PPD, sendo este calculado a partir do PMV (ISO 7730, 2005). Deste modo, para qualquer valor de PMV,

os membros de um grupo que se apresentam insatisfeitos podem ser estimados pela curva empírica do PPD, expressa na figura 1 (ISO 7730, 2005).

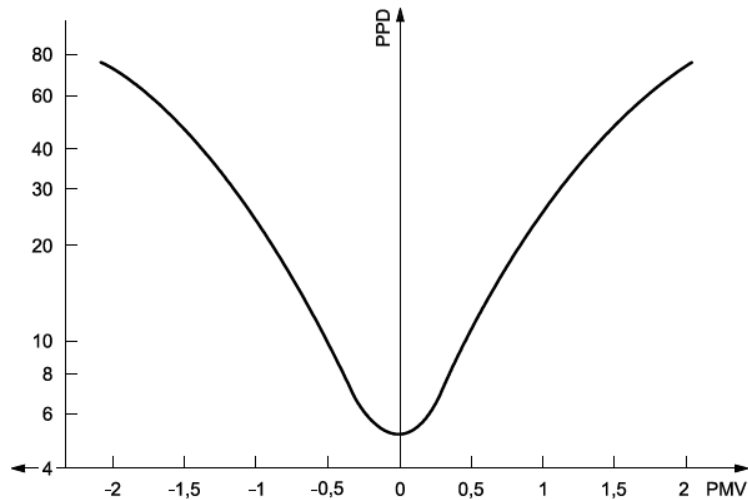


Figura 1 - Curva empírica do PPD (ISO 7730, 2005)

A ASHRAE 55 (2017) apresenta valores do PMV aceitáveis para conforto geral quando estes encontram-se no intervalo de -0,5 a +0,5. Para tal situação o PPD máximo obtido é de 10% na quantidade de pessoas que se encontram desconfortáveis. Apesar disso, na maioria dos edifícios, o valor de 90% das pessoas satisfeitas não é alcançado, verificando-se tipicamente um valor de 80%. O motivo da diferença apresentada (10%) reflete o potencial de desconforto local em partes localizadas do corpo - desconforto local – (ASHRAE 55, 2017). Isto é, dos expectáveis 20% de insatisfeitos com as condições de conforto propiciadas por um PMV de $\pm 0,5$, resultam da contribuição de dois fatores, desconforto térmico geral (10%) e desconforto térmico local (10%). Outra abordagem é a verificada na ISO 7730 (2005), que estipula os valores aceitáveis de PMV em três categorias, sendo estas as seguintes, A ($PMV \pm 0,2$), B ($PMV \pm 0,5$) e C ($PMV \pm 0,7$). Em cada uma destas, é ainda especificado o desconforto térmico no corpo todo, PPD e o desconforto local máximo associado a cada um dos fatores ambientais. Na literatura, a relação entre o desconforto térmico local e o desconforto térmico geral, medido pelo índice PPD, ainda não foi investigado apesar dos dois fatores poderem estar relacionados. Não obstante o seu impacte é contabilizado em cada uma das categorias (A, B e C) da ISO 7730 (2005) onde é estimado, sem relacionamento mútuo, o desconforto térmico (Dear, 2004, Simone *et al.*, 2013). Como já referido, vários são os fatores que influenciam

desconforto térmico local. Dentro destes, quatro advêm das condições ambientais: assimetrias de radiação, correntes de ar, chão quente ou frio e gradientes de temperatura verticais. Uma descrição sumária destes índices de conforto térmico local é feita de seguida.

É sabido que o movimento do ar apresenta um impacte substancial no conforto térmico dos ocupantes. De facto, a sensação de corrente de ar é originada por um desequilíbrio entre o calor gerado pelo corpo e o calor removido por convecção, o que gera uma sensação de desconforto habitualmente local e muito dependente da velocidade do ar. A sensação de corrente de ar é ainda agravada quando existem flutuações na velocidade, associada à turbulência do ar (Fanger *et al.*, 1988), ou na temperatura (Lampret *et al.*, 2018). Para avaliar a sensação de corrente de ar recorre-se ao indicador DR (*Draught Rate*), em que o seu valor representa a percentagem prevista de insatisfação devido à sensação de corrente de ar (Fanger *et al.*, 1988).

Outro parâmetro a considerar, a variação do gradiente térmico vertical, relacionado com diferenças de temperaturas entre o ar na zona junto aos pés e o ar na região da cabeça pode levar a desconforto térmico local. Nos sistemas do tipo deslocamento, o gradiente de temperatura vertical é de grande importância devido à estratificação térmica, que influencia o conforto térmico global e local. Möhlenkamp *et al.* (2018) defendem no seu estudo que um gradiente vertical de até 8 K/m pode ser aceitável e propiciador de condições locais de conforto, o que de alguma forma contradiz o máximo de 3-4 K/m sugerido na literatura. No que se refere às normas de conforto, a ISO 7730 (2005), para o cálculo da percentagem de pessoas que irão sentir desconforto, considera um valor limite para o gradiente térmico de 8 °C entre a cabeça e os pés. Já a ASHRAE 55 (2017) especifica que não pode exceder os 3 °C para índices de vestuário de 0,7 clo e níveis de atividade de 1,3 met, aumentando esse valor para 4°C para o caso de ocupantes num estado sedentário.

Quando o chão se encontra mais quente ou frio, os ocupantes do espaço podem sentir-se desconfortáveis devido à sensação térmica nos seus pés. Quando os pés dos ocupantes se encontram diretamente em contacto com o chão, o material do mesmo é importante no conforto térmico. Por outro lado, quando as pessoas utilizam calçado, o material do chão é insignificante (Fanger, 1977). Devido à diferença de temperatura do chão em relação à temperatura da divisão, esta desigualdade provoca a existência de assimetria de radiação. Apesar de poder encontrar-se relacionado com a temperatura do chão, assimetrias de

radiação também podem ocorrer devido às temperaturas das paredes e do teto, caso estas sejam diferentes, e à exposição da radiação solar. Devido ao aparecimento de um maior número de sistemas de climatização que utilizam radiação, assimetrias verticais e horizontais, ou ambas, ocorrem quando se opta pela aplicação destes sistemas (Zhou *et al.*, 2019). Dependendo da superfície que apresenta uma temperatura diferente da restante divisão, diferente é o impacto no conforto térmico (ASHRAE, 2017, ISO 7730, 2005, Zhou *et al.*, 2019). Uma assimetria de radiação devido a uma parede quente causa menor desconforto do que a mesma situação na presença de uma parede fria. Ainda, um teto frio causa menor desconforto que um teto quente (Fanger *et al.*, 1985). Assimetria de radiação também se pode dever à incidência direta e difusa da radiação solar (Marino *et al.*, 2015). O impacto da radiação solar no conforto térmico é aprofundado no subcapítulo seguinte.

Abordados os principais fatores ambientais que causam desconforto térmico local, aborda-se em seguida os inerentes ao comportamento do indivíduo. À semelhança dos anteriores, o metabolismo e o vestuário, tanto têm impacto no conforto térmico geral como local. Relativamente ao vestuário, uma distribuição desadequada de isolamento térmico associada a este fator pode enfatizar desconforto térmico local (Simone *et al.*, 2013). Também, consoante o nível de atividade realizada, diferente será a percepção de conforto térmico. A variação do metabolismo encontra-se associado à atividade corporal a desempenhar. Por sua vez, dependendo desta, poderá ocorrer o deslocamento físico do corpo no espaço em que se encontra. Exemplo desta é quando um indivíduo caminha. Neste caso, a atividade realizada afeta tanto o metabolismo, como a velocidade do ar na envolvente a este. (Zhang *et al.*, 2020).

Pelos aspetos apresentados, verifica-se que para se atingir o desejado conforto térmico é imprescindível a consideração de diversos parâmetros, sendo estes provenientes tanto do comportamento do indivíduo como do ambiente em que este se insere. Deste modo, pretende-se atingir conforto térmico no corpo todo, minimizando a insatisfação geral e local.

1.2.2 Radiação Solar em Edifícios

Em engenharia procura-se quantificar e prever a quantidade de energia transferida pelos mecanismos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Referente

aos edifícios, no projeto e dimensionamento de sistemas de climatização estão presentes os três mecanismos enunciados.

Ao contrário da transferência de calor por condução e convecção, que precisam de um meio físico para se efetuarem as trocas energéticas, o terceiro, trocas de calor por radiação, não necessita. Assim este meio de trocas energéticas pode ocorrer no vácuo.

Este tipo de transferência de calor pode ser determinado pela lei de Stefan-Boltzman que para uma superfície negra, se resume ao descrito na equação 1.1 (Holman, 2002).

$$q_{\text{emitida}} = \sigma_{\text{SB}}AT^4 \quad (1.1)$$

σ_{SB} é a constante de Stefan-Boltzmann - $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Um corpo negro é o emissor ideal, pois emite o máximo de radiação eletromagnética possível a uma dada temperatura. Outros tipos de superfícies – corpos reais -, não irradiam uma quantidade tão elevada de energia, mas sim uma percentagem desta à qual se denomina de emissividade (ϵ_r). Apesar disso, a radiação total emitida por esses corpos é também proporcional a T^4 (Holman, 2002).

A radiação solar insere-se no espectro da radiação térmica. A sua intensidade na superfície da terra encontra-se dependente das condições atmosféricas, da altura do ano e do ângulo de incidência da radiação solar. No limite da atmosfera, quando a terra se encontra à distância média do sol, a radiação solar total é de 1395 W/m^2 (Holman, 2002). Este valor é intitulado de constante solar.

A distribuição espectral solar extraterrestre aproxima-se de um corpo negro a uma temperatura de 5800 K . O fluxo radiativo encontra-se maioritariamente concentrada na região de comprimento de onda curto ($0,2 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$). A radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre sofre significativas mudanças na sua magnitude e distribuição. Estas mudanças devem-se à absorção e dispersão (*scattering*) da radiação por elementos constituintes da atmosfera. A figura 2 (Incropera *et al.*, 2007) apresenta as mudanças no espectro solar. Nesta figura, observa-se o efeito de absorção por gases atmosféricos, como o O_3 (ozono), H_2O (vapor de água), O_2 (oxigénio molecular) e CO_2 (dióxido de carbono). Ao longo do espectro solar, ainda existe absorção por poeiras e aerossóis presentes na atmosfera. O efeito de dispersão encontra-se relacionado com a dimensão das moléculas presentes na atmosfera (Incropera *et al.*, 2007).

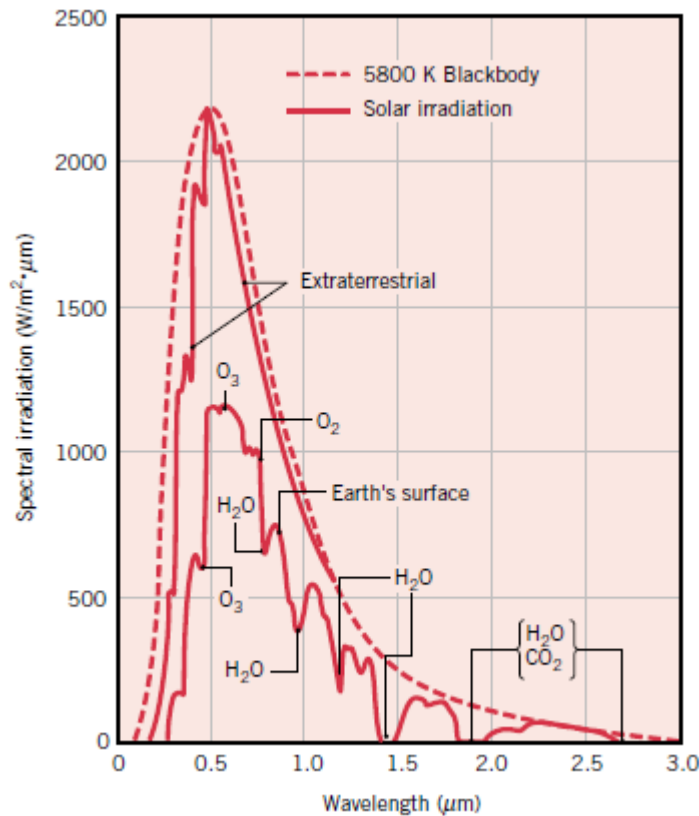


Figura 2 – Distribuição espectral da radiação solar (Incropera et al., 2007)

A dispersão atmosférica é o resultado do redirecionamento dos raios solares provenientes do sol. Esta ocorre de dois modos: *Rayleigh scattering* (molecular) ocorre em moléculas de gás de pequena dimensão, tipicamente quando o valor de $\pi D/\lambda$ é muito menor que a unidade, a radiação proveniente do sol é redirecionada uniformemente em todas as direcções; *Mie scattering* ocorre em partículas de pó e aerossóis, quando $\pi D/\lambda$ é próximo da unidade e neste caso a radiação solar é redirecionada, mas ao contrario da anterior, esta é concentrada na direcção dominante da radiação solar incidentes (Incropera et al., 2007).

A radiação proveniente do sol que passa na atmosfera sem ser absorvida, nem sofrer efeitos de dispersão, é denominada de radiação direta. A radiação redirecionada pode incidir em todas as direcções, apesar da sua intensidade ser superior na direcção da radiação direta. A radiação redirecionada é intitulada de radiação difusa. A parcela de contribuição dos dois tipos de radiação, direta e difusa, pode variar substancialmente dependendo das condições atmosféricas (Incropera et al., 2007).

Para responder a exigências arquitetónicas e de luminosidade, cada vez mais são utilizados vãos envidraçados de grandes dimensões. Consequentemente, aumenta a

quantidade de radiação proveniente do exterior que entra pelas superfícies transparentes do edifício. Deste modo, o desenvolvimento de métodos que identifiquem, relativamente à posição do sol, a incidência da radiação no edifício, conduz a um melhor entendimento da exposição do espaço de ocupação (La Gennusa *et al.*, 2007).

Conforme atrás referido, ocorrem situações de desconforto térmico local que podem ser derivadas de diversas influências externas, em que uma destas é a assimetria de radiação incidente no corpo. Neste âmbito a radiação a que o corpo se encontra sujeito pode provir de superfícies quentes ou frias, ou da ação direta e difusa da radiação solar. Esta assimetria poderá resultar em desconforto local por parte dos ocupantes do espaço. Relativamente a esta temática, Wang *et al.* (2019) apresenta um estudo experimental, onde realça as diferentes combinações de temperatura radiante associada ao conforto térmico quando esta apresenta um valor superior à temperatura do ar. É abordada a neutralidade térmica utilizando como indicador a temperatura da pele, sugerindo-se que variações na temperatura radiante e na temperatura do ar influenciam a temperatura ótima da superfície da pele do corpo. A presença de superfícies (paredes) a temperaturas diversas, poderá provocar que diferentes partes do corpo apresentem temperaturas diferentes, o que se refere poderá resultar em sensações de desconforto térmico local. Relativamente à ação direta e difusa do sol no interior de um edifício, Marino *at al.* (2015) explora o impacte que esta apresenta no conforto térmico apresentando um modelo baseado na ISO 7330 (2005). Modelos como o referido revelam a sua importância quando utilizados em estudos de radiação, por forma a identificar zonas internas de um edifício que são desconfortáveis.

A abordagem à radiação solar associada aos edifícios apresenta diversas variáveis que são influenciadas pelas opções construtivas do próprio edifício. Deste modo, soluções de otimização do projeto podem apresentar diversos benefícios tanto nos níveis de conforto promovidos como nos consumos energéticos associados. Diversos são os estudos que realçam esta temática, dos quais se destacam os trabalhos desenvolvidos por Ahmed *et al.* (2017) e Taleb *et al.* (2020).

É pois fundamental discutir e avaliar de que modo se interligam a radiação solar e o conforto térmico e qual o impacte destes nos consumos energéticos dos edifícios e, conseqüentemente, nas políticas de ação climática nacionais e europeias. Neste âmbito, no sub-capítulo seguinte apresentar-se-ão os esforços de investigação mais relevantes que versem esta temática.

1.3 Revisão bibliográfica

1.3.1 CFD

Por forma a abordar a utilização de ferramentas numéricas de CFD, propõem-se apresentar em seguida alguns trabalhos relevantes nesta área de estudo e relevantes para a dissertação.

O desenvolvimento do CFD pode ser traçado até ao início de 1900's (Shang, 2004). Desde então diversas abordagens foram realizadas com o aparecimento dos computadores e dos cálculos numéricos associados aos mesmos. Um dos grandes contributos na área ocorreu no *Los Alamos National Lab* onde foram desenvolvidos variados modelos numéricos para a simulação de escoamentos. Alguns dos trabalhos realizados foram descritos por Harlow (2004). Destes há a destacar: o modelo PIC (*Particle in cell*) proveniente do trabalho de Evans e Harlow (1957); o modelo MAC (*Marker and cell*) do trabalho de Harlow e Welch (1965); e o modelo FLIC (*Fluid in Cell*) do trabalho de Gentry, Martin e Daly (1966).

No entanto, o primeiro trabalho conhecido a abordar corpos 3D do ponto de vista de uma análise computacional foi o de Hess e Smith (1967), que se focava no estudo de escoamentos incompressíveis em torno de corpos com formas arbitrárias, obtendo deste modo um modelo para a utilização em cálculo numérico automático por computador.

Nos códigos de CFD comerciais (por exemplo: Ansys Fluent, Autodesk CFD, Simscale), o algoritmo SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*) é largamente utilizado para resolver as equações de Navier-Stokes. O algoritmo SIMPLE advém do trabalho de Patankar e Spalding (1972). Este é caracterizado pela abordagem a escoamentos tridimensionais parabólicos, onde providencia um processo geral no cálculo, para resolver conjuntamente as equações associadas à quantidade de movimento e continuidade em qualquer dimensão. Para ilustrar o método, os autores aplicaram-no a um problema de um escoamento laminar numa conduta de secção quadrada com uma das paredes laterais que se movimenta. Posteriormente diferentes métodos foram desenvolvidos a partir do algoritmo SIMPLE, obtendo-se variantes como o SIMPLEC e o SIMPLER (Artemov *et al.*, 2009).

Por outro lado, na simulação de escoamentos turbulentos o modelo mais comum de aplicação é o $k-\epsilon$, fruto do trabalho de Launder e Spalding (1974). O modelo incorpora

um conjunto de equações que refletem o processo de transporte de energia cinética turbulenta, k , e a sua taxa de dissipação, ϵ . Estas são calculadas a partir das equações de transporte resolvidas simultaneamente com as equações que governam o comportamento do escoamento. Os autores ainda apresentam algumas aplicações do modelo, como por exemplo, em jatos coaxiais, escoamento num tubo, escoamento numa conduta de secção quadrangular, entre outros.

Outros modelos de turbulência foram desenvolvidos, podendo enumerar-se, por exemplo, o RNG k - ϵ , *realizable* k - ϵ , k - ω e SST k - ω . Devido ao destaque no presente trabalho, aprofunda-se o modelo RNG k - ϵ . Este é obtido pela utilização da técnica matemática denominada de *renormalization group* (RNG), sendo semelhante ao k - ϵ mas incorporando refinamentos (Soe e Khaing, 2017). A renormalização é uma metodologia que permite modelar problemas físicos em que existem muitas escalas de energia com interesse e, assim, reduzir a sua complexidade e correspondente esforço computacional (Wilson, 1975). Nagano e Itazu (1997) apresentam uma evolução do modelo turbulento em estudo, sendo esta a fonte das referências bibliográficas apresentadas em seguida. Yakhot e Orszag em 1986 aplicaram a teoria de RNG às equações da energia turbulenta e a sua taxa de dissipação. Posteriormente Smith e Reynold em 1992 examinaram a teoria de Yakhot e Orszag, identificando erros algébricos, e deste modo, reformularam o modelo. Yakhot e Smith em 1992 introduziram o modelo que é referido como RNG k - ϵ .

Relativamente à aplicação e desenvolvimento de ferramentas de CFD em edifícios, estas começaram a ser utilizadas nos anos de 1970's. Nielsen (1974), aplicou uma análise em 2D, comparando os campos de velocidade e temperatura entre um modelo em escala reduzida e um modelo computacional de uma sala. Nielsen *et al.* (1979) estudaram, em diferenças finitas, o efeito da gravidade no escoamento (*buoyancy*) utilizando o modelo de turbulência de k - ϵ . Os autores concluíram que os valores extraídos numericamente estavam em razoável acordo com os dados experimentais. Jones e Whittle (1992) apresentam na sua pesquisa alguns marcos da utilização de ferramentas de CFD no estudo do escoamento de ar no interior de uma divisão. Destes destacam-se os seguintes: Em 1987 Whittle estudou o escoamento e temperatura do ar num espaço de escritórios durante o inverno. O estudo focou-se nos efeitos de convecção e radiação associado às trocas de energia por uma janela (Jones e Whittle, 1992). Qingyan e Kooi (1988) estudaram, utilizando o acoplamento de um programa de cargas térmicas com CFD, a energia, escoamento e qualidade do ar no interior de uma divisão.

Desde então muitas têm sido as aplicações de CFD, em variadas áreas de estudo, das quais se destacam a utilização de CFD em medicina cardiovascular (Morris *et al.*, 2015), desenvolvimento de propulsão aeroespacial (Chibber *et al.*, 2020), aerodinâmica (Adamsab, 2020), trocas de calor em permutadores (Vizitiu *et al.*, 2019) entre muitas outras áreas, como apresenta o artigo de Raman *et al.* (2018). Conjugando a maturação de ferramentas de CFD com os estudos que serão apresentados nos capítulos seguintes, referentes à temática em estudo, conclui-se que a utilização destas ferramentas se encontra aceite para ser aplicada ao presente estudo.

1.3.2 Conforto

Criar um ambiente adequado num espaço interior de um edifício é um dos principais aspetos no projeto de edifícios. A satisfação dos ocupantes no interior do espaço, no decorrer das atividades que realizam, depende do conforto proporcionado pelo espaço. Esta preocupação pelo conforto inicialmente focava-se apenas nos sistemas de AVAC, mas atualmente esta já aborda diversas outras situações. Dentro destas, encontra-se, por exemplo, o estudo do conforto térmico em espaços com ventilação natural (Heracleous e Michael, 2019) ou o conforto em ambientes exteriores (Jin *et al.*, 2019).

O conforto térmico proporcionado é uma consequência do balanço térmico entre o corpo e a envolvente. Este balanço pode ser descrito matematicamente na seguinte equação (Olesen *et al.*, 2001).

$$S = M - W - C - R - E_{sk} - C_{res} - E_{res} - K \quad (1.2)$$

Onde S é a energia armazenada no corpo, M é a produção de calor devido ao metabolismo, W é o trabalho realizado pelo corpo, C é o calor perdido por convecção, R é o calor perdido por radiação, E_{sk} é o calor perdido pela evaporação na pele, C_{res} calor perdido por convecção devido à respiração, E_{res} é o calor latente trocado na respiração e K é a perda de calor por condução.

Por outro lado, na esteira do já referido, os índices mais amplamente utilizados no estudo da temática do conforto, emergem do trabalho de Fanger (1972) e são estes o PMV e o PPD. O PMV, que procura refletir o nível de conforto térmico, é influenciado por seis

fatores, sendo que estes se expressam na equação matemática que caracteriza este indicador (ISO 7730, 2005).

$$PMV = (0,303e^{-0,036M}+0,028)\{(M-W)-3,05 \times 10^{-3}[5733-6,99(M-W)-p_a]-0,42[(M-W)-58,15]-1,7 \times 10^{-5}M(5867-p_a)-0,0014M(34-t_a)-3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4]-f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\} \quad (1.3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00+1,290I_{cl} & I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \\ 1,05+0,645I_{cl} & I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \end{cases} \quad (1.4)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38|t_{cl}-t_a|^{0,25} & 2,38|t_{cl}-t_a|^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & 2,38|t_{cl}-t_a|^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (1.5)$$

$$t_{cl} = 35,7-0,028(M-W)-I_{cl}\{3,96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl}+273)^4-(\bar{t}_r+273)^4]+f_{cl}h_c(t_{cl}-t_a)\} \quad (1.6)$$

Na equação apresentada, M é taxa de metabolismo [W/m^2], W é taxa de trabalho mecânico realizado, [W/m^2], I_{cl} é a resistência térmica do vestuário [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$], f_{cl} é o fator de área do vestuário, calculado na equação (1.4), t_a é a temperatura do ar [$^{\circ}\text{C}$], \bar{t}_r é a temperatura radiante média [$^{\circ}\text{C}$], v_{ar} é a velocidade relativa em relação ao corpo humano [m/s], p_a é o valor da pressão parcial de vapor de água [Pa], h_c é o coeficiente de convecção [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$], calculado na equação em (1.5) e t_{cl} é a temperatura superficial da roupa [$^{\circ}\text{C}$], calculada na equação (1.6). Segundo a ISO 7730 (2005) o PMV apenas deve ser utilizado num intervalo de valores restrito, sendo este de -2 a +2. Os seus parâmetros também devem respeitar determinados valores, M entre 46 e 232 W/m^2 (0,8 met a 4 met), I_{cl} entre 0 e 0,310 $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ (0 clo a 2 clo), t_a entre 10 e 30 $^{\circ}\text{C}$, \bar{t}_r entre 10 e 40 $^{\circ}\text{C}$, v_{ar} entre 0 e 1 m/s e por último p_a entre 0 e 2700 Pa.

O valor do PPD, obtido a partir do PMV, prevê a percentagem de pessoas que se sentem desconfortáveis com um conjunto de condições ambientais, e pode ser obtido utilizando a seguinte equação (ISO 7730, 2005).

$$PPD = 100-95e^{-0,03353PMV^4-0,2179PMV^2} \quad (1.7)$$

A percentagem de pessoas que se encontram desconfortáveis com o ambiente em que se encontram é condicionada por dois tipos de desconforto concomitantes: a percentagem de pessoas desconfortáveis no corpo inteiro, que é obtida através da equação 1.7, e a percentagem de pessoas desconfortáveis devido ao desconforto local. Como anteriormente referido, o desconforto total sentido numa divisão, será o conjugar destas duas variantes.

Nos sub-capítulos seguintes, levando em consideração o apresentado, é aprofundada a temática em duas vertentes, sendo estas o impacto da radiação solar no indicador de conforto e a utilização do mesmo em estudos com ferramentas de CFD.

1.3.2.1 O conforto e radiação solar

É sabido que a incidência da radiação solar no interior de um edifício afeta substancialmente o conforto térmico dos seus ocupantes, razão pela qual maior atenção tem sido dada ao estudo desta temática. É disso exemplo os trabalhos de investigação que a seguir se referem.

Hodder e Parsons (2007) estudaram o efeito da radiação solar no conforto térmico numa câmara climática com o objetivo de simular o efeito no interior de um carro. O estudo foi desenvolvido realizando três experiências que visavam avaliar os efeitos do impacto (1) da intensidade da radiação solar incidente, (2) da variação no espectro de radiação e (3) da variação do tipo de vidro no conforto térmico. Dos resultados obtidos, concluíram com base nos votos de sensação térmica que: o PMV aumenta 1 unidade por cada incremento de 200 W/m^2 do fluxo radiativo; a utilização de uma gama específica do espectro de radiação não tem efeito direto na sensação térmica; o nível de radiação e não a gama espectral determinou a resposta à sensação térmica; e nas condições que apresentam valores semelhantes de radiação, com utilização de vidros diferentes, não se verificaram diferenças significativas na resposta térmica.

Hwang e Shu (2011) estudaram o conforto térmico num átrio de um edifício com uma fachada envidraçada. Os autores levaram em consideração os efeitos da radiação de grande comprimento de onda provenientes de superfícies com temperaturas constantes e da radiação solar difusa. Também consideraram o impacto do feixe de raios solares. Para o estudo do conforto foram utilizados vidros diferentes, tamanhos diferentes, e estruturas de sombreamento, verificando o impacto destes no conforto térmico e no consumo

energético de arrefecimento. Ainda foi estudado o controlo das condições do espaço com base no PMV e por termostato convencional, com o objetivo de investigar o potencial de poupança energética. Os resultados demonstraram que quando se utiliza um sistema baseado no PMV, o potencial de poupança aumenta com condições de baixa necessidade energética do espaço.

Yao *et al.* (2015) investigaram o impacte do ajuste manual de sombreamento (persianas) no conforto térmico. Para tal, recorreram ao índice de conforto térmico PMV e à sua versão modificada o PMV-RAD (alterado do PMV baseado no trabalho de Hodder e Parsons, 2007). Os resultados revelam que a utilização de sombreamento melhora os valores obtidos nos índices de conforto térmico, resultando em condições de conforto térmico num número de horas superior. Os autores ainda acrescentam que apesar do aumento de desempenho, as persianas foram utilizadas com pouca frequência e cerca de 30% do tempo de trabalho não se encontravam ajustadas corretamente, havendo deste modo, o potencial de melhoria.

Em muitas das aplicações atuais em edifícios modernos, as condições de conforto térmico são influenciadas pela radiação solar, como apresentado nos estudos mencionados. Apesar disso, a radiação solar não é tida em consideração no valor do PMV anteriormente discutido. Por forma a ajustar este valor, de modo a adequar o índice a situações de incidência de radiação solar direta, duas estratégias têm sido adotadas na literatura da especialidade: adicionar um termo que contabilize a influência da radiação solar ou ajustar o valor da temperatura radiante média (Yang *et al.*, 2020).

Por exemplo, La Gennusa *et al.* (2007), apresenta um modelo onde corrige o valor do PMV ajustando o valor da temperatura radiante média (t_r) na equação 1.8.

$$t_r^* = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^N F_{s \rightarrow i} T_i^4 + \frac{C_{dn}}{\epsilon \sigma} \left(\alpha_{irr,d} \sum_{j=1}^M F_{S \rightarrow j} I_{d,j}^{in} + C_S^{in} \alpha_{irr,b} f_p I_{bn}^{in} \right)} - 273 \quad (1.8)$$

Na equação anterior, T_i é a temperatura absoluta dos objetos irradiados, $F_{s \rightarrow i}$ é o fator de forma entre o individuo e as i superfícies isotérmicas do ambiente, $F_{S \rightarrow j}$ é o fator de forma entre o individuo e as j superfícies transparentes do ambiente, $I_{d,j}^{in}$ e I_{bn}^{in} são a radiação que atravessa as superfícies transparentes, respetivamente difusa e direta, $\alpha_{irr,d}$ e $\alpha_{irr,b}$ são a absorvidade respetivamente em relação a radiação solar difusa e direta, f_p é o

fator de área projetada do individuo na direção dos raios solares, C_{dn} é o coeficiente dia-noite e C_S^{in} é um coeficiente relacionado com a estrutura do edifício. Por sua vez, Arens *et al.* (2014), aplicaram um modelo que engloba o efeito da radiação solar no conforto térmico para uso computacional (SolarCal). A ferramenta tem uma estrutura semelhante ao apresentado na ASHRAE 55 de 2004. O modelo é baseado no valor ERF (*Effective Radiant Field*) que é uma medida do fluxo de energia radiante do corpo ou para o corpo humano. Este pode ser obtido a partir da seguinte equação (ASHRAE 55, 2017).

$$EFR = f_{eff} h_r (\bar{t}_r - T_a) \quad (1.9)$$

Na equação anterior, f_{eff} é a fração do corpo exposta à radiação (=0,696 para uma pessoa sentada e 0,725 para uma pessoa em pé), h_r é o coeficiente de transferência de energia por radiação [W/m^2K], T_a é a temperatura do ar [$^{\circ}C$] e \bar{t}_r é a temperatura radiante média.

Por forma a contabilizar-se a contribuição do espectro dos baixos comprimentos de onda (típicos da radiação solar) recorre-se à seguinte expressão matemática (ASHRAE 55, 2017).

$$ERF_{solar} = \left(0,5 f_{svv} (I_{diff} + I_{TH} R_{floor}) + f_p f_{bes} I_{dir} \right) f_{eff} T_{sol} \left(\frac{\alpha_{SW}}{\alpha_{LW}} \right) \quad (1.10)$$

Na equação anterior, f_{svv} é a fração do céu que se encontra visível a partir do centro do corpo, I_{diff} é a intensidade da radiação solar difusa [W/m^2], I_{TH} é a intensidade da radiação solar total num plano horizontal, direta e difusa [W/m^2], R_{floor} é a refletividade do chão, f_{bes} é a fração do corpo exposta à radiação solar, I_{dir} é a intensidade da radiação solar direta [W/m^2], f_p é o fator de área projetada, α_{LW} é a absorvidade da radiação com comprimento de onda elevado e α_{SW} é a absorvidade da radiação de baixo comprimento de onda. Finalmente o valor ERF_{solar} é somado ao valor de ERF de elevado comprimento de onda possibilitando a determinação de um novo valor para \bar{t}_r pela equação (1.9).

Zhang *et al.* (2018) apresentaram um modelo que contabiliza o efeito da radiação solar de forma explícita no índice PMV. O modelo intitula-se de *Corrected Predicted Mean Vote* (CPMV) e consiste em duas partes, R_1 é a radiação de elevado comprimento de onda transferida entre a pessoa e as superfícies à sua volta, R_2 é o ganho térmico devido

à radiação solar por superfície de área do corpo, podendo ser calculada com a seguinte expressão.

$$R_2 = \alpha f_{cl} f_{eff} f_p I_{dir} \quad (1.11)$$

Na equação anterior, α é a absorvidade à radiação solar, f_{eff} é a radiação efetiva por fator de área, f_p é o fator de área projetada e I_{dir} é a intensidade de radiação solar direta [W/m²]. Aplicando os conceitos na equação do PMV obtém-se a seguinte expressão matemática.

$$\begin{aligned} PMV = & (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \{ (M-W) - 3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99(M-W) - \\ & p_a] - 0,42[(M-W) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) - \\ & R_1 + R_2 - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Para validar o modelo, os autores, comparam resultados obtidos experimentalmente com valores obtidos pelo ajuste no PMV, contabilizando o impacto da radiação solar (CPMV). Os estudos foram realizados com diferentes tipos de janelas em edifícios em Tianjine no norte da China. No total 998 respostas térmicas foram registradas no verão de 2017. Da análise dos dados, chegaram à conclusão que o modelo CPMV encontra-se de acordo com os dados de sensação térmica das pessoas. Com a utilização do CPMV obtiveram uma redução do desvio de 79,5% do valor da sensação térmica comparativamente com o PMV.

Yang *et al.* (2020) compararam dois modelos para prever o conforto térmico de pessoas no interior de um edifício quando expostas a radiação solar. Os dois modelos comparados foram o CPMV e o APMV (*Ajusted Predicted Mean Vote*, modelo do trabalho de La Gennusa *et al.*, 2007), em condições semelhantes. Os autores chegaram à conclusão que ambos os modelos conseguem determinar com precisão a influência da radiação solar no conforto térmico humano sob a incidência de radiação solar.

A utilização do PMV em condições ambientais com a influência da radiação solar direta apresenta um desvio da sensação térmica sentida pelos ocupantes da divisão. Isto ocorre devido a este indicador não considerar o efeito da radiação solar direta. Para

umentar a capacidade de previsão da sensação térmica em tais situações, o PMV necessita de ser ajustado por modelos que consideram o impacto da radiação solar.

1.3.2.2 Conforto e CFD

Muitos são os estudos e trabalhos realizados que fazem uso dos resultados de simulação obtidos por ferramentas de CFD para preverem as condições de conforto proporcionadas. É nesse âmbito que se centrará a apresentação do conjunto de trabalhos que a seguir se elenca.

Catalina *et al.* (2009) estudaram, numérica e experimentalmente, a utilização de tetos arrefecidos como estratégia de climatização no interior de uma câmara climática. O estudo teve como objetivo recorrer a um conjunto de dados, resultantes tanto da simulação numérica como do procedimento experimental, para obter o valor do PMV. Durante todos os testes realizados, a humidade no interior da câmara foi controlada de modo a que o risco de condensação fosse evitado na superfície arrefecida. Foram estudadas diferentes temperaturas para o teto arrefecido, sendo que estas variaram entre os 16,9 e 18,9 °C. As condições de fronteira utilizadas na simulação numérica (baseada no software STAR-CCM+) foram obtidas a partir dos dados experimentais. A validação dos dados numéricos focou-se nos valores das temperaturas em três experiências (temperatura do teto arrefecido: 16,9, 17,6 e 18,9). O modelo foi ainda validado por um estudo de sensibilidade do escoamento de ar. Os valores obtidos do PMV mostraram que se alcançava condições de conforto térmico.

Shan *et al.* (2019) estudaram a capacidade de prever o conforto térmico por parte de uma unidade *fancoil*. O estudo integra a simulação CFD e a correspondente validação experimental. Este realizou-se num escritório com as dimensões 5,2 x 2,7 x 2,85 m, em que uma das paredes é exterior sem janelas e três paredes internas com quatro janelas no total. A temperatura de *set-point* foi de 23 °C e a temperatura exterior de 33 °C. Consideram-se os ganhos térmicos, provenientes do interior do espaço, os ocupantes, computadores e lâmpadas. Para as paredes foram utilizadas condições de fronteira do tipo fluxo imposto, enquanto que para a velocidade de insuflação foram utilizados os valores medidos para a velocidade do escoamento de ar de entrada. Os autores concluíram que o modelo numérico previa com grande precisão as condições termo-cinémicas do escoamento, tendo comparado para tal os perfis de velocidade e temperatura previstos

pela simulação numérica e medidos no procedimento experimental. A partir do modelo numérico foram obtidos os valores da temperatura radiante e do valor do PMV, concluindo que a unidade consegue criar um ambiente de conforto térmico adequado.

Gan *et al.* (2019) estudaram a utilização de ventilação natural num edifício com o objetivo de se obter poupanças energéticas pela redução do uso do sistema de ventilação e climatização. O estudo utilizou a informação gerada pelo modelo *building information modeling* – BIM para estudar o efeito da ventilação natural no conforto térmico e o desempenho energético. O modelo BIM providencia informações relacionadas com o edifício, materiais, condição ambiente exterior e ocupação, que é integrado numa análise de CFD e BES (*building energy simulation*). Foi utilizado um caso de estudo (edifício público em Hong Kong) para se realizar a análise em várias estações do ano. Os resultados revelaram que a utilização de ventilação natural nem sempre consegue alcançar condições de conforto térmico. No estudo, a utilização de ventilação natural no final da primavera (abril) produz um escoamento de ar arrefecido, deste modo nesta altura pode ser poupada a energia associada à ventilação forçada.

Pelos exemplos apresentados fica patente a importância e crescente interesse na utilização de ferramentas computacionais do tipo CFD no auxílio e perceção do estudo do conforto sob diferentes condições ambientais. Denota-se a grande importância no uso de CFD da correta parametrização das condições de fronteira, por forma a que os valores obtidos na simulação prevejam com a maior acuidade possível a situação real simulada.

1.3.2.3 Conforto sob a incidência de radiação solar – aplicação de CFD

Antoun *et al.* (2016) abordaram a eficiência energética e o conforto térmico de um sistema de ventilação dedicada para um ocupante, com a existência de assimetria de radiação devido à existência de janelas (radiação solar). Foi analisado o efeito da assimetria de radiação no conforto térmico da pessoa através de CFD (Ansys Fluent). O modelo numérico foi validado com a utilização de um manequim numa câmara climática equipada com o sistema em estudo. Várias simulações foram realizadas para avaliar o efeito de diferentes tipos de vidros no conforto térmico, sujeito a vários parâmetros operacionais do sistema de climatização. Com a utilização de janelas de elevado desempenho o sistema de ventilação personalizado obteve um potencial de poupança energética de 35%, comparativamente a um sistema de ventilação por mistura para o

mesmo nível de conforto e quantidade de ar novo (mesmo ganho térmico para os dois casos).

Moon *et al.* (2016) estudaram o conforto térmico no interior de um compartimento de passageiros de um carro. O estudo utilizou ferramentas de CFD (Ansys Fluent 13.0) para prever o conforto térmico e o escoamento de ar para condições de funcionamento em arrefecimento. Por forma a avaliar o conforto térmico, os autores utilizaram duas abordagens, o modelo de conforto térmico de Fanger e o modelo de temperatura equivalente. Os resultados mostraram que com a utilização de radiação solar a temperatura nos passageiros aumentou 1 a 2 °C. Verificaram que esta diferença causou um impacto substancial no conforto dos ocupantes no interior do compartimento.

Buratti *et al.* (2017) apresentam um estudo utilizando ferramentas de CFD para avaliar o conforto térmico numa situação de convecção natural. O modelo da simulação foi validado por dados experimentais. O estudo decorreu numa sala de aula com o sistema de AVAC desligado. Na sala, o fluxo de calor através da parede opaca foi monitorizado por forma a calcular-se o valor equivalente de condutividade térmica para ser colocado no modelo CFD, visto que a sala apresenta uma parede exterior. Relativamente à parede exterior, apenas a temperatura exterior e a radiação solar foram colocadas como parâmetros no modelo computacional. A radiação solar foi introduzida recorrendo ao módulo solar do *software* de simulação (Ansys Fluent). A simulação transiente foi realizada utilizando um passo temporal de 2s. Uma UDF (*User Define Function*) foi escrita para a temperatura exterior e foi colocada como condição de fronteira para a parede opaca exterior com vidros, utilizando uma condição de transferência de calor por convecção. Relativamente às outras paredes interiores foram escolhidas duas condições de fronteira diferentes, adiabática e de temperatura constante (294K). O período de simulação e coleta de valores decorreu das 12 horas da manhã até às 18 horas, de modo a estudar os perfis de velocidade e temperatura sem a sala se encontrar ocupada. Os valores da simulação e dos dados experimentais foram comparados, relativamente à temperatura interna do ar, temperatura da superfície opaca e transparente (parede exterior). Considerando a temperatura da superfície transparente, até às 11 da manhã a radiação solar não afetou a parede externa devido à localização da sala e os valores da simulação encontram-se próximos dos experimentais (diferença média, para paredes internas adiabáticas +0,6 K e para paredes internas com temperatura constante +0,45 K). Entre as 11 e 15 horas, a simulação corretamente acrescenta o impacto da radiação solar,

observando-se uma diferença média de -0.26 K (adiabática) e $-0,14$ K (contante). Entre as 15 e as 18 horas as temperaturas na simulação são superiores ao expeável, mas apresentam o comportamento dos valores experimentais. Com a utilização de paredes adiabáticas a diferença foi de $2,5$ K e com temperatura constante foi de $1,5$ K. Considerando os valores obtidos para o primeiro caso (parede adiabática) e para o segundo (temperatura da parede constante), prosseguiram-se com as restantes simulações utilizando o segundo caso, uma vez que é este que apresenta um menor erro em relação aos dados experimentais, validando-se assim a utilização do modelo. Uma vez validado, este foi utilizado para analisar os perfis de velocidade e temperatura no ambiente da sala, estudar os efeitos e a influência da radiação solar na sala de aula em todos os períodos da sua ocupação.

Najafi e Haghighi (2019) estudaram a utilização de tetos radiantes para arrefecimento numa divisão, com uma janela, sujeita à incidência direta de radiação solar. O consumo energético do sistema variou por forma a assegurar-se conforto térmico, averiguado com base no indicador PMV. O cálculo computacional foi realizado recorrendo ao *software* Fluent 6.3. Em todas as simulações procurou-se evitar a existência de condensação. O estudo compara a utilização de janelas com e sem revestimento, mostrando que as primeiras revelam uma poupança energética de 49% a 58%. Os autores também estudaram a alteração da posição da divisão de Oeste para Sul, indicando que esta alteração conduz a reduções energéticas. A utilização de diferentes vidros e a alteração da orientação da divisão alteram a necessidade energética do espaço. Por sua vez, a redução do consumo é refletida num aumento da temperatura do teto radiante, reduzindo a probabilidade de se observar condensação no mesmo e aumento do conforto térmico no espaço.

A inclusão nos estudos do efeito da radiação solar influencia as condições de conforto e exigências energéticas. Para estudar estes efeitos, muitos *softwares* de simulação permitem incorporar o ganho térmico resultante da radiação solar (Ansys Fluent, Autodesk CFD, Comsol). O seu estudo permite o melhor entendimento do impacte solar no edifício, possibilitando o desenvolvimento de soluções de engenharia proveitosas energeticamente e benefícios no conforto proporcionado.

1.4 Objetivos e contribuição do trabalho

Ao longo do desenvolvimento apresentado nos subcapítulos anteriores ficou evidente a importância do conforto térmico dos ocupantes num edifício, bem como o seu consequente impacto no consumo energético, associado à preocupação da eficiência energética. Também ficou evidente a necessidade de ferramentas computacionais de CFD, onde a sua aplicação na área de estudo se encontra aceite. Estas últimas apresentam diversos benefícios em detrimento de uma análise experimental, mais onerosa e complexa, como enunciado. Pese embora ser unanimemente aceite a importância dos procedimentos experimentais na validação, de entre outros, dos códigos de simulação.

O presente trabalho final de mestrado pretende estudar, pela utilização de ferramentas numéricas de simulação de escoamentos, o impacto nos níveis de conforto e no consumo energético previstos para uma sala de aulas da Área Departamental de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, quando esta se encontra exposta a radiação solar. Este estudo espera contribuir para o incremento da capacidade de previsão dos modelos de conforto, quando utilizados num estudo com *softwares* de CFD, onde é incorporado o impacto da radiação solar nos indicadores de sensação térmica.

Como já apresentado, diversos trabalhos foram publicados englobando o impacto da radiação (Hwang e Shu, 2011, Antoun *et al.*, 2016, Najafi e Haghig, 2019). O autor encontrou estudos que comprovam experimentalmente o impacto negativo na sensação de conforto térmico associado à exposição direta da radiação solar. Apesar disso, não se encontrou estudos, que pela utilização de ferramentas CFD, se propusessem a obter condições de conforto aceitáveis na divisão quando esta se encontra exposta a radiação solar direta. Deste modo, surge a necessidade de aplicar ajustes ao PMV, como anteriormente explanado.

O cálculo do conforto dos ocupantes da divisão é efetuado recorrendo ao PMV, ajustado, de modo a considerar a influência da radiação solar. Associado a isso encontra-se o consumo energético ao funcionamento do sistema de climatização. Considerando tal enunciado, coloca-se ainda como objetivo realizar uma comparação com uma solução de engenharia em que é removido o impacto da radiação solar direta pela utilização de sombreamento.

1.5 Estrutura e organização do trabalho

O presente trabalho final de mestrado encontra-se dividido em 4 capítulos principais.

O primeiro capítulo, denominado de introdução, em que incorpora as considerações agora elaboradas, pretende familiarizar o leitor com a temática do estudo. Neste é realçada a importância de se alcançar conforto num espaço climatizado, a preocupação energética associada aos sistemas de climatização e a introdução de radiação solar, sendo este um parâmetro de destaque no estudo. Também é discutido o contributo de ferramentas de CFD para o estudo em questão. É também efetuada a necessária revisão bibliográfica para estabelecer o estado-da-arte desta temática, com o objetivo de identificar eventuais lacunas e propor contributos inovadores.

O segundo capítulo, modelação matemática e numérica, incide na necessária formalização matemática do tema. Neste, as equações que regem os escoamentos de climatização são apresentadas e o método numérico descrito. Além destas, também as equações que permitem quantificar os índices de conforto são discutidas, nomeadamente no que se refere à sua adequação a processos onde a radiação solar tem influência significativa.

O terceiro capítulo, aplicação ao estudo do conforto sob a incidência de radiação solar, utiliza para uma geometria específica, em concreto a sala de aulas M2.13, localizada no Pavilhão M do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Conjuga-se o descrito nos capítulos precedentes, avaliando o impacto da radiação solar nas condições de conforto, enquanto apresenta e discute soluções construtivas que permitem melhorar, simultaneamente, as condições de conforto dos ocupantes e os consumos energéticos associados aos sistemas de climatização.

Por último, no quarto capítulo, é efetuado uma síntese do trabalho realizado, apresentam-se as conclusões principais e sugestões para trabalhos futuros.

2 Modelação matemática e numérica

2.1 Introdução

A área de aplicação de ferramentas computacionais, com o desenvolvimento destas ao longo do tempo, é vasta. No entanto a sua aplicação recai na resolução de equações matemáticas que regem os processos de escoamentos de fluidos e transferência de calor. Neste capítulo pretende-se apresentar estas equações, focando-se nas principais para o entendimento da temática em estudo.

2.2 Equações matemáticas de processos físicos

2.2.1 Equações que governam o escoamento de fluidos

Todos os códigos de CFD são baseados nas equações que governam a dinâmica dos fluidos. Estas equações representam matematicamente os princípios físicos em que é baseada toda a análise de escoamentos de fluidos. As equações referidas são a da conservação da massa, de conservação da quantidade de movimento e conservação de energia.

A primeira equação que governa o escoamento de fluidos expressa a conservação de massa. A equação que resulta da aplicação deste princípio é a equação de continuidade, e pode ser descrita conforme apresentado de seguida (ver e.g., Anderson, 1995).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.1)$$

Na equação anterior ρ é a massa volúmica, \mathbf{V} é a velocidade do escoamento e t é a variável de tempo.

A segunda equação que governa o escoamento é a equação de conservação da quantidade de movimento e obedece à segunda lei de Newton, que formula que a taxa de variação da quantidade de movimento num corpo é igual à força que é aplicada neste.

$$F = ma \quad (2.2)$$

A força que o elemento de fluido se encontra sujeito resulta de duas fontes. As primeiras, *forças mássicas ou volúmicas*, atuam diretamente em todo o volume do fluido e são originadas de uma fonte remota - exemplo destas são, a força gravítica ou forças eletromagnéticas. As segundas, *forças de superfície*, atuam diretamente na superfície do elemento de fluido. Estas resultam da distribuição de pressão e da distribuição da tensão normal e corte que atuam na superfície do elemento de fluido. Ambas são impostas por elementos de fluido que se encontram na sua vizinhança ou por paredes adjacentes (Anderson, 1995, Tu *et al.*, 2008, Zikanov, 2010). Uma das formas de descrever matematicamente o somatório de forças atrás referido é apresentada de seguida (ver *e.g.* Anderson, 1995):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (2.4)$$

Nas equações anteriores, u, v e w são as componentes da velocidade nas coordenadas x, y e z, respetivamente. A variável p é a pressão, τ é a tensão de corte e σ tensão normal ao elemento de fluido na sua superfície.

A terceira equação que governa o escoamento é equação de conservação da energia.

$$\text{Taxa de variação de energia} = \sum \dot{Q} + \sum \dot{W} \quad (2.5)$$

Na equação anterior, os dois termos representados como $\sum \dot{Q}$ e $\sum \dot{W}$ descrevem a taxa de adição de calor para o fluxo no volume de controlo e a taxa de trabalho realizado pelas forças na superfície do fluido. A equação da conservação de energia para o elemento de fluido pode ser escrita da seguinte forma (ver *e.g.* Tu *et al.*, 2008).

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (2.6)$$

2.2.2 Modelo de turbulência

Escoamentos em regime laminar são completamente descritos pelas equações da continuidade e quantidade de movimento. No entanto, muitos dos escoamentos em engenharia são turbulentos. A natureza do escoamento turbulento, caracterizado por flutuações aleatórias da velocidade no fluido, obriga a um tratamento especial deste fenómeno, tendo em conta as escalas – espaciais e temporais - típicas de escoamentos turbulentos. A natureza intrínseca da turbulência, caracterizada por uma flutuação irregular da velocidade tanto no tempo como no espaço obriga a que estas equações resolvam o escoamento tanto na evolução temporal como espacial devido, maioritariamente, à presença de estruturas intituladas de turbilhões que usualmente estão associadas ao efeito rotacional do escoamento. No escoamento existem turbilhões de várias dimensões. Tipicamente os turbilhões de grandes dimensões, gerados no escoamento, deformam-se e dão origem a turbilhões de tamanho menor. Esta cascata continua até que os turbilhões se dissipem em calor. Quando esta cascata decorre os turbilhões apresentam uma certa escala de tamanho e tempo. Para resolver os escoamentos turbulentos é necessário resolver todas as escalas de turbilhões no fluido. Para que tal ocorra a malha tem de ser fina o suficiente, por forma a resolver os turbilhões de menor dimensão (escalas de Kolmogorov). Esta abordagem a escoamentos turbulentos em CFD é denominada de *Direct Numerical Simulation* (DNS). Esta necessita de grande capacidade computacional, devido a isso é maioritariamente utilizada em geometrias simples e de aplicação muito específica. Uma segunda abordagem para resolver escoamentos turbulentos é conhecido como *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Este é o método aplicado no presente trabalho. Ainda outra abordagem é intitulada de *Large-Eddy Simulation* (LES), consiste em resolver os turbilhões de maiores dimensões enquanto que os de menores dimensões são modelados por um processo de filtragem (Ruiz *et al.*, 2016).

De modo a clarificar o nível de precisão, tanto na abordagem por LES como por RANS existem termos que tem de ser modelados. Em relação ao nível de precisão no estudo de escoamentos turbulentos, o modelo DNS é o mais preciso, sendo o menos preciso dos referidos o modelo RANS. Por outro lado, a vantagem da abordagem por um modelo RANS recai no menor custo computacional em comparação com os restantes, sendo que o modelo DNS é o mais exigente. Apesar das desvantagens enunciadas para o modelo RANS, em engenharia é usualmente o mais utilizado. Isto porque a informação obtida por este modelo é suficientemente precisa para a maioria dos problemas (Zikanov, 2010).

O modelo RANS utiliza as equações médias do escoamento do fluido, mas em vez das quantidades instantâneas, estas são decompostas num valor médio e flutuações. Por exemplo a velocidade pode ser estrita da seguinte forma.

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (2.7)$$

Aplicando esta operação às equações de Navier-Stokes resulta nas equações de escoamento médio. Para um escoamento incompressível de um fluido Newtoniano as equações do escoamento podem ser escritas da seguinte forma (ver e.g. Zikanov, 2010).

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.8)$$

Na equação anterior, μ é o valor da viscosidade, u_i com $i, j = 1, 2, 3$ para os componentes da velocidade u, v, w , e τ_{ij} é intitulado de tensões de Reynolds que pode ser escrito da seguinte forma:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (2.9)$$

Com as equações disponíveis o sistema não se encontra fechado devido às tensões de Reynolds serem desconhecidas e não poderem ser expressas em função do valor médio do vetor da velocidade e do valor médio da pressão.

Muitos investigadores desenvolveram modelos para resolver as tensões de Reynolds. Dentro destes encontram-se modelos que adicionando 2 variáveis ao sistema e por isso

resolvem mais duas equações, uma da energia cinética turbulenta e outra a da sua dissipação. Dentro destes constata-se o modelo de k-ε proposto por Launder e Spalding (1974), k-ω de Wilcox (1988) entre outros modelos. A escolha do modelo de turbulência a utilizar deve ponderar a adequabilidade do mesmo, isto porque os modelos desenvolvidos apresentam diferentes níveis de precisão para determinadas condições do escoamento. Deste modo, a utilização do modelo mais adequado irá melhorar a solução obtida. No presente trabalho optou-se por usar o modelo RNG k-ε. Diversos estudos utilizaram o modelo referido atingindo resultados adequados aos problemas de engenharia em discussão (Kilic e Sevilgen, 2008, Li *et al.*, 2013, Serra e Semiao, 2013, Shan *et al.*, 2019).

Com a introdução dos valores médios e das suas flutuações obtém-se um sistema de equações com mais variáveis do que equações, a saber as 5 equações que governam o escoamento (continuidade, três equações da quantidade de movimento e equação de energia) e 14 incógnitas resultantes das variáveis das tensões de Reynold. O objetivo dos modelos de turbulência é resolver este problema (Autodesk CFD help, 2020).

As duas equações do modelo descrevem o transporte na energia cinética turbulenta k , e a sua dissipação ϵ . Relativamente ao escoamento turbulento a viscosidade turbulenta pode ser calculada do seguinte modo.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.10)$$

Na equação anterior, C_μ é uma constante empírica. A equação da energia cinética turbulenta toma a seguinte forma.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial k}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial k}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] - \rho \epsilon + \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

Seguindo o mesmo processo, a equação da dissipação da energia cinética turbulenta pode ser apresentada do seguinte modo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] - \\ C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ \left. \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Na equação anterior σ_k e σ_ε são números de Schmidt para escoamento turbulento e C_1 e C_2 são parâmetros do modelo. Para o modelo RNG o valor de C_1 é calculado da seguinte forma.

$$C_1 = C_0 \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.12)$$

Onde η é definido do seguinte modo.

$$\eta = \frac{\sqrt{Gk}}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

$$G = \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

Nas equações anteriores η_0 e β são constantes do modelo. O valor de G contabiliza a geração de energia cinética turbulenta e é devida à interação entre as tensões de Reynolds e os gradientes médios da velocidade. As constantes do modelo encontram-se na tabela 1 na página seguinte (Autodesk CFD help, 2020).

Tabela 1 - Constantes do modelo RNG k-ε (Autodesk CFD help, 2020)

Constante	Valor
C_μ	0,085
C_0	1,42
C_2	1,68
β	0,015
η_0	4,38
σ_k	0,7179
σ_ε	0,7179

Região da parede

Na região da parede é formada uma camada limite, onde a velocidade varia desde a condição de não escorregamento até à velocidade do escoamento livre. Consequentemente, verifica-se a existência de gradientes elevados junto à região da parede. Transportando a existência de tais gradientes para um domínio computacional, para que estes sejam corretamente calculados existe a necessidade de um elevado número de elementos da malha nesta região. A aplicação desta vertente recai na utilização do modelo de turbulência também na região da camada limite. Como referido anteriormente, a esta abordagem encontra-se associado um custo computacional muitas vezes proibitivo, o que obriga à modelação dos fenómenos nesta região conforme se aborda em seguida. A introdução de funções de parede reduz o custo computacional sem conduzir a uma perda significativa da precisão. No caso de estudo, o modelo de turbulência RNG k-ε na região perto da fronteira sólida é substituído pelas funções de parede (Bredberg, 2000).

Utilizam-se variáveis adimensionais nesta modelação, nomeadamente a velocidade tangencial à superfície sólida e a distância normal à mesma (ver *e.g.* Berni e Fontanesi, 2020).

$$U^+ = \frac{\bar{u}_t}{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}} \quad (2.15)$$

$$y^+ = \frac{\delta \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}}{\nu} \quad (2.16)$$

Nas equações anteriores \bar{u}_t é a velocidade tangencial à superfície sólida, τ_w é a tensão de corte δ é a distância à superfície e ν é a viscosidade cinemática. A região do escoamento perto da superfície sólida pode ser dividida em três áreas.

- Subcamada viscosa, $0 < y^+ < 5$
- Camada transição, $5 < y^+ < 30$
- Subcamada de inércia ou logarítmica, $30 < y^+ < 200$

Em cada uma das camadas mencionadas o escoamento apresenta comportamentos distintos. Na subcamada viscosa os efeitos turbulentos são negligenciáveis, enquanto que na subcamada de inércia os efeitos viscosos são reduzidos. Na camada de transição, tanto os efeitos turbulentos como viscosos são importantes. A figura 3 seguinte (Efros, 2006) apresenta o perfil das funções a abordar comparativamente à linha para o escoamento na região da camada limite. O perfil apresentado pela linha a cheio provem de dados experimentais e análises com DNS (Moser *et al.*, 1999).

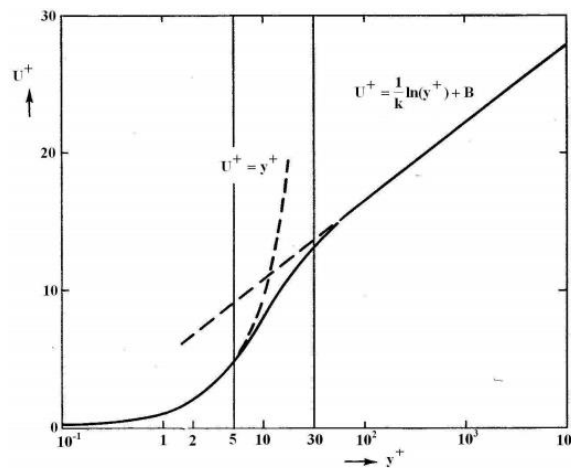


Figura 3 - Escoamento na camada limite (Efros, 2006)

Associado à subcamada viscosa e à subcamada de inércia existem equações do perfil de velocidade adimensionalizada que as aproximam adequadamente. Estas são as seguintes, respetivamente (ver *e.g.* Kalitzin *et al.*, 2005).

$$U^+ = y^+ \quad (2.17)$$

$$U^+ = \frac{1}{k_{VK}} \log(y^+) + B \quad (2.18)$$

Na equação anterior, k_{VK} é a constante adimensional de Von Karman (0,4) e B é uma constante empírica relacionada com a espessura da subcamada viscosa (5,5).

Nos modelos k - ϵ , a equação da energia cinética turbulenta é resolvida no domínio inteiro, incluído as células adjacentes à superfície sólida. A condição de fronteira imposta para k , numa parede alinhada com o eixo xx , é a seguinte (ver *e.g.* Ferziger e Peric, 2002).

$$\frac{\partial k}{\partial y} = 0 \quad (2.19)$$

A produção de energia cinética, G_k e a sua taxa de dissipação, ϵ , nas células adjacentes à parede, são os termos fonte na equação de k . Estes são abordados assumindo equilíbrio local entre a produção de energia cinética e a sua dissipação. Deste modo a produção de k é baseada na lei logarítmica associada a subcamada de inércia. Uma possível formulação é a apresentada em seguida.

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial \bar{u}_t}{\partial y} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_t}{\partial y} = \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{ky} \quad (2.21)$$

O valor de ϵ é computadorizado do seguinte modo.

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{1/2}}{ky} \quad (2.22)$$

2.2.3 Condições de fronteira físicas nas paredes

Todas as previsões de escoamentos de fluidos surgem da solução obtida nas equações que governam o escoamento. Apesar disso, consoante o estudo a simular diferentes soluções são obtidas. Esta variação nas simulações recai em parte devido à variação das condições de fronteira nos diferentes estudos. Dependendo da análise a realizar, sendo uma situação específica, apresenta determinadas condições de fronteira apropriadas para a simulação dessa situação (Tu *et al.*, 2008).

Para o estudo em questão, utiliza-se uma condição de fronteira para um escoamento viscoso. A interação entre o escoamento e a superfície conduz a uma condição de não-eskorregamento. Isto significa que na superfície a velocidade do escoamento é zero.

Assume-se, de forma similar, que a temperatura da camada do escoamento imediatamente em contacto com a superfície também apresenta a mesma temperatura desta última (temperatura imposta). Por outro lado, quando a temperatura da parede não é conhecida, aplica-se a lei de Fourier para a condução de calor, fornecendo deste modo a condição de fronteira do tipo fluxo imposto. Esta pode ser apresentada pela seguinte equação (ver, *e.g.* Anderson, 1995).

$$\dot{q}_w = - \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \quad (2.23)$$

Na equação anterior, T é a temperatura, n indica a direção perpendicular à parede e \dot{q}_w é o fluxo de calor pela parede.

Ainda no âmbito desta tipologia de condição de fronteira – fluxo imposto – pode ser modelada a troca radiativa entre superfícies. Assunto que será aprofundado em seguida.

2.2.4 Modelo de radiação

Para a realização do presente trabalho é vital a utilização de um modelo de radiação. Este irá influenciar as condições do espaço e conseqüentemente o conforto proporcionado pelo mesmo (Menchaca-Brandan *et al.*, 2017). O modelo de transmissão de calor por radiação utilizado é *surface-to-surface*, considerando assim que o meio é não participativo.

A simplificação utilizada irá afetar diretamente a temperatura da superfície e indiretamente a temperatura do gás (ar) devido a trocas energéticas por condução e convecção. Para incluir trocas energéticas por radiação nas equações que governam o escoamento, o fluxo de calor radiativo é adicionado à equação de transporte de energia através da introdução do termo q_{ri} determinado da seguinte forma (Autodesk CFD help, 2020, Incropera *et al.*, 2007).

$$q_{ri} = A_i(G_i - J_i) \quad (2.24)$$

Na equação anterior q_{ri} apresenta o balanço da radiação na superfície i . Assim, G_i é a irradiação e J_i representa a radiosidade da superfície. Para uma superfície difusa e cinzenta, a radiosidade pode ser expressa do seguinte modo.

$$J_i = (1 - \varepsilon_{r,i} - \tau_{r,i})G_i + \varepsilon_{r,i}E_{bi} \quad (2.25)$$

Onde $\varepsilon_{r,i}$ é a emissividade, $\tau_{r,i}$ é a transmissividade e E_{bi} é o poder emissivo de um corpo negro do elemento de superfície i que pode ser determinada pela expressão apresentada em seguida.

$$E_{bi} = \sigma_{SB} T_i^4 \quad (2.26)$$

Por outro lado, considerando a radiação proveniente das superfícies de outros elementos a radiação incidente na superfície i pode ser determinada por:

$$G_i = \sum_{j=1}^N J_j F_{ij} \quad (2.27)$$

Na equação anterior J_j é a radiosidade proveniente da superfície do elemento j , diferente de i , que existe no domínio em estudo e F_{ij} é o fator de forma entre a superfície i e a superfície j . Como é visível pelo conjunto de equações, a análise da radiação no domínio encontra-se interligada em todos os elementos geométricos do mesmo.

O cálculo dos fatores de forma é realizado pela projeção de uma imagem da face dos elementos envolventes numa esfera que rodeia o elemento em consideração. Desta projeção é calculado o valor do fator de forma, sendo que a sua precisão encontra-se relacionada com a definição da projeção criada. Esta metodologia pode ser estendida, por exemplo, à modelação da radiação solar, utilizando para tal uma cúpula que representa o céu. Deste modo é possível calcular-se o valor do fator de forma entre o corpo e a cúpula (céu). O valor do fluxo solar proveniente do sol é obtido consoante a posição geográfica e a hora do dia.

2.2.5 Índices de conforto térmico

É por demais evidente que a radiação solar afeta substancialmente o conforto térmico experienciado no interior de um espaço ocupado. Apesar disso, os indicadores PMV e PPD não contabilizam o seu impacto de forma explícita (Yang *et al*, 2020). Uma vez que a temática do trabalho incide em situações em que a radiação solar se encontra presente, é necessário aplicar um método que consiga prever com maior precisão o conforto térmico nestas situações. Apresentam-se em seguida as duas abordagens que vão ser aplicadas neste trabalho. A primeira provém das conclusões dos resultados experimentais realizados por Hodder e Parsons (2007) que sustenta que para o aumento da radiação direta no valor de 200 W/m^2 o desconforto térmico aumenta aproximadamente 1 valor na sua escala (-3 a +3). Esta conclusão foi utilizada no trabalho de Yao *et al.* (2015) no estudo da incidência de radiação solar e a gestão do sombreamento. A sua formulação pode ser expressa da seguinte forma.

$$\text{PMV-RAD} = \text{PMV} + \frac{\text{RAD}}{200} \quad (2.28)$$

Na equação anterior RAD [W/m^2] é o fluxo de radiação direta do sol. A segunda abordagem utiliza o valor de ERF (ASHRAE, 2017). Esta leva em consideração diversos fatores relevantes para a sua aplicação. Como introduzido no capítulo 1 o ganho solar no corpo pode ser calculado utilizando o valor de ERF. O valor de ERF no corpo humano, devido à radiação de elevado comprimento de onda é relacionado com a temperatura radiante média obtida pela equação 1.9. O fluxo de radiação absorvida pela superfície do corpo, devido à incidência de radiação solar direta, pode ser contabilizada como uma adição de um fluxo de radiação de elevado comprimento de onda. Esta pode ser expressa da seguinte forma.

$$a_{LW} \text{ERF}_{\text{solar}} = a_{SW} E_{\text{solar}} \quad (2.29)$$

Onde E_{solar} é radiação solar na superfície do corpo [W/m^2]. A quantidade apresentada pode ser expressa pelo somatório de três fluxos distintos. Estes provêm da entrada da radiação solar no interior da divisão pela fachada do edifício. Intitulando, estes são:

energia da radiação solar difusa (E_{diff}), energia solar refletida (E_{refl}) e energia da radiação solar direta proveniente do sol (E_{dir}). Estes fluxos podem ser expressos matematicamente do seguinte modo.

$$E_{diff} = 0,5f_{eff}f_{svv}T_{sol}I_{diff} \quad (2.30)$$

$$E_{refl} = 0,5f_{eff}f_{svv}T_{sol}I_{TH}R_{floor} \quad (2.31)$$

$$E_{dir} = f_p f_{eff} f_{bes} T_{sol} I_{dir} \quad (2.32)$$

Na equação 2.31, I_{TH} é o total de radiação horizontal direta e difusa no ambiente exterior. O valor de I_{TH} pode ser obtido por $I_{TH} = I_{dir} \sin \beta + I_{diff}^2$. O enunciado resulta no apresentado na equação 1.9 para o cálculo de E_{solar} . Posteriormente o valor da temperatura radiante média é ajustada para ser aplicada na formulação matemática do PMV.

2.3 Modelação Numérica

Nos subcapítulos anteriores foram apresentadas algumas equações que regem o escoamento em estudo. Estas equações, denominadas de equações parciais diferenciais (PED), providenciam o estudo do escoamento em variáveis contínuas no domínio inteiro. Em contraste, a solução numérica providencia a solução para um número discreto de pontos no domínio geométrico, por exemplo, uma malha de pontos. Deste modo são substituídas as PED por equações algébricas resolvidas em valores discretos do escoamento. Existem vários métodos para discretizar as PED, apesar disso apenas será explanado um destes devido à sua aplicação ao estudo, o método dos elementos finitos.

2.3.1 Método dos elementos finitos

As equações diferenciais apresentadas anteriormente, têm de ser discretizadas por forma a serem transformadas em equações algébricas que podem ser resolvidas computacionalmente. Por forma a apresentar o método, utiliza-se a equação 2.33, de transporte de um escalar ϕ (Zienkiewicz *et al.*, 2005).

$$u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_d \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + Q_f = 0 \quad (2.33)$$

Na equação anterior estão presentes termos convectivos e difusivos, em que k_d é o coeficiente de difusão e Q_f é o termo de fonte. Para realizar a discretização da equação 2.33 considera-se o seguinte.

$$\phi \approx \hat{\phi} = \sum N_a \tilde{\phi}_a \quad (2.34)$$

Em que N_a são funções de teste conhecidas, e $\tilde{\phi}_a$ representa um conjunto de parâmetros desconhecidos que serão aplicados à equação a discretizar. Ao substituir-se na equação 2.33 o enunciado em 2.34 obtém-se uma aproximação à equação original. Conseqüentemente, o valor obtido deixa de ser 0 e passa a ser um resíduo. Para obter-se o valor dos parâmetros desconhecidos utiliza-se o método de resíduos ponderados. Introduzindo a função de peso, W_a , e integrando em Ω podemos reescrever (2.35)

$$\int_{\Omega} W_a \left[u \frac{d\hat{\phi}}{dx} - \frac{d}{dx} \left(k_d \frac{d\hat{\phi}}{dx} \right) + Q_f \right] d\Omega = 0 \quad (2.35)$$

Integrando o segundo termo por partes, obtém-se.

$$\int_{\Omega} W_a \left[u \frac{d\hat{\phi}}{dx} + Q_f \right] d\Omega + \int_{\Omega} \frac{dW_a}{dx} k_d \frac{d\hat{\phi}}{dx} d\Omega = \int_{\Gamma_q} W_a \bar{q}_n d\Gamma \quad (2.36)$$

Onde é assumido que as condições de fronteira possam ser de Neumann ou Dirichlet. Para um nó interno, “a” do domínio, a equação aproximada toma a seguinte forma.

$$K_{ab} \tilde{\phi}_b + f_a = 0 \quad (2.37)$$

Onde na equação anterior, as suas variáveis representam o seguinte.

$$K_{ab} = \int_0^L W_a u \frac{dN_b}{dx} dx + \int_0^L \frac{dW_a}{dx} k_d \frac{dN_b}{dx} dx \quad (2.38)$$

$$f_a = \int_0^L W_a Q_f dx + W_a \bar{q}_n \Big|_{\Gamma_q} \quad (2.39)$$

É de notar que caso o valor de α seja de 0, obtém-se o método de Galerkin, previamente referido. Por outro lado, caso α seja 1, obtém-se na forma de *full upwind*, sendo necessário considerar a direção do escoamento.

2.3.2 O método de solução

Um dos mais populares algoritmos de ligação do par pressão-velocidade num escoamento incompressível é o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linkage Equations*). O esquema em questão, que também será aplicado ao estudo, recai na classificação de métodos iterativos e foi desenvolvido por Patankar e Spalding (1972). A abordagem utilizada no método começa por assumir o campo de pressões para a resolução da equação do momento. Uma equação de correção da pressão, obtida a partir da equação da continuidade, é resolvida para se obter a correção no campo de pressões, que é utilizada para atualizar os campos de pressão e velocidade. Os valores arbitrados vão progressivamente melhorando com a realização das iterações até terem convergido (Tu *et al.*, 2008).

A equação da quantidade de movimento discretizada pode ser expressa da seguinte forma (Zikanov, 2010).

$$a_p(\mathbf{u})u_{i,p} + \sum_l a_{l,p}(\mathbf{u}) u_{i,l} = Q_p(\mathbf{u}) - \left(\frac{\delta p}{\delta x_i}\right)_p \quad (2.41)$$

Onde u_i é a componente da velocidade e $\frac{\delta p}{\delta x_i}$ é a discretização espacial do gradiente de pressão. A discretização apresentada em cima resulta de uma discretização espacial utilizando um método totalmente implícito. O lado esquerdo da equação encontra-se associado à discretização de termos não lineares e viscosos. O somatório de índice l percorre todos os nós vizinhos de P utilizados nas fórmulas de discretização. É de notar que devido à ordem quadrática não linear da equação a quantidade de movimento, os coeficientes a_p e $a_{l,p}$ no lado esquerdo da equação, são em função de \mathbf{u} (vetor). As *forças mássicas* e outros termos, que são funções lineares de \mathbf{u} , são agrupadas juntas no termo de fonte Q . A equação encontra-se escrita numa forma geral, o que não implica a utilização de um tipo específico de malha ou método de discretização.

No método, os novos valores da velocidade e pressão são representados da seguinte forma.

$$u_i^{m+1} = u_i^* + u_i', \quad p^{m+1} = p^m + p' \quad (2.42)$$

Nas equações anteriores, u_i^* é a solução da equação de momento linearizada com p^m utilizado como estimativa da pressão. A equação da quantidade de movimento obtida a partir do enunciado é a seguinte.

$$a_p(\mathbf{u}^m)u_{i,p}^{m+1} + \sum_l a_{l,p}(\mathbf{u}^m)u_{i,l}^{m+1} = Q_p(\mathbf{u}^m) - \left(\frac{\delta p^{m+1}}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.43-a)$$

Do mesmo modo podemos escrever:

$$a_p(\mathbf{u}^m)u_{i,p}^* + \sum_l a_{l,p}(\mathbf{u}^m)u_{i,l}^* = Q_p(\mathbf{u}^m) - \left(\frac{\delta p^m}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.43-b)$$

Subtraindo 2.43-b na equação a 2.43-a obtém-se:

$$a_p(\mathbf{u}^m)u_{i,p}' + \sum_l a_{l,p}(\mathbf{u}^m)u_{i,l}' = - \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.44)$$

Novamente a equação anterior faz parte de um sistema linearizado, em que de momento não pode ser resolvida para u_i' nem p' , uma vez que ambos são desconhecidos. Ainda se pode representar a equação da seguinte forma.

$$u_{i,p}' = \tilde{u}_{i,p}' - \frac{1}{a_p(\mathbf{u}^m)} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.45)$$

Sabendo que para um escoamento incompressível a equação da continuidade devolve $\left. \frac{\delta u_i^{m+1}}{\delta x_i} \right|_p = 0$, podemos reescrever a equação 2.45 como apresentado em 2.46.

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{1}{a_p(\mathbf{u}^m)} \frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_p = \left(\frac{\delta u_i^*}{\delta x_i} \right)_p + \left(\frac{\delta \tilde{u}_i'}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.46)$$

Novamente observa-se uma dificuldade enunciada anteriormente, \tilde{u}_i' e p' são desconhecidas. No método SIMPLE este problema é resolvido removendo os termos associados a \tilde{u}_i' . A solução aplicada pelo método não apresenta explicação matemática, a sua aplicação é utilizada uma vez que se verifica convergência dos resultados, porém esta convergência é mais lenta do que com a utilização de esquemas mais sofisticados. O método SIMPLE pode ser esquematizado nos seguintes passos.

Passo1: Determinar os valores dos coeficientes a_p , $a_{i,p}$ e os termos do lado direito da equação 2.43-b, usando a velocidade e a pressão da iteração anterior.

Passo2: Resolver 2.43-b para se obter o valor da velocidade intermédia u_i^* , que não satisfaz a equação da continuidade.

Passo3: Resolver a equação da pressão aproximada (obtida a partir de 2.46).

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left(\frac{1}{a_p(\mathbf{u}^m)} \frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_p = \left(\frac{\delta u_i^*}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.48)$$

Passo4: Atualizar os valores da velocidade e pressão.

$$u_{i,p}' = - \frac{1}{a_p(\mathbf{u}^m)} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_p \quad (2.49)$$

$$u_{i,p}^{m+1} = u_{i,p}^* + u_{i,p}', \quad p_p^{m+1} = p_p^m + p_p' \quad (2.50)$$

Passo5: Resolver as restantes equações de transporte para as diversas variáveis ϕ .

Passo6: Verificar a convergência, caso seja necessário realizar a próxima iteração.

A convergência do algoritmo SIMPLE pode ser acelerada recorrendo a parâmetros de sub-relaxação ao se atualizar a velocidade e a pressão.

$$u_{i,p}^{m+1} = u_{i,p}^* + \alpha_u u_{i,p}', \quad p_p^{m+1} = p_p^m + \alpha_p p_p' \quad (2.51)$$

Onde os coeficientes de sub-relaxação, α_u e α_p , variam de 0 a 1. A convergência dos resultados pode ser considerada ótima quando se aplica $\alpha_u=1-\alpha_p$.

No *solver* utilizado o método descrito encontra-se englobado no processo de resolução para se alcançar uma solução numérica. O método de resolução intitula-se de *segregated solver* e no *software* utilizado consiste nos seguintes passos (Autodesk CFD help, 2020).

1. Leitura da geometria, condições de fronteira e análise de dados.
2. Criação da estrutura de dados.
3. Resolver equação do momento em x.
4. Resolver equação do momento em y.
5. Resolver equação do momento em z.
6. Resolver equação da pressão e corrigir a velocidade (SIMPLE).
7. Resolver a equação da energia.
8. Resolver equação de energia cinética do modelo de turbulência.
9. Resolver equação de dissipação de energia do modelo de turbulência.
10. Verificar a convergência.
11. Realizar cálculos finais de apresentação de dados.
12. Escrita dos dados.

A utilização de métodos iterativos para se alcançar uma solução de uma determinada simulação numérica implica determinar quantas iterações se pretendem efetuar. Assim, a simulação decorre até se atingir um número de iterações pré-determinado ou quando se atinge um critério de convergência.

Na realização de uma simulação por um processo iterativo, espera-se que globalmente, os valores a cada iteração convirjam para a solução correta. Uma vez que a solução da simulação é desconhecida “a priori” necessita-se de aplicar uma metodologia para determinar o critério de convergência. Existem diversas abordagens à temática, um dos indicadores é a utilização da norma dos resíduos. Após a discretização das equações, estas formam um conjunto de equações algébricas dependendo das suas quantidades. Para cada uma destas quantidades pode-se escrever uma equação algébrica, a equação dos resíduos que encontra-se escrita de seguida (Autodesk CFD help, 2020).

$$R_{\phi_i} = F_i - A_{ii}\phi_i - \sum_{j \neq i} A_{ij}\phi_j \quad (2.52)$$

Na equação anterior ϕ é a variável típica de uma equação algébrica, A_{ij} são coeficientes algébricos resultantes da discretização dos termos da advecção e difusão nas equações que governam o escoamento, F_i é o termo de fonte discretizado e R_{ϕ_i} é o valor do resíduo no nó i . Uma vez que o domínio é composto por muitos nós, a metodologia de se observar a convergência neste é utilizando a norma dos resíduos.

$$\sqrt{\sum_i R_i^2} \quad (2.53)$$

Outros indicadores de convergência também são aplicados, considerando os valores mínimos, máximo e a média das variáveis dependentes.

2.3.3 Características da solução por métodos numéricos

Realizar uma análise dos valores obtidos da utilização de ferramentas de CFD é parte integrante da utilização das mesmas. Os métodos numéricos utilizados resultam numa aproximação. Consequentemente, os valores obtidos da simulação serão uma aproximação às condições reais. Esta diferença entre resultados obtidos computacionalmente e a realidade advém de erros introduzidos nos passos para se obter uma solução numérica.

- As equações podem conter aproximações ou modelos.
- Aproximações realizadas no processo de discretização.
- Um dos métodos para resolver as equações discretizadas é a utilização de procedimentos iterativos. A menos que estes se baseiem em cálculos em grandes períodos de tempo a solução exata resultante da discretização pode não ser alcançada. Um dos perigos associados aos métodos iterativos está associado à paragem do processo numa fase precoce do cálculo resultando no aumento dos erros associados à solução numérica (Ferziger e Peric, 2002).

Existem soluções que podem ser obtidas a partir das equações que governam o escoamento, apesar disso em muitos fenômenos físicos a solução exata não se encontra disponível ou não é praticável, exemplos destes são os modelos de turbulência e combustão. Isto leva à utilização de modelos que mesmo que sejam resolvidos corretamente a solução obtida pelos mesmos não é uma exata representação da realidade. Por forma a serem aplicados, estes têm de ser validados com dados obtidos experimentalmente ((Ferziger e Peric, 2002).

Os erros de discretização podem ser reduzidos pela utilização de esquemas de interpolação de ordem superior ou em regiões mais reduzidas (refinamento da malha), o que leva, em ambos os casos, a um aumento do custo computacional. Deste modo, têm de ser alcançado um equilíbrio entre ambos.

3 Aplicação ao estudo do conforto sob a incidência da radiação solar

No primeiro capítulo destacou-se, com base na análise bibliográfica levada a cabo, a importância do estudo do conforto térmico, particularmente quando o indivíduo se encontra sujeito a radiação solar direta. Neste âmbito, pretende-se relevar e avaliar neste capítulo o impacto que a radiação solar tem na percepção de conforto térmico para o ocupante de uma sala de aulas de um edifício escolar. Além disso, pretende-se estudar o impacto energético associado ao sistema de climatização que permite assegurar as condições de conforto.

3.1 Geometria

Por forma a realizar-se o estudo proposto é imprescindível definir-se o objeto de aplicação. O utilizado é a sala M2.13 do departamento de Engenharia Mecânica do ISEL, cujas dimensões são: 10,41 metros de comprimento, 6,44 metros de largura e 3 metros de altura, sendo que se colocou a 2,7 metros de altura o teto falso. Por sua vez as dimensões da janela são: 6,44 metros de comprimento, 1,5 metros de altura e 10 milímetros de espessura, representando a janela com a caixilharia. No interior da sala encontram-se, além das secretárias, dois ocupantes. A utilização de apenas duas pessoas deveu-se à necessária economia do custo computacional. A figura 6 apresenta a síntese da descrição elaborada.

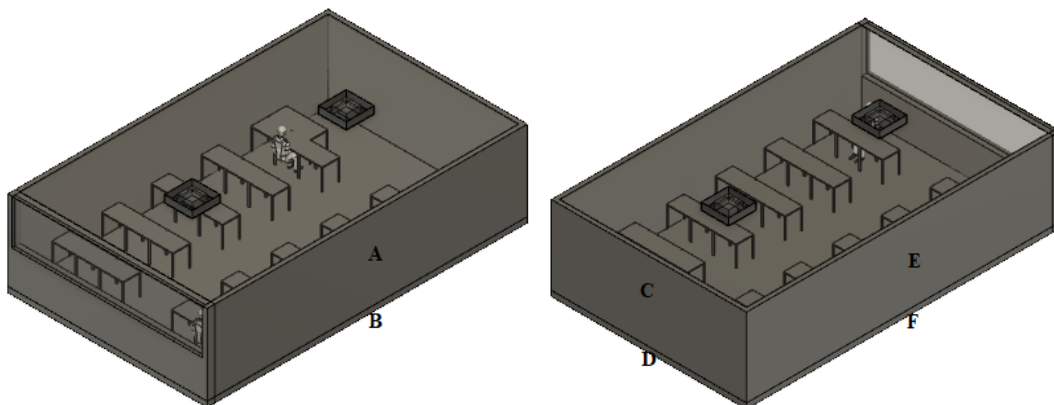


Figura 6 - Geometria da sala

A utilização de duas pessoas e o detalhe envolvido nas mesmas tem grande impacto na simulação. Do ponto de vista do custo computacional, a geometria das pessoas/manequins deve ser o mais simples possível. Por outro lado, do ponto de vista da precisão da simulação, deve ser o mais real possível. Assim é necessário encontrar-se um compromisso para o nível de complexidade exigido para se obter os resultados desejados (Gao e Niu, 2005). A utilização de manequins, CTM (*computational thermal manikins*), com geometrias mais simples, normalmente requerem a utilização de uma malha menos refinada que um CTM com uma geometria mais realista. Além disso, o detalhe envolvido no CTM deve encontrar-se de acordo com a precisão dos modelos numéricos escolhidos, devendo ser a sua articulação o mais coerente possível (Taghinia *et al.*, 2018). O nível de detalhe no CTM varia substancialmente com a abordagem aplicada, podendo este variar desde simples volumes paralelepípedos até uma geometria muito detalhada. Uma das aplicações desta última é o estudo da respiração, assim a malha e a geometria terão de apresentar grande detalhe neste tipo de estudo (Li *et al.*, 2013). É sugerido na bibliografia que CTM com maior complexidade sejam utilizados no estudo do conforto térmico num pequeno ambiente com uma pessoa, enquanto que CTM mais simplificados deverão ser aplicados em estudos de sistemas de ventilação (Yan *et al.*, 2016-a). Em cada estudo, tem de ser analisado o nível de detalhe do CTM por forma a que este não se encontre tão simplificado que se perca a capacidade de significado dos valores extraídos da simulação. Yan *et al.* (2016-b) estudaram o impacto que diferentes manequins, com detalhes distintos, apresentam na previsão do escoamento à sua volta, bem como o custo computacional associado a cada destes. Foram estudados 4 manequins e o que apresenta



Figura 7 - Computational Thermal Manikin

menos detalhes é formado por blocos geométricos simples. A utilização deste, apresenta divergências significativas em relação ao escoamento dos restantes CTM, de maior detalhe. Assim, considerando os diferentes níveis de detalhe estudados pelos autores, no presente estudo opta-se pelo que apresenta uma boa previsão do escoamento com menor custo computacional. O nível de detalhe do CTM utilizado pode ser visualizado na figura 7.

Para o sistema climatizador modelaram-se dois equipamentos do tipo cassette cujo esquema se apresenta na figura 8 e que genericamente reproduzem os sistemas de climatização utilizado em estudos semelhantes (Noh *et al.*, 2007, Noh *et al.*, 2008, Fukada *et al.*, 2015).

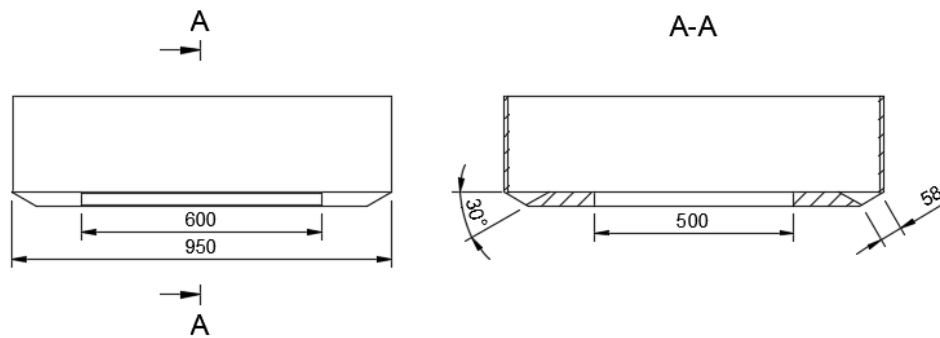


Figura 8 – Cassete (unidade milímetros)

Tratando-se de um estudo com incidência da radiação solar, revela-se evidente que a posição da sala simulada irá influenciar a quantidade de radiação solar incidente (Ahmed *et al.*, 2017). Atentando o enunciado, para efeitos de definição das condições de fronteira,



Figura 9 - Edifício do departamento de Engenharia Mecânica do ISEL (google maps)

considera-se a sala na fachada Este, devido á posição do sol no período de verão no horário da manhã (figura 9 – google maps), uma vez que o balanço entre a exposição solar do interior da sala com o fluxo desta é majorado.

Uma vez que se trata de um estudo de radiação, as propriedades das paredes e da janela têm de se encontrar definidas, contrariamente ao que se pode encontrar em estudos de ventilação (Aganovic *et al.*, 2019). As especificações dos materiais encontram-se no anexo A.

Vários são os parâmetros a considerar na seleção do vão envidraçado. Destes destacam-se 3: o coeficiente de transmissão luminosa, o coeficiente global de transmissão de calor e o fator solar. O primeiro pode ser definido como a quantidade de luz visível que atravessa um vidro. O valor da sua percentagem é obtido entre a luz transmitida e a luz que incide sobre o vidro. O segundo é o inverso da resistência térmica equivalente de um sistema físico. E o terceiro, é a fração incidente de radiação solar que é transmitida pelo vidro para o interior do espaço. Este processo pode ser dividido em dois mecanismos dominantes: transmissão direta da radiação solar; e emissão radiativa associada a trocas convectivas com o espaço interior, fruto do aumento da energia interna do vidro, resultante do carácter não transparente deste. O seu valor é calculado pela percentagem de energia incidente no vidro com a que é passada para o interior (Freitas, 2005). Os parâmetros enunciados variam com os vários tipos de vidro e com o respetivo processo de fabrico (Mendonça, 2005, Feng *et al.*, 2016). A existência de vários tipos de vidro encontra-se associado á aplicação a que se destinam, dependendo das características desejadas para os mesmos. No estudo foram simulados dois tipos de vidros. As características destes são idênticas excluindo o fator solar. Para o presente estudo comparativo optou-se pela análise de dois vidros - utilizados em estudos idênticos (e.g. Mohelníkova e Altan, 2009, Widder e Cort, 2015) - de características não radiativas similares, coeficiente global de transmissão de calor de $5 \text{ W/m}^2\text{K}$, mas com um fator solar diverso, 0,2 e 0,7.

3.2 Condições de fronteira aplicadas

Como enunciado no capítulo 2 as escolhas das condições de fronteira determinam substancialmente os valores obtidos na simulação. Assim, a sua determinação deve ser

realizada de forma ponderada de modo a que estas representem o melhor possível a realidade.

Em todas as simulações realizadas considera-se que os ocupantes apresentam uma libertação de 65 W (ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001). Considera-se ainda, para os ocupantes, os valores de 0,6 clo (ISO 7730, 2005, Özdamar e Umarogullari, 2018, Ngarambe *et al.*, 2019) característica de roupa leve e um nível de atividade de 1,2 met, correspondente a 70 W/m², adequado para uma sala de aula (ISO 7730, 2005).

Serão simuladas duas condições diferentes. A variação nestas é devido ao vão envidraçado utilizado e à presença, ou não, de radiação solar direta (aplicação de sistemas passivos de sombreamento). Para determinar as condições de fronteira nas simulações, uma vez que se trata de uma simulação de conforto térmico, é necessário recorrer-se a informações meteorológicas. Como critério de escolha do dia em que se aplica a simulação considera-se o dia mais quente registado pela estação meteorológica do Instituto Superior Técnico para o ano de 2019. Assim, o dia mais quente registado ocorreu a 11 de Julho. A escolha do horário é influenciada tanto pela temperatura do ar, bem como a posição do sol neste dia. Levando em consideração tais parâmetros a simulação é realizada para as 10 horas e 30 minutos da manhã. Apesar de neste horário não ser o que apresenta um maior fluxo de radiação solar do dia, é necessário levar-se em consideração a posição do sol relativamente à sala em estudo. Assim, é balanceada a influência do fluxo de radiação solar com a sua exposição no interior da sala. Simultaneamente, pretende-se que os ocupantes que se encontram na última fila de secretárias da sala, estejam expostos a radiação solar direta. Deste modo, esta zona da divisão é a que apresenta maiores desafios para se alcançar o conforto térmico dos ocupantes.

Nas simulações pretendidas para o caso estudo, existe a presença ou ausência de radiação solar direta. Nas simulações em que é inexistente radiação solar direta a incidir na divisão, isso deve-se à utilização de sombreamento. Assim, em vez de se utilizar janelas com controlo solar e térmico, pretende-se comparar o impacto da aplicação de sombreamento externo complementado com uma janela simples de vidro laminado. Existem vários tipos de sombreamento que podem ser aplicados. No presente estudo optou-se pela simulação de um sistema do tipo prateleira, que se caracteriza pela opacidade à radiação direta solar na janela. O dimensionamento deste tipo de sombreamento leva em consideração diversos parâmetros. Dependendo da dimensão do sombreamento, variará também a sua influência no controlo da radiação solar direta ao

longo do ano. É de realçar que o seu dimensionamento considera, também, os benefícios da radiação solar no inverno, no aquecimento dos edifícios, tirando partido, para tal, da variação da altura do sol no verão e no inverno. Esta abordagem, em certas situações, poderá resultar numa redução da luminosidade a entrar pela janela. Situação que poderá ter de ser compensada artificialmente. Apesar do enunciado, os benefícios energéticos associados ao sistema de climatização são superiores aos prejuízos energéticos resultantes da maior necessidade de iluminação artificial. Para o trabalho em estudo, considera-se que o sombreamento utilizado se encontra dimensionado de modo a que no horário e dia em estudo a janela encontra-se protegida da radiação solar direta proveniente do sol (Xie *et al.*, 2017, Zhao e Du, 2020).

Apesar de a radiação solar direta não incidir na janela, o termo associado à radiação difusa deve ser considerado nas trocas energéticas do “sistema” sala. Assim é necessário determinar o seu impacte. Devido à escassez de dados sobre a radiação difusa do céu foram desenvolvidos diversos modelos com o objetivo de estimar este valor. Para avaliar o valor do fluxo de radiação é necessário considerarem-se, de entre outros, as condições atmosféricas, nomeadamente o índice de céu limpo (*clearness index* - k_t). Neste âmbito existem vários modelos. O presente estudo recorreu a um modelo que utiliza intervalos de tempo de uma hora (Berrizbeitia *et al.*, 2020). A escolha do modelo para determinar a radiação difusa do céu num plano horizontal, consiste no mais adequado para a localização em estudo, uma vez que se encontra otimizado para localizações com uma latitude entre 31° e 42° (Orgill e Hollands, 1977). Uma vez que o valor obtido é num plano horizontal é necessário determinar o valor na janela. Para tal recorre-se às equações presentes na ASRHAE 55 (2017) já apresentadas no capítulo das equações de conforto térmico (eq. 2.30 a 2.32) para se obter uma estimativa deste valor. Estas são ajustadas para o cálculo da radiação difusa que entra na janela. Este cálculo encontra-se descrito detalhadamente no anexo B.

O *software* de simulação (Autodesk CFD) apenas contabiliza a radiação solar direta. Assim é necessário determinar a radiação solar difusa que provém do exterior. Após a sua determinação, esta é aplicada como fluxo energético na superfície do vidro.

A fachada externa dos edifícios troca constantemente energia com o ambiente por convecção e radiação. Isto ocorre sob a influência de diversas condições exteriores, como a velocidade do vento, temperatura ambiente e radiação solar. Esta última contribuição energética foi discutida no parágrafo acima. O coeficiente de transferência de calor por

convecção na superfície da parede depende das condições do escoamento de ar no exterior. Este parâmetro é normalmente estimado utilizando correlações baseadas em dados experimentais (Jayamaha *et al.*, 1996). Diversas experiências já foram realizadas nesta área de estudo, levando ao desenvolvimento de expressões numéricas para a estimativa deste parâmetro. Dentro destas experiências existem variantes que levam em consideração a geometria do edifício, o espaço que o rodeia, rugosidade da superfície da fachada, a direção do escoamento e a sua temperatura. O parâmetro em estudo é de grande importância devido ao impacto energético associado a simulações energéticas em edifícios. Para a presente análise recorreu-se ao modelo de McAdams (Mirsadeghi *et al.*, 2013), de onde é possível obter o valor de 26,32 W/K.m² para a parede e 24,0 W/K.m² para a janela, quando se considera o valor de 4,7 m/s para a velocidade do ar.

A determinação das temperaturas das paredes interiores, na sua superfície externa, foi realizada recorrendo a uma simulação numérica. Esta apresenta todas as paredes adiabáticas, exceto a da fachada e não leva em consideração a radiação solar (sala protegida da radiação solar). Após alcançar-se um nível adequado de conforto térmico no interior da sala registou-se o valor médio da temperatura nas superfícies dessas paredes. Esta simulação tem como objetivo representar uma condição em que todas as divisões do edifício se encontram com níveis de conforto térmico adequados e deste modo as condições ambientais nas divisões são idênticas. A previsão das temperaturas varia consoante o tipo de construção do edifício, apesar disso os valores obtidos corroboram com alguns estudos realizados (Nguyen *et al.*, 2014, Saeki *et al.*, 2014, Fernandes *et al.*, 2015). A temperatura obtida é posteriormente aplicada nas simulações, como condição de fronteira.

Associado ao modelo de turbulência e às condições de fronteira do caudal de ar de entrada é necessário determinar as quantidades de energia cinética turbulenta e a sua dissipação no escoamento de insuflação. Recorrendo à definição de intensidade de turbulência esta pode ser caracterizada da seguinte forma (Autodesk CFD help, 2020):

$$I = \frac{u_i}{\bar{u}_i} \quad (3.1)$$

E recordando que a energia cinética turbulenta pode ser descrita por:

$$k = \frac{1}{2} [(u)^2 + (v)^2 + (w)^2] \quad (3.2)$$

É possível ligar essas duas grandezas turbulentas da seguinte forma:

$$k = \frac{1}{2} [(\bar{u}I)^2 + (\bar{v}I)^2 + (\bar{w}I)^2] \quad (3.3)$$

Com as equações apresentadas é necessário conhecer-se o valor da intensidade turbulenta para se obter o valor da energia cinemática turbulenta. A escolha do valor de intensidade de turbulência irá afetar os perfis de velocidade de insuflação, conseqüentemente é necessário adequar este valor a cada caso de estudo (Cao e Meyers, 2013). Foi aplicado o valor de intensidade de turbulência de 10%, uma vez que é o valor sugerido para simulações com cassetes (Noh *et al*, 2007). Associado à determinação da energia cinética turbulenta encontra-se a sua dissipação, o valor desta pode ser obtido do seguinte modo (Autodesk CFD help, 2020).

$$\varepsilon = C_{\mu} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3.4)$$

Na equação anterior “*l*” é a escala de comprimento turbulenta, esta quantidade descreve a dimensão característica dos turbilhões.

Conforme profusamente descrito anteriormente, o presente trabalho de investigação foca a sua atenção, de entre outros, no estudo do impacte da radiação solar direta no conforto dos ocupantes. Para que tal seja contabilizado utilizam-se dois indicies de conforto, o PMV-ERF e o PMV-RAD - explanados no capítulo 2 - que adequam o modelo original de previsão das condições de conforto em espaços fechados à presença de radiação solar direta.

Uma vez que o impacte da radiação solar direta é avaliado por dois indicadores distintos, é expectável que os resultados obtidos sejam diferentes. De modo a obter-se as desejadas conclusões do impacte da radiação solar direta no conforto humano, divide-se o estudo em três vertentes. O primeiro caso-estudo tem como objetivo comparar os dois

modelos - PMV-ERF e PMV-RAD - de previsão das condições de conforto que contabilizam a radiação solar (simulação SR-I). O segundo caso-estudo foca-se no impacto da radiação solar direta no conforto dos ocupantes (simulação SR-S), quando comparado com uma situação em que o mesmo é inexistente devido a sombreamento (simulação SCS). Por último, o terceiro caso-estudo tem como objetivo mensurar o custo energético de se optar por vidros com um elevado desempenho energético ou a utilização de sombreamento (simulação SR-E).

A tabela 2 sintetiza as considerações mais relevantes apresentadas neste subcapítulo, bem como as restantes condições de fronteira pertinentes para o estudo.

Tabela 2- Condições de Fronteira

Condições de fronteira iguais em todas as simulações						
Temperatura nas paredes [°C]	A*	B	C	D	E	F
	25,11	25,01	24,83	24,82	25,10	25,05
Temperatura no Chão [°C]	25,03					
Dia e hora (11 de julho de 2019, 10:30 h)	Posição geográfica			Temperatura ambiente		
	Latitude: 38° 45' N Longitude: 9° 7' O			29,50 °C		
	Coeficiente de convecção [W/m ²]					
	Parede			Vidro		
	26,32			24,00		
Condições de fronteira que variam consoante a simulação						
		Caudal de ar em cada cassete [m ³ /h]	Temperatura do ar de insuflação [°C]	Fluxo de radiação difusa [W/m]		
Simulações <u>com</u> radiação solar direta	SR-I	800	17,50	16,88		
	SR-S	400	21			
	SR-E	800	19			
Simulação <u>sem</u> radiação solar direta devido a sombreamento	SCS	400	21	28,35		

*A posição das letras das temperaturas na parede encontram-se representadas na figura 6

3.3 Considerações computacionais

3.3.1 Malha

Um dos passos mais importantes no decorrer do pré-processamento é a definição da malha. Uma malha bem construída é um passo importante para se obter uma boa simulação em CFD. A correta geração da malha é deste modo um passo fundamental para se alcançar resultados numéricos, precisos, eficientes e robustos. Por outro lado, uma malha mal construída conduz a resultados numéricos com baixa precisão, uma convergência lenta e por vezes numericamente instáveis. A sua construção decorre da divisão do domínio em subdomínios e o seu refinamento é feito de modo a que os valores discretos das propriedades do fluido, como por exemplo a velocidade, pressão, temperatura e outras quantidades, sejam determinadas de forma adequada e equilibrada. A precisão da solução por CFD aumenta com o refinamento da malha e por conseguinte com o aumento do número de elementos. Do mesmo modo, o custo computacional também aumenta, sendo necessário considerarem-se limitações a nível de memória e tempo de cálculo. Adicionalmente, com o aumento progressivo do refinamento da malha alcança-se uma condição em que os resultados são insensíveis ao incremento do número de elementos. Quando tal se verifica, alcança-se uma solução independente da malha.

A construção da malha é realizada de forma automática pelo *software*, depois de definidos alguns critérios indispensáveis. Findo este processo construtivo é necessário examinar a malha assegurando que esta é adequada à geometria e geradora de resultados independentes. A malha que é utilizada nas simulações contém 3,4 milhões de elementos, levando em consideração o enunciado anteriormente.

3.3.2 Convergência e tempo de cálculo

A convergência da solução numérica é controlada pelo *solver* do *software* computacional. Este ajusta os parâmetros computacionais garantindo a convergência dos valores. A simulação é executada internamente como transiente com apenas uma iteração entre cada espaço temporal, sendo deste modo um dos parâmetros que também é ajustado. O critério de convergência utilizado para as simulações consiste na obtenção de resíduos na ordem de 10^{-5} e a derivada dos valores médios do processo iterativo a tender para 0.

As simulações foram realizadas num computador equipado com um processador AMD Ryzen 7 2700X com 16 Gigabytes de memória RAM.

3.3.3 Ferramenta computacional

À realização do estudo encontra-se associado a aplicação e exploração de um *software* comercial. Para o mesmo, utiliza-se o Autodesk CFD devido à sua disponibilidade e confiabilidade. Este *software* é amplamente utilizado até mesmo dentro da área de estudo (exemplo de aplicação, o trabalho de Raczkowski *et al.*, 2019).

Após obtenção da solução numérica convergida, extraem-se os resultados necessários ao cálculo e à caracterização dos indicadores de conforto térmico. É deste modo importante apresentar a metodologia utilizada para se obter os valores dos indicadores de conforto.

O *software* de simulação (Autodesk CFD) permite extrair dados de um plano específico. Assim utiliza-se esta funcionalidade para introduzir os dados desse plano num programa desenvolvido para o estudo, em Python 3.8. Neste âmbito foram desenvolvidos três programas que permitem prever o índice de conforto PMV recorrendo aos 3 modelos já elencados: o modelo original, o modelo PMV-ERF e o modelo PMV-RAD.

O código do cálculo do PMV é obtido pela utilização de um módulo intitulado *pythermalcomfort* (Tartarini *et al.*, 2020). Este foi verificado recorrendo a valores de teste presentes na ISO 7730 (2005).

Ainda sobre este, é necessário apresentar a metodologia utilizada pela ISO 7730 (2005) para o cálculo da pressão parcial de vapor de água, parâmetro utilizado no cálculo do PMV, que é realizado recorrendo às seguintes equações.

$$HR = \frac{p_a}{p_s} * 100 \quad (3.5)$$

$$p_s = e^{\frac{16,6536-4030,183}{t_a+235}} \quad (3.6)$$

Onde, p_s é a pressão de saturação, HR é a humidade relativa e t_a é a temperatura do ar de bolbo seco. Uma vez que os indicadores de conforto térmico, que contabilizam o impacto da radiação solar, resultam de alterações à metodologia de cálculo do índice PMV

original, é por demais evidente que o índice de conforto PMV previsto pelo modelo original é um caso particular dos modelos mais genéricos PMV-ERF e PMV-RAD. Dentro deste mesmo módulo (pythermalcomfort) encontra-se a base para o cálculo do PMV-ERF. Apesar disso, este foi modificado pelos parâmetros e informação computacional disponibilizada na ASRHAE 55 (2017). Também este código computacional foi validado pelos valores fornecidos nessa norma. É de referir que após a sua validação, modificações foram feitas nas parcelas de cálculo, de forma a adequar o código ao caso em estudo. O ajuste é realizado na remoção da parcela associada à radiação difusa, uma vez que esta já é contabilizada nas condições de fronteira da simulação numérica. Assim o cálculo é realizado com a parcela de radiação direta que incide no ocupante e a parcela que é refletida no chão e só posteriormente é que incide no ocupante. Por último, o código no PMV-RAD apenas é adicionado o ajuste da radiação solar após o cálculo do PMV, repetindo-se em seguida o cálculo do PPD com o PMV ajustado.

Importa referir as limitações associadas ao programa desenvolvido para o presente estudo. O cálculo do PMV é realizado nas zonas da sala em que não existe exposição da radiação solar direta. Quando esta se encontra presente é calculado o PMV-ERF ou o PMV-RAD, consoante o caso em análise. Assim fica evidente que para se alternar entre o PMV e o PMV-ERF ou o PMV-RAD necessita-se de identificar o fluxo de radiação solar direta.

O fluxo de radiação solar direta é obtido no *software* de simulação computacional (Autodesk CFD). Devido às limitações do modelo de radiação presente no programa de simulação, o fluxo de radiação apenas é obtido em superfícies. Consequentemente, para a utilização dos valores do fluxo de radiação num plano da sala é necessário gerar uma superfície fictícia e assim extraírem-se os valores do fluxo de radiação solar nesse plano.

As limitações na obtenção dos dados do fluxo de radiação solar no Autodesk CFD, limita os planos em que é possível quantificar o impacte da radiação solar direta, tendo estes de ser horizontais. Consequente a limitação evidenciada irá refletir-se na aplicação do programa desenvolvido em Python para ser utilizado no presente estudo. Para consulta, os códigos desenvolvidos em Python encontram-se no anexo C.

A visualização dos dados extraídos do Autodesk CFD, trabalhados no programa em Python para o estudo, é feita recorrendo ao *software* ParaView 5.8.0. Existem ainda dados que são apresentados diretamente com as ferramentas de visualização do Autodesk CFD.

3.4 Resultados

Considerando o elencado nos subcapítulos anteriores, apresentam-se em seguida os resultados obtidos das simulações parametrizadas. Serão discutidos e analisados os resultados decorrentes da aplicação da modelação matemática, física e numérica anteriormente apresentada. Focando, neste âmbito, particular atenção aos valores da velocidade e temperatura do ar, bem como aos parâmetros associados ao conforto térmico, PMV e PPD.

Um dos parâmetros no cálculo do PMV é a humidade do ar. Por forma a especificar este parâmetro manteve-se constante o valor da humidade relativa no valor de 40% (Teodosiu *et al.*, 2015) que se encontra associado à estação do ano, verão (Nguyen *et al.*, 2013). Os restantes parâmetros necessários para o cálculo do indicador de conforto térmico são fornecidos pelos valores da simulação ou pelos valores apresentados no subcapítulo das condições de fronteira.

Os valores apresentados serão expostos em dois planos, um vertical e outro horizontal. O plano horizontal encontra-se posicionado a 1,1 metros do plano do chão, ao nível dos ombros para um ocupante sentado numa cadeira. Por sua vez, o plano vertical encontra-se colocado de tal modo que a pessoa que se encontra mais próxima da janela esteja dividida em duas partes iguais (a 1,17 metros da parede mais próxima), obtendo-se uma melhor perceção da pluma gerada pelo ocupante. Para melhor visualização da localização dos planos mencionados, a figura 10 apresenta geometricamente a sua posição.

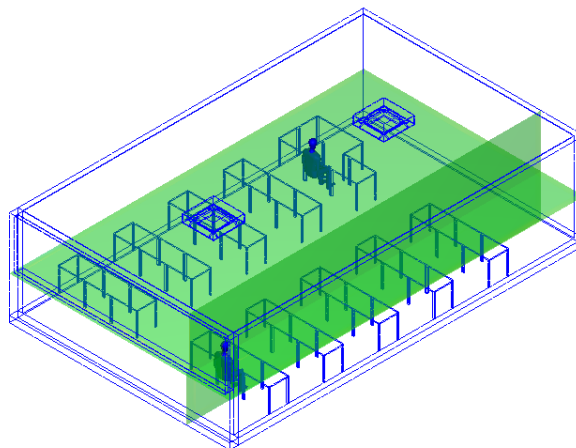


Figura 10 - Posição geométrica dos planos

3.4.1 Radiação solar

Tratando-se de um estudo em que um dos objetivos é avaliar o impacto da radiação solar no conforto, apresentam-se agora os dados da mesma. Estes dados estão associados aos valores simulados no interior da sala. Na figura 11 é apresentada a zona de influência da radiação solar direta. Esta zona encontra-se diretamente relacionada com a posição do sol, geometria do edifício e a sua localização. Isto porque o *software* de simulação posiciona a fonte de radiação solar por forma a que esta simule o mais fidedignamente a direção da radiação direta proveniente do sol. Assim, a simulação da radiação direta do sol considera a inclinação da radiação. Consequentemente, devido à direção da radiação, apenas parte da sala é afetada diretamente pela sua incidência.

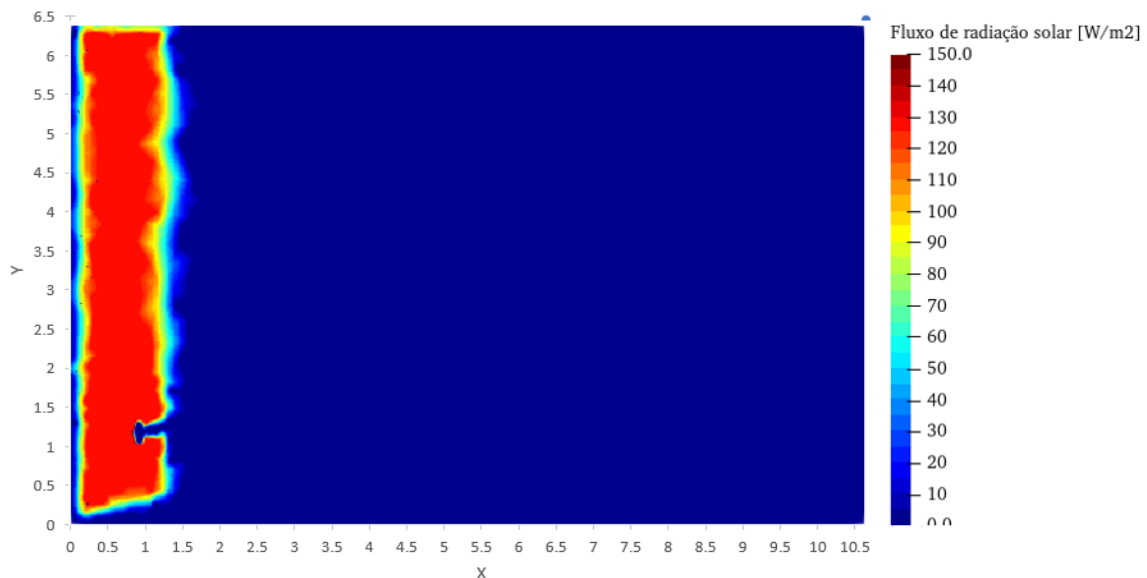


Figura 11 - Fluxo de radiação solar direta (plano horizontal localizado a 1,1 metros do chão)

Apresentado o valor do fluxo de radiação solar num plano horizontal, analisa-se o impacto desta nas simulações em que é contabilizada. Para os dados visualizados na figura 11, recorda-se que é utilizado um vão envidraçado com boas características energéticas, como apresentado anteriormente.

3.4.2 Caso 1 – Índices de conforto térmico sob exposição de radiação solar direta

Por forma a extrair-se um maior número de conclusões e observações irá abordar-se individualmente os dados resultantes da simulação tendo em consideração o seu impacto coletivo no valor de conforto proporcionado no espaço. Cada um destes apresenta informações vitais para o entendimento do processo físico no interior da sala e, consequentemente, no seu impacto nos índices de conforto simulados.

No presente subcapítulo pretende-se comparar o conforto previsto, para as mesmas condições termo-cinemáticas da sala, pelos dois modelos de cálculo do índice PMV anteriormente discutidos.

As figuras 12 e 13 representam o campo de velocidade, no plano horizontal e no plano vertical, respetivamente. Devido à necessidade de remoção da carga térmica do espaço, observam-se valores elevados de velocidade do escoamento nas zonas afetadas diretamente pelo ar de insuflação (p.e. zona localizada na posição $x=4$ e $y=0,5$ para a figura 12, $x=4$ e $z=1,5$ para a figura 13). Observa-se que maioritariamente o escoamento do ar movimenta-se em direção à janela para cotas mais baixas ($z<1$), enquanto que para cotas mais altas o escoamento é maioritariamente realizado no sentido oposto. Tal poderá dever-se ao efeito ascensional do ar junto à janela resultante da convecção natural.

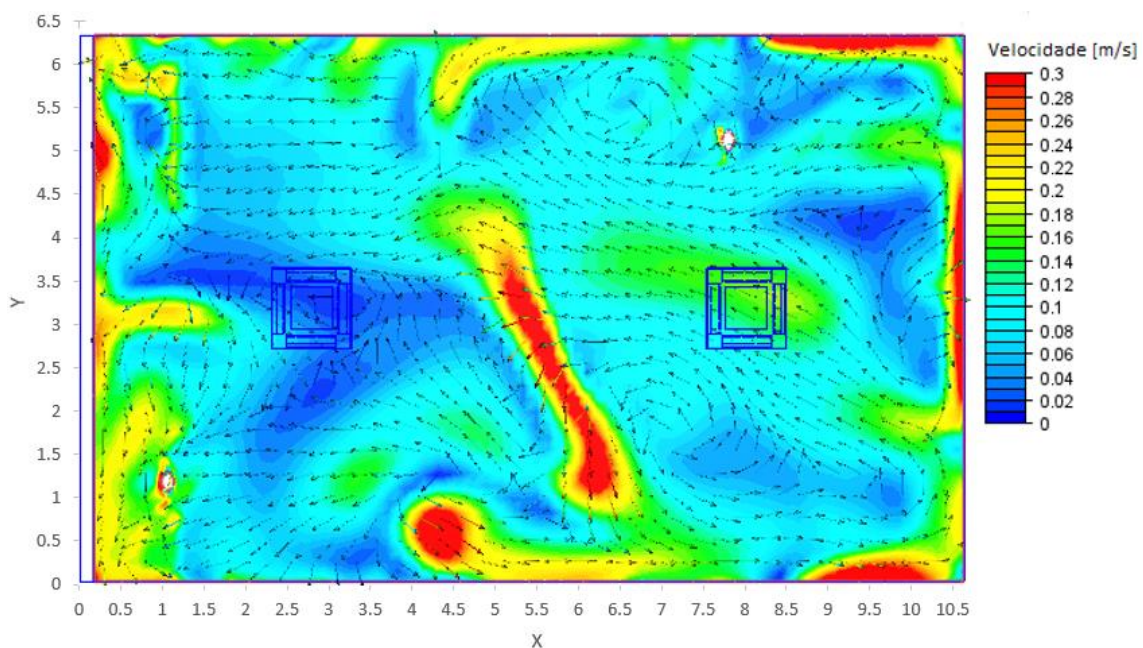


Figura 12 - Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão

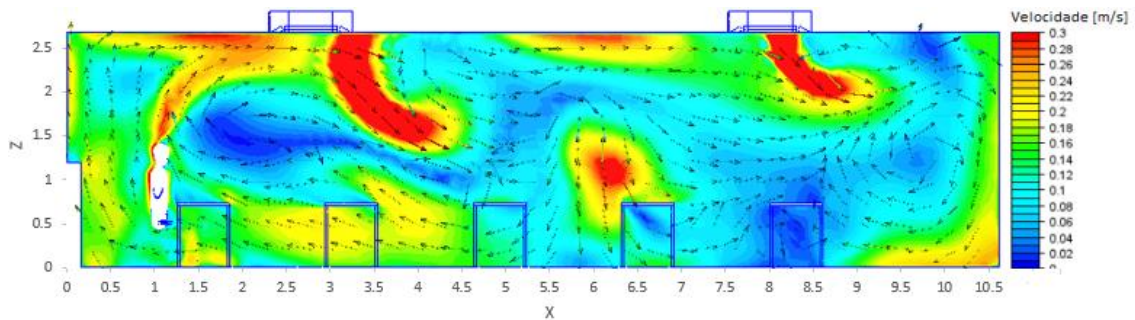


Figura 13 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A)

Associado a isso, o ocupante que se encontra localizado junto à janela recebe um escoamento de ar na parte frontal do seu corpo. É notório, na região normalmente ocupada pelo docente – zona oposta à janela - que o campo de velocidade é diretamente afetado pelo ar de insuflação resultando em velocidades de escoamento mais elevadas (figura 12 e 13 para $x > 10$, junto à parede contrária à da janela).

A distribuição da temperatura no interior da sala encontra-se representada nas figuras 14 e 15. É visível que as zonas da sala mais próximas da janela apresentam valores superiores às restantes (p.e. posição $x=1$ e $y=5,5$). Esta zona de maior temperatura do ar é fortemente influenciada pelas trocas de calor na parede e pelos ganhos térmicos resultantes da radiação solar nestes elementos construtivos. Esse fenómeno pode ser observado, por exemplo, junto ao chão na última fila de secretárias da sala, na parede E da sala ($x < 2$), junto à janela e no tampo das secretárias (ver figura 15 na região localizada de coordenadas $x=1,5$ e $z=1$).

O ar localizado junto aos ocupantes apresenta temperaturas superiores devido à carga térmica que estes geram no espaço. Por outro lado, o ar de insuflação é identificado pela sua menor temperatura quando comparado com o restante. Identifica-se ainda que o valor da temperatura do ar é menor quanto mais longe da parede da fachada (p.e. ver figura 14 na posição $x=10$ e $y=4$ com uma temperatura de $\approx 21,5$ °C comparando com a posição $x=0,5$ e $y=4$ com uma temperatura de $\approx 22,5$ °C).

Conciliando as informações da velocidade do escoamento com a temperatura do mesmo, verifica-se a formação de uma pluma no ocupante junto à janela (ver figuras 13 e 15 na região localizada de coordenadas $x=1$ e $y=1,5$). Devido à geometria da sala e ao aquecimento das superfícies na zona localizada perto da janela, a direção do escoamento do ar nesta região é maioritariamente ascendente. Assim, o ar aquecido é direcionado para cotas superiores (p.e. ver figuras 12 e 14 na localização de coordenadas $x=1$ e $y=6$).

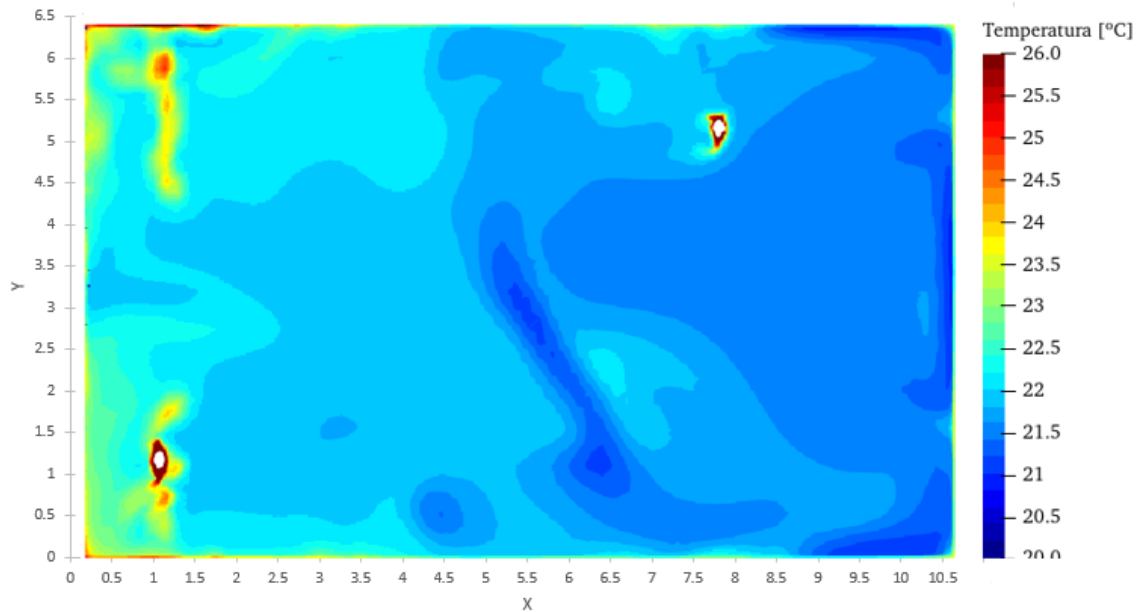


Figura 14 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão

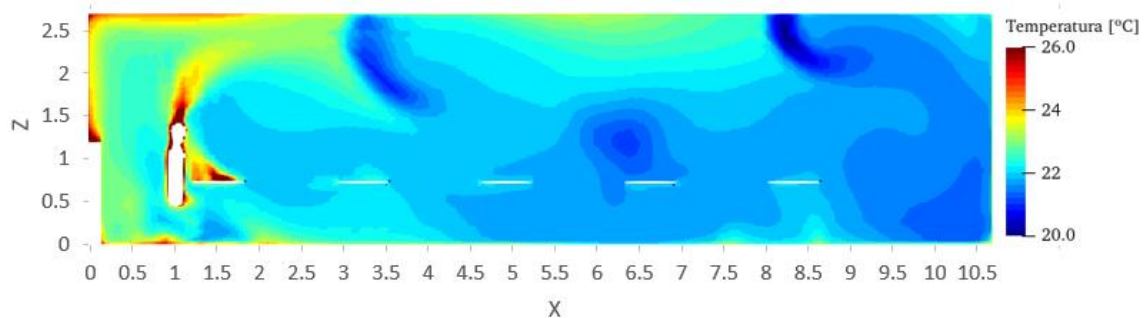


Figura 15 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A)

Como anteriormente apresentado, diversos parâmetros ambientais influenciam o conforto dos ocupantes do espaço, sendo isso mensurado pelo PMV. Lembra-se que a previsão do conforto é avaliada recorrendo ao indicador PMV e este é ajustado por forma a considerar o impacto da radiação solar. Este ajuste realiza-se de duas formas - ERF e RAD.

As figuras 16 e 17 apresentam o nível de conforto previsto pelos modelos de conforto PMV-ERF e PMV-RAD, respetivamente, no plano horizontal atrás descrito. O objetivo da simulação é obter-se um valor de índice de conforto térmico dentro da gama objetivo ($\pm 0,5$) para os ocupantes na zona afetada diretamente pela radiação solar, por ser esta, previsivelmente, a mais desconfortável. Verifica-se, da observação das figuras atrás referidas, que para a previsão do conforto utilizando o PMV-ERF este objetivo é alcançado ($PMV < 0,5$), enquanto que com o PMV-RAD tal não se verifica.

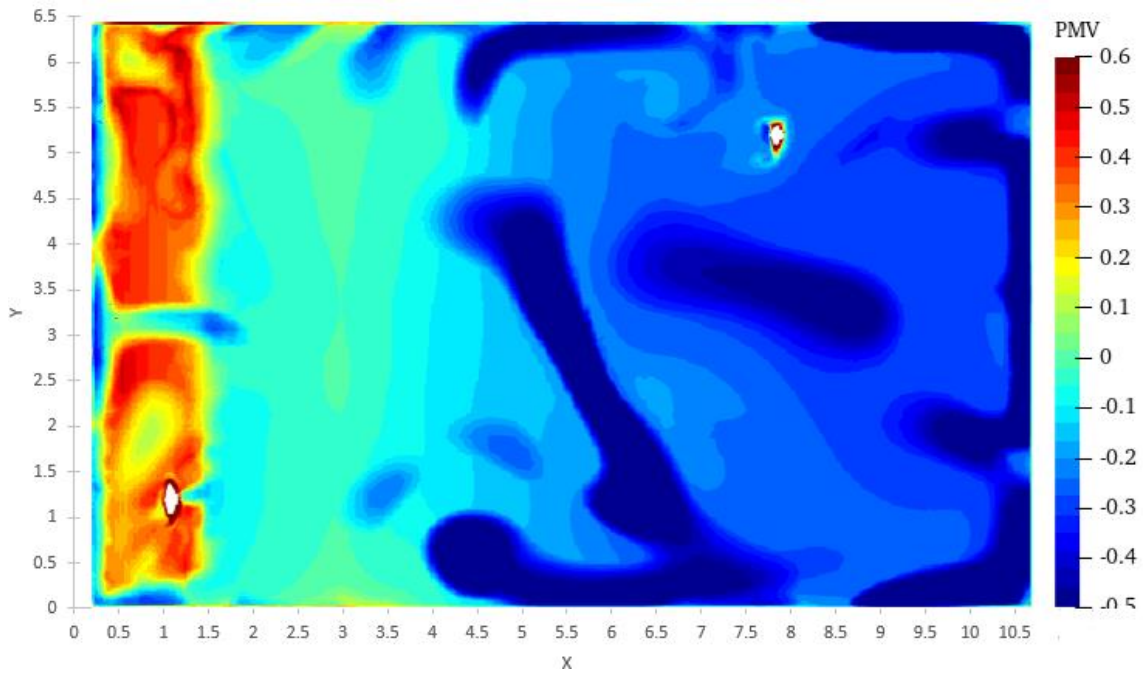


Figura 16 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo PMV-ERF

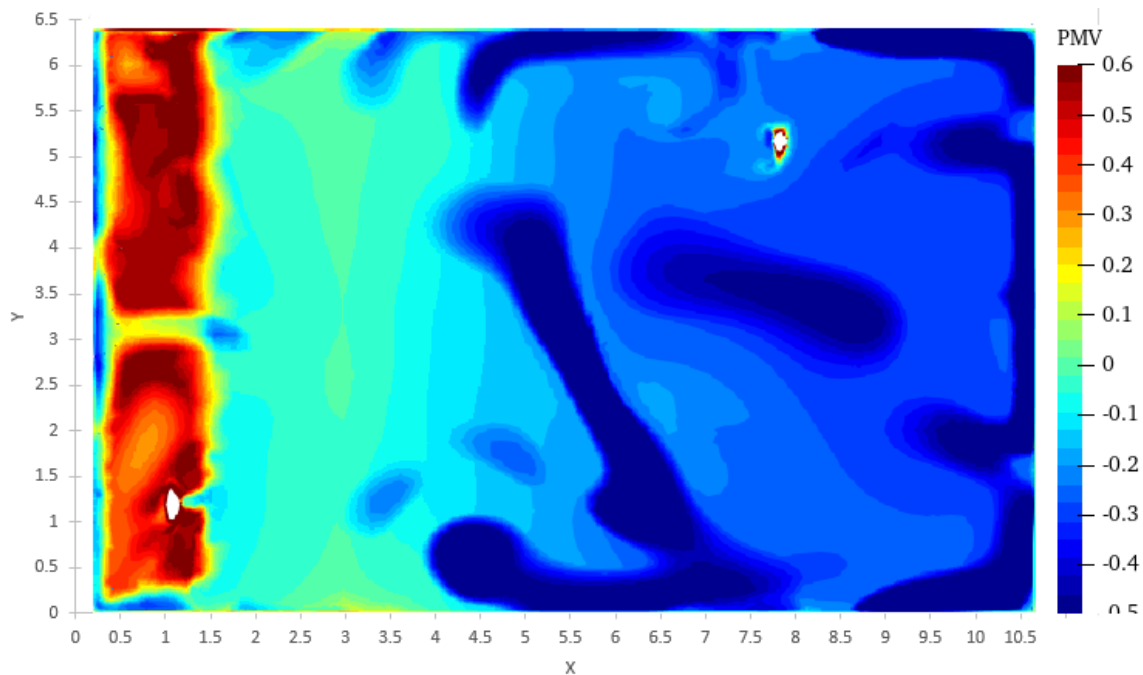


Figura 17 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo Conforto térmico - PMV-RAD

Objetivamente o apresentado ocorre para valores $x < 1,5$ (p.e. ver figura 16 e 17 na região de coordenadas $x=1$ e $y=4$ com valores de PMV de $\approx 0,35$ e $\approx 0,45$, respetivamente). Deste modo conclui-se que o indicador PMV-RAD, ao prever o nível de conforto térmico indica que o ocupante se encontra a expressar uma sensação térmica de

maior calor que o PMV-ERF. Apesar desta diferença, ambos os indicadores apresentam valores similares. O apresentado também foi observado por Arens *et al.* (2015) no desenvolvimento de uma ferramenta para prever o conforto térmico. Os autores compararam os campos previsionais do índice PMV-ERF, quando sujeito a radiação solar, com os resultados obtidos num anterior estudo, Hodder e Parsons (2007), que é de base do modelo previsional PMV-RAD, tendo concluído que os modelos apresentavam uma boa concordância.

Nas zonas da sala que não são afetadas diretamente pela radiação solar (figura 16 e 17 em $x > 1,5$), o ar com uma velocidade superior e uma temperatura inferior, potencia desconforto térmico com sensação térmica de frio. Contrariamente, as regiões afetadas pela radiação solar, contribuem para uma sensação térmica de calor por parte do ocupante, identificado pelo PMV-ERF e o PMV-RAD. Nas zonas afetadas diretamente pelo ar de insuflação prevê-se que os ocupantes apresentem uma sensação térmica de frio e que o valor na escala do PMV se distancie da gama objetivo (p.e. posição $x=4,5$ e $y=0,5$ nas figuras 16 e 17). A zona da sala que apresenta um valor de PMV mais próximo da neutralidade é a região central da sala, próxima da zona afetada pela radiação solar direta ($1,5 < x < 4$). O autor atribui esses valores na escala do PMV à temperatura do ar nessa zona, resultante do balanço entre as cargas térmicas resultantes das condições exteriores à sala e à temperatura do ar de insuflação.

Identifica-se no espaço uma zona de maior preocupação junto à parede oposta à janela. Isto porque, a utilização do quadro branco da sala encontra-se nessa zona, e consequentemente, a sua utilização resulta numa sensação térmica de frio.

Como estratégia de discussão dos resultados do PPD apresentados, opta-se, primariamente por abordar a zona afetada pela radiação solar. Apesar de ser notório que se trata de uma zona caracterizada por índices de desconforto acima do desejável, provocado maioritariamente por uma sensação de calor, a distribuição deste índice de conforto é claramente coerente com a distribuição já discutida para o índice PMV. Para as condições da simulação, observa-se que a percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições do espaço é mais elevada nas zonas afetadas pelo ar de insuflação do que nas zonas afetadas diretamente pela radiação solar direta. Esta constatação é expectável, uma vez que as condições de insuflação e de simulação foram definidas tendo como objeto a otimização do nível de conforto na região afetada pela radiação solar.

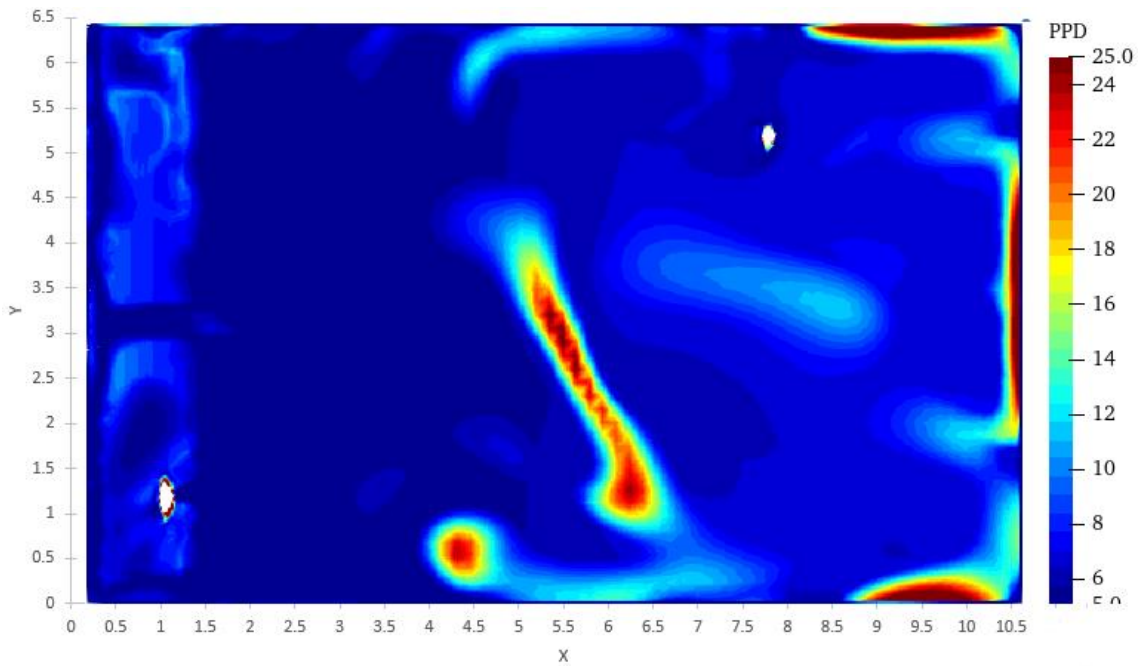


Figura 18 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo Conforto térmico - PMV-ERF

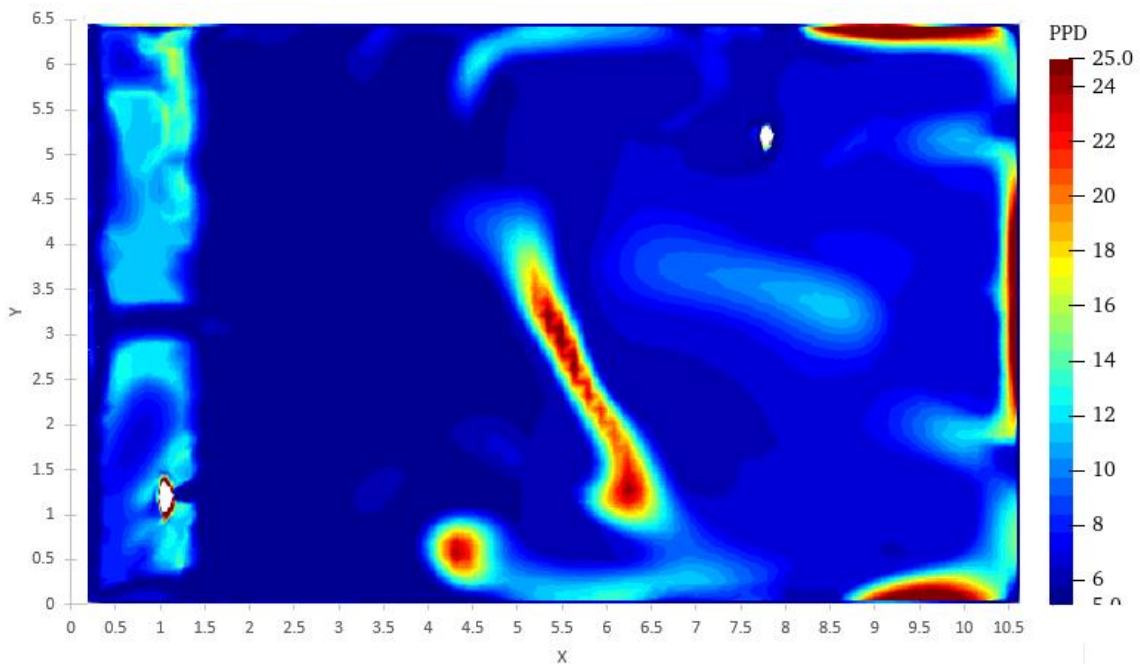


Figura 19 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo Conforto térmico - PMV-RAD

É, pois, de esperar que, nas regiões da sala onde os ganhos solares diretos são atenuados ou inexistentes, a sensação de desconforto associada à conjugação de dois fatores concomitantes, baixa temperatura do ar e elevada velocidade de insuflação, tenha como

consequência a criação de bolsas de elevado desconforto térmico (p.e. a região de coordenadas $x=4,5$ e $y=0,5$, também $x=6,5$ e $y=1,5$).

Apesar dos valores apresentados e discutidos do PPD, é expectável que o desconforto local contribua para o aumento da percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições proporcionadas pelo espaço, como identificado na ASRHAE 55 (2017).

Pela comparação apresentada entre o PMV-ERF e o PMV-RAD verifica-se que ambos refletem a presença de radiação solar direta, nas condições em estudo, por um aumento da sensação de calor nos ocupantes da sala. Visto não se terem apurado diferenças acentuadas entre as condições de conforto previstas pelos modelos PMV-RAD e PMV-ERF, e tendo em conta ser este último o método sugerido pela ASRHAE 55 (2017), doravante será este o modelo utilizado neste trabalho de investigação.

3.4.3 Caso 2 – Utilização de sombreamento ou vão envidraçado de elevado desempenho

No presente subcapítulo pretende-se apresentar e estudar o impacte que a radiação solar direta tem no conforto térmico dos ocupantes de uma divisão. Deste modo comparam-se duas simulações, estas são a SR-S e SCS. Como identificado nas condições de fronteira destas simulações, o que as distingue é a utilização, ou não, de sombreamento. Enquanto que na simulação SR-S existe a presença de radiação solar direta, na simulação SCS esta não existe devido ao sombreamento. Consequentemente, devido ao apresentado, o vão envidraçado também é diferente, a saber este caracteriza-se por um valor de fator solar de 0,2 em SR-S e 0,7 em SCS.

Por forma a identificar o impacte negativo da radiação solar direta as condições de insuflação utilizadas são as mesmas em ambas as simulações. Apesar disso, para as condições escolhidas, estas resultam em bons níveis de conforto no interior da sala para a simulação com sombreamento (SCS).

As figuras 20 a 21 apresentam o campo de velocidades para a simulação SCS e as figuras 22 e 23 para a simulação SR-S. Em ambas as figuras é possível identificar o ar proveniente do equipamento de climatização devido à sua maior velocidade (p.e. em ambas as simulações a região de coordenadas $x=6$ e $y=3$). Tendo em consideração o apresentado, verifica-se ainda um aumento da velocidade do escoamento na região perto

da parede da fachada para a simulação SR-S (ver figura 22 para valores de coordenadas com $x < 1$ e uma velocidade de escoamento superior a 0,14 m/s). Ao considerarem-se as variáveis alteradas no estudo, conclui-se que tal se deve à presença de radiação solar direta no interior da sala. Considerando os planos verticais apresentados para as duas simulações, observa-se que na simulação SR-S o escoamento apresenta duas direções predominantes, com um comportamento semelhante ao do caso 1. O indicado não se verifica na simulação SCS.

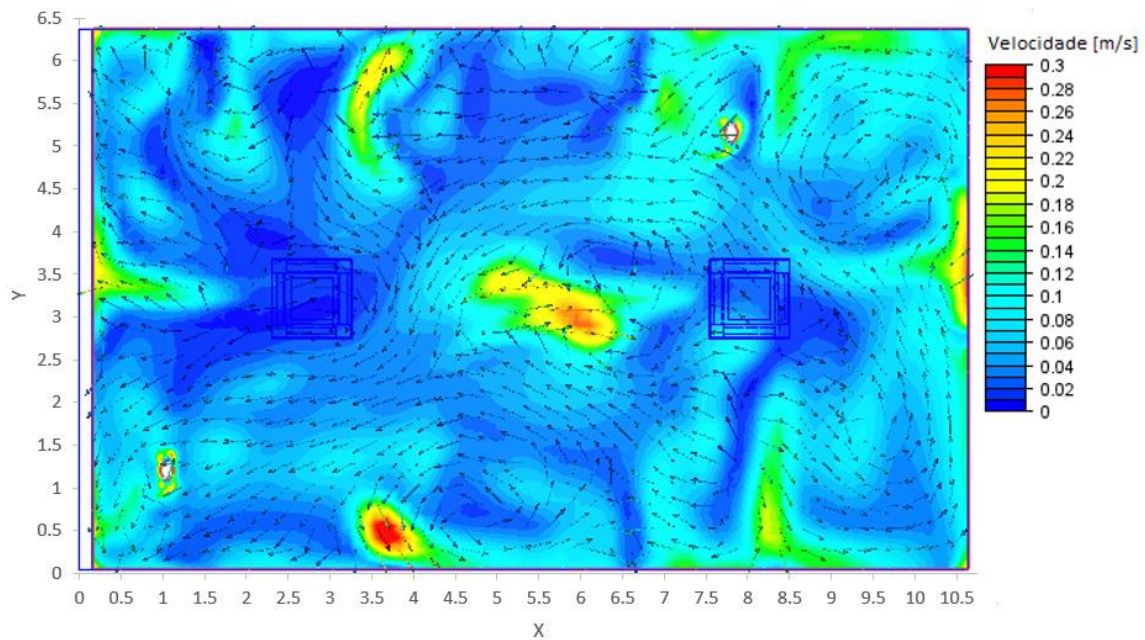


Figura 20 - Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão – SCS

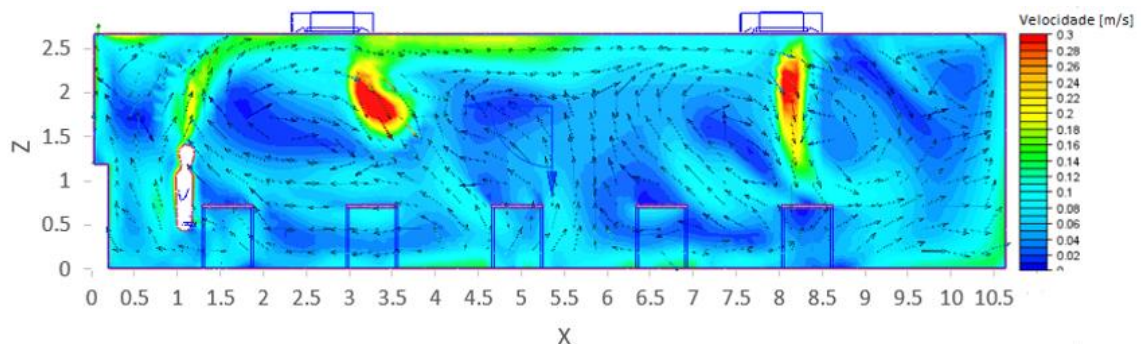


Figura 21 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) – SCS

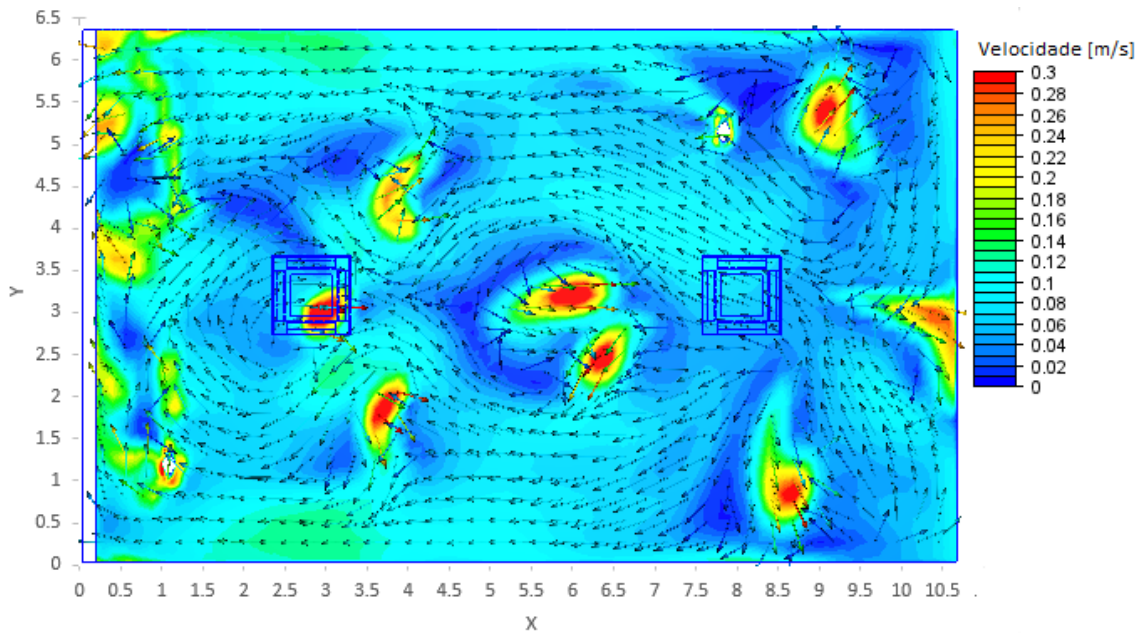


Figura 22 – Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-S

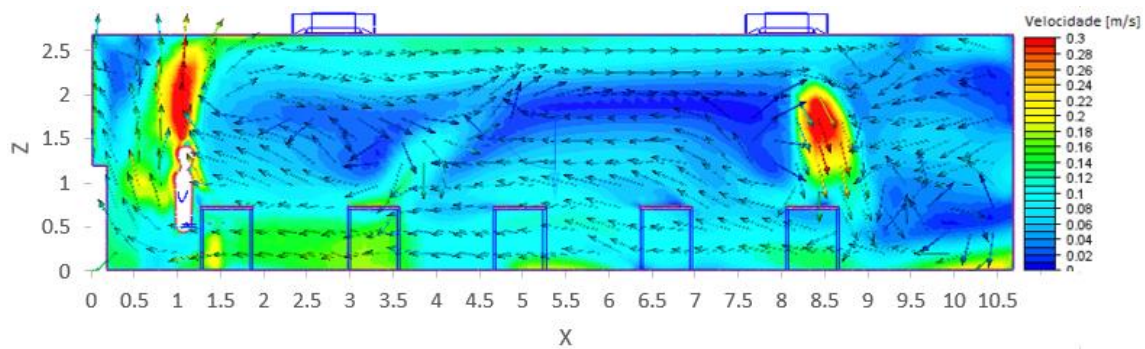


Figura 23 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-S

As figuras 24 e 25 apresentam o campo de temperatura para a simulação SCS e as figuras 26 e 27 referem-se à simulação SC-S. Comparando ambas, verifica-se uma variação notória nos valores da temperatura (p.e. para a região de coordenadas $x=2,5$ e $y=2,5$ a simulação SCS indica uma temperatura de $\approx 23,5$ °C enquanto na simulação SC-S um valor de temperatura de ≈ 26 °C). Verifica-se que a simulação SC-S apresenta valores superiores. O aumento da temperatura do ar advém do aumento da carga térmica no espaço devido à radiação solar direta. A distribuição de temperatura na simulação SCS apresenta uma baixa variação, característica da estratégia de ventilação adotada, mistura. Por outro lado, a simulação SR-S apresenta um aumento da temperatura localizada junto à janela (ver figura 26 para as regiões de coordenadas com $x < 1$, considerando como exemplo a posição de com $x=1$ e $y=5$). Também é possível identificar superfícies que apresentam temperaturas superiores e que conseqüentemente aquecem o ar que se

encontra em contacto com estas. Dentro destas, e observáveis na figura 27, identificam-se o parapeito da janela, a secretária e o próprio ocupante. Este último resulta da dissipação de calor devido ao metabolismo humano, conjugado com o aumento da carga térmica proveniente do sol, que aquece a vestimenta. Considerando os dados da velocidade do escoamento e da temperatura deste, identifica-se a formação de plumas. Estas ocorrem nos ocupantes e nas superfícies aquecidas devido à radiação solar direta. Assim, enquanto que as plumas formadas devido à presença dos ocupantes observam-se em ambas as simulações, as segundas devido à radiação solar, apenas existem na simulação SR-S. Devido à variação da massa volúmica do ar, observa-se, em ambas as simulações, que o ar com uma temperatura superior encontra-se junto ao teto, enquanto que o escoamento com uma temperatura inferior encontra-se a cotas inferiores (ver figuras 25 e 27 para coordenadas com $z > 2,5$).

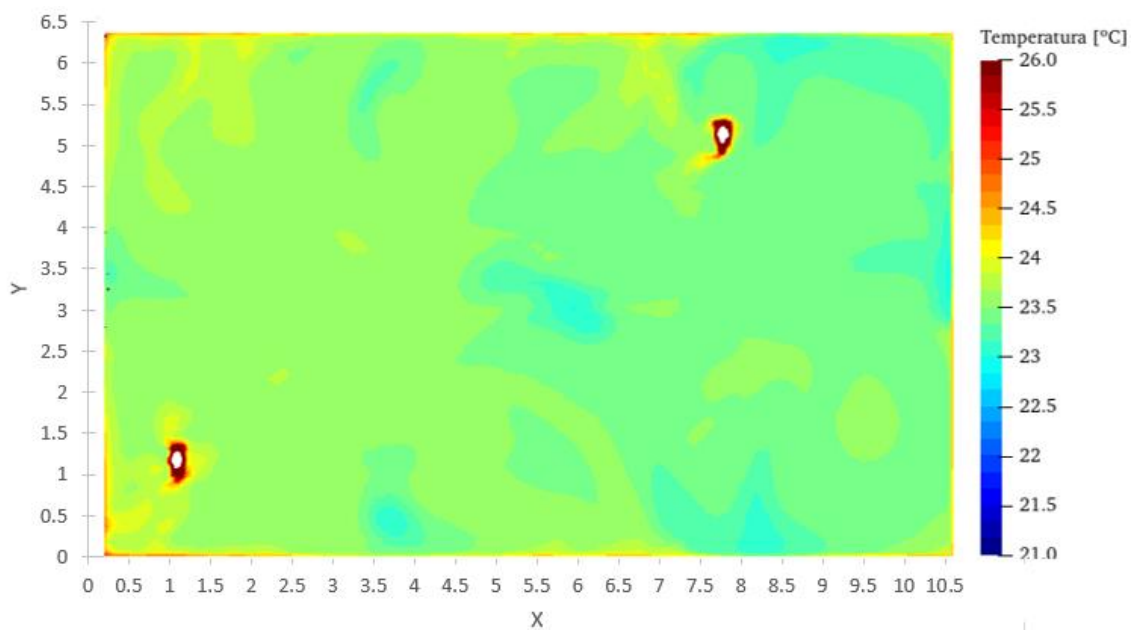


Figura 24 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão – SCS

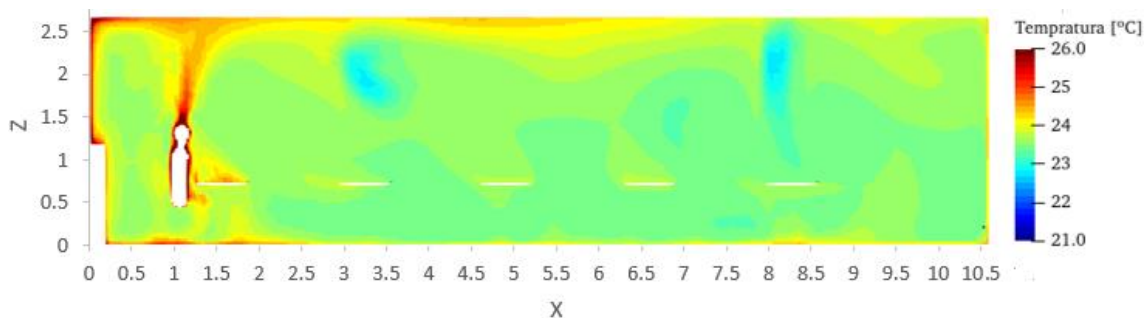


Figura 25 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SCS

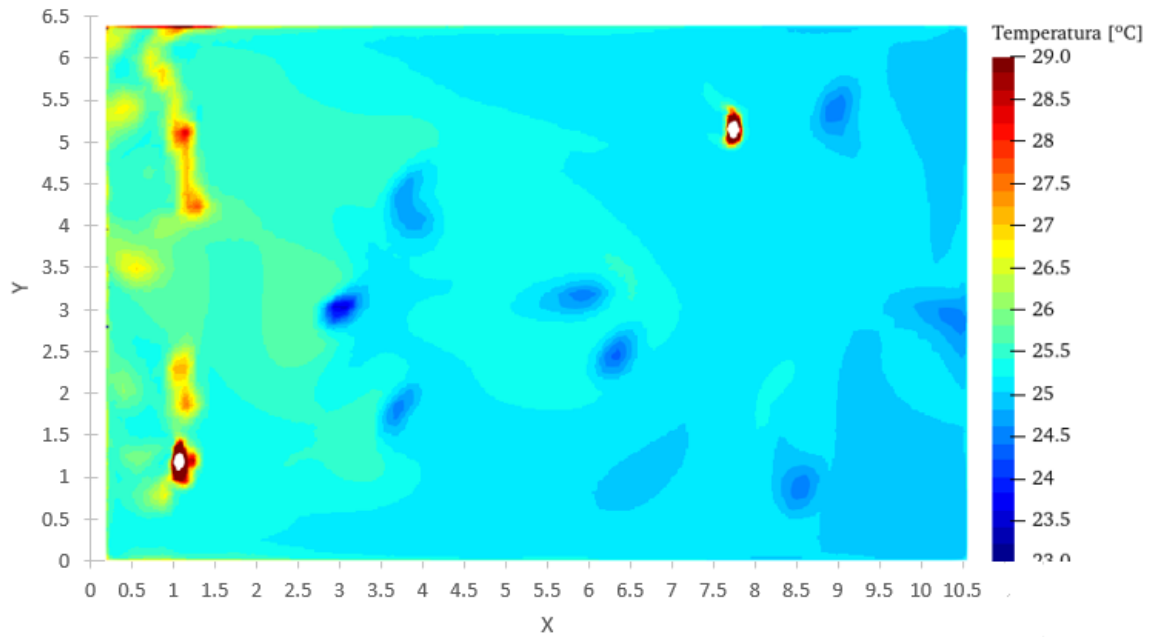


Figura 26 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-S

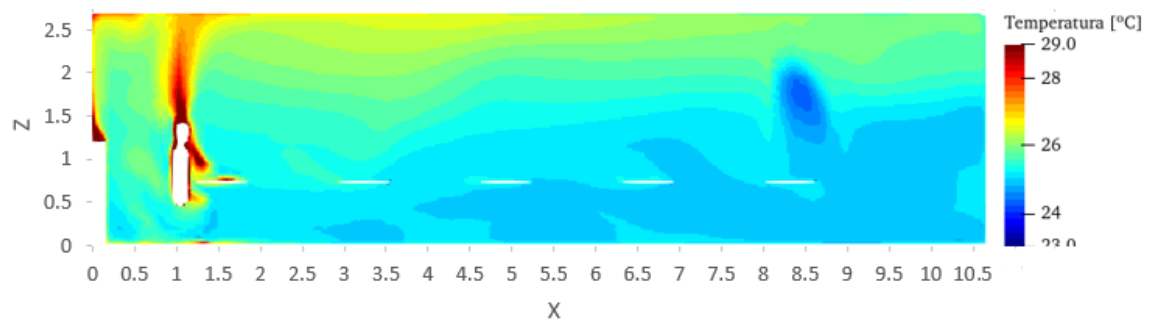


Figura 27 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-S

Resultante da combinação dos dados ambientais da simulação numérica obtém-se o valor do indicador de conforto térmico. Recorda-se que o ajuste efetuado ao PMV, de modo a considerar a presença de radiação solar direta, é através do ERF. As figuras 28 e 29 apresentam a previsão de conforto para as situações simuladas, respetivamente, para SCS e SR-S. Enquanto que na simulação SCS é alcançado conforto térmico, com valores de PMV dentro da gama objetivo, na simulação SR-S tal não se verifica. Na simulação SR-S, na região afetada pela radiação prevê-se que os ocupantes descrevam a sua condição como estando ligeiramente com calor ou com calor (ver figura 29 para coordenadas $x < 1,5$). Nesta simulação verifica-se que mais de metade das condições da sala não se encontram na gama de valores objetivo ($\pm 0,5$) identificadas como se alcançando conforto térmico no espaço. A maior carga térmica no espaço reflete-se nas condições ambientais simuladas, e que conseqüentemente afeta a previsão do conforto pelo PMV. Para contrariar a sensação térmica de calor dos ocupantes é necessário ajustar

as condições de insuflação, aumentando o consumo energético. Por outro lado, na simulação SCS, com sombreamento, prevê-se boas condições de conforto. Apenas nas zonas de insuflação de ar é que os ocupantes podem experimentar frio (p.e. região com coordenadas $x=6$ e $y=3$). As restantes zonas apresentam um valor de PMV adequado.

Comparando os dados das simulações, conclui-se que as necessidades energéticas de arrefecimento do espaço para uma situação com sombreamento, SCS, são insuficientes para se alcançar conforto térmico na presença de radiação solar direta como é o caso da simulação SR-S. A utilização de sombreamento conduz a melhores níveis de conforto para uma solução energeticamente mais económica. Samani et al. (2016) e Sghiouri et al. (2018) estudaram a utilização de sombreamento na prevenção da entrada de radiação solar direta pelas janelas do edifício, verificando melhorias no conforto térmico dos ocupantes. Estes estudos corroboram as conclusões obtidas numericamente.

As figuras 30 e 31 apresentam os dados do PPD para as simulações consideradas. Os dados do PPD evidenciam, na simulação SR-S, o desconforto dos ocupantes no espaço. Contrariamente ao que se verifica nas restantes simulações, até ao presente momento abordadas, o escoamento de ar de insuflação propicia melhores condições de conforto (p.e. localização de coordenadas $x=8,5$ e $y=0,5$). Tal poderá dever-se, entre outros, ao

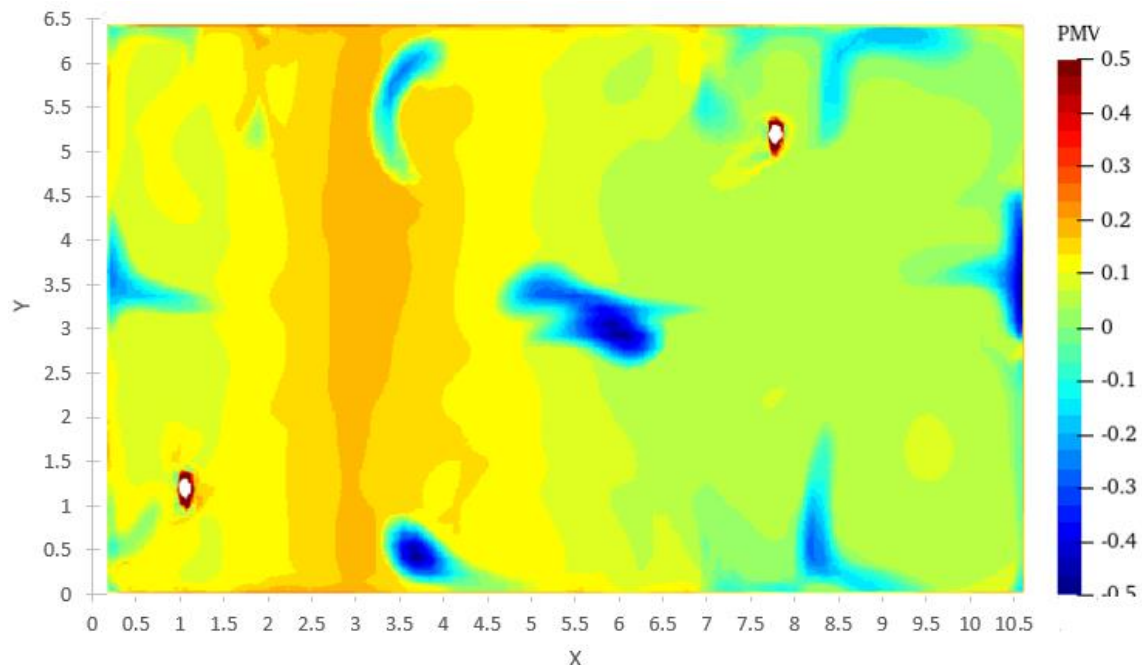


Figura 28 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo de conforto térmico – SCS

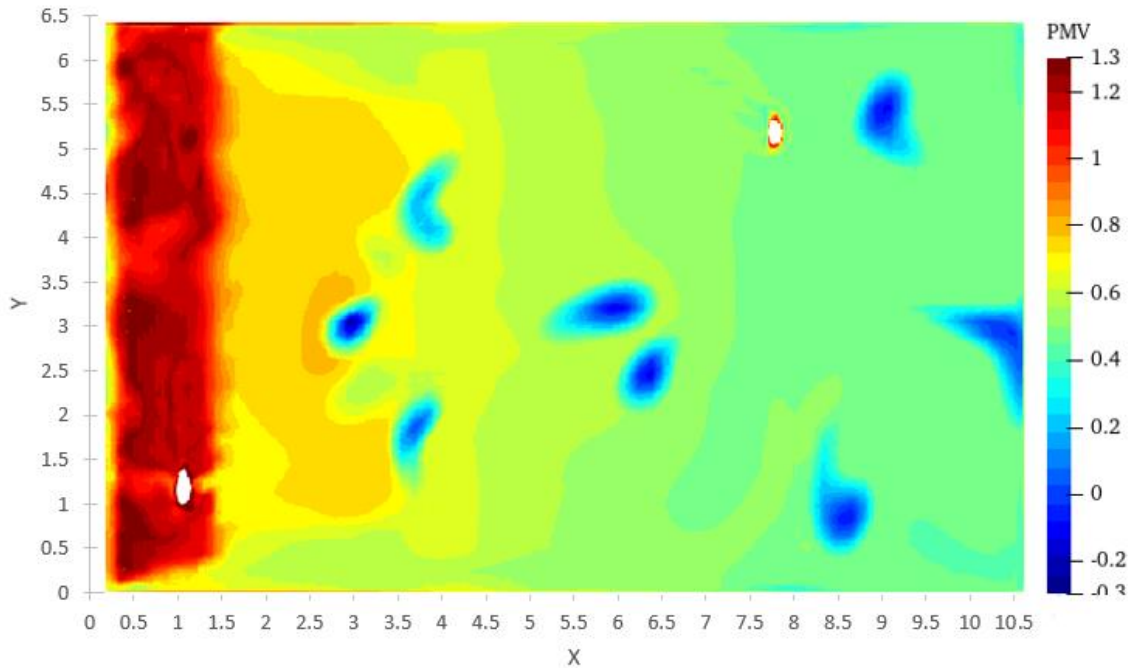


Figura 29 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico PMV-ERF – SR-S

contributo do escoamento de ar com uma velocidade superior e uma temperatura inferior de modo a remover a carga térmica da região aumentando a sensação de neutralidade térmica do ocupante. Observa-se que na zona exposta à radiação solar o desconforto experienciado pela média dos ocupantes é superior a 20% (os dados rondam o valor de 35%). O valor do PPD vai reduzindo gradualmente com o afastamento da zona afetada diretamente pela radiação solar direta. Além disso, os dados evidenciam que as condições geradas por esta solução não são promotoras de condições de conforto para a maioria dos ocupantes. Verifica-se um grande contraste com os dados de PPD para a simulação SCS. Nesta, a percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições ambientais do espaço é substancialmente menor, proporcionando aos ocupantes conforto térmico. Exemplo disso é a região de coordenadas $x=2,5$ e $y=5$ em que na simulação SCS prevê uma percentagem de pessoas desconfortáveis no valor de $\approx 5,5\%$ enquanto que na simulação SR-S os dados preveem uma percentagem de $\approx 15\%$.

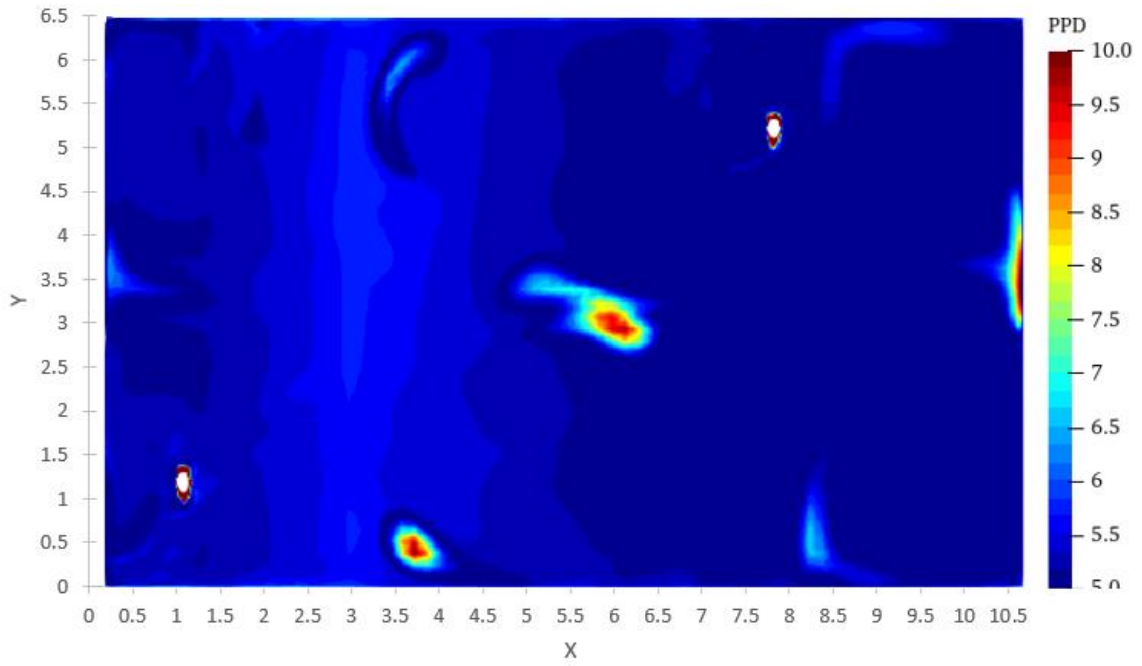


Figura 30 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico – SCS

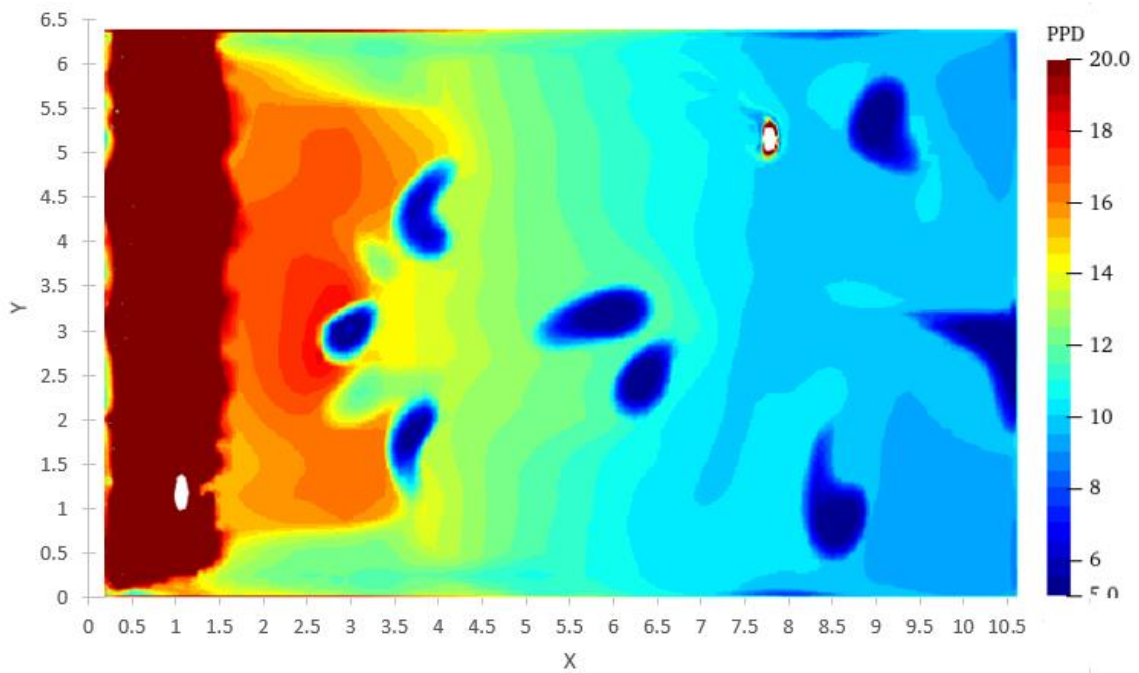


Figura 31 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico - PMV-ERF - SR-S

3.4.4 Caso 3 – Potência energética para condições ambientais de conforto sob exposição de radiação solar direta

No presente subcapítulo pretendem-se estudar duas soluções distintas e o seu custo energético. Assim, compara-se a simulação SCS, anteriormente apresentada, onde se obtêm boas condições de conforto com sombreamento, com a simulação SR-E. Para esta última adequar-se-ão as condições do sistema de climatização de forma a otimizar as condições de conforto na sala, para uma simulação com radiação solar direta. Tem-se por objetivo, adequar os parâmetros selecionados e indicados nas condições de fronteira, visando a obtenção de bons níveis de conforto na zona que não é afetada diretamente pela radiação solar. Uma vez que as condições de insuflação são diferentes nestas simulações, pretende-se identificar a diferença no custo energético da escolha de uma solução em vez de outra.

Importa, antes de se passar para a análise das potências energéticas, apresentar os campos simulados que resultam da adequação às condições de fronteira anteriormente apresentadas. É sobre isso que se discutirá nos próximos parágrafos deste texto.

Anteriormente identificou-se que a simulação com sombreamento, SCS, para as mesmas condições de insuflação que SR-S conduz a melhores níveis de conforto no espaço. Em seguida avalia-se o quanto esta simulação é energeticamente mais eficiente, em contraste com uma solução que permita a entrada de radiação solar direta, quando se adequam as condições de conforto também a este caso de estudo.

As figuras 32 e 33 apresentam o campo de velocidades para a simulação SR-E. Verifica-se um aumento da velocidade junto à parede da fachada identificável na figura 33 para a região de coordenadas $x=0,1$ e $y=2$, devido às trocas energéticas por convecção entre o ar e o vidro. Ainda, devido a trocas energéticas com o exterior da sala, na figura 32, p.e. na localização de coordenadas $x=1$ e $y=4,5$ observa-se o aumento da velocidade do escoamento devido ao ganho energético resultante da radiação solar direta promovendo o efeito de convecção. De modo a contrariar este ganho, as regiões afetadas diretamente pelo escoamento de ar impulsionado pelos equipamentos de climatização apresentam valores de velocidade superiores (p.e. na figura 32 para as coordenadas $x=3,5$ e $y=3$). Verifica-se ainda um escoamento ascendente junto aos ocupantes, visível na figura 33 na localização de $x=1,5$ e $z=2$.

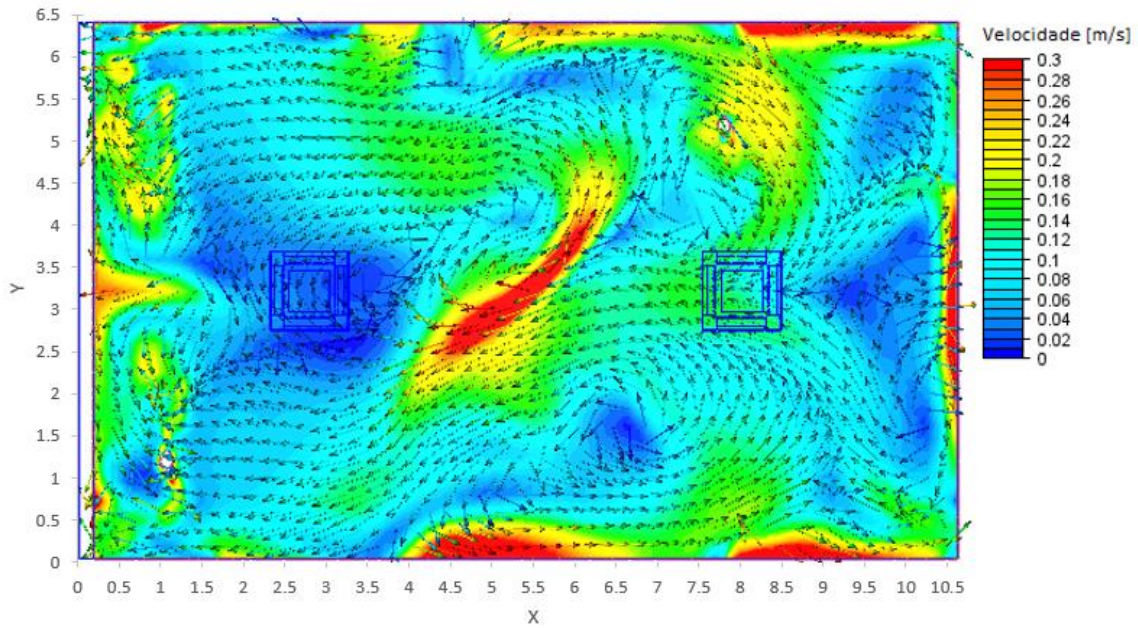


Figura 32 - Campo de vetores velocidade num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-E

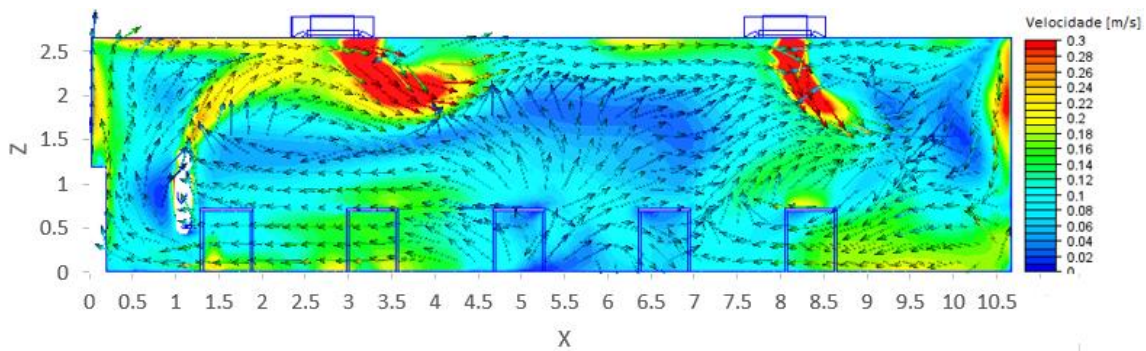


Figura 33 - Campo de vetores velocidade num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-E

As figuras 34 e 35 apresentam o campo de temperaturas para a simulação SR-E. Observa-se que a temperatura do ar é superior junto à parede da fachada (ver figura 34 para coordenadas de $x < 1$ e figura 35 na região de $x = 0,2$ e $y = 2$). Considerando os dados da velocidade com os da temperatura, verifica-se a formação de plumas na vizinhança dos ocupantes e em zonas próximas da janela (p.e, na figura 35, pluma do ocupante localizada em $x = 1,5$ e $y = 2$). Enquanto que as primeiras se devem ao aquecimento corporal humano devido ao metabolismo conjugado com a influência da radiação solar, as segundas devem-se ao aquecimento de superfícies próximas da janela pela radiação solar direta proveniente do sol. Comparando os valores da temperatura com a simulação SCS observa-se que maioritariamente a simulação SR-E apresenta valores inferiores (p.e. para a região de coordenadas de $x = 2,5$ e $y = 2,5$ a simulação SCS prevê uma temperatura de $\approx 23,5$ °C enquanto a simulação SC-E prevê uma temperatura de ≈ 23 °C). Apesar disso a

simulação SC-E apresentar regiões de pequena dimensão com temperaturas do ar superiores. Sabendo que as condições são escolhidas de modo a maximizar a neutralidade no valor do PMV, o fato de a temperatura ser inferior e maioritariamente verificar-se uma velocidade do escoamento superior em SR-R, manifesta o impacto que a radiação difusa tem no conforto do ocupante, uma vez que este parâmetro influencia o PMV no aumento da sensação térmica de calor. Identifica-se que os dados da temperatura, na simulação SCS, são mais homogêneos uma vez que, para além dos ocupantes, não existem ganhos térmicos localizados. Por outro lado, na simulação SC-E considera-se o ganho energético da radiação solar direta já identificada na figura 11. Ambas as simulações apresentam um aumento de temperatura do ar junto ao vão envidraçado devido às trocas energéticas que aí decorrem (ver figuras 25 e 35 para a região de coordenadas $x=0,1$ e $y=2$).

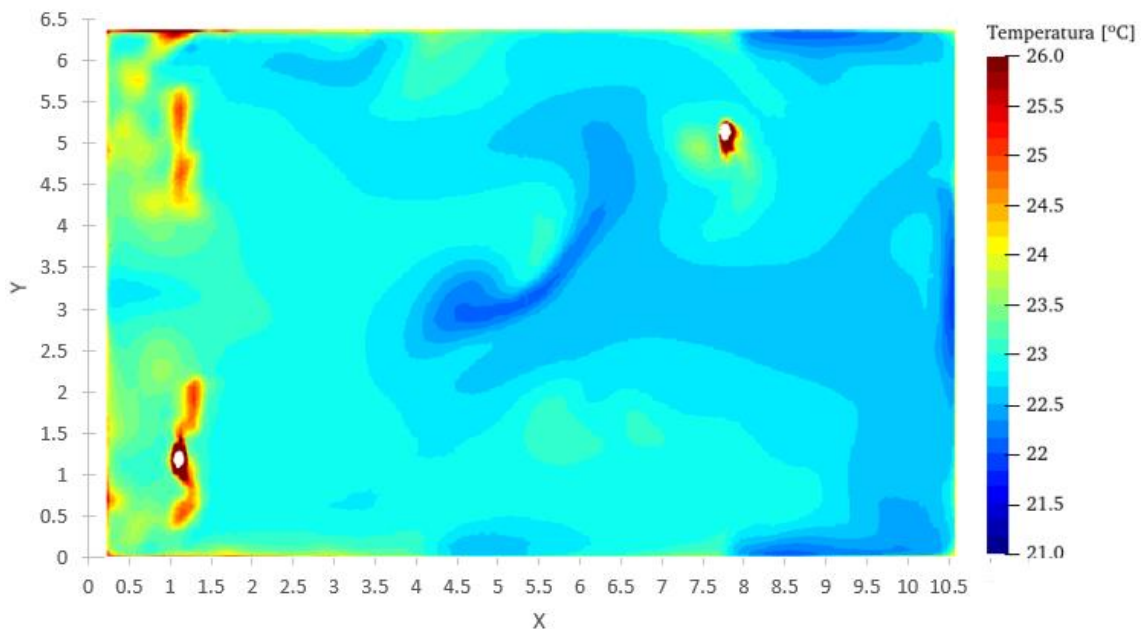


Figura 34 - Campo de temperaturas num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão - SR-E

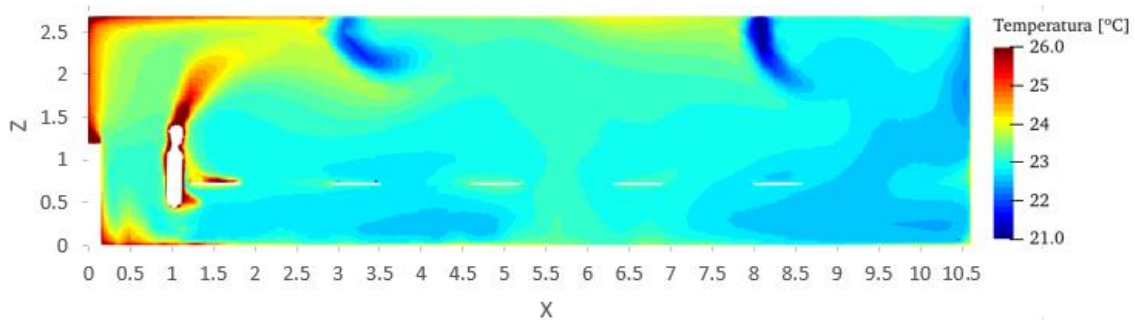


Figura 35 - Campo de temperaturas num plano vertical localizado a 1.17 m da parede mais próxima (A) - SR-E

Conclui-se que, apesar disso, devido à radiação solar direta, a simulação SR-E apresenta uma maior influência das trocas energéticas com o exterior da divisão.

A figura 36 apresenta os dados do PMV para a simulação SR-E. Observa-se que os ocupantes que se encontram na zona exposta à radiação solar direta irão experienciar desconforto térmico com sensação de ligeiro calor. Ao inferir os parâmetros no cálculo do PMV (eq. 1.3 e 1.10) e os ajustes neste, é expectável o apresentado. Isso deve-se ao aumento do fluxo radiativo, consubstanciado num incremento do valor de PMV que contabiliza esta contribuição energética através do cálculo do ERF. As condições ambientais são impostas de modo a maximizar conforto na zona central da sala, que não se encontra exposta ao impacto da radiação solar direta. Assim nas regiões do espaço em que esta se encontra presente, o valor da previsão da sensação térmica do ocupante irá refletir que este se encontra com ligeiro calor, região da sala caracterizada por $x < 1,5$. Verifica-se ainda uma região da sala que é indiretamente afetada pela entrada de radiação solar direta no interior da mesma, esta é identificada para coordenadas de x entre 1,5 e 3. Por outro lado, nas regiões afetadas diretamente pelo ar de insuflação e sem contribuição direta da radiação solar, prevê-se que os ocupantes experienciem desconforto associado ao frio (p.e. localização de coordenadas $x=5$ e $y=3$). Nas restantes regiões, o valor do PMV é próximo de 0, o que indica que os ocupantes que se encontrem nesses espaços sintam neutralidade térmica relativamente às condições ambientais.

Em ambas as simulações, as condições de insuflação foram selecionadas de modo a maximizar o conforto no espaço. Apesar disso, na simulação SR-E observa-se a impossibilidade de toda a área para ocupação humana apresentar condições ambientais para conforto térmico (PMV no $\pm 0,5$). No entanto, os dados da simulação SCS apresentam uma conformidade superior com o intervalo de PMV indicado.

Na figura 37 apresentam-se os dados do PPD da simulação SR-E. Os dados do PPD corroboram com os já apresentados pelo PMV. Verifica-se que a percentagem de pessoas descontentes com as condições do espaço é superior nas zonas afetadas pela radiação solar direta (p.e. região de coordenadas $x=1$ e $y=1,5$) e pelo ar de insuflação (p.e. região de coordenadas $x=5$ e $y=3$). Pelo já apresentado e comprovado pelos valores do PPD, a percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições do espaço é superior na simulação SR-E face à simulação SCS.

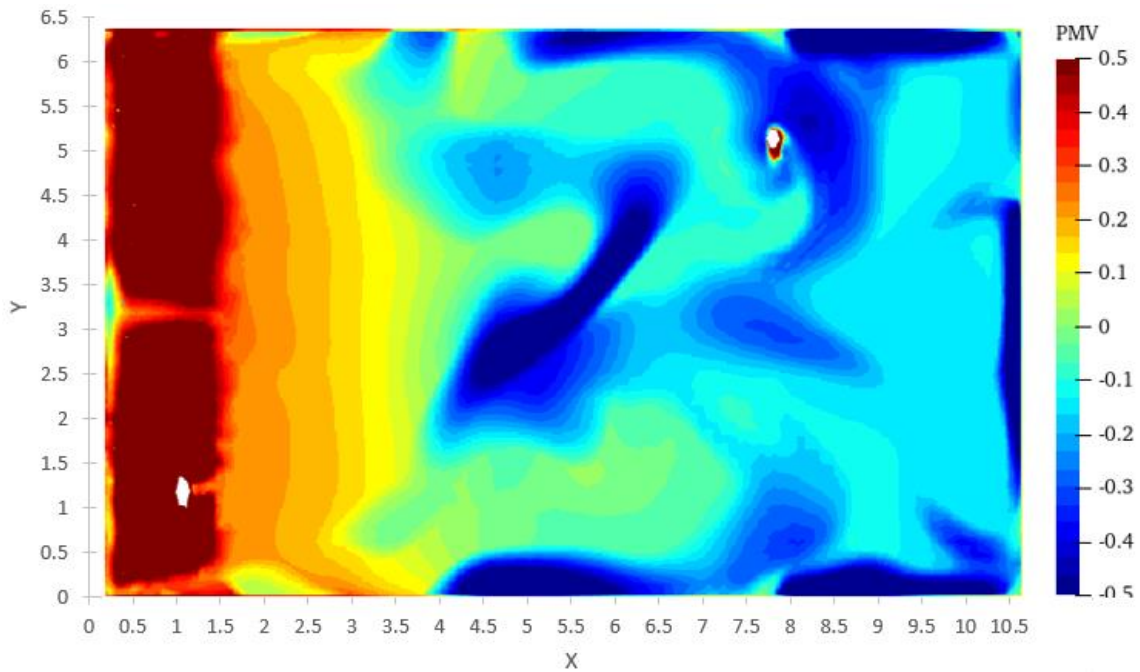


Figura 36 - Campo do índice de conforto PMV num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico PMV-ERF - SR-E

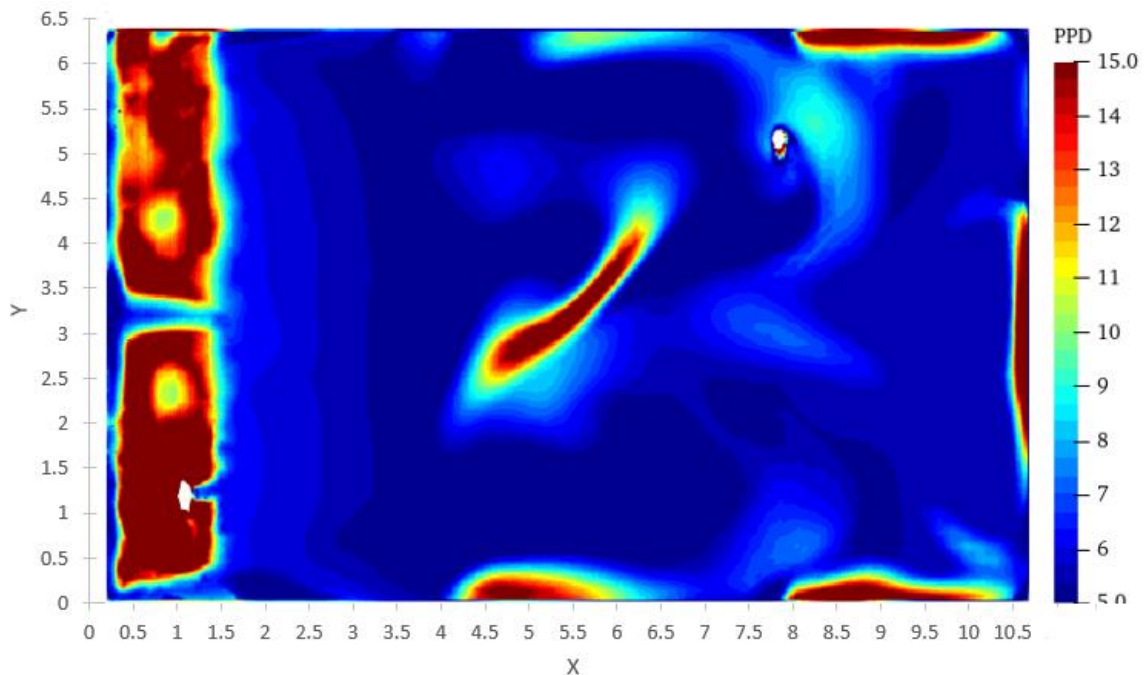


Figura 37 - Campo do índice de conforto PPD num plano horizontal localizado a 1.1 m do chão baseado no modelo conforto térmico - PMV-ERF - SR-E

Nós últimos anos tem-se verificado um aumento das sinergias associadas à procura e desenvolvimento de sistemas com melhor desempenho energético. Devido a este interesse na redução do consumo energético, elabora-se a presente comparação, refletindo a preocupação com esse tema. Ademais, tal interesse é refletido ao longo do presente

trabalho, ainda que de forma indireta. Devido ao consumo energético em edifícios e ao seu peso nos balanços energéticos nacionais, com forte contributo dos sistemas de climatização, é de basilar importância avaliar o impacto de algumas estratégias passivas de mitigação do consumo energético, das quais se destaca neste esforço de investigação o sombreamento.

Para mensurar a eficiência energética de cada simulação, considera-se as condições de insuflação e retorno do ar no equipamento de climatização do tipo cassete. Tendo em consideração o caudal mássico de ar que atravessa o equipamento pode-se quantificar a potência relacionada com a remoção do calor sensível pela seguinte equação (Vadoudi e Marinhas, 2018).

$$\dot{Q}_{\text{sensível}} = \dot{m}_{\text{ar}} (h_{\text{ar retorno}} - h_{\text{ar insuflação}}) \quad (3.7)$$

Em que $\dot{Q}_{\text{sensível}}$ é a potência de remoção do calor sensível do ar, \dot{m}_{ar} é o caudal mássico de ar e h é a entalpia específica do ar. Em seguida, na tabela 3, apresenta-se a potência necessária em cada um dos casos simulados na remoção do calor sensível do ar.

Tabela 3 - Consumo energético

Simulação	Potência sensível requerida [kW]
SR-E	2,21
SCS	0,73

Observam-se valores diferentes na potência necessária para se alcançar as condições ambientais de conforto no espaço simulado, quando se comparam os casos em estudo. Na simulação em que se considera a radiação solar, a potência requerida ao equipamento de climatização é manifestamente superior. Além dos benefícios ao nível do conforto térmico, associados ao sombreamento, já discutidos anteriormente, o seu impacto nos consumos energéticos também é evidente. De facto, do ponto de vista energético, existem benefícios na adoção de uma estratégia baseada no sombreamento exterior em detrimento de soluções que passem pela escolha de um vidro com características superiores. Naturalmente, a utilização de ambas as soluções, conduz a uma redução energética superior ao apresentado.

4 Conclusão

4.1 Síntese conclusiva

A preocupação direcionada para a eficiência energética tem aumentado ao longo dos passados anos. Esta advém das práticas humanas em que muitas vezes é necessário a utilização de energia. Consequentemente, para corresponder a estas exigências, recorre-se à produção de energia elétrica por fontes renováveis e não renováveis. Estas últimas resultam na libertação de poluentes atmosféricos que levam à existência de problemas de qualidade do ar e o aumento do efeito de estufa. Na União Europeia, ao longo do tempo, foram implementadas medidas energéticas por forma a reduzir o impacto negativo da poluição para o ambiente e melhorar a segurança no aprovisionamento de energia. Seguindo as diretivas Europeias, em Portugal são implementadas medidas com vista os objetivos Europeus.

Considerando a temática energética nos edifícios, a operação dos sistemas de climatização e/ou ventilação pode corresponder a uma grande parcela energética do consumo. O impacto da radiação solar, além de aumentar as exigências energéticas, afeta o conforto dos ocupantes de uma divisão. Sabendo que o controlo das condições ambientais é realizado pelo sistema de climatização e/ou ventilação, é este que terá de compensar o impacto da radiação solar, de modo a proporcionar conforto aos ocupantes.

O estudo das condições ambientais de um espaço para ocupação pode ser realizado recorrendo a diversas metodologias. Uma destas é pela aquisição de dados por métodos experimentais. No entanto, esta abordagem, revela-se muitas vezes morosa e requer a utilização de instrumentos específicos que podem não estar disponíveis. Uma alternativa a esta, consiste na aplicação de ferramentas numéricas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que permitem prever, por meio de procedimentos numéricos, o valor do conforto térmico. Este estudo revela a sua importância e destaque quando se tem em mente a quantidade de horas que as pessoas passam no interior de espaços confinados, em que na sua maioria as condições ambientais são controladas artificialmente.

A radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre pode sofrer significativas mudanças. Estas advêm de efeitos de absorção e dispersão. A radiação proveniente do sol, que é redirecionada por efeitos de dispersão é denominada de radiação difusa. Por

outro lado, a radiação direta atravessa a atmosfera sem ser absorvida nem sofrer efeitos de dispersão.

De modo a quantificar o conforto térmico de um espaço utiliza-se, dentro de outras abordagens, o índice PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). No entanto, no estudo base onde estes índices de conforto foram introduzidos, a radiação solar direta não era contabilizada, deixando uma lacuna importante na previsão das condições de conforto em espaços onde este fenómeno fosse prevalente. Por esta razão, mais tarde, de entre outros, os modelos PMV-ERF e PMV-RAD foram introduzidos e a sua adequabilidade comprovada em casos reais. Uma vez que o estudo aborda a temática da radiação solar e os indicadores originais mencionados não levam em consideração tal parâmetro, é necessário recorrer aos últimos para se obter uma correta predição das condições no interior do espaço.

Neste trabalho final de mestrado foi proposto o estudo do impacte que a radiação solar direta exhibe no nível de conforto térmico no interior de uma sala de aula e as repercussões que este tem na potência energética do sistema de climatização. Como comprovado na revisão bibliográfica, a confiabilidade de utilização de metodologias de CFD para casos-estudo como o presente, na obtenção das condições ambientais do espaço, já foi comprovada. Para isso, aplica-se o *software* de simulação Autodesk CFD que incorpora a resolução do par pressão-velocidade num escoamento incompressível pela metodologia SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linkage Equations*). A turbulência do escoamento é simulada recorrendo a um modelo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), especificamente RNG k- ϵ . O modelo de transmissão de calor por radiação utilizado é o *surface-to-surface* que considera o meio não participativo.

Para a realização do estudo é importante e fundamental definir-se o objeto da sua aplicação. Deste modo, a divisão utilizada é a sala M2.13 do departamento de Engenharia do ISEL, em que as dimensões são de 10,41 metros de comprimento, 6,44 metros de largura e 2,7 metros de altura ao teto falso. Nesta, na parede que incorpora a fachada do edifício encontra-se presente um vão envidraçado de 6,44 metros de largura e 1,5 metros de altura com 10 milímetros de espessura. Para a simulação, este representa o conjunto vidro e caixilharia. No interior da sala encontram-se secretárias e dois ocupantes.

A aplicação das ferramentas mencionadas e da geometria apresentada rege-se a três casos-estudos que foram desenvolvidos e discutidos. O primeiro caso-estudo consiste em comparar, para a mesma simulação numérica (SR-I), a previsão de conforto térmico pelos

índices que ajustam o valor do PMV, a saber o PMV-RAD e o PMV-ERF. O segundo caso-estudo pretende verificar o impacto que a radiação solar direta tem no conforto térmico dos ocupantes numa divisão. Para isso compara uma simulação em que existe a presença de radiação solar direta no interior da divisão (SR-S) e outra, que devido a sombreamento, encontra-se isenta desta influência solar (SCS). No entanto, de modo a averiguar o impacto da radiação solar direta as condições proporcionadas pelo sistema de climatização são otimizadas para a situação com sombreamento. Por último, o terceiro caso-estudo, aborda o estudo de duas soluções e a potência energética requerida em ambas pelo sistema de climatização. Utiliza-se a simulação com sombreamento apresentada no caso-estudo 2 (SCS), comparando-a a uma simulação com radiação solar direta (SR-E) em que o sistema de climatização é otimizado de modo a que se preveja que os ocupantes da divisão se encontram o mais agradados possível com as condições ambientais do espaço.

Devido às simulações estarem diretamente relacionadas com a presença ou ausência da radiação solar, as características do vão envidraçado são deveras importantes. Assim nas simulações com sombreamento o fator solar do vidro é de 0,7 enquanto nas restantes é de 0,2. A escolha do dia para o estudo, utilizando assim os seus dados meteorológicos consiste na escolha do dia mais quente de 2019 pela estação meteorologia do Instituto Superior Técnico, sendo este o dia 11 de Julho. As trocas energéticas que decorrem na superfície da fachada do edifício são definidas, pelo coeficiente de convecção devido ao escoamento do ar (parede - 26,32 W/m²; Vidro – 24,00 W/m²) e de forma complementar na superfície do vidro, ainda pelo ganho energético da radiação difusa (vidro com fator solar de: 0,7 – 28,35 W/m²; 0,2 – 16,88 W/m²). A radiação solar direta é englobada no estudo pelo *software* de simulação. Relativamente ao equipamento de climatização, resume-se o seu caudal e temperatura de insuflação: Simulação SR-I, uma temperatura de 17,5 °C e um caudal de ar de 800 m³/h por equipamento; as simulações SR-S e SCS, uma temperatura de 21 °C com um caudal de 400 m³/h por equipamento; a simulação SR-E, uma temperatura de 19 °C com um caudal de 800 m³/h por equipamento.

Para o estudo é imprescindível conhecerem-se informações relativamente aos ocupantes da divisão, uma vez que estes são parâmetros no cálculo do PMV. Deste modo, os ocupantes apresentam um metabolismo de 1,2 met e uma resistência térmica de vestuário de 0,6 clo. Nas simulações realizadas pretende-se prever o conforto térmico dos ocupantes, deste modo um PMV no intervalo $\pm 0,5$ é identificado como sendo o objetivo.

No primeiro caso-estudo verifica-se, a partir dos dados, que a previsão do conforto pelo indicador PMV-ERF se encontra de acordo com o objetivo estipulado. Por outro lado, o indicador PMV-RAD ultrapassa ligeiramente o valor de PMV de 0,5. Assim conclui-se que este último, ao prever o nível de conforto térmico indica que o ocupante se encontra a expressar uma sensação térmica de maior calor que o PMV-ERF. No entanto, ambos os indicadores apresentam uma boa conformidade na previsão de conforto térmico sob exposição de radiação solar direta. Devido à necessidade de remoção de carga térmica do espaço, as zonas da sala que não são afetadas diretamente pela radiação solar direta, o ar com uma velocidade superior e uma temperatura inferior, potencia uma sensação térmica de ligeiro frio ($PMV < -0,4$). Contrariamente, os ocupantes que se encontram expostos a radiação solar direta são propensos a definirem o seu conforto térmico como se encontrando com ligeiro calor ($PMV > 0,45$).

No segundo caso-estudo identifica-se o impacto da radiação solar direta. Por um lado, a simulação SCS apresenta bons níveis de conforto, por outro, na simulação SR-C o mesmo já não se verifica (PMV no intervalo de $\pm 0,5$). Na região da sala afetada diretamente pela radiação solar direta prevê-se que os ocupantes se expressem como estando com ligeiro calor ou até mesmo com calor ($1 < PMV < 1,3$). Observa-se ainda que a gama objetivo para o PMV não é alcançada na grande maioria do espaço. Consequentemente, conclui-se que as condições preconizadas para o escoamento de insuflação, para o caso com sombreamento, são insuficientes na promoção de condições de conforto térmico quando a radiação solar direta é considerada. Isso evidencia o impacto negativo que a radiação solar direta tem no ocupante de uma divisão.

No terceiro caso-estudo, pela potência necessária dos equipamentos de climatização, identifica-se que a solução com sombreamento é energeticamente melhor, visto que necessita de 0,73 kW em contraste com 2,21 kW na simulação SR-E. Além disso, verifica-se que a simulação com sombreamento também resulta numa previsão de valores de PMV mais adequados para conforto térmico (valores de PMV mais próximos de 0). Apesar de em ambas as simulações as condições de insuflação de ar pelos equipamentos de climatização serem escolhidas de modo a maximizar o conforto, na simulação SR-E observa-se a impossibilidade de se preverem bons valores de conforto térmico em todo o espaço ($PMV \pm 0,5$).

Em síntese, verifica-se o impacto negativo da radiação solar direta no conforto dos ocupantes. De modo a manterem-se níveis de conforto adequado é necessário aumentar o

consumo energético por parte do sistema de climatização. Na simulação com sombreamento o impacto da radiação solar direta é eliminado, alcançando-se resultados melhores no conforto experienciado pelos ocupantes e reduções energéticas.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o desenvolvimento do trabalho e o aprofundar do tema surgiram dúvidas que necessitam de ser estudadas individualmente, parte destas como continuação do estudo em questão.

O estudo apresentado neste trabalho final de mestrado foca-se no impacto que a radiação solar apresenta no conforto térmico na estação do ano de verão. Deste modo, surge a necessidade de mensurar a influência deste parâmetro no inverno. É sabido que a presença de radiação solar no inverno tem o potencial de reduzir o consumo energético do sistema de climatização. Como se relaciona esta redução energética com os níveis de conforto que são proporcionados? Será que são compatíveis?

Ao longo do dia as condições atmosféricas encontram-se em constante variação, quer a temperatura, a velocidade do ar, a posição e o fluxo energético proveniente do sol, entre outros. A simulação em questão, apenas considera as condições num momento do tempo. Uma vez que o sistema de climatização tem a função de garantir conforto térmico, como poderá ser este ajustado para os diferentes níveis de radiação solar decorrentes ao longo do dia? Ou até mesmo, condições atmosféricas diferentes?

No estudo realizado, apesar de na divisão existirem duas cassetes, a sua temperatura e caudal de insuflação foram mantidos iguais. Será que o ajuste independente destes poderá conduzir a melhorias de conforto quando existe a presença de radiação solar direta? A utilização de técnicas de climatização e ventilação distintas têm o potencial de apresentar resultados melhores?

Do ponto de vista do autor, ainda existem diversos trabalhos a serem realizados na presente temática. Associado às ferramentas computacionais de CFD, deveria equacionar-se a incorporação e desenvolvimento de recursos que possam ajudar e reduzir o custo temporal necessário ao estudo do conforto térmico. Neste âmbito é ainda sugerido a inclusão do componente solar no cálculo do conforto térmico embutido no *software* de simulação.

Referências

- Adamsab, K. (2020). CFD investigation of unsteady aerodynamics in gas turbine engine blade surface. *Materials Today: Proceedings*.
- Aganovic, A., Steffensen, M., & Kilic, G. (2019). CFD study of the air distribution and occupant draught sensation in a patient ward equipped with protected zone ventilation. *Building and Environment*, *162*, 106279. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106279>
- Ahmed, A., Khalid, C., Ahmed, E., & Mohsin, G. (2017). Impact of solar radiation on building envelope using energyplus software. 7th International Mechanical Engineering Congress, Karachi, Paquistão, 24-25.
- Akimoto, T., Tanabe, S.-, Yanai, T., & Sasaki, M. (2010). Thermal comfort and productivity - Evaluation of workplace environment in a task conditioned office. *Building and Environment*, *45*(1), 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.022>
- ASHRAE (2001). ASHRAE Fundamentals Handbook. Atlanta.
- Anderson, J. D. (1995). Computational Fluid Dynamics. McGraw-Hill.
- Ang, C. N., & Wang, Y. C. (2009). Effect of moisture transfer on specific heat of gypsum plasterboard at high temperatures. *Construction and Building Materials*, *23*(2), 675–686. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.016>
- ANSYS Inc. (2020, Julho 28) Ansys Fluent: Fluid Simulation Software. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Antoun, S., Ghaddar, N., & Ghali, K. (2016). Coaxial personalized ventilation system and window performance for human thermal comfort in asymmetrical environment. *Energy and Buildings*, *111*, 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.030>

- Arens, E., Hoyt, T., Zhou, X., Huang, L., Zhang, H., & Schiavon, S. (2015). Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors. *Building and Environment*, 88, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.004>
- Artemov, V., Beale, S. B., de Vahl Davis, G., Escudier, M. P., Fueyo, N., Launder, B. E., Leonardi, E., Malin, M. R., Minkowycz, W. J., Patankar, S. V., Pollard, A., Rodi, W., Runchal, A., & Vanka, S. P. (2009). A tribute to D.B. Spalding and his contributions in science and engineering. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(17–18), 3884–3905. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.038>
- ASRHAE (2017), Standard 55: 2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, Atlanta.
- Autodesk CFD Help 2019 (2020, Novembro, 10). <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/>
- Bell, W. (1995). The estimation of body density in rugby union football players. *British Journal of Sports Medicine*, 29(1), 46–51. <https://doi.org/10.1136/bjism.29.1.46>
- Berni, F., & Fontanesi, S. (2020). A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on in-cylinder simulations. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115320. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115320>
- Berrizbeitia, S. E., Jadraque Gago, E., & Muneer, T. (2020). Empirical Models for the Estimation of Solar Sky-Diffuse Radiation. A Review and Experimental Analysis. *Energies*, 13(3), 701. <https://doi.org/10.3390/en13030701>
- Bredberg, J. (2000). On the wall boundary condition for turbulence models. Department of thermo and fluid dynamics Chalmers University of Technology. Internal Report 00/4.
- Buratti, C., Palladino, D., & Moretti, E. (2017). Prediction Of Indoor Conditions And Thermal Comfort Using CFD Simulations: A Case Study Based On Experimental Data. *Energy Procedia*, 126, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.130>

- Cao, S. J., & Meyers, J. (2013). Influence of turbulent boundary conditions on RANS simulations of pollutant dispersion in mechanically ventilated enclosures with transitional slot Reynolds number. *Building and Environment*, 59, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.004>
- Catalina, T., Virgone, J., & Kuznik, F. (2009). Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling. *Building and Environment*, 44(8), 1740–1750. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.015>
- Chibber, S., Goyal, C., & Chauhan, T. (2020). Similar nozzle critical configuration and flow measurement using CFD analysis. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.046>
- Conselho da União Europeia 11052/12 de 7 de Junho. Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comité económico e social europeu e ao comité das regiões. Secretário-Geral da comissão europeia.
- Dear, R. (2004). Thermal comfort in practice. *Indoor Air*, 14, 32–39. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00270.x>
- Diretiva Europeia 2001/77/CE de 27 de Setembro. Jornal Oficial das Comunidades Europeias 27.10.2001. Parlamento Europeu e do Conselho.
- Diretiva Europeia 2018/2001 de 11 de Dezembro. Jornal Oficial das Comunidades Europeias 21.12.2018. Parlamento Europeu e do Conselho.
- Efros, V. (2006). Large eddy simulation of channel flow using. [Thesis for degree of Master of Science]. Division of fluid dynamics, Chalmers University of Technology.
- Energia*. (2019, Dezembro 4). Agência Europeia do Ambiente. <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/energy/intro>
- Evans, M., & Harlow, F. (1957). The Particle-In-Cell Method For Hydrodynamic Calculations (LA-2139). Los Alamos Scientific Laboratory.

- Faber, P., & Garby, L. (1995). Fat content affects heat capacity: a study in mice. *Acta Physiologica Scandinavica*, 153(2), 185–187. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1995.tb09850.x>
- Fanger, P. O. (1972), Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill.
- Fanger, P. O. (1977), Thermal comfort in indoor environments, *Nat. Bur. Stand. (U.S.), Publ. 491*, 3-17.
- Fanger, P. O., Ipson, B. M., Langkilde, G., Olessen, B. W., Christensen, N. K., & Tanabe, S. (1985). Comfort limits for asymmetric thermal radiation. *Energy and Buildings*, 8(3), 225–236. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(85\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0378-7788(85)90006-4)
- Fanger, P. O., Melikov, A. K., Hanzawa, H., & Ring, J. (1988). Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12(1), 21–39. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90053-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90053-9)
- Feng, W., Zou, L., Gao, G., Wu, G., Shen, J., & Li, W. (2016). Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.029>
- Fernandes, J., Pimenta, C., Mateus, R., Silva, S., & Bragança, L. (2015). Contribution of Portuguese Vernacular Building Strategies to Indoor Thermal Comfort and Occupants' Perception. *Buildings*, 5(4), 1242–1264. <https://doi.org/10.3390/buildings5041242>
- Ferziger, J. H., Peric, M. (2002). Computational methods for fluid dynamics. Springer.
- Freitas, V. P. (2005). Manual de boas práticas de escolha de vãos envidraçados. Departamento de engenharia civil da faculdade de engenharia da universidade do Porto.
- Fukada, K., Sakai, K., Ono, H. (2015). Study on modeling method in modularizing HVAC elements for CFD software. 14th Conference of international building performance simulation association. Hyderabad, India.

- Gan, V. J. L., Deng, M., Tan, Y., Chen, W., & Cheng, J. C. P. (2019). BIM-based framework to analyze the effect of natural ventilation on thermal comfort and energy performance in buildings. *Energy Procedia*, *158*, 3319–3324. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.971>
- Gao, N. P., & Niu, J. L. (2005). CFD Study of the Thermal Environment around a Human Body: A Review. *Indoor and Built Environment*, *14*(1), 5–16. <https://doi.org/10.1177/1420326x05050132>
- Gentry, R. A., Martin, R. E., & Daly, B. J. (1966). An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems. *Journal of Computational Physics*, *1*(1), 87–118. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(66\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0021-9991(66)90014-3)
- Harlow, F. H. (2004). Fluid dynamics in Group T-3 Los Alamos National Laboratory. *Journal of Computational Physics*, *195*(2), 414–433. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2003.09.031>
- Harlow, F. H., & Welch, J. E. (1965). Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface. *Physics of Fluids*, *8*(12), 2182–2189. <https://doi.org/10.1063/1.1761178>
- Heracleous, C., & Michael, A. (2019). Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. *Journal of Building Engineering*, *26*, 100917. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100917>
- Hess, J. L., & Smith, A. M. O. (1967). Calculation of potential flow about arbitrary bodies. *Progress in Aerospace Sciences*, *8*, 1–138. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(67\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(67)90003-6)
- Heymsfield, S. B., Wang, J., Kehayias, J., Heshka, S., Lichtman, S., & Pierson, R. N. (1989). Chemical determination of human body density in vivo: relevance to hydrodensitometry. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *50*(6), 1282–1289. <https://doi.org/10.1093/ajcn/50.6.1282>

- Hodder, S. G., & Parsons, K. (2006). The effects of solar radiation on thermal comfort. *International Journal of Biometeorology*, 51(3), 233–250. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0050-y>
- Holman, J. P. (2002). Heat transfer (9th ed.). McGraw-Hill.
- Hoof, J. (2008). Forty years of Fanger's model of thermal comfort: comfort for all? *Indoor Air*, 18(3), 182–201. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x>
- Hwang, R.-L., & Shu, S.-Y. (2011). Building envelope regulations on thermal comfort in glass facade buildings and energy-saving potential for PMV-based comfort control. *Building and Environment*, 46(4), 824–834. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.009>
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer (6th ed.). Wiley.
- Information Technologies in Society, IT'IS (2020, Maio, 27). Thermal Conductivity. <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/thermal-conductivity/>
- ISO (2005). Standard 7730: 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. International Organization for Standardization.
- Jayamaha, S. E. G., Wijeyesundera, N. E., & Chou, S. K. (1996). Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Building and Environment*, 31(5), 399–407. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(96\)00014-5](https://doi.org/10.1016/0360-1323(96)00014-5)
- Jin, H., Liu, S., & Kang, J. (2019). Thermal comfort range and influence factor of urban pedestrian streets in severe cold regions. *Energy and Buildings*, 198, 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.054>
- Jones, P. J., & Whittle, G. E. (1992). Computational fluid dynamics for building air flow prediction—current status and capabilities. *Building and Environment*, 27(3), 321–338. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90033-1)

- Kalitzin, G., Medic, G., Iaccarino, G., & Durbin, P. (2005). Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. *Journal of Computational Physics*, *204*(1), 265–291. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2004.10.018>
- Kilic, M., & Sevilgen, G. (2008). Modelling airflow, heat transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *35*(9), 1159–1164. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.05.006>
- La Gennusa, M., Nucara, A., Pietrafesa, M., & Rizzo, G. (2007). A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort. *Solar Energy*, *81*(5), 594–606. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.09.005>
- Lampret, Ž., Krese, G., Butala, V., & Prek, M. ž. (2018). Impact of airflow temperature fluctuations on the perception of draught. *Energy and Buildings*, *179*, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.014>
- Launder, B. E., Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics And Engineering*, *3*, 269-289
- Li, X., Inthavong, K., Ge, Q., & Tu, J. (2013). Numerical investigation of particle transport and inhalation using standing thermal manikins. *Building and Environment*, *60*, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.014>
- Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M. (2015). Mapping of the indoor comfort conditions considering the effect of solar radiation. *Solar Energy*, *113*, 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.020>
- Martins, F., Felgueiras, C., & Smitková, M. (2018). Fossil fuel energy consumption in European countries. *Energy Procedia*, *153*, 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.050>
- Menchaca-Brandan, M. A., Dominguez Espinosa, F. A., & Glicksman, L. R. (2017). The influence of radiation heat transfer on the prediction of air flows in rooms under natural ventilation. *Energy and Buildings*, *138*, 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.037>

- Mendonça, P. (2005). Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados. (Tese de doutoramento). Universidade do Minho. <http://hdl.handle.net/1822/4250>
- Mirsadeghi, M., Cóstola, D., Blocken, B., & Hensen, J. L. M. (2013). Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. *Applied Thermal Engineering*, 56(1–2), 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.003>
- Mohelnikova, J., Altan, H. (2009). Evaluation of optical and thermal properties of window glazing. *WEAS Transactions on environment and development*, 5(1), 86–93.
- Möhlenkamp, M., Schmidt, M., Wesseling, M., Wick, A., Gores, I., & Müller, D. (2018). Thermal comfort in environments with different vertical air temperature gradients. *Indoor Air*, 29(1), 101–111. <https://doi.org/10.1111/ina.12512>
- Moon, J. H., Lee, J. W., Jeong, C. H., & Lee, S. H. (2016). Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *International Journal of Thermal Sciences*, 107, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013>
- Morris, P. D., Narracott, A., von Tengg-Kobligk, H., Silva Soto, D. A., Hsiao, S., Lungu, A., Evans, P., Bressloff, N. W., Lawford, P. V., Hose, D. R., & Gunn, J. P. (2015). Computational fluid dynamics modelling in cardiovascular medicine. *Heart*, 102(1), 18–28. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2015-308044>
- Moser, R. D., Kim, J., & Mansour, N. N. (1999). Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re\tau=590$. *Physics of Fluids*, 11(4), 943–945. <https://doi.org/10.1063/1.869966>
- Nagano, Y., & Itazu, Y. (1997). Renormalization group theory for turbulence: Assessment of the Yakhot-Orszag-Smith theory. *Fluid Dynamics Research*, 20(1–6), 157–172. [https://doi.org/10.1016/s0169-5983\(96\)00045-7](https://doi.org/10.1016/s0169-5983(96)00045-7)

- Najafi, N. Z., & Haghghi, A. P. (2019). Anticipating an efficient relative humidity in a room under direct solar radiation and equipped by radiant cooling panel system. *International Journal of Refrigeration*, 98, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.10.018>
- Neto, E. W., Da Costa, E., & A. Maia, M. (2006). Influence of Emissivity and Distance in High Voltage Equipments Thermal Imaging. *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*, 1–4. Latin America, Venezuela. <https://doi.org/10.1109/tdcla.2006.311553>
- Ngarambe, J., Yun, G. Y., & Kim, G. (2019). Prediction of indoor clothing insulation levels: A deep learning approach. *Energy and Buildings*, 202, 109402. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109402>
- Nguyen, J. L., Schwartz, J., & Dockery, D. W. (2013). The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity. *Indoor Air*, 24(1), 103–112. <https://doi.org/10.1111/ina.12052>
- Nielsen, P. V. (1974). Flow in air conditioned rooms: Model experiments and numerical solution of the flow equations. (PhD thesis). Technical University of Denmark.
- Nielsen, P. V., Restivo, A., & Whitelaw, J. H. (1979). Buoyancy-affected flows in ventilated rooms. *Numerical Heat Transfer*, 2(1), 115–127. <https://doi.org/10.1080/10407787908913402>
- Noh, K.-C., Han, C.-W., & Oh, M.-D. (2008). Effect of the airflow rate of a ceiling type air-conditioner on ventilation effectiveness in a lecture room. *International Journal of Refrigeration*, 31(2), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.07.005>
- Noh, K.-C., Jang, J.-S., & Oh, M.-D. (2007). Thermal comfort and indoor air quality in the lecture room with 4-way cassette air-conditioner and mixing ventilation system. *Building and Environment*, 42(2), 689–698. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.033>

- Olesen, B. W., Moreno-Beltrón, L., Grau-Rios, M., Tähti, E., Niemelä, R., Olander, L., & Haström, K. (2001). Target Levels. *Industrial Ventilation Design Guidebook*, 355–413. <https://doi.org/10.1016/b978-012289676-7/50009-6>
- Orgill, J. F., & Hollands, K. G. T. (1977). Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 19(4), 357–359. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(77\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0038-092x(77)90006-8)
- Özdamar, M., Umarogullari, F. (2018). Thermal comfort and indoor air quality. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 5(3), 90-108.
- Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(10), 1787–1806. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(72\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(72)90054-3)
- Portugal Energia (2021). Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030. <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/>
- Qingyan, C. & Kooi, J. (1988). ACCURACY - A program for combined problems of energy analysis, indoor airflow and air quality, *ASHRAE Transactions*, 94, 216-194.
- Raczkowski, A., Suchorab, Z., & Brzyski, P. ł. (2019). Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room. *MATEC Web of Conferences*, 252, 04007. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925204007>
- Raman, R. K., Dewang, Y., & Raghuwanshi, J. (2018). A review on applications of computational fluid dynamics. *Internal Journal of LNCT*, 2(6), 137-143.
- Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (2006). Decreto-lei nº79/2006. *Diário da República*, 67, 2416-2468.
- Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (2006). Decreto lei nº80/2006. *Diário da República*, 67, 2468-2513.
- Rousselot M. (2018), Energy Efficiency Trends in Buildings, Odyssee-Mure, Policy brief

- Ruiz, J., Kaiser, A. S., Zamora, B., Cutillas, C. G., & Lucas, M. (2016). CFD analysis of drift eliminators using RANS and LES turbulent models. *Applied Thermal Engineering*, *105*, 979–987. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.108>
- Saeki, K., Obayashi, K., Iwamoto, J., Tone, N., Okamoto, N., Tomioka, K., & Kurumatani, N. (2014). The relationship between indoor, outdoor and ambient temperatures and morning BP surges from inter-seasonally repeated measurements. *Journal of Human Hypertension*, *28*(8), 482–488. <https://doi.org/10.1038/jhh.2014.4>
- Samani, P., Leal, V., Mendes, A., & Correia, N. (2016). Comparison of passive cooling techniques in improving thermal comfort of occupants of a pre-fabricated building. *Energy and Buildings*, *120*, 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.055>
- Sanchez-Marin, F. J., Calixto-Carrera, S., & Villaseñor-Mora, C. (2009). Novel approach to assess the emissivity of the human skin. *Journal of Biomedical Optics*, *14*(2), 024006. <https://doi.org/10.1117/1.3086612>
- Santos, C. A. P., & Matias, L. (2006). Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. *Laboratório Nacional De Engenharia Civil*.
- Serra, N., & Semiao, V. (2013). Characterization of non-isothermal flows typical of built environments in a laboratory scale model. Part II – Numerical predictions with CFD. *Building and Environment*, *68*, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.006>
- Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., & Naji, H. (2018). Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco. *Journal of Building Engineering*, *18*, 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.03.018>

- Shan, X., Xu, W., Lee, Y.-K., & Lu, W.-Z. (2019). Evaluation of thermal environment by coupling CFD analysis and wireless-sensor measurements of a full-scale room with cooling system. *Sustainable Cities and Society*, 45, 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.011>
- Shang, J. S. (2004). Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 40(3), 173–197. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2004.04.001>
- Simone, A., Della Crociata, S., & Martellotta, F. (2013). The influence of clothing distribution and local discomfort on the assessment of global thermal comfort. *Building and Environment*, 59, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.001>
- Soe, T., M., & Khaing, S., Y. (2017). Comparison of turbulence models for computational fluid dynamics simulation of wind flow on cluster of buildings in Mandalay. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 7(8), 337-350.
- Taghinia, J. H., Rahman, M. M., & Lu, X. (2018). Effects of different CFD modeling approaches and simplification of shape on prediction of flow field around manikin. *Energy and Buildings*, 170, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.075>
- Taleb, S., Yeretziyan, A., Jabr, R. A., & Hajj, H. (2020). Optimization of building form to reduce incident solar radiation. *Journal of Building Engineering*, 28, 101025. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101025>
- Tartarini, F., Schiavon, S., Hoyt, T., & Mackey, C. (2020, Novembro, 10). Pythermalcomfort. <https://pythermalcomfort.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- Teodosiu, C. ă. ă., Ilie, V., & Teodosiu, R. (2015). Modeling of Water Vapor Sources in Enclosures. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 4(2), 212-217. <https://doi.org/10.18178/ijscer.4.2.212-217>
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C. (2008). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. Elsevier.

- Vadoudi, Kiyam & Marinhas, Sandrine. (2018). Development of Psychrometric diagram for the energy efficiency of Air Handling Units. *International Journal of Ventilation*. 3(5), 491-500.
- Vizitiu, R. Ş., Burlacu, A., Isopescu, D. N., Verdeş, M., Sosoi, G., & Lăzărescu, C. D. (2019). CFD analysis of an innovative heat recovery system. *Procedia Manufacturing*, 32, 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.244>
- Wang, D., Chen, G., Song, C., Liu, Y., He, W., Zeng, T., & Liu, J. (2019). Experimental study on coupling effect of indoor air temperature and radiant temperature on human thermal comfort in non-uniform thermal environment. *Building and Environment*, 165, 106387. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106387>
- Widder, S. H., Cort, K. A. (2015). Thermal and optical properties of low-e storm windows and panels. Pacific Northwest National Laboratory.
- Wilcox, D. C. (1988). Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*, 26(11), 1299–1310. <https://doi.org/10.2514/3.10041>
- Wilson, K. G. (1975). Renormalization group methods. *Advances in Mathematics*, 16(2), 170–186. [https://doi.org/10.1016/0001-8708\(75\)90149-8](https://doi.org/10.1016/0001-8708(75)90149-8)
- Xie, J. C., Xue, P., Mak, C. M., & Liu, J. P. (2017). Balancing energy and daylighting performances for envelope design: A new index and proposition of a case study in Hong Kong. *Applied Energy*, 205, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.115>
- Yan, Y., Li, X., Yang, L., & Tu, J. (2016-a). Evaluation of manikin simplification methods for CFD simulations in occupied indoor environments. *Energy and Buildings*, 127, 611–626. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.030>
- Yan, Y., Li, X., & Tu, J. (2016-b). Effects of manikin model simplification on CFD predictions of thermal flow field around human bodies. *Indoor and Built Environment*, 26(9), 1185–1197. <https://doi.org/10.1177/1420326x16653500>

- Yang, R., Zhang, H., You, S., Zheng, W., Zheng, X., & Ye, T. (2020). Study on the thermal comfort index of solar radiation conditions in winter. *Building and Environment*, *167*, 106456. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106456>
- Yao, J., Chow, D. H. C., Zheng, R.-Y., & Yan, C.-W. (2015). Occupants' impact on indoor thermal comfort: a co-simulation study on stochastic control of solar shades. *Journal of Building Performance Simulation*, *9*(3), 272–287. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1046492>
- Zhang, H., Yang, R., You, S., Zheng, W., Zheng, X., & Ye, T. (2018). The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation. *Building and Environment*, *134*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.037>
- Zhang, Y., Zhou, X., Zheng, Z., Oladokun, M. O., & Fang, Z. (2020). Experimental investigation into the effects of different metabolic rates of body movement on thermal comfort. *Building and Environment*, *168*, 106489. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106489>
- Zhao, J., & Du, Y. (2020). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar Energy*, *206*, 997–1017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.090>
- Zhou, X., Liu, Y., Luo, M., Zhang, L., Zhang, Q., & Zhang, X. (2019). Thermal comfort under radiant asymmetries of floor cooling system in 2 h and 8 h exposure durations. *Energy and Buildings*, *188–189*, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.009>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Nithiarasu, P. (2005). *The finite element method for fluid dynamics* (6th ed.). Elsevier.
- Zikanov, O. (2010). *Essential Computational Fluid Dynamics*. Wiley.

Anexo

Anexo A - Propriedade dos materiais

Por forma a realizar a simulação é necessário que todos os parâmetros sejam introduzidos. Dentro destes encontram-se as propriedades dos materiais aplicados. O objetivo deste anexo é apresentar os mesmos.

Paredes interiores		Fonte
Condutividade térmica	0,42 W/mk	Valor calculado a partir da condutividade térmica dos materiais que englobam a parede, ITE 50
Massa volúmica	654 kg/m ³	Tijolos PRECERAM (30*20*11)
Calor específico	920 J/kgk	Mendonça, 2005
Emissividade	0,93	Neto <i>et al.</i> , 2006
Coefficiente global de transmissão de calor	2,78 W/m ² K	Valor calculado a partir dos materiais que constituem a parede

Parede Exterior		Fonte
Condutividade térmica	0,34 W/mk	Valor calculado a partir das materiais que englobam a parede, ITE 50
Massa volúmica	589 kg/m ³	Tijolos PRECERAM (30*20*22)
Calor específico	920 J/kgk	Mendonça, 2005
Emissividade	0,93	Neto <i>et al.</i> , 2006
Coefficiente global de transmissão de calor	1,3 W/m ² K	ITE 50

A Influência da Radiação Solar nas Condições de Conforto em Espaços Climatizados para Ocupação Humana

Chão		Fonte
Condutividade térmica	0,71 W/mk	Valor calculado a partir das materiais que englobam o chão, Santos e Matias (2006)
Massa volúmica	2300 kg/m ³	Mendonça, 2005
Calor específico	840 J/kgk	Mendonça, 2005
Emissividade	0,94	Neto <i>et al.</i> , 2006
Coefficiente global de transmissão de calor	3,7 W/m ² K	Valor calculado a partir dos materiais que constituem o chão

Janela com vidro simples		Fonte
Condutividade térmica	1,1 W/mk	Mendonça, 2005
Massa volúmica	2500 kg/m ³	
Calor específico	750 J/kgk	
Emissividade	0,94	
Transmissividade luminosa	0,87	
Coefficiente global de transmissão de calor	5,0 W/m ² K	
Fator solar	0,7	

Janela com vidro de controlo solar e térmico		Fonte
Emissividade	0,15	Widder e Cort, 2015
Fator solar	0,2	Fenge <i>et al.</i> , 2016 e texto de disigning buildings

Humanos		Fonte
Condutividade térmica	0,5 W/mk	Dados da fundação IT'IS
Massa volúmica	1038 kg/m ³	Heymsfield <i>et al.</i> , 1990 e Bell, 1995
Calor específico	3470 J/kgk	Faber e Garby, 1995
Emissividade	0,98	Sanchez-Marin <i>et al.</i> , 2009

Mesas (Madeira)		Fonte
Condutividade térmica	0,14 W/mk	Santos e Matias (2006)
Massa volúmica	600 kg/m ³	Santos e Matias (2006)
Calor específico	1300 J/kgk	Mendonça, 2005
Emissividade	0,9	Mendonça, 2005

Teto falso (Gesso cartonado)		Fonte
Condutividade térmica	0,25 W/mk	Santos e Matias (2006)
Massa volúmica	875 kg/m ³	Santos e Matias (2006)
Calor específico	950 J/kgk	Ang, 2009
Emissividade	0,93	Neto <i>et al.</i> , 2006

Cassete (PVC)		Fonte
Condutividade térmica	0,17 W/mk	Santos e Matias (2006)
Massa volúmica	1390 kg/m ³	Santos e Matias (2006)
Calor específico	1040 J/kgk	Mendonça, 2005
Emissividade	0,95	Neto <i>et al.</i> , 2006

Anexo B – Radiação difusa

O cálculo da radiação difusa utiliza as equações abaixo, retiradas da ASRHAE 55 (2017).

$$E_{\text{diff}} = 0,5f_{\text{eff}}f_{\text{svv}}T_{\text{sol}}I_{\text{diff}} \quad (\text{B-1})$$

$$E_{\text{refl}} = 0,5f_{\text{eff}}f_{\text{svv}}T_{\text{sol}}I_{\text{TH}}R_{\text{floor}} \quad (\text{B-2})$$

Com base na equação apresentada por Orgill e Hollands (1977), com um rácio de radiação difusa de 0,177, obtém-se, a partir da tabela da C2-3 da ASRHAE 55 (2017) um valor de 180,65 W/m² de radiação difusa horizontal e um valor de 840 W/m² de radiação solar direta.

Para o estudo PE e PR

$$E_{\text{diff}}=0,5 \times 1 \times 0,5 \times 0,2 \times 180,65 = 9,03 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B-3})$$

$$E_{\text{reflt}}=0,5 \times 1 \times 0,5 \times 0,2 \times (180,65 + 840 \times \sin(46)) \times 0,2 = 7,85 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B-4})$$

$$E_{\text{total}}= 16,88 \text{ W/m}^2$$

Para o estudo PRS

$$E_{\text{diff}}=0,5 \times 1 \times 0,24 \times 0,7 \times 180,65 = 15,17 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B-5})$$

$$E_{\text{reflt}}=0,5 \times 1 \times 0,24 \times 0,7 \times (180,65 + 840 \times \sin(46)) \times 0,2 = 13,18 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B-6})$$

$$E_{\text{total}}= 28,35 \text{ W/m}^2$$

Anexo C – Código dos programas computacionais

PMV-ERF

```
import csv
import math
from pythermalcomfort.models import pmv_ppd
print('Aguardar...Programa em processamento')
#Temperatura-----
with open('Temp.csv', 'r') as csv_file_T:
    csv_reader_T = csv.reader(csv_file_T)
    next(csv_reader_T)#passar uma linha
    Temp = []
    pop_x = []
    pop_y = []
    pop_z = []
    for line in csv_reader_T:
        Temp.append(line[7])
        #Cordenadas
        pop_x.append(line[1])
        pop_y.append(line[2])
        pop_z.append(line[3])
comprimento_T = len(Temp)
#Temperatura Radiante-----
P1=
P2=
P3=
P4=
P5=
#Velocidade do Ar-----
with open('VA.csv', 'r') as csv_file_VA:
    csv_reader_VA = csv.reader(csv_file_VA)
    next(csv_reader_VA)#passar uma linha
    VA = []
    for line in csv_reader_VA:
        VA.append(line[7])
comprimento_VA = len(VA)
#Radiação solar-----
#Utilizar radiação solar?
UT = True
if UT:
    with open('SOL.csv', 'r') as csv_file_SOL:
        csv_reader_SOL = csv.reader(csv_file_SOL)
        next(csv_reader_SOL)#passar uma linha
        SOL = []
        for line in csv_reader_SOL:
```

```
SOL.append(line[7])
comprimento_SOL = len(SOL)
#-----
def solar_gain(
    sol_altitude,
    sol_azimuth,
    sol_radiation_dir,
    sol_transmittance,
    f_svv,
    f_bes,
    asw=0.7,
    posture="seated",
    floor_reflectance=0.6,
):
    """
```

Calculates the solar gain to the human body using the Effective Radiant Field (ERF) [1]. The ERF is a measure of the net energy flux to or from the human body. ERF is expressed in W over human body surface area [w/m2]. In addition, it calculates the delta mean radiant temperature. Which is the amount by which the mean radiant temperature of the space should be increased if no solar radiation is present.

Parameters

sol_altitude : float

Solar altitude, degrees from horizontal [deg]. Ranges between 0 and 90.

sol_azimuth : float

Solar azimuth, degrees clockwise from North [deg]. Ranges between 0 and 180.

posture : str

Default 'seated' list of available options 'standing', 'supine' or 'seated'

sol_radiation_dir : float

Direct-beam solar radiation, [W/m2]. Ranges between 200 and 1000. See Table C2-3 of ASHRAE 55 2017 [1].

sol_transmittance : float

Total solar transmittance, ranges from 0 to 1. The total solar transmittance of window systems, including glazing unit, blinds, and other façade treatments, shall be determined using one of the following methods:

i) Provided by manufacturer or from the National Fenestration Rating Council approved Lawrence Berkeley National Lab International Glazing Database.

ii) Glazing unit plus venetian blinds or other complex or unique shades shall be calculated using National Fenestration Rating Council approved software or Lawrence Berkeley National Lab Complex Glazing Database.

f_svv : float

Fraction of sky vault exposed to body, ranges from 0 to 1.

f_bes : float

Fraction of the possible body surface exposed to sun, ranges from 0 to 1. See Table C2-2 and equation C-7 ASHRAE 55 2017 [1].

asw: float

The average short-wave absorptivity of the occupant. It will range widely, depending on the color of the occupant's skin as well as the color and amount of clothing covering the body.

A value of 0.7 shall be used unless more specific information about the clothing or skin color of the occupants is available.

Note: Short-wave absorptivity typically ranges from 0.57 to 0.84, depending on skin and clothing color. More information is available in Blum (1945).

floor_reflectance: float

Floor reflectance. It is assumed to be constant and equal to 0.6.

Notes

More information on the calculation procedure can be found in Appendix C of [1].

Returns

erf: float

Solar gain to the human body using the Effective Radiant Field [W/m²]

delta_mrt: float

Delta mean radiant temperature. The amount by which the mean radiant temperature of the space should be increased if no solar radiation is present.

Examples

.. code-block:: python

```
>>> from pythermalcomfort.models import solar_gain
>>> results = solar_gain(sol_altitude=0, sol_azimuth=120,
sol_radiation_dir=800, sol_transmittance=0.5, f_svv=0.5, f_bes=0.5,
asw=0.7, posture='seated')
>>> print(results)
{'erf': 42.9, 'delta_mrt': 10.3}
```

"""

```
posture = posture.lower()
```

```
if posture not in ["standing", "supine", "seated"]:
```

```
    raise ValueError("Posture has to be either standing, supine or seated")
```

```
def find_span(arr, x):
```

```
    for i in range(0, len(arr)):
```

```
        if arr[i + 1] >= x >= arr[i]:
```

```
            return i
```

```
    return -1
```

```
deg_to_rad = 0.0174532925
```

```
hr = 6
```

```
i_diff = 0.175 * sol_radiation_dir * math.sin(sol_altitude * deg_to_rad)
```

```
i_diff_mul = 0.175 * math.sin(sol_altitude * deg_to_rad)
```

```
i_diff_per = (i_diff_mul*100)/(1+i_diff_mul)
```

```
fp_table = [
```

```
[0.35,0.35,0.314,0.258,0.206,0.144,0.082],
[0.342,0.342,0.31,0.252,0.2,0.14,0.082],
[0.33,0.33,0.3,0.244,0.19,0.132,0.082],
[0.31,0.31,0.275,0.228,0.175,0.124,0.082],
[0.283,0.283,0.251,0.208,0.16,0.114,0.082],
[0.252,0.252,0.228,0.188,0.15,0.108,0.082],
[0.23,0.23,0.214,0.18,0.148,0.108,0.082],
[0.242,0.242,0.222,0.18,0.153,0.112,0.082],
[0.274,0.274,0.245,0.203,0.165,0.116,0.082],
[0.304,0.304,0.27,0.22,0.174,0.121,0.082],
[0.328,0.328,0.29,0.234,0.183,0.125,0.082],
[0.344,0.344,0.304,0.244,0.19,0.128,0.082],
[0.347,0.347,0.308,0.246,0.191,0.128,0.082]
]
if posture == "seated":
    fp_table = [
        [0.29,0.324,0.305,0.303,0.262,0.224,0.177],
        [0.292,0.328,0.294,0.288,0.268,0.227,0.177],
        [0.288,0.332,0.298,0.29,0.264,0.222,0.177],
        [0.274,0.326,0.294,0.289,0.252,0.214,0.177],
        [0.254,0.308,0.28,0.276,0.241,0.202,0.177],
        [0.23,0.282,0.262,0.26,0.233,0.193,0.177],
        [0.216,0.26,0.248,0.244,0.22,0.186,0.177],
        [0.234,0.258,0.236,0.227,0.208,0.18,0.177],
        [0.262,0.26,0.224,0.208,0.196,0.176,0.177],
        [0.28,0.26,0.21,0.192,0.184,0.17,0.177],
        [0.298,0.256,0.194,0.174,0.168,0.168,0.177],
        [0.306,0.25,0.18,0.156,0.156,0.166,0.177],
        [0.3,0.24,0.168,0.152,0.152,0.164,0.177],
    ]
alt_range = [0, 15, 30, 45, 60, 75, 90]
az_range = [0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180]
alt_i = find_span(alt_range, sol_altitude)
az_i = find_span(az_range, sol_azimuth)
fp11 = fp_table[az_i][alt_i]
fp12 = fp_table[az_i][alt_i + 1]
fp21 = fp_table[az_i + 1][alt_i]
fp22 = fp_table[az_i + 1][alt_i + 1]
az1 = az_range[az_i]
az2 = az_range[az_i + 1]
alt1 = alt_range[alt_i]
alt2 = alt_range[alt_i + 1]
fp = fp11 * (az2 - sol_azimuth) * (alt2 - sol_altitude)
fp += fp21 * (sol_azimuth - az1) * (alt2 - sol_altitude)
fp += fp12 * (az2 - sol_azimuth) * (sol_altitude - alt1)
fp += fp22 * (sol_azimuth - az1) * (sol_altitude - alt1)
fp /= (az2 - az1) * (alt2 - alt1)
```

```
f_eff = 0.725
if posture == "seated":
    f_eff = 0.696
sw_abs = asw
lw_abs = 0.95
e_diff = f_eff * f_svv * 0.5 * sol_transmittance * i_diff
e_direct = fp * sol_transmittance * f_bes * sol_radiation_dir*f_eff
e_refl = (
    f_eff
    * f_svv
    * 0.5
    * sol_transmittance
    * (sol_radiation_dir * math.sin(sol_altitude * deg_to_rad) + i_diff)
    * floor_reflectance
)
e_solar = e_direct + e_refl
erf = e_solar * (sw_abs / lw_abs)
d_mrt = erf / (hr * f_eff)
# print(fp, e_diff, e_direct, e_refl, e_solar, erf, d_mrt)
return {"erf": round(erf, 1), "delta_mrt": round(d_mrt, 1), "fp":fp, "%dif":i_diff_per}
#-----
#valores para iniciar a variável
pmv_max = -3
pmv_min = +3
ppd_max = 0
ppd_min = 100
pop_erro = []
xmax = 8.54225 #valor maximo no Autodesk CFD para x, extraido da geometria
#dimensoes da janela
w = 1.5
h = 6.435
RAD = 0#colocar valor da radiação solar w/m2
with open('PMV.csv', 'w') as new_file:
    csv_write = csv.writer(new_file)
    for i in range(len(Temp)):
        if i == 0:
            data = [pop_x[i], pop_y[i], pop_z[i], 'PMV', 'PPD', 'clo']
            csv_write.writerow(data)
        else:
            from pythermalcomfort.models import pmv_ppd
            Var_erro = False
            if float(Temp[i])<10 or float(Temp[i])>30:
                Var_erro = True
            if float(VA[i])<0.0001 or float(VA[i])>1:
                Var_erro = True
            #Para o MRT
            x = float(pop_x[i])
```

```
if x > 7.28:
    TempR = P1
elif x > 5.61:
    TempR =
elif x > 3.93:
    TempR =
elif x > 2.25:
    TempR =
elif x > 0.57:
    TempR =
else:
    TempR = P5
#-----
if Var_erro == False:
    if UT: #Realizar com radiação
        if float(SOL[i]) > 0:
            d = xmax - float(pop_x[i])
            f_svv_cal =
((math.atan(h/(2*d))*(180/math.pi))*(math.atan(w/(2*d))*(180/math.pi)))/(90*180)
            solar_g = solar_gain(sol_altitude=45.98, sol_azimuth=97.82,
sol_radiation_dir=((float(SOL[i])/math.sin(45.98*math.pi/180))/0.2),
            sol_transmittance=0.2, f_svv=f_svv_cal, f_bes=0.5, asw=0.7,
posture='seated')
            TempR = TempR + solar_g['delta_mrt']
            pmvabs = []
            pmvG = []
            ppdG = []
            clo_list = [0.5, 0.6, 0.75]
            clo_teste = 0.5
            for it in range(3):
                clo = clo_list[it]
                pmv_ppd1 =
            pmv_ppd(tdb=float(Temp[i]),tr=TempR,vr=float(VA[i]),rh=40,met=1.2,clo=clo)# Determinar
            PMV e PPM na iteração
            pmvabs.append(abs(pmv_ppd1['pmv']))
            pmvG.append(pmv_ppd1['pmv'])
            ppdG.append(pmv_ppd1['ppd'])
            del(pmv_ppd1)
            minimo = min(pmvabs)
            index = pmvabs.index(minimo)
            pmv = pmvG[index]
            ppd = ppdG[index]
            clo = clo_list[index]
            #Determinar o valor maximo e minimo do PMV e PPD calculado
            if pmv > pmv_max:
                pmv_max = pmv
            elif pmv < pmv_min:
```

```
    pmv_min = pmv
    if ppd > ppd_max:
        ppd_max = ppd
    elif ppd < ppd_min:
        ppd_min = ppd

    data = [pop_x[i], pop_y[i], pop_z[i], pmv, ppd, clo]
    csv_write.writerow(data)# Escrever linha de dados no ficheiro csv

    elif Var_erro == True:
        pop_erro.append([pop_x[i], pop_y[i], pop_z[i], Temp[i], VA[i]])
numP = len(pop_erro)
print('Ficheiro de pontos que não foram realizados por estarem fora das margens do PMV e
PPD: \n Numero de pontos: {}'.format(numP))
for i in range(numP):
    print('x: {}, y: {}, z: {}, T: {}, Va:
{}'.format(pop_erro[i][0],pop_erro[i][1],pop_erro[i][2],pop_erro[i][3],
            pop_erro[i][4]))
print('Ficheiro escrito \n PMV maximo {} e PMV minimo {} \n PPD maximo {} e PPD minimo
{}'.format(pmv_max, pmv_min, ppd_max, ppd_min))
print('Valor maximo de x : {}'.format(xmax))
print('Ficheiro interno; Tamanho \n Temp: {} \n VA: {} \n SOL: {}'.format(comprimento_T,
comprimento_VA, comprimento_SOL))
```

PMV-RAD

```
import csv
import math
from pythermalcomfort.models import pmv_ppd
print('Aguardar...Programa em processamento')
#Temperatura-----
with open('Temp.csv', 'r') as csv_file_T:
    csv_reader_T = csv.reader(csv_file_T)
    next(csv_reader_T)#passar uma linha
    Temp = []
    pop_x = []
    pop_y = []
    pop_z = []
    for line in csv_reader_T:
        Temp.append(line[7])
        #Cordenadas
        pop_x.append(line[1])
        pop_y.append(line[2])
        pop_z.append(line[3])
comprimento_T = len(Temp)
#Temperatura Radiante-----
P1=
```

```
P2=  
P3=  
P4=  
P5=  
#Velocidade do Ar-----  
with open('VA.csv', 'r') as csv_file_VA:  
    csv_reader_VA = csv.reader(csv_file_VA)  
    next(csv_reader_VA)#passar uma linha  
    VA = []  
    for line in csv_reader_VA:  
        VA.append(line[7])  
comprimento_VA = len(VA)  
#Radiação solar-----  
#Utilizar radiação solar?  
UT = True  
if UT:  
    with open('SOL02.csv', 'r') as csv_file_SOL:  
        csv_reader_SOL = csv.reader(csv_file_SOL)  
        next(csv_reader_SOL)#passar uma linha  
        SOL = []  
        for line in csv_reader_SOL:  
            SOL.append(line[7])  
    comprimento_SOL = len(SOL)  
#valores para iniciar a variável  
pmv_max = -3  
pmv_min = +3  
ppd_max = 0  
ppd_min = 100  
pop_erro = []  
xmax = 0  
for i in range(1,len(pop_x),1):  
    if float(pop_x[i]) > xmax:  
        xmax = float(pop_x[i])  
RAD = 0#colocar valor da radiação solar w/m2  
with open('PMV_rad.csv', 'w') as new_file:  
    csv_write = csv.writer(new_file)  
    for i in range(len(Temp)):  
        if i == 0:  
            data = [pop_x[i], pop_y[i], pop_z[i], 'PMV', 'PPD', 'clo']  
            csv_write.writerow(data)  
        else:  
            from pythermalcomfort.models import pmv_ppd  
            Var_erro = False  
            if float(Temp[i])<10 or float(Temp[i])>30:  
                Var_erro = True  
            if float(VA[i])<0.0001 or float(VA[i])>1:  
                Var_erro = True
```

```
#MRT
x = float(pop_x[i])
if x > 7.28:
    TempR = P1
elif x > 5.61:
    TempR =
elif x > 3.93:
    TempR =
elif x > 2.25:
    TempR =
elif x > 0.57:
    TempR =
else:
    TempR = P5
if Var_erro == False:
    pmvabs = []
    pmvG = []
    ppdG = []
    clo_list = [0.5, 0.6, 0.75]
    clo_teste = 0.5

if UT: #Realizar com radiação
    if SOL[i] != 0:
        Aj = float(SOL[i])/200
    else:
        Aj = 0
    for it in range(3):
        clo = clo_list[it]
        pmv_ppd1 =
pmv_ppd(tdb=float(Temp[i]),tr=TempR,vr=float(VA[i]),rh=40,met=1.2,clo=clo)# Determinar
PMV e PPM na iteração
        pmvabs.append(abs(pmv_ppd1['pmv']+Aj))
        pmvG.append(pmv_ppd1['pmv']+Aj)
        del(pmv_ppd1)
        minimo = min(pmvabs)
        index = pmvabs.index(minimo)
        pmv = pmvG[index]
        clo = clo_list[index]
        ppd = 100.0 - 95.0 * math.exp(-0.03353 * pow(pmv, 4.0) - 0.2179 * pow(pmv, 2.0))
    if pmv > pmv_max:
        pmv_max = pmv
    elif pmv < pmv_min:
        pmv_min = pmv
    if ppd > ppd_max:
        ppd_max = ppd
    elif ppd < ppd_min:
        ppd_min = ppd
```

```
data = [pop_x[i], pop_y[i], pop_z[i], pmv, ppd, clo]
csv_write.writerow(data)# Escrever linha de dados no ficheiro csv
elif Var_erro == True:
    pop_erro.append([pop_x[i], pop_y[i], pop_z[i], Temp[i], VA[i]])
numP = len(pop_erro)
print('Ficheiro de pontos que não foram realizados por estarem fora das margens do PMV e PPD:
\n Múmero de pontos: {}'.format(numP))
for i in range(numP):
    print('x: {}, y: {}, z: {}, T: {}, Va:
    {}'.format(pop_erro[i][0],pop_erro[i][1],pop_erro[i][2],pop_erro[i][3],
                pop_erro[i][4]))
print('Ficheiro escrito \n PMV maximo {} e PMV minimo {} \n PPD maximo {} e PPD minimo
    {}'.format(pmv_max, pmv_min, ppd_max, ppd_min))
print('Valor maximo de x : {}'.format(xmax))
print('Ficheiro interno; Tamanho \n Temp:{} \n VA:{} \n SOL:{}'.format(comprimento_T,
comprimento_VA, comprimento_SOL))
```