

**RICARDO FILIPE NASCIMENTO SANTOS**

**DISSERTAÇÃO**

**CLIMATIZAÇÃO DE ESPAÇOS OCUPADOS ATRAVÉS DE  
ENERGIA PRODUZIDA POR METODOS NATURAIS**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

Instituto Superior de Engenharia

Ano letivo 2019/2020

**RICARDO FILIPE NASCIMENTO SANTOS**

**DISSERTAÇÃO**

**CLIMATIZAÇÃO DE ESPAÇOS OCUPADOS ATRAVÉS DE  
ENERGIA PRODUZIDA POR METODOS NATURAIS**

Mestrado em Engenharia Mecânica  
Energia, Climatização e Refrigeração

Trabalho efetuado sob a orientação de:  
Prof. Doutor Eusébio Zeferino Encarnação



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

Instituto Superior de Engenharia

Ano letivo 2019/2020

# **CLIMATIZAÇÃO DE ESPAÇOS OCUPADOS ATRAVÉS DE ENERGIA PRODUZIDA EM SISTEMAS DE FACHADA DUPLA**

Declaração da Autoria do trabalho

Declaro ser o(a) autor(a) deste trabalho, que é original e inédito.  
Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da  
listagem de referências incluída.

---

Ricardo Filipe Nascimento Santos

## Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Estado da Arte</b> .....	<b>10</b>
Climatização Passiva .....	10
Sistemas Aquecimento Passivo.....	11
Sistemas Arrefecimento Passivo .....	11
Fachadas DSF .....	13
Dispositivos Sombreamento .....	16
Conforto térmico .....	17
Fatores que influenciam o conforto térmico .....	17
Cálculo o conforto térmico .....	19
ADI (Air Distribution Index) .....	20
<b>4. Modelos de Simulação</b> .....	<b>22</b>
Modelo da resposta térmica de edifícios (BTR).....	22
Modelo Simulação numérica de escoamentos (CFD) .....	23
Modelo da resposta térmica do corpo humano (HTR) .....	24
<b>5. Metodologia Numérica</b> .....	<b>25</b>
Construção da Camara Experimental em CAD .....	26
Construção da Estrutura em Madeira .....	26
Fixação das Placas de Isolamento .....	27
Construção das Janelas e Vidros .....	28
Representação da Estrutura da câmara: lado da fachada ventilada (DSF).....	28
Representação da Estrutura da câmara: lado oposto da fachada ventilada (DSF) ...	29
Construção da fachada ventilada.....	29
Sistema AVAC.....	31
Jatos descendentes.....	31
Conduta Extração Câmara.....	32
Conjugação dos sistemas de ventilação implementados .....	32
<b>6. Análise e discussão de resultados</b> .....	<b>36</b>
Análise da simulação para “Mistura Perfeita” utilizando o método do BTR. ...	36
Análise da evolução da Concentração de CO <sub>2</sub> .....	36

Análise da evolução da Temperatura do ar na sala: Fachada simples VS DSF.....	37
Análise do PMV .....	39
Análise da simulação com jatos descendentes .....	40
Análise da Concentração de CO <sub>2</sub> .....	40
Análise do PPD .....	43
Análise do Conforto Térmico.....	46
Análise do ADI .....	49
<b>7. Discussão de Resultados.....</b>	<b>52</b>
<b>8. Conclusões .....</b>	<b>53</b>
<b>9. Bibliografia.....</b>	<b>54</b>

## Índice de Figuras

<i>Figura 1 - Cinco principais modos de ventilação em DSF [L. Alemdag] .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2 – Representação da Estrutura Madeira Câmara .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3 - Pormenor na construção dos bits para fixação das placas de isolamento... 26</i>	
<i>Figura 4 - Pormenor na construção dos bits para fixação dos vidros das janelas .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5 - Placas isolamento da estrutura, em poliestireno 40mm .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6 – Representação dos vidros das janelas da câmara .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7 - Vista global do lado onde será construída a fachada ventilada da câmara 28</i>	
<i>Figura 8 - Vista global do lado oposto da fachada ventilada da câmara .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9 - Representação da estrutura de madeira da fachada ventilada .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10 - Representação das lamelas na DSF.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11 - Representação da fachada ventilada composta pelas 4 fachadas simples, 3 DSF, lamelas e envidraçados .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 12 - Representação jatos descendentes e das condutas de admissão de ar proveniente das várias secções da fachada ventilada.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 13 – Representação das condutas de extração da câmara, ventilação forçada, auxiliadas por dois ventiladores.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 14 - Representação dos sistemas de ventilação da câmara com vista de topo..</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15 - Representação dos sistemas de ventilação implementados na câmara.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16 - Representação final e detalhada da câmara com fachada ventilada .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 17- Gráfico de evolução de Concentração de CO<sub>2</sub> para uma simulação de "mistura perfeita" .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 18 - Análise temperatura do ar Sala e Fachada Simples para uma simulação de "mistura perfeita" .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 19 - Análise temperatura do ar Sala e Fachada DSF .....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 20 – Gráfico evolução do valor do PMV em condições de Inverno para uma simulação de "mistura perfeita" .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 21 - Distribuição do valor da Concentração de CO<sub>2</sub> às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 22 - Distribuição do valor da Concentração de CO<sub>2</sub> às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 23 - Distribuição do valor da Concentração de CO<sub>2</sub> às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno .....</i>	<i>41</i>

<i>Figura 24 - Distribuição do valor da Concentração de CO<sub>2</sub> às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	42
<i>Figura 25 – Evolução da Concentração de CO<sub>2</sub> para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno</i> .....	42
<i>Figura 26 - Distribuição do valor PPD às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	43
<i>Figura 27 - Distribuição do valor PPD às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	43
<i>Figura 28 - Distribuição do valor PPD às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	44
<i>Figura 29 – Distribuição do valor PPD às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	45
<i>Figura 30 - Evolução do valor PPD para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno</i> .....	45
<i>Figura 31 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	46
<i>Figura 32 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	47
<i>Figura 33 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	47
<i>Figura 34 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	48
<i>Figura 35 - Evolução do Conforto Térmico para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno</i> .....	48
<i>Figura 36 - Distribuição do valor ADI às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	49
<i>Figura 37 - Distribuição do valor ADI às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	50
<i>Figura 38 - Distribuição do valor ADI às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	50
<i>Figura 39 - Distribuição do valor ADI às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno</i> .....	51
<i>Figura 40 - Evolução do valor do ADI para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno</i> .....	51

## **Resumo**

No panorama das alterações climáticas muitas estratégias são utilizadas para reduzir o consumo de energia dos edifícios. As principais convergências no setor da construção são a nível arquitetónico e de conforto dos ambientes interiores, sabendo que a energia é um grande fator a ter em conta. Atualmente os novos edifícios possuem grandes fachadas, muitas delas envidraçadas, que geram quantidades de energia sob forma de calor. Para fazer face a estes problemas foram desenvolvidos sistema de fachadas duplas ventiladas e sistemas de sombreamento como o caso de lamelas. Este sistema permite de forma eficiente e com baixos custos energéticos reduzir a necessidade de climatização dos edifícios. Este projeto visa estudar o aproveitamento do calor gerado pelos envidraçados para climatização dos espaços interior com recurso a ventilação forçada. Para tal será necessário estudar os comportamentos térmicos das 3 fachadas duplas ventiladas (DSF) instaladas na camara experimental com recurso a 3 programas de simulação dinâmica, utilizados na modelação de escoamentos (CFD), na resposta térmica humana (HTR) e na resposta térmica de edifícios (BTR). A partir destes modelos resultaram duas simulações, uma para aplicação da mistura perfeita do ar dentro da camara e a outra para uma vertente mais prática utilizando jatos descendentes. Os resultados destas simulações foram bastante satisfatórios, comprovando que os sistemas de climatização por métodos naturais podem ser o futuro na climatização e tornar os edifícios termicamente mais eficientes com custos de produção de energia muito reduzidos.

*Palavras-chave: (fachadas duplas ventiladas, DSF, ventilação forçada, consumo de energia, sistema de sombreamento, simulação dinâmica, CFD, HTR, BTR, eficiência energética)*

## ***Abstract***

*In the climate change perspective, there are many different strategies being used in order to reduce energy consumption of buildings. The main convergences in the construction industry are at an architectural level and interior environment comfort, knowing that energy is now a factor to keep in mind. Nowadays, new buildings are built with great facades, many of them in glass, that generate great amounts of energy in the form of heat. To combat these problems new techniques were developed, like double skin facades and shading systems like venetian blinds. These systems allow the reduction of the need to climatize the buildings in an efficient and low energy cost way. This project aims to study the exploitation of the heat generated by glass to use on climatization of interior spaces using forced ventilation. To do so, a study of the three double skin façades (DSF) and the experimental chamber's thermal behavior will be necessary, using three dynamic simulation programs, used for flow modeling (CFD), human thermal response (HTR) and building thermal response (BTR). From these models, two simulations were created, one for the application of the perfect mixture of air inside the chamber and another more practical one that uses downward streams. These simulations got very satisfying results, proving that climatization systems that use natural methods can be the future and can make buildings thermally more efficient and with much lower energy costs.*

*Key-words: (DSF, forced ventilation, energy consumption, shading system, dynamic modelling, CFD, HTR, BTR, energy efficiency)*

## 1. Introdução

O rápido crescimento populacional resultou num aumento exponencial de consumo de energia dos edifícios, grande parte devido a maior dependência de sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC). Estima-se que os setores de construção consumam 40% da energia global do planeta. Numa escala mais reduzida os sistemas AVAC são responsáveis pelo consumo de cerca de 60% da energia dos edifícios (Final Energy Consumption by sector and buildings Energy Mix, 2010). O conceito “Consumo Energético” tem tomado proporções de elevada escala e os requisitos legais para a certificação energética estão cada vez mais rigorosos. Para tal é necessário reduzir os consumos energéticos dos edifícios sem implicar a alteração ao conforto dos ocupantes. Na construção moderna os envidraçados são cada vez mais utilizados em edifícios comerciais e escritórios por darem uma visão atrativa e empresarial. Contudo a excessiva utilização de envidraçados pode trazer problemas ao nível da qualidade térmica dos edifícios. Muitos destes são construídos apenas com vidros simples causando problemas térmicos, acústicos bem como o excessivo consumo de energia (Conceição, Santiago, & Awbi, 2016).

Hoje em dia os edifícios começam a ser termicamente confortáveis e são projetados para consumir a menor quantidade de energia possível. Estratégias como o uso de fachadas duplas ou dispositivos de sombreamento são exemplos simples de métodos que podem ser adotados minimizando o uso de sistemas de climatização mecanizados. As fachadas duplas, também conhecidas com DSF (Double Skin Facade), são consideradas boas soluções para contornar os problemas apresentados. Oferecem, devido a sua caixa-de-ar, a possibilidade de instalação de lamelas ou persianas que controlam a exposição solar do edifício. Como restringimos a circulação de ar é também possível controlar a ventilação através de métodos naturais, híbridos ou mecânicos (Conceição, Santiago, & Awbi, 2016).

## 2. Objetivos

Os objetivos a que se propõem este projeto, vão de encontro a procura de sistemas climatização mais eficientes e de baixo consumo energético. Esses sistemas serão testado para aplicação numa sala de aula, utilizando uma câmara experimental. Para tal é necessários conhecer quais as fontes de energia alternativa que podem ser aplicadas nesta situação. A linha de elaboração do projeto traça os seguintes objetivos:

- Climatização de espaços ocupados através da energia produzida em sistemas de fachada dupla
- Aplicação de sistemas de ventilação de forma a avaliar o nível de conforto térmico, qualidade do ar e eficiência dos sistemas AVAC
  - Simulação de um sistema de climatização por jatos descendentes, contruídos em duas condutas retangulares simetricamente localizadas na câmara
- Aplicação das simulações em condições de inverno

### **3. Estado da arte**

O rápido crescimento populacional resultou num aumento de consumo de energia dos edifícios devido a maior dependência dos sistemas de AVAC. A International Energy Agency (IEA) afirma que os setores de construção na maioria dos países presentes na IEA, consomem atualmente 40% da energia global do planeta. Os sistemas de AVAC são responsáveis pelo consumo de cerca de 60% da energia dos edifícios (Poirazis, 2004)

Os desafios climáticos têm crescido nos últimos anos o que tem levado a tomar providências contra o elevado consumo de energia. (Alemdag & Beyhan, 2017) nos seus estudos demonstram que a energia é um importante fator a ter em conta no desenho arquitetónico dos edifícios. Hoje em dia os edifícios começam a ser termicamente confortáveis e são projetados para consumir a menor quantidade de energia possível. Edifícios equipados com grandes superfícies de envidraçados localizados em regiões quentes geram grandes quantidades de energia sob forma de calor, energia essa proveniente quase na sua totalidade da radiação solar. Para tal foram desenvolvidos estudos térmicos em fachadas de sistemas que pudessem equilibrar as condições ambientais exteriores e interiores. Edifícios naturalmente ventilados em que a radiação solar incidente pode ser controlada provaram ser energeticamente mais eficientes. Exemplo disso foi comprovado por (Hazem, Ameghchouche, & Bougriou, 2015) e por (Xu & Ojima, 2007) onde mostraram que, no Verão, o uso de fachadas duplas podem reduzir o consumo de energia até 15% com recurso apenas á ventilação natural para aquecer ou arrefecer os espaços. No Inverno essa redução pode alcançar os 30% usando os aproveitamentos do calor gerado pela radiação solar incidente.

## Climatização Passiva

(Agrawal, 1989) Estimou que é possível reduzir em 35% as necessidades energéticas dos edifícios usando recursos alternativos. Para tal é necessário recorrer a sistema de climatização passivos, isto é, elementos arquitetônicos e construtivos integrados nos edifícios que contribuam para o aquecimento ou arrefecimento de forma natural sem recurso a equipamento mecânico.

### Sistemas de Aquecimento Passivo

Nas épocas frias, em que as necessidades de aquecimento predominam, estes sistemas procuram aproveitar ao máximo a energia solar através dos vãos envidraçados, aos quais podem se associar elementos de armazenamento da energia solar. Exemplos de Sistemas de Aquecimento Passivo:

- Ganhos diretos: A radiação solar é transmitida através do envidraçado aquecendo o espaço interior. Para tal é necessário que os vãos envidraçados estejam bem dimensionado e bem orientados para que o rendimento seja o maior possível.  
A utilização de sistema com vidros duplos é de todos o mais vantajoso para a obtenção e retenção de calor no interior do edifício. Em situações noturnas ou de pouca radiação solar podem ser usados dispositivos que permitem o isolamento e ajudem a manter a temperatura. A caixa-de-ar entre os vãos envidraçados reduz as transferências de calor por convecção, o que traduz numa redução de 9% de ganhos solar e uma redução de 28% de perdas em comparação com sistemas de vidro simples (Gonçalves & Graça, 2004)
- Ganhos indiretos: Os ganhos indiretos ocorrem quando os edifícios são equipados com dispositivos chamados “massas térmicas”. As massas térmicas permitem durante o período diurno absorver e armazenar o calor resultante da incidência da radiação solar e durante o período noturno trocar o calor armazenado por condução e convecção para o interior.

## **Sistemas de Arrefecimento Passivo**

Nas épocas quentes os sistemas utilizados para arrefecimento são mais complexos, onde é necessários recorrer a fontes frias para arrefecer os espaços. Na ausência de uma fonte fria torna-se necessário recorrer a processos de dissipação de calor ou de controlo da radiação incidente para reduzir as necessidades de arrefecimento.

Os Sistemas de Arrefecimento Passivo mais utilizados são:

- Ventilação Natural: A ventilação natural é dos métodos mais simples e eficazes de arrefecimento. Dadas as elevadas amplitudes térmicas registadas no verão é possível durante quase todo o dia arrefecer o edifício no entanto esse processo têm maior rendimento em períodos noturno. A ventilação ocorre devida as diferenças de pressão registadas entre o interior e exterior do edifício. Estes gradientes geram um fluxo natural de ar, muitas vezes por ação direta do vento, utilizado para efeitos de arrefecimento;
- Torre de Vento: Os sistemas de arrefecimento natural com recurso a torres de vento são geralmente utilizadas em climas quentes e secos, em que o gradiente de temperatura por si só consegue criar um fluxo de ar. Este sistema funciona com base no efeito de “Coanda” em que o ar quente é aspirado do exterior e conduzido por canais subterrâneos onde é arrefecido por contacto com água ou com o próprio solo. Posteriormente o ar já arrefecido é conduzido para o interior do edifício que depois será extraído a uma temperatura mais elevada através de uma torre (Gupta & Tiwari, 2016);
- Arrefecimento Evaporativo: Este tipo de sistemas utiliza o fenómeno da evaporação da água para arrefecer o ar exterior utilizando os mesmos princípios de funcionamento das torres de vento;
- Arrefecimento Radiativo: Este método pouco utilizado, em grande parte pelo facto de só ter efeito em períodos noturnos. Consiste basicamente na emissão de radiação para o exterior através de grandes superfícies, sendo as coberturas as mais usuais.

- Fachadas ventiladas DSF: Sistema em parede dupla com caixa-de-ar, auxiliado por ventilação mecânica ou natural para arrefecimento das fachadas dos edifícios. Este tipo de sistemas está na base deste estudo pelo que será abordado várias vezes ao longo do documento.
- Dispositivos de Sombreamento: A utilização de dispositivos que produzem sombra ao edifício permitem diminuir a radiação solar incidente. Caso estes dispositivos sejam móveis, como o caso de lamelas ou persiana, é possível controlar a incidência da energia solar

## **Fachadas DSF**

As janelas e fachadas ventiladas consistem basicamente numa parede dupla com espaço de ar entre elas. Normalmente estas paredes são construídas em vidro transparente para que se possa tirar partido da iluminação natural e eventuais ganhos energéticos devido a radiação. A fachada envidraçada exterior pode ser de vidro simples ou dupla, com distanciamento entre 20cm a 2m da fachada interior (Parra, Guardo, Egusquiza, & Alavedra, 2015).

São consideradas uma tipologia de construção em duas camadas, uma exterior envidraçada e outra interior envidraçada ou mista, instaladas de modo a que exista uma caixa-de-ar entre ambas que permita o fluxo de ar.

A ventilação desta caixa-de-ar pode ser natural, forçada ou mista, que é utilizada para a evacuação do calor absorvido por radiação pela fachada exterior:

- Ventilação Natural: A ventilação natural é conduzida por dois mecanismos: a diferença de pressão produzida pelo vento ou a flutuabilidade produzida pela diferença de temperatura entre o canal de ar e o ambiente exterior (Hazem, Ameghchouche, & Bougriou, 2015)
- Ventilação Forçada: Usada através de equipamentos mecânicos (ventiladores) quando a ventilação natural não é suficiente para alcançar as performances pretendidas;
- Ventilação Mista: Através de ventilação forçada trabalha em função dos fluxos da ventilação natural. Esta opção é do ponto de vista energético mais favorável

visto que o sistema de ventilação forçada não necessita vencer todo o caudal de extração, por apoio da ventilação natural;

As fachadas duplas ventiladas oferecem, para além dos aspetos estéticos, um maior conforto devido á redução do ruído exterior e uma melhor eficiência energética devido á redução das cargas térmicas perdidas pelo elevado caudal provocado pelo efeito do vento (Poirazis, 2004)

### **Tipos de DSF**

Classificação das DSF quanto aos modos de ventilação (Alemdag & Beyhan, 2017):

1. Cortina de ar externa: Nesse tipo de ventilação, o fluxo de ar é feito de fora para fora, isto é, a admissão é feita pelo exterior da mesma forma que é feita a exaustão;
2. Cortina de ar interna: o ar no canal de ventilação sai de dentro da sala e retorna a sala. Essa circulação é realizada por auxílio de sistemas de ventilação;
3. Fornecimento de ar: A ventilação da fachada é auxiliada pelo ar exterior. O ar novo do exterior é introduzido no interior através de sistemas de ventilação ou até mesmo de modo natural;
4. Exaustão de ar: O ar sujo ou contaminado é extraído do interior do edifício que por sua vez é conduzido para o exterior da fachada;
5. Zona “Buffer”: Considera-se que o canal de ventilação é hermético e não há fluxos de ar entre a fachada exterior e a fachada interior. Esta estanquicidade criará uma zona de amortecimento térmico passivo á semelhança de uma caixa-de-ar em paredes de alvenaria;

A figura 1 representa os conceitos acima mencionados:

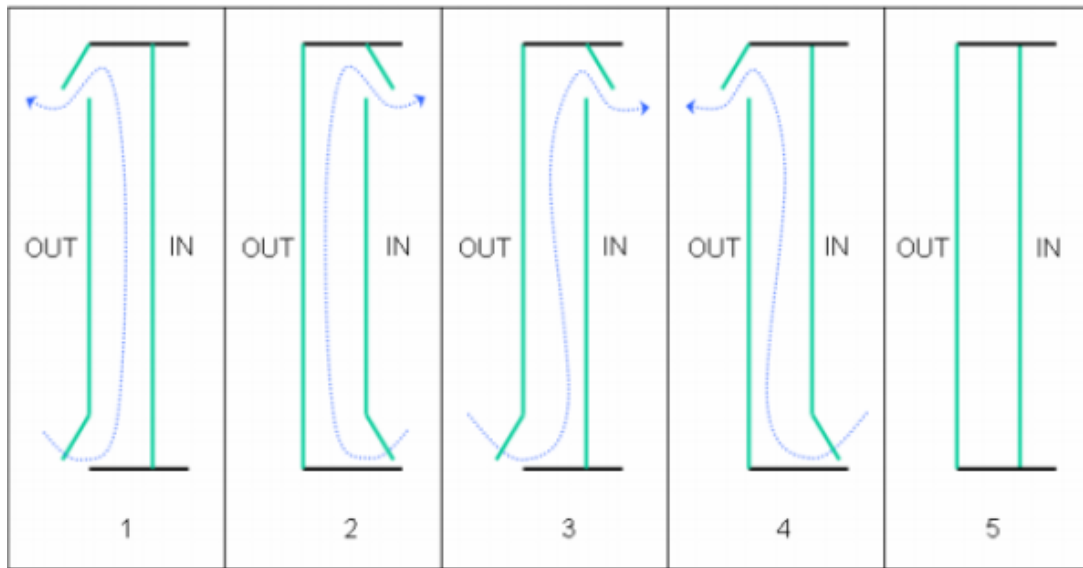


Figura 1 - Cinco principais modos de ventilação em DSF [L. Alemdag]

Gratia e Herde (Gratia & de Herde, 2004) estudaram o comportamento térmico e as cargas de aquecimento e arrefecimento necessárias para garantir conforto aos ocupantes. Para tal utilizaram um determinado edifício localizado na Bélgica recriando as condições climáticas exteriores para dias de Primavera, Verão, Outono e Inverno. Com este estudo concluíram que as fachadas duplas reduzem as cargas de aquecimento no Inverno e aumentavam as cargas de arrefecimento no Verão. Com isto comprova-se que existem desvantagens na utilização de grandes superfícies envidraçadas nos edifícios, em que a radiação solar em períodos de calor pode ser muito prejudicial na climatização dos espaços.

Em climas temperados as fachadas duplas apresentam problemas face aos grandes ganhos solares e temperaturas quentes ao longo do ano, mesmo no inverno (Guardo, Coussirat, Egusquiza, Alavedra, & Castilla, 2009). Para tal foram usadas estratégias para combater estes ganhos térmicos, tais como, dispositivos de sombreamento, vidros duplos ou triplos ou através de ventilação natural ou mecânica.

## Dispositivos de Sombreamento

Dispositivos de sombreamento como o caso as lamelas instaladas na face interior dos envidraçados são geralmente usadas para controlar a radiação solar incidente e iluminação.

Os primeiros estudos sobre lamelas basearam-se nos efeitos na transferência de calor por convecção em superfícies interiores com e sem radiação solar incidente (Collins M. R., Harrison, Oosthuizen, & Naylor, 2002) (Phillips, Naylor, Oosthuizen, & Harrison, 2002). Outros autores focaram-se no desenvolvimento de modelos que avaliassem a influência das lamelas nas cargas de arrefecimento e consumos energéticos (Collins & Harrison, 2004) (Athienits & Santamouris, 2002) (Chantrasrisalai & Fisher, 2006) (Manz & Menti, 2012). Outros estudos incidiram apenas nos efeitos das Lamelas na iluminação interior e transmissão de luz solar (Tzempelikos, A., 2008) (Tzempelikos & Athienitis, 2007).

Nos dias que correm, por grande efeito da necessidade de redução do consumo energético dos edifícios, muitos autores trabalham no desenvolvimento de estratégias de controlo automático de lamelas de forma a maximizar a entrada de luz e minimizar os ganhos por efeito da radiação solar. Contudo não é fácil existir este controlo pois há vários processos a acontecer em simultâneo como escoamentos, processos térmicos e óticos.

(Parra, Guardo, Egusquiza, & Alavedra, 2015) Em estudos recentes provou que as lamelas podem reduzir os ganhos solares em 35%. Essas reduções não se devem apenas á radiação refletida mas também pelo calor absorvido pela superfície das lamelas que posteriormente é dissipado pela ventilação, comprovando também que a ventilação forçada é mais eficaz que a ventilação natural. No mesmo estudo ficou evidenciado que a distância das lamelas aos envidraçados exteriores e as propriedades físicas das mesmas influenciam as performances térmicas das fachadas.

## Conforto Térmico

As condições ambientais interiores devem proporcionar aos ocupantes o conforto necessário para que se sintam agradáveis num determinado espaço.

Um ambiente que propicie conforto ao ser humano, em locais de trabalho ou de estudo, influencia significativamente o rendimento, produtividade e até a taxa de acidentes de trabalho.

O conforto térmico pode ser definido segundo a “ASHRAE Standard 55” como a condição mental que expressa a satisfação com ambiente térmico. Esta condição é avaliada através de critérios subjetivos, submetidos pelos próprios ocupantes.

As condições ambientais requeridas para conforto não são as mesmas para todos, fatores fisiológicos ou psicológicos variam de pessoa para pessoa, razão pelo qual é difícil satisfazer todos num espaço (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2010)

### Fatores que influenciam o conforto térmico

Sendo o conforto térmico uma variável maioritariamente sujeita a fatores pessoais dos ocupantes é necessário conhecê-los um a um.

Existem 6 fatores que devem ser tidos em conta quando se estuda o conforto térmico:

- **Temperatura do ar:** Considerada a temperatura média do ar em redor do ocupante. É considerada a média das temperaturas do ar no nível do tornozelo, no nível da cintura e no nível da cabeça.
- **Temperatura radiante:** Temperatura única para todo o corpo, podendo ser considerada uma média ponderada da temperatura das superfícies em torno do ocupante.
- **Velocidade do ar e humidade relativa:** Fatores importantes para o cálculo da temperatura operativa e qualidade do ar interior.

- **Taxa metabólica:** Entendida como a taxa de transformação da energia em calor e trabalho através das atividades metabólicas do ser humano (Tabela 1). A taxa de calor metabólico é convertida para “met” (1 met = 58,2 W/m<sup>2</sup>)

Atividade	M[W/m <sup>2</sup> ]
Dormir	44
Sentado a descansar	61
De pé	75
Caminhar devagar	126
Caminhar rápido	164
Ler, Escrever	61
Dactilografar	8
Dança Social	150
Luta Desportiva	444-546

*Tabela 1- Valores Metabólicos para diferentes tipos de atividades humanas*

- **Isolamento do vestuário:** É a resistência da roupa do ocupante à transferência de calor. O nível do isolamento térmico é avaliado em “clo” (1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>.°C.W<sup>-1</sup>) (Tabela 2).

Tipo de Vestuário	Resistência térmica (clo)
Nu	0
Calções	0,1
Vestuário Tropical	0,3
Vestuário leve, de Verão	0,5
Vestuário de trabalho	0,7
Vestuário de Inverno	1,0
Fato completo	1,5

*Tabela 2 - Valor de resistência térmica para vários tipos de vestuário*

### Cálculo do conforto térmico

Para o cálculo do conforto térmico recorre-se a teoria desenvolvida por Fanger. A teoria consiste na previsão da sensação de conforto térmico em ambientes termicamente moderados (Fanger, 1970). Para tal são usados dois índices: o PMV e o PPD. O primeiro índice traduz a votação média previsível dos indivíduos de acordo com a seguinte escala (Tabela 3):

Sensação Térmica	PMV
Escaldante	+3
Quente	+2
Ligeiramente Quente	+1
Neutro	0
Ligeiramente Frio	-1
Frio	-2
Gelado	-3

Tabela 3 - Tabela índice PMV utilizada pelos ocupantes para avaliar a sensação térmica

Fanger desenvolveu a seguinte forma para relacionar o PMV com os fatores acima mencionados:

$$PMV = (0,303 e^{-0.036M} + 0,028) L \quad (1)$$

Em que,

$L$  – Diferença entre a produção interna de calor ( $M$ ) e a perda de calor ( $W$ )

O segundo índice PPD é um indicador da previsão da percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições do ambiente. O PPD pode ser estimado pela seguinte expressão em função do PMV (Fanger 1982).

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

Segundo esta metodologia verifica-se que não é possível satisfazer todos os ocupantes porque mesmo quando  $PMV=0$ , pelo menos 5% das pessoas continuam insatisfeitas. Com base na norma ISO 7730/05 para se obterem condições de conforto, o valor de PPD deverá ser inferior a 15%, o que equivale a valores de PMV entre -0.7 e +0.7.

### **ADI (Air Distribution Index)**

O ADI é um método que estuda a distribuição de ar num determinado compartimento através dos níveis de conforto térmico, qualidade de ar e eficácia de ventilação.

O ADI fornece informações sobre o desempenho do sistema de ventilação, sendo capaz de comparar vários sistemas, com características e taxas de ventilação diferentes. Para o cálculo do ADI é necessário ter em conta dois principais parâmetros: A taxa de remoção de contaminantes e taxa de remoção de calor (Conceição & Awbi, Comfort and airflow evaluation in spaces equipped with mixing ventilation and cold radiant floor, 2013)

Estes dois parâmetros são representados pela eficácia da ventilação na remoção de contaminantes e na remoção de calor,  $\varepsilon_c$  e  $\varepsilon_t$ , respetivamente.

A primeira representa a eficácia de ventilação na remoção de contaminantes tendo em conta a taxa de concentração de  $CO_2$  no espaço e na área de respiração

$$\varepsilon_c = \frac{c_o - c_i}{c_m - c_i} \quad (3)$$

Em que,

$C_o$  - Concentração de contaminantes na extração

$C_i$  - Concentração de contaminantes na insuflação

$C_m$  - Concentração de contaminantes na zona de respiração

A segunda representa a eficácia de ventilação na remoção de calor tendo em conta o diferencial de temperatura de exaustão e insuflação e a temperatura média do corpo humano.

$$\varepsilon_t = \frac{t_o - t_i}{t_m - t_i} \quad (4)$$

Em que,

$t_o$  - Temperatura exaustão

$t_i$  - Temperatura insuflação

$t_m$  - Temperatura média do ar

Para se conhecer o ADI é necessário saber o Numero de Conforto Térmico ( $N_T$ ) e o Numero de Qualidade do Ar ( $N_C$ ). Estas variáveis são calculadas com base nos Índices do Conforto Térmico

$$ADI = \sqrt{N_t \times N_c} \quad (5)$$

Em função do número de conforto  $N_t$  e em função do número de qualidade do ar,

$$N_t = \frac{\varepsilon_t}{PDD} ; N_c = \frac{\varepsilon_c}{PD} \quad (6); (7)$$

Para o cálculo do nível de conforto térmico é utilizado um novo indicador, o PPD (Predicted Percentage Dissatisfied). O PPD é definido como um indicador da previsão da percentagem de pessoas insatisfeitas com as condições do ambiente.

Para o cálculo do nível de qualidade do ar é utilizado o PD (Percentage of Dissatisfied), caracterizado a percentagem de pessoas insatisfeitas com a taxa de ventilação.

#### **4. Modelos de Simulação**

Nesta secção serão apresentados os modelos utilizados nas simulações numérico que permitirão obter resultados sobre o conforto térmico dos ocupantes e a qualidade do sistema de ventilação a implementar.

##### **Modelo da Resposta Térmica de Edifícios (BTR)**

Este modelo numérico é utilizado para simular o comportamento térmico dos edifícios, utilizando equações integrais de balanço de massa e energia.

As equações integrais de balanço de massa são desenvolvidas para o estudo de elementos voláteis como o vapor de água e contaminantes do ar.

As equações integrais do balanço de energia são desenvolvidas para o ar (dentro dos vários compartimentos), para os diferentes vidros das janelas, para os corpos internos (mesas, cadeiras, teto, solo, paredes e outros objetos dentro do espaço). Estas equações são também aplicadas aos corpos principais do edifício, que estão divididos em várias camadas.

Para a resolução deste sistema de equações, é utilizado o método de Runge-Kutta-Fehlberg. Este modelo tem em consideração fenómenos de condução, convecção, radiação e de transferência de massa. A condução é verificada entre os corpos internos do edifício. A convecção é verificada em fenómenos naturais, forçados e mistos e a radiação verificada dentro e fora do edifício em ondas curtas (distribuição real da radiação solar nas superfícies) e nas ondas longas (trocas de calor entre as superfícies externas e internas do edifício). No cálculo da radiação, é considerado o efeito de sombreamento causado pelas superfícies interiores e exteriores e pelos dispositivos de sombreamento. O BTR é um modelo também aplicado no estudo térmico em veículos derivado a semelhança das condições de projeto. Em (Conceição, Da Silva, Andre, & Viegas, 2000), (Conceição & Lucio, 2010), (Conceição E. , Silva, André, & Viegas, 1999) , (Conceição E. , 1996) encontra-se informação teórica sobre o comportamento térmico de veículos e em (Conceição & Lucio, 2010), (Conceição E. , 2003), (Conceição, Silva, & Lucio, 2004), (Conceição & Lucio, 2006), (Conceição, Lucio, & Lopes, 2008), (Conceição & Lucio, 2009),(Conceição, Lucio, & Lopes, 2008) podem ser vistas algumas aplicações deste modelo em veículos e também em edifícios.

Exemplos de estudos de conforto adaptativo, usados através deste modelo, podem ser consultados em (Conceição E. , Lucio, Ruano, & Crispim, 2009),(Conceição, Nunes, Gomes, & Lucio, 2010).

Aplicações deste modelo permitem ainda controlar os sistemas de AVAC como explicado em (Conceição, Gomes, & Ruano, 2018), (Ruano & Ferreira, 2014).

### **Modelo de Simulação Escoamentos (CFD)**

O modelo *Computational Fluids Dynamics* (CFD) simula os escoamentos turbulentos com transmissão de calor e massa, aplicados em fluxos de ar turbulentos tridimensionais em condições permanentes e não isotérmicas. O modelo numérico é utilizado através do método dos volumes finitos para resolver as equações diferenciais parciais. Consideram-se equações diferenciais as de conservação de massa, de energia, de momento, equações relacionadas com a turbulência de escoamentos e por fim equações de concentração de CO<sub>2</sub>. Este método tem como objetivo obter vários resultados que contribuem para o conforto dos ocupantes. Entre eles o QAI (Qualidade do Ar Interior), através no nível de concentração de CO<sub>2</sub>, e os níveis de Risco de Resfriamento e também o DR (Draugh Risk), utilizando a temperatura, velocidade e intensidade da turbulência do ar). Outros métodos de avaliação da qualidade do ar interior em edifícios escolares podem ser consultados em (Conceição & Lucio, 2006), (Conceição, Vicente, & Lucio, 2008), (Conceição E. , Lucio, Vicente, & Rosão, 2008) e em (Conceição, Silva, & Viegas, 1997), (Conceição, Silva, & Viegas, 1997) para métodos que avaliam a qualidade do ar em veículos.

## Modelos de resposta térmica do corpo Humano

O modelo numérico HTC estuda a resposta térmica do corpo humano através das equações integrais do balanço de energia (energia trocada pelo tecido corporal) e das equações integrais do balanço de massa (sangue e transpiração).

A resolução deste sistema de equações é feita usando o método Runge – Kutta – Fehlberg com controlo de erros. Este modelo numérico é usado para calcular os parâmetros humanos (temperatura do tecido corporal, temperatura arterial e venosa do sangue e vapor de água na pele), os parâmetros de vestuário (temperatura e vapor de água) e o nível de conforto térmico.

O estudo do conforto térmico segundo este modelo é feito com base no modelo de Fanger anteriormente referido. Para tal é usado um manequim virtual constituído por 25 elementos, capacitado para estudar o sistema térmico humano, o sistema termorregulador, o vestuário e conseqüentemente o conforto térmico.

Para poder avaliar simultaneamente o nível de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos e o escoamento em torno dos mesmos é utilizada uma filosofia que considera o acoplamento simultaneamente dois *softwares*. Exemplos deste tipo de aplicação pode ser observado em (Conceição E. , Santiago, Lucio, & Awbi, 2018), (Conceição, Lucio, & Awbi, 2013), (Conceição, Rosa, Lucio, Custodio, & Andrade, 2010), (Conceição & Lucio, 2016). Outras exemplos de aplicações deste modelo podem ser consultadas em (Conceição & Lucio, 2011), (Conceição E. , Lucio, Lourenço, & Brito, 2006), (Conceição & Lucio, 2010), (Conceição E. , 2000), (Conceição, Lúcio, & Farinho, 2007), (Conceição E. , 1999), (Conceição & Lucio, 2002), (Conceição & Lucio, 2001)

## 5. Metodologia numérica

Neste trabalho serão calculadas variáveis como temperatura do ar dentro dos espaços, sala e DSF, temperatura das lamelas, temperatura dos vidros, temperatura dos corpos opacos, temperatura interior dos corpos e a massa de contaminantes.

As DSF são usadas na produção de energia e são equipadas com lamelas. O sistema AVAC é construído usando 2 condutas verticais localizadas por cima de cada fila de mesas dos ocupantes.

As três DSF instaladas na camara, voltadas a sul, estão equipadas com duas superfícies transparentes, cada uma com 4mm de espessura e equipadas com 24 lamelas ajustáveis.

O fluxo de ar ascendente nas DSF está ligado a um sistema de tubos que por sua vez, através do sistema AVAC, é injetado para dentro da câmara.

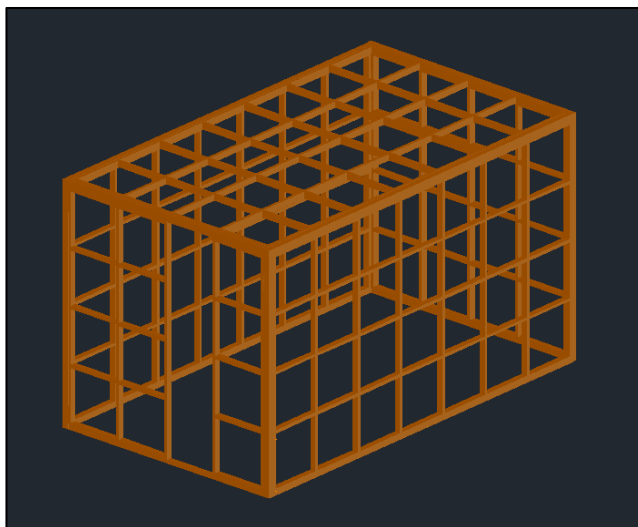
O caudal de insuflação utilizado é de 980 m<sup>3</sup>/h, dividido em 28 jatos descendentes com um caudal aproximado de 35 m<sup>3</sup>/h. A temperatura exterior de projeto é de 7,7 °C.

Na simulação numérica é considerado um dia típico de inverno, ocupação de 12 pessoas entre as 8h e as 12h e entre as 14h e as 18h. Simulação feita durante 24h com céu limpo

## 5.1 Construção da câmara experimental em CAD

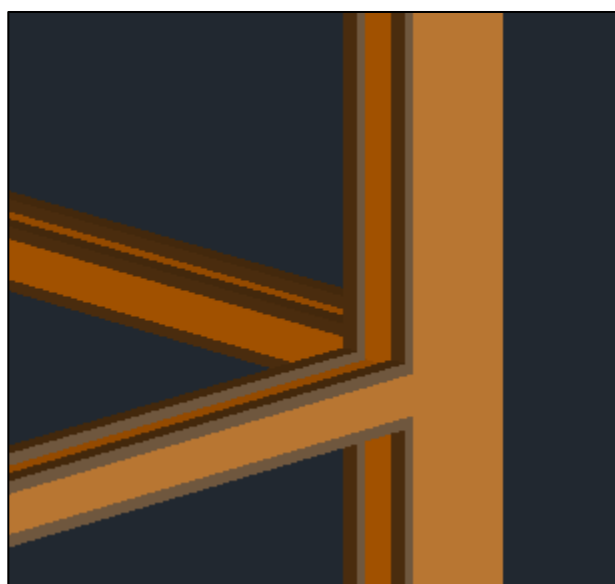
### Construção da estrutura em madeira

A câmara experimental tem 4.5m de comprimento, 2.55m de largura e 2.5m de altura. A Estrutura principal foi construída com barrotes de madeira maciça de 67cm. As quadrículas funcionam como suporte para a instalação das placas de isolamento e janelas (figura 2).



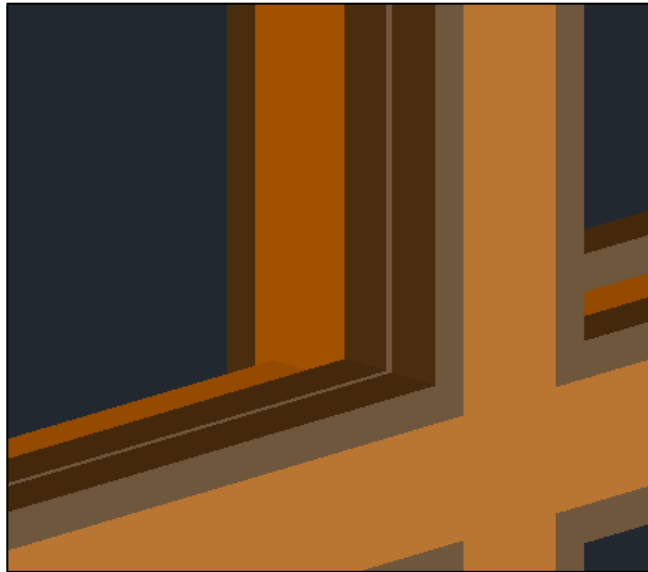
*Figura 2 – Representação da Estrutura Madeira Câmara*

Os bits são pequenas ripas de madeiras auxiliares na fixação das placas de isolamento e das janelas. Na figura 3 é representada pormenor dos bits para a fixação das placas de isolamento



*Figura 3 - Pormenor na construção dos bits para fixação das placas de isolamento*

A figura 4 representa em pormenor bits para fixação dos vidros das janelas. É possível ver que espaçamento entre bits é visivelmente reduzido devido a espessura do vidro



*Figura 4 - Pormenor na construção dos bits para fixação dos vidros das janelas*

### **Fixação das placas isolamento**

O isolamento escolhido para a construção da câmara foram placas de isolamento de poliestireno extrudado de 40mm. Este tipo de isolamento foi selecionado tendo em conta o coeficiente transmissão calor mais equivalente ao de uma parede de alvenaria na construção moderna. Na figura 5 está representado o isolamento já instalado e a forma como é fixado pelos bits.



*Figura 5 - Placas isolamento da estrutura, em poliestireno 40mm*

## Construção das janelas e vidros

As janelas foram construídas em vidro simples com 2mm de espessura, representadas pela figura 6.

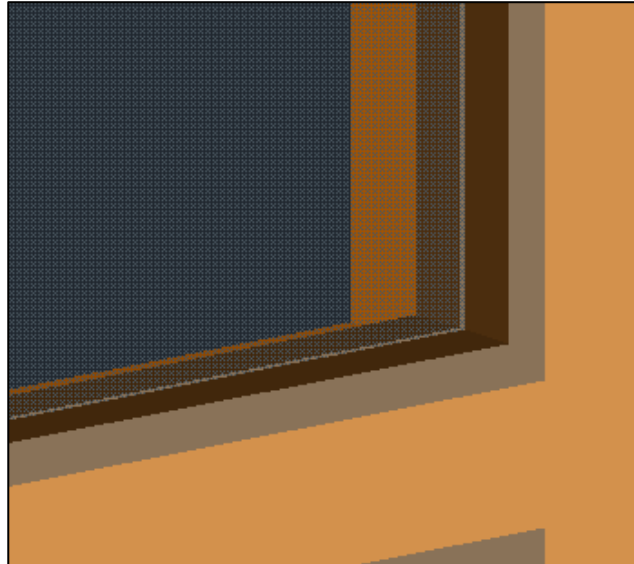


Figura 6 – Representação dos vidros das janelas da câmara

## Estrutura Câmara lado fachada ventilada (DSF)

A parede interior do lado da DSF é composta por 3 superfícies envidraçadas com 2 quadrículas cada. A figura 7 ilustra esse pormenor.

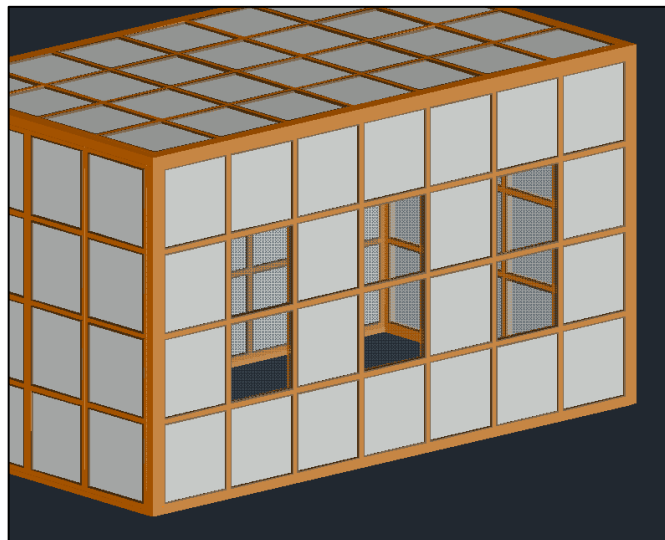
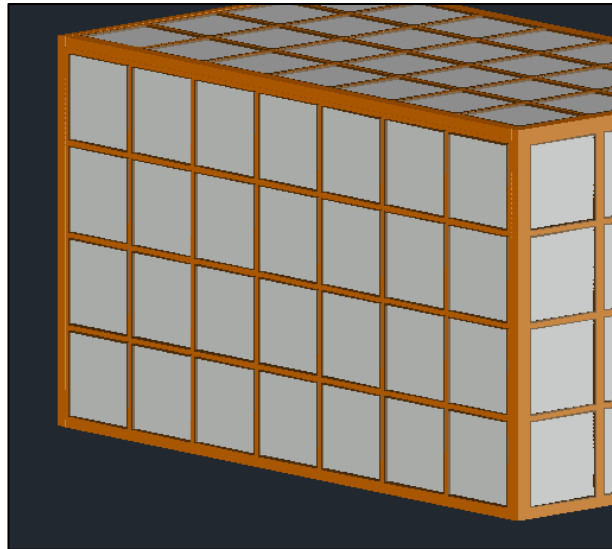


Figura 7 - Vista global do lado onde será construída a fachada ventilada da câmara

### **Estrutura Câmara lado oposto fachada ventilada (DSF)**

Na figura 8 está representada a parede do lado oposto a DSF, totalmente composta por placas de isolamento.



*Figura 8 - Vista global do lado oposto da fachada ventilada da câmara*

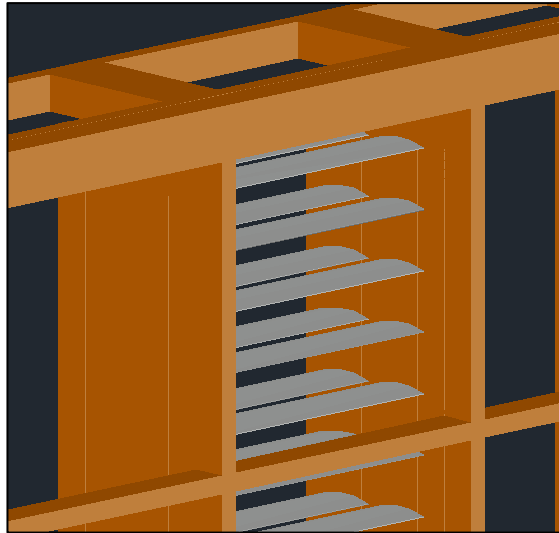
### **Construção fachada ventilada (DSF)**

A fachada ventilada estará dividida em 7 secções (figura 9). 4 Delas serão fachadas simples apenas com isolamento á semelhança das restantes paredes da camara. As outras 3 serão as DSF.



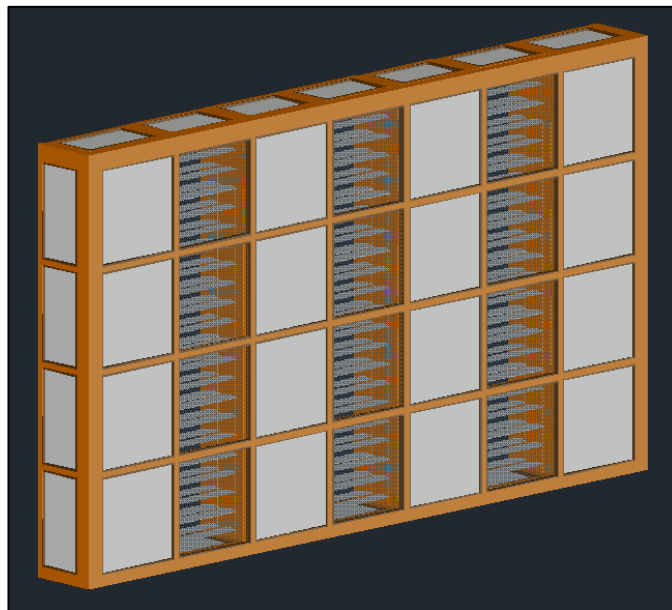
*Figura 9 - Representação da estrutura de madeira da fachada ventilada*

Utilização de 1 filas de lamelas em três colunas para controlar a incidência de radiação solar. Poderá também ser utilizada para o controlo da luz solar dentro da câmara. (Na figura 10 estão representadas duas filas de lamelas, no entanto para a simulação numérica só será contabilizada uma delas).



*Figura 10 - Representação das lamelas na DSF*

O aspeto final da fachada ventilada (figura 11) é composto por 3 secções de envidraçados, responsáveis pela captação da energia solar.



*Figura 11 - Representação da fachada ventilada composta pelas 4 fachadas simples, 3 DSF, lamelas e envidraçados*

## 5.2 Sistema AVAC

### Jatos Descendentes

A ventilação da sala é usada para promover o conforto térmico e boa qualidade do ar para os ocupantes. O sistema de ventilação usado adapta-se tanto para uma situação de verão como de inverno.

Nas estações quentes trabalha com o objetivo de remover o calor em torno dos ocupantes promovendo a circulação do ar e a remoção dos contaminantes da zona de respiração. (Conceição, Santiago, & Awbi, 2016)

O sistema de AVAC é construído por uma rede tubos que percorre longitudinalmente a fachada ventilada com uma picagem em cada secção (figura 12). Com o auxílio de ventilação mecânica o ar é encaminhado para duas condutas retangulares que por sua vez injetam o ar climatizado para dentro da sala. Esta injeção é feita em jatos descendentes, utilizando difusores de ar adequados para o efeito instalados ao longo da conduta.

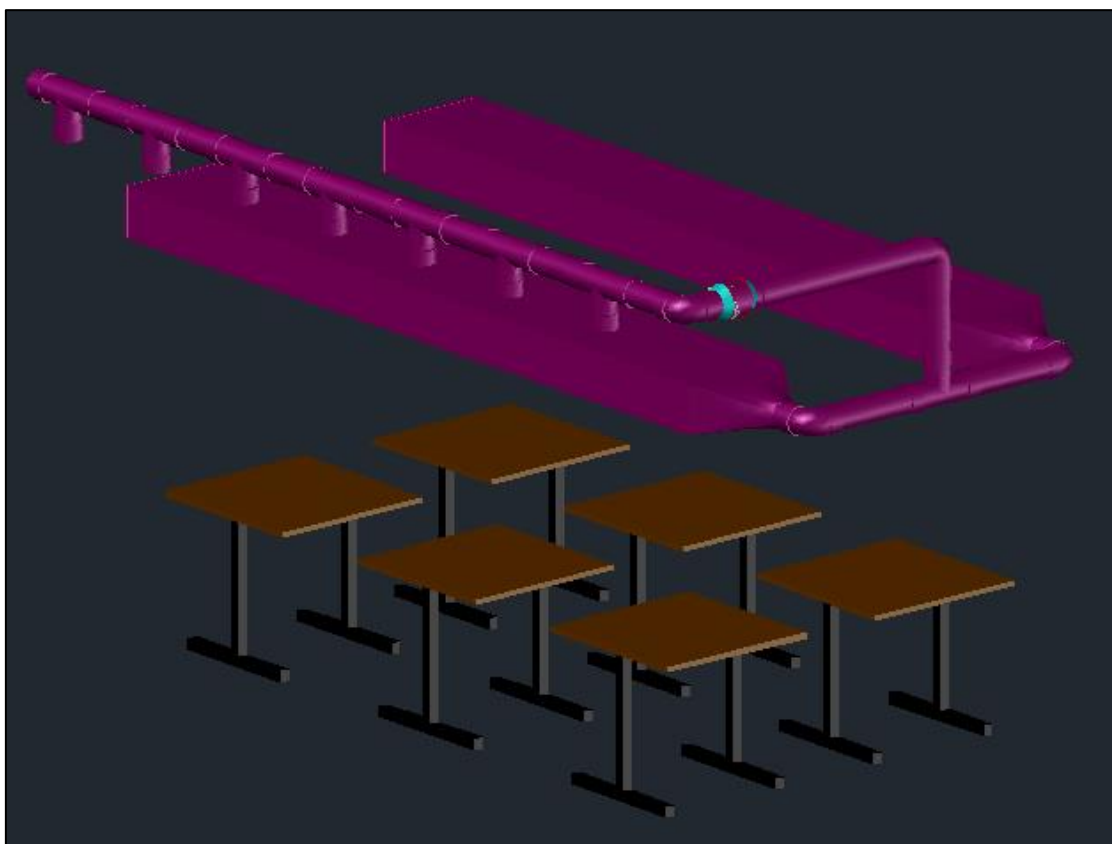
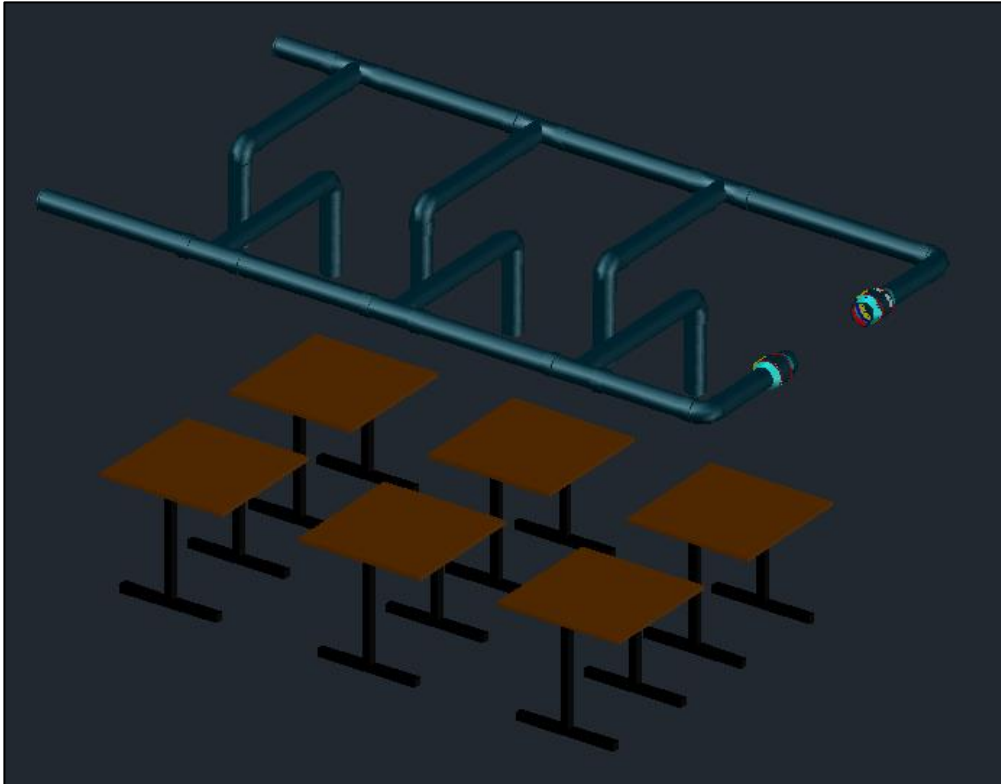


Figura 12 - Representação jatos descendentes e das condutas de admissão de ar proveniente das várias secções da fachada ventilada

### **Conduta Extração da Câmara**

As condutas de extração serão construídas em 2 tubos instalados longitudinalmente junto ao teto da câmara com 3 bocais de extração (figura 12). A conjugação destas duas condutas deverá garantir que os contaminantes sejam removidos pela zona de passagem ou corredor. O sistema é de ventilação é auxiliado por dois ventiladores.



*Figura 13 – Representação das condutas de extração da câmara, ventilação forçada, auxiliadas por dois ventiladores*

### **Conjugação dos sistemas de ventilação implementados**

Um bom sistema de AVAC deverá garantir todas as condições de conforto dos ocupantes, condições essas que dependem mais do que a sensação térmica e temperatura ambiente dos espaços. A noção de conforto conjuga uma serie de fatores (conforto térmico, Qualidade do Ar, Qualidade do sistema de ventilação...), representados no cálculo do ADI.

A difusão do ar representa a parte terminal do sistema de ventilação da instalação, sendo que o conforto dos ocupantes reside na qualidade do ar interior. Este deverá contribuir para um ambiente saudável e extrair o máximo de poluentes.

O sistema implementado deverá garantir a qualidade e temperatura adequada do ar na insuflação e remover as partículas e contaminantes da sala para o exterior. O ar climatizado nas fachadas, através de um sistema de ventilação forçado, é injetado para dentro a sala, diretamente na zona de respiração dos ocupantes.

A insuflação do ar climatizado o mais perto dos ocupantes reduz a probabilidade de perdas térmicas e de qualidade do ar, garantindo que o ar respirado é o mais limpo possível.

Para que o ar na sala permaneça o mais limpo e livre de contaminantes é necessário que o sistema de extração instalado faça um bom varrimento do ar até a zona exaustão. A localização dos bocais de extração estão localizadas de forma a obrigar o ar a circular no sentido das mesas para o corredor, arrastando consigo os contaminantes produzidos pela respiração dos ocupantes (CO<sub>2</sub>).

A velocidade de ventilação é outro fator que foi cuidadosamente analisado. Na insuflação tem de ser garantido que o ar limpo chega até aos ocupantes com a qualidade desejada, no entanto não poderá excessiva pois poderá provocar algum desconforto. Por sua vez a velocidade na extração terá de ser de tal ordem que faça o varrimento dos contaminantes sem prejudicar a qualidade do ar insuflado. Se não houver estes cuidados na implementação do sistema e no controlo da velocidade do ar poderá acontecer o ar insuflado para dentro da sala ser imediatamente extraído para o exterior, sem chegar até aos ocupantes, o que revela a ineficácia do sistema e uma má qualidade do ar no interior da sala, mais concretamente na zona de respiração. A figura 14 representa os dois sistemas de ventilação implementados. Os jatos descendentes incidem sobre os ocupantes e sobre as mesas e extraído na zona do corredor através das condutas verticais instaladas. Esquemáticamente apesar de não ser possível visualizar, a câmara é ocupada por 12 ocupantes, sentados 2 em cada mesa, voltados para a porta da câmara, ou seja, segundo esta orientação a fachada ventilada ficará do seu lado esquerdo.

Na figura 15 é visível a simetria e a localização das condutas na sala, projetadas para que a distribuição do ar seja o mais uniforme possível.



Figura 15 - Representação dos sistemas de ventilação implementados na câmara

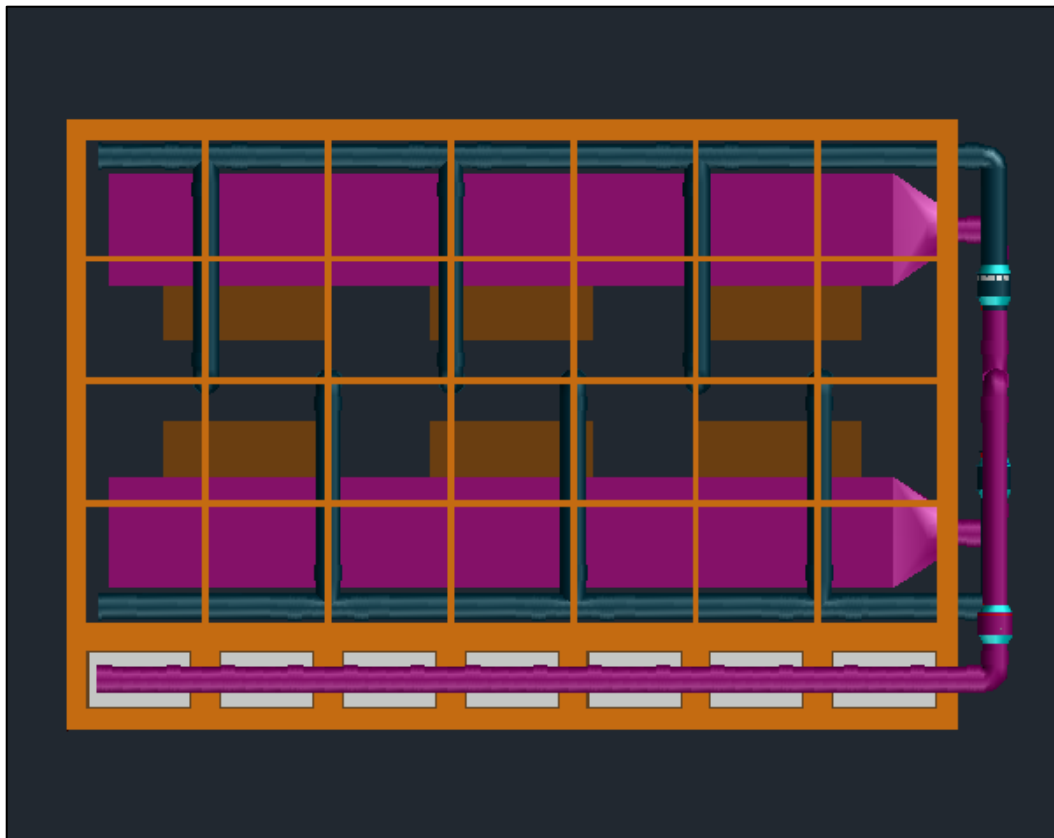
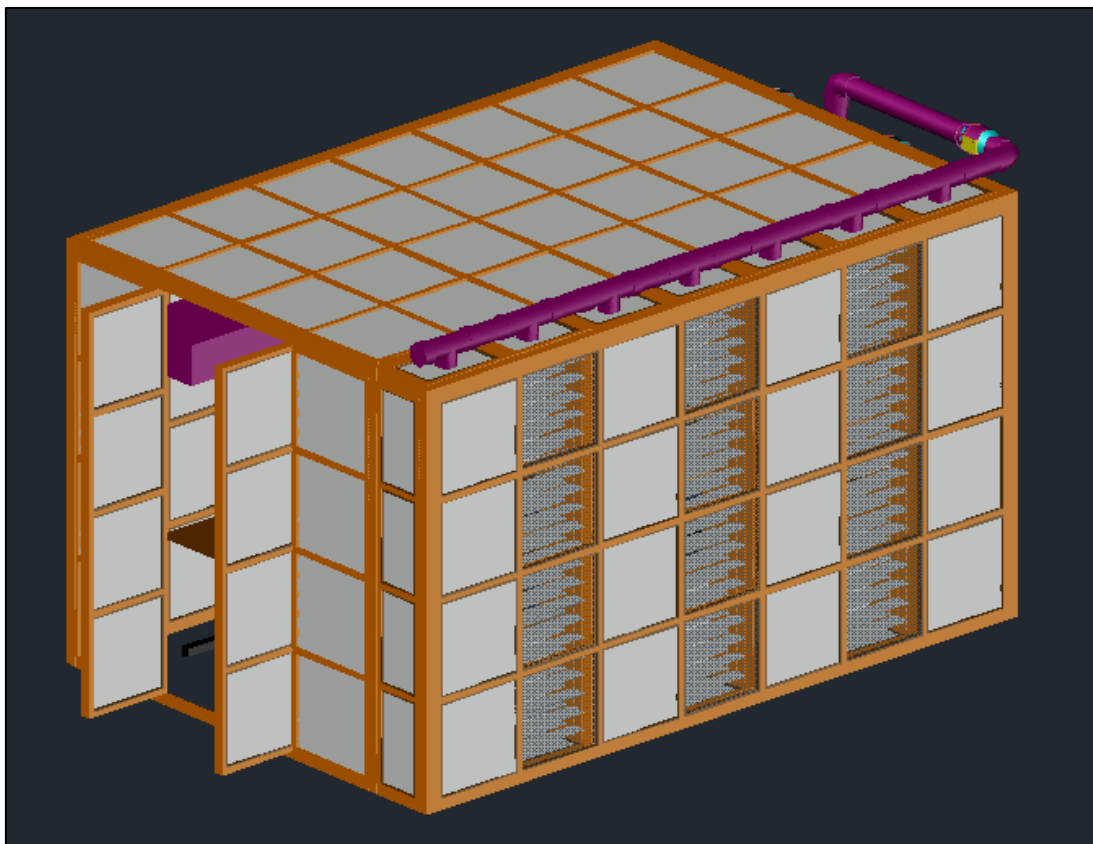


Figura 14 - Representação dos sistemas de ventilação da câmara com vista de topo

Conjugando todos os sistemas e todas as etapas de construção da câmara teremos o aspecto final semelhante a da figura 16.



*Figura 16 - Representação final e detalhada da câmara com fachada ventilada*

## 6. Análise e discussão de resultados

Neste parágrafo será feita a análise dos resultados obtidos nas simulações numéricas. De referir que a introdução de dados nos *softwares* de simulação foram previamente realizados antes desta análise. As localizações dos corpos, fachadas e objetos nos ficheiros de importação tiveram como pontos de referência com base os desenhos CAD acima já demonstrados.

### 6.1 Análise da simulação para “Mistura Perfeita” utilizando o método do BTR

A primeira simulação levada a cabo neste projeto tem por base a consideração de uma mistura perfeita do ar na sala, em que todos os pontos de análise espalhados pelo espaço são iguais e homogéneos.

#### Análise da evolução da Concentração de CO<sub>2</sub>

Em primeira análise é graficamente visíveis dois picos de elevadas concentrações de CO<sub>2</sub>. Isto deve-se ao facto de corresponder ao período em que a sala está ocupada, entre as 8h e as 12h, e novamente entre as 14h e as 18h. Ainda assim os valores estão bem abaixo do máximo permitido, cerca de 1800 mg/m<sup>3</sup> (ASHRAE 65). Entre os dois períodos de ocupação da sala é possível verificar a queda na concentração de CO<sub>2</sub>, revelando a eficácia do sistema de ventilação na renovação do ar e na remoção de contaminantes.

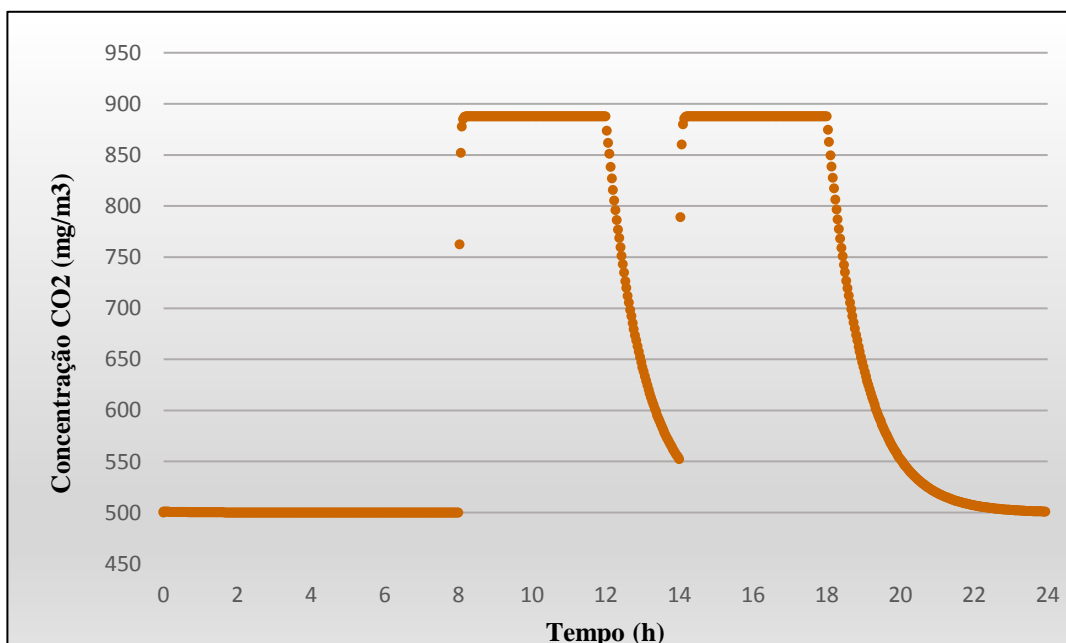


Figura 17- Gráfico de evolução de Concentração de CO<sub>2</sub> para uma simulação de "mistura perfeita"

## Análise da evolução da Temperatura do Ar na Sala: Fachada Simples VS DSF

Desta maneira é feita mais uma análise as variáveis em estudo, concretamente a temperatura do ar registada dentro da sala e por consequente a comparação com a temperatura do ar produzido nas fachadas.

A temperatura da sala será vista como sendo a de referência, analisando a influência da das fachadas na produção de calor.

A primeira análise (figura 19) é feita para a fachada simples, onde se verifica que a exposição á radiação solar é determinante para o aumento da temperatura. A temperatura da sala permanece constante durante todo o período noturno, começando gradualmente a subir a partir das 8 horas. A partir das 12h a temperatura sobe de forma considerável, cerca de 10°C em apenas 2 horas.

Após o pico solar das 14 horas tanto a temperatura da fachada com a da sala começam a diminuir como previsto.

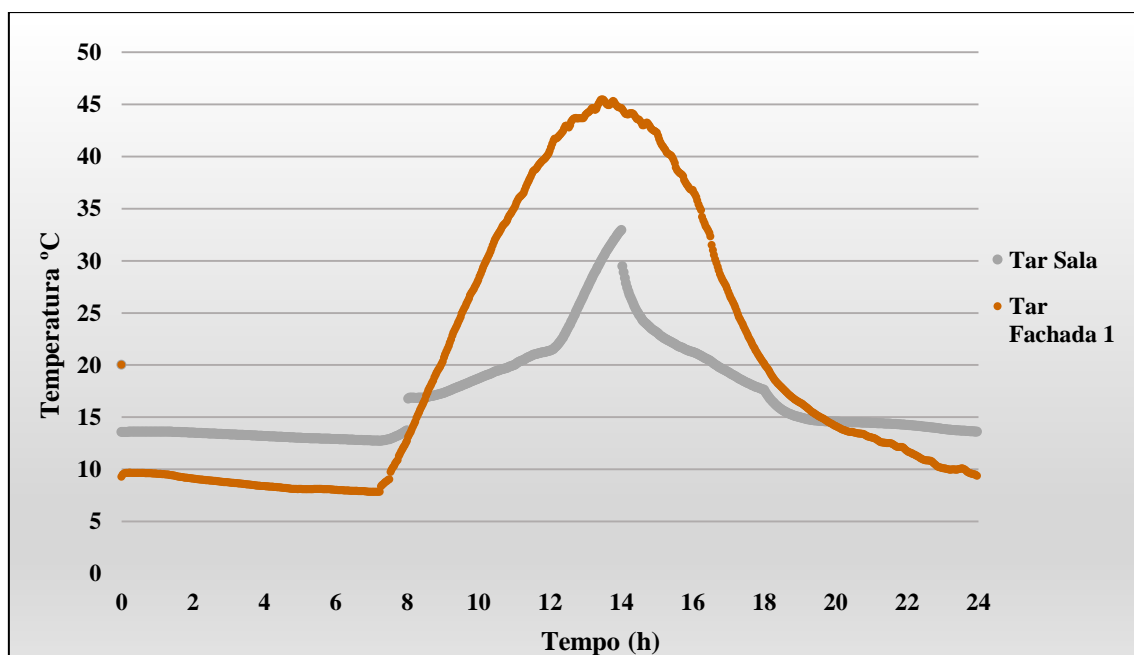


Figura 18 - Análise temperatura do ar Sala e Fachada Simples para uma simulação de "mistura perfeita"

Quanto a análise de temperatura da fachada DSF (figura 20), em comparação com a fachada simples, só é possível identificar diferenças quando há incidência direta da radiação solar nos vidros. Ou seja, até as 12 horas considera-se que a fachada DSF esteve a sombra e que só a partir dessa hora é o sol começou a entrar pelos vidros. Nesse período até as 14h verifica-se o crescimento exponencial da temperatura da fachada DSF, que, em conjunto com as fachadas simples, contribuíram para um maior aumento da temperatura da sala.

Após as 14 horas a fachada DSF torna a ficar a sombra provocando a diminuição abrupta da temperatura.

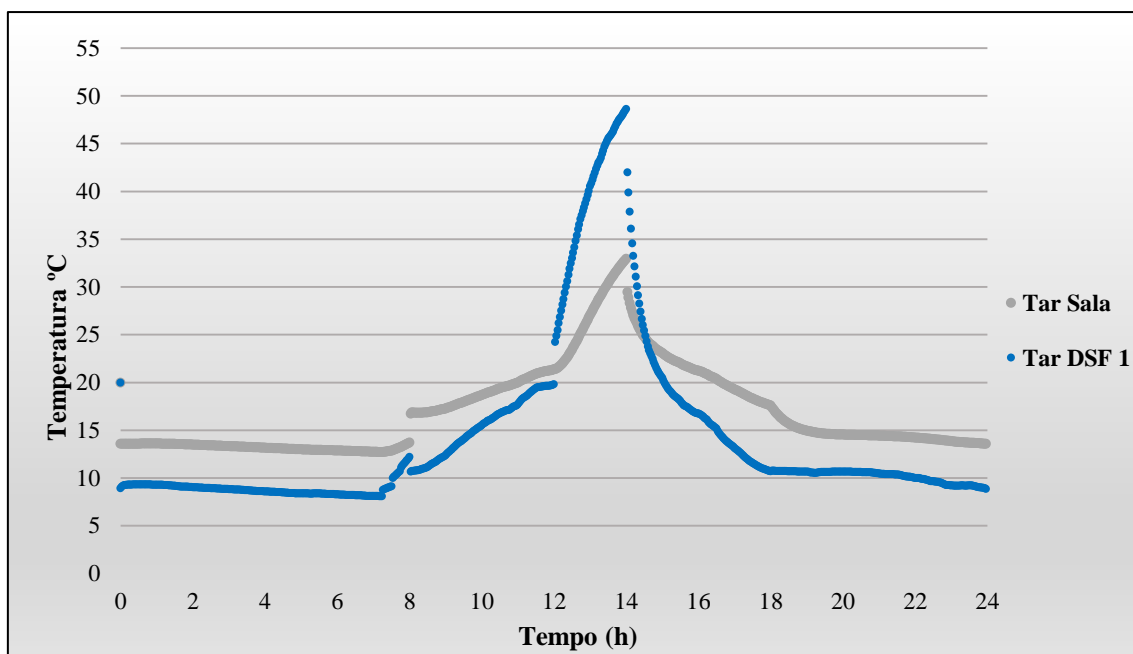


Figura 19 - Análise temperatura do ar Sala e Fachada DSF

## Análise PMV

O PMV é o método que analisa o conforto térmico dos ocupantes com base numa votação de valores em escala feita pelos próprios ocupantes. Como este estudo é feito tendo em conta simulações numéricas essa votação não é feita com testemunhos reais mas pode ser estimada através das fórmulas já conhecidas.

Assim sendo a aplicação na estação de inverno terá um gráfico semelhante ao obtido através dos métodos empíricos (figura 21). A análise feita a partir das 00:00h estima que até ao nascer do sol, altura em que começa a haver incidência da radiação solar nas fachadas, o PMV apresenta resultados negativos, isto é, os ocupantes sentem frio ou frio moderado.

Ao longo do dia até ao sol atingir o seu expoente máximo às 14 horas o PMV cresce quase exponencialmente, conseguindo obter valores ótimos a partir das 12 horas. No ponto de PMV máximo os ocupantes nunca chegaram a sentir algum desconforto térmico, permanecendo em valores ótimos até às 16 horas. Naturalmente com a exposição solar a diminuir o PMV começa a descer e a aproximar-se dos valores noturnos já registados no início da simulação.

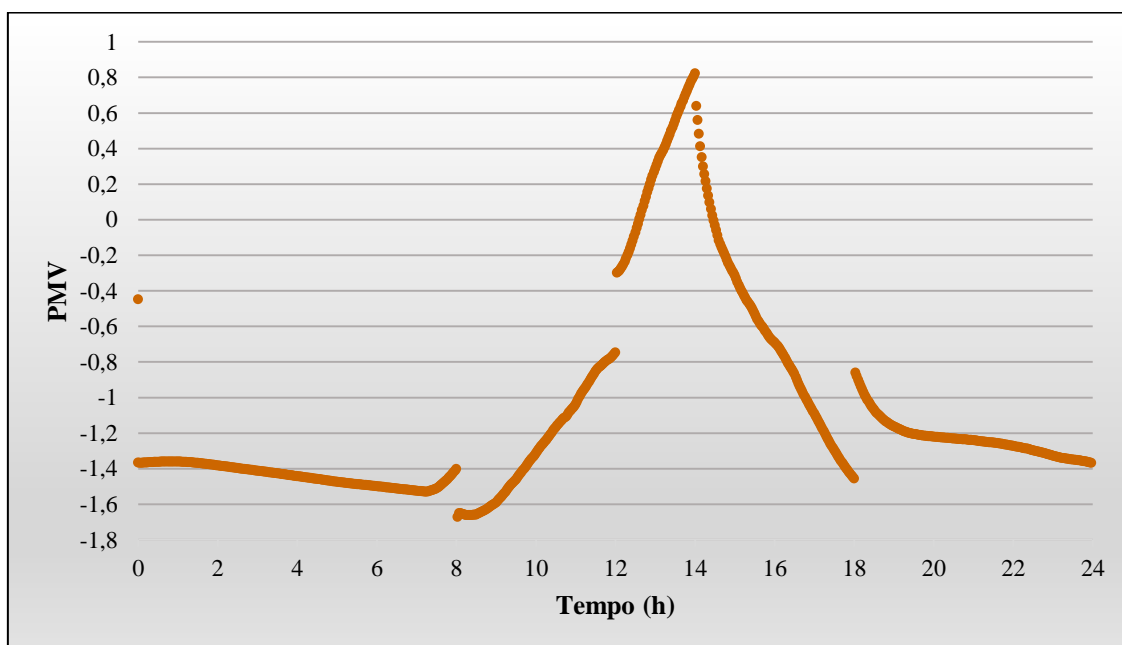


Figura 20 – Gráfico evolução do valor do PMV em condições de Inverno para uma simulação de “mistura perfeita”

## 6.2 Análise da simulação para os jatos descendentes

### Análise da Concentração CO<sub>2</sub> na área de respiração

A concentração de CO<sub>2</sub> na zona de respiração é outra variável importante na análise do conforto térmico dos ocupantes.

Foram realizadas novamente 4 amostras em 4 períodos diferentes, 8 horas (figura 22), 12 horas (figura 23), 14 horas (figura 24), 18 horas (figura 25), com uma análise evolutiva final (figura 26).

Graficamente os resultados divergem entre ocupantes, apesar de serem em termos qualitativos praticamente desprezáveis.

Na análise conjunta aos 4 gráficos, ou apenas ao gráfico da figura 20, conclui-se que a concentração para cada ocupante foi constante ao longo do período da simulação.

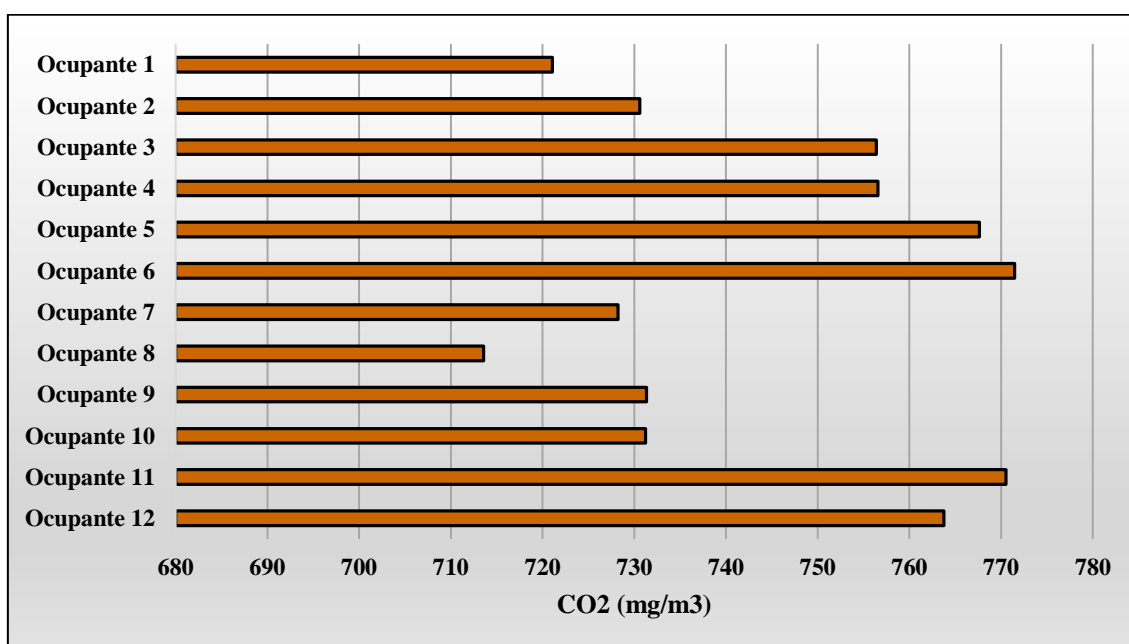


Figura 21 - Distribuição do valor da Concentração de CO<sub>2</sub> às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

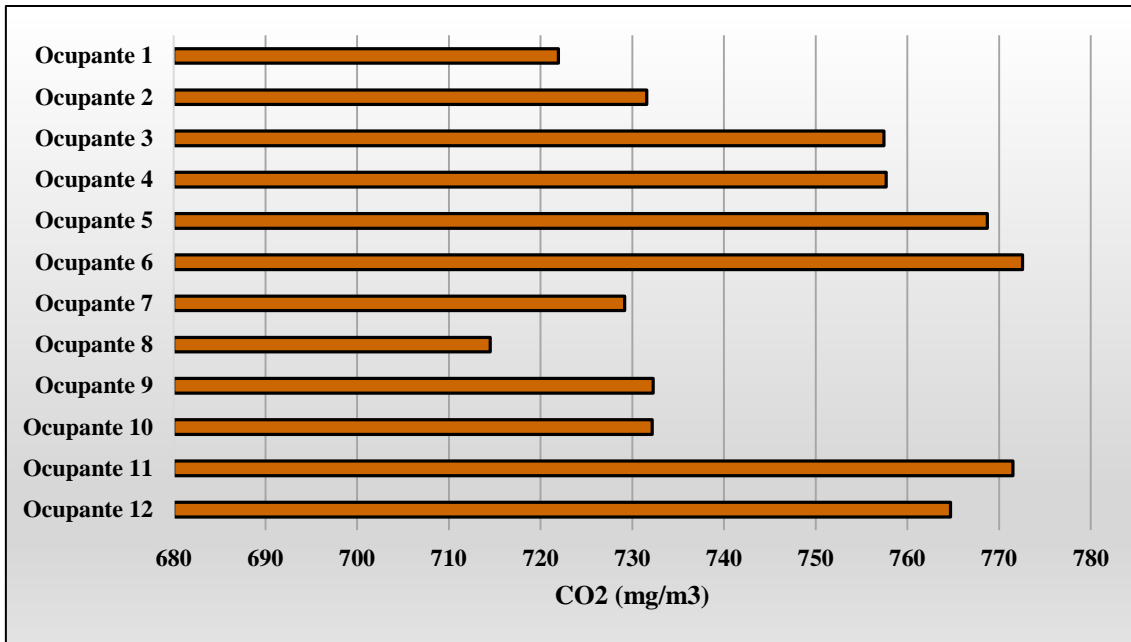


Figura 22 - Distribuição do valor da Concentração de CO2 às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

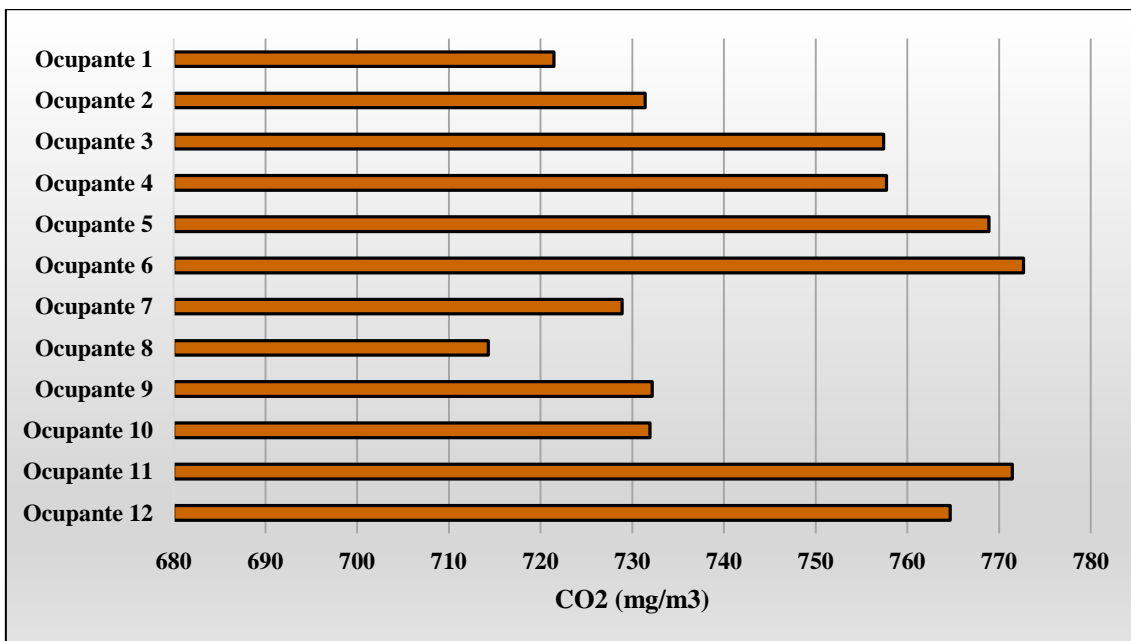


Figura 23 - Distribuição do valor da Concentração de CO2 às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

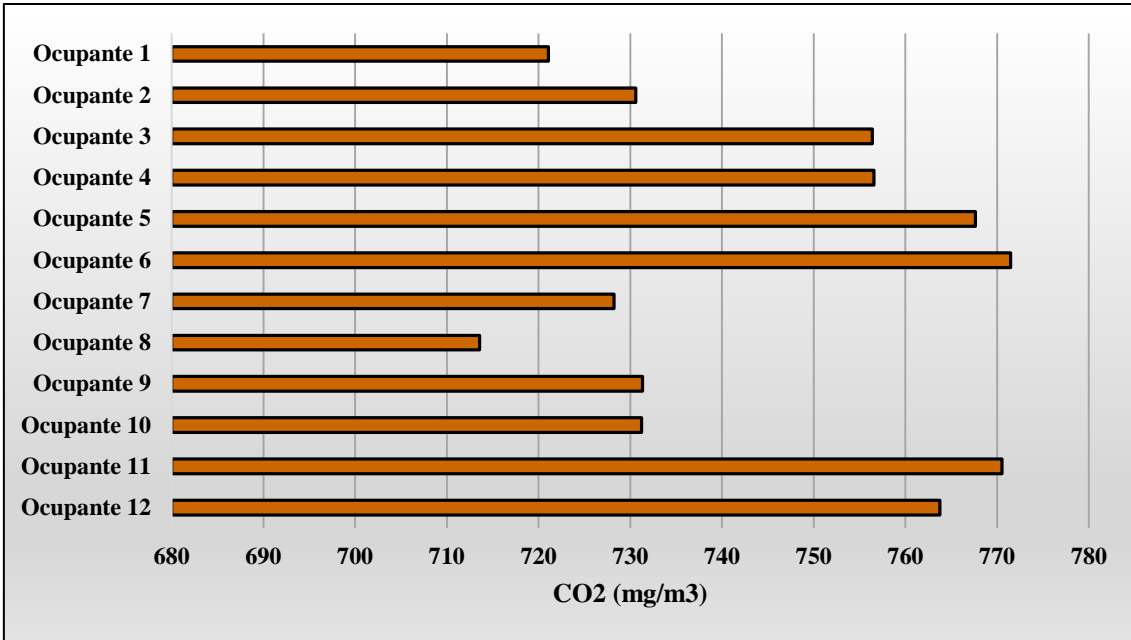


Figura 24 - Distribuição do valor da Concentração de CO<sub>2</sub> às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

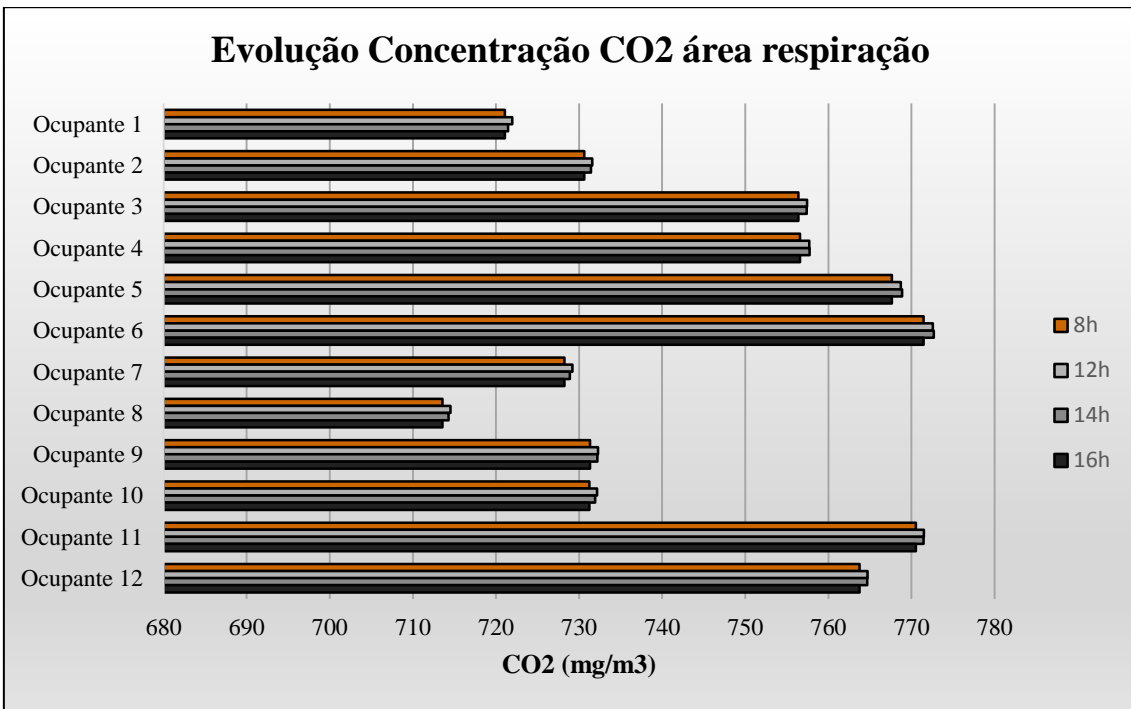


Figura 25 – Evolução da Concentração de CO<sub>2</sub> para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno

## Análise do PPD

A análise do PPD nas amostras das 8 horas (figura 27), a primeira da manhã, demonstra que os índices são praticamente uniformes, existindo no geral apenas uma diferença percentual na ordem de 1,5%. Em primeira análise verifica-se que o “Ocupante 1” apresenta maior desconforto ao invés do “Ocupante 6” que aparenta estar termicamente mais confortável.

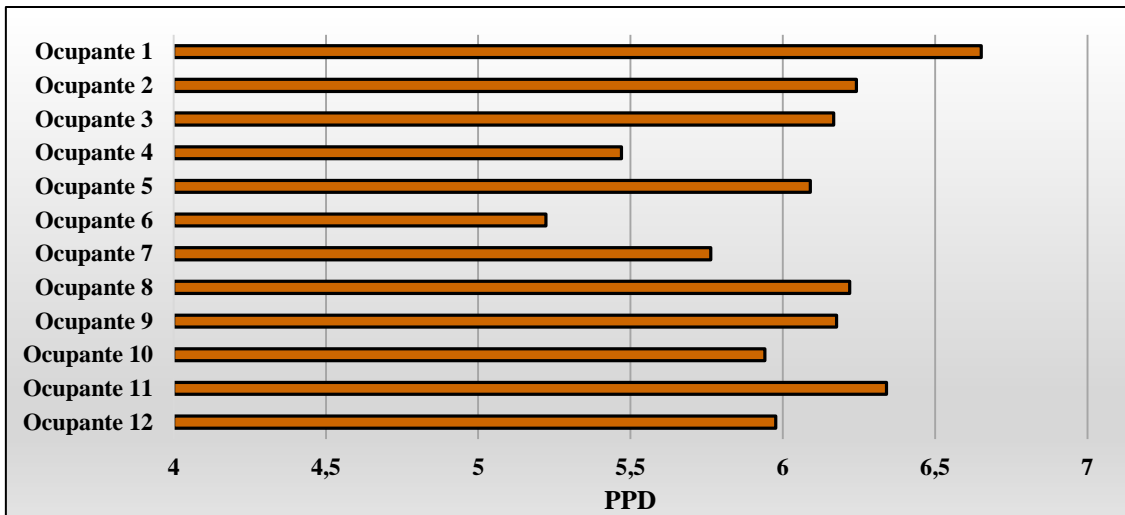


Figura 26 - Distribuição do valor PPD às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

A análise do PPD nas amostras das 12 horas (figura 28), revela que os ocupantes com maior nível de satisfação na análise das 8 horas são agora os que demonstram estar desconfortáveis. Gráficamente podemos concluir que neste caso já existe mais discrepância de resultados.

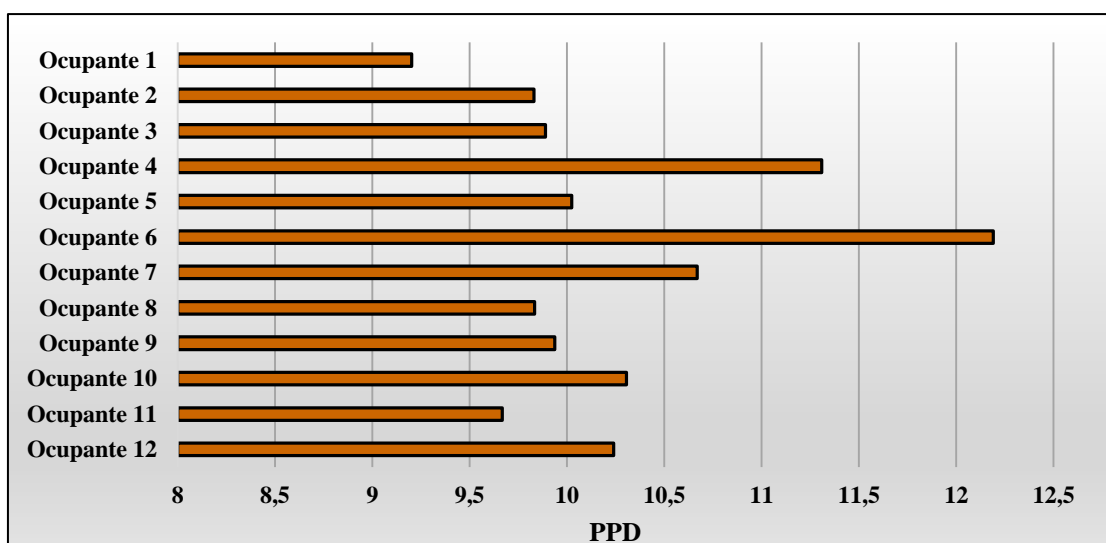


Figura 27 - Distribuição do valor PPD às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

O aumento da exposição solar da fachada ventilada obriga forçosamente ao incremento da temperatura do ar injetado na sala. Em comparação com os dois períodos já analisados é de estimar que o desconforto dos ocupantes cresça consideravelmente. O gráfico da figura 29 ilustra precisamente essa situação, onde é possível verificar que todos os ocupantes se encontram termicamente desconfortáveis, com o crescimento até cerca de 71%, mais 60% do que verificado anteriormente. Fazendo uma abordagem comparativa entre ocupantes verifica-se que uma oscilação de 0,5% não permite distinguir o nível de conforto dos mesmos.

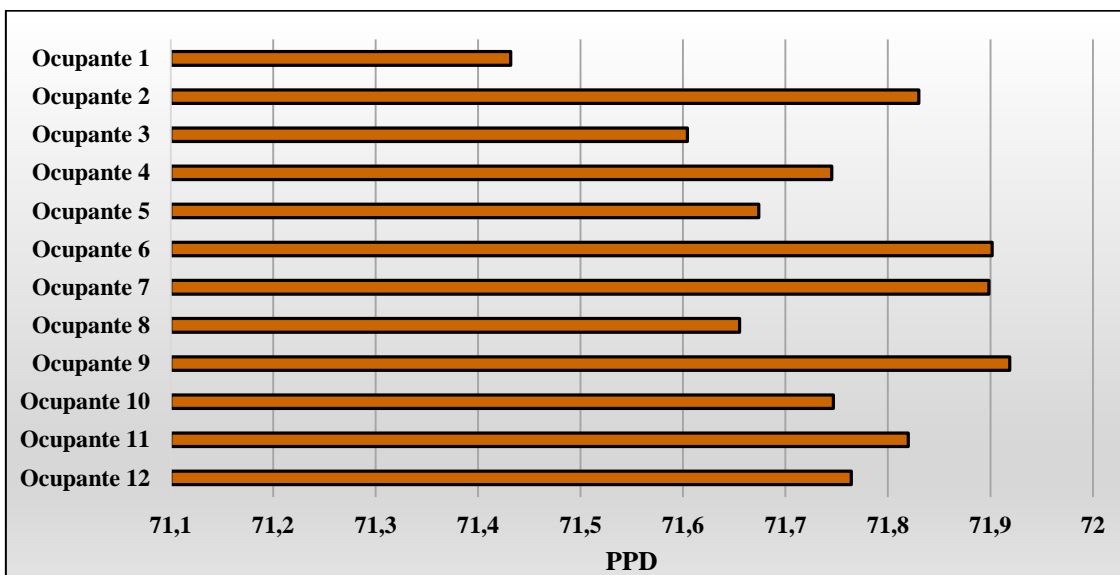


Figura 28 - Distribuição do valor PPD às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

Na análise final do dia (figura 30), voltamos a ter resultados idênticos a primeira análise, em que a exposição solar é fraca e onde se espera que o nível de desconforto voltem a baixar. Novamente o “Ocupante 6” é que se encontra termicamente mais confortável, tendo uma diferença percentual de 1,5% para o mais desconfortável, o “Ocupante 1”.

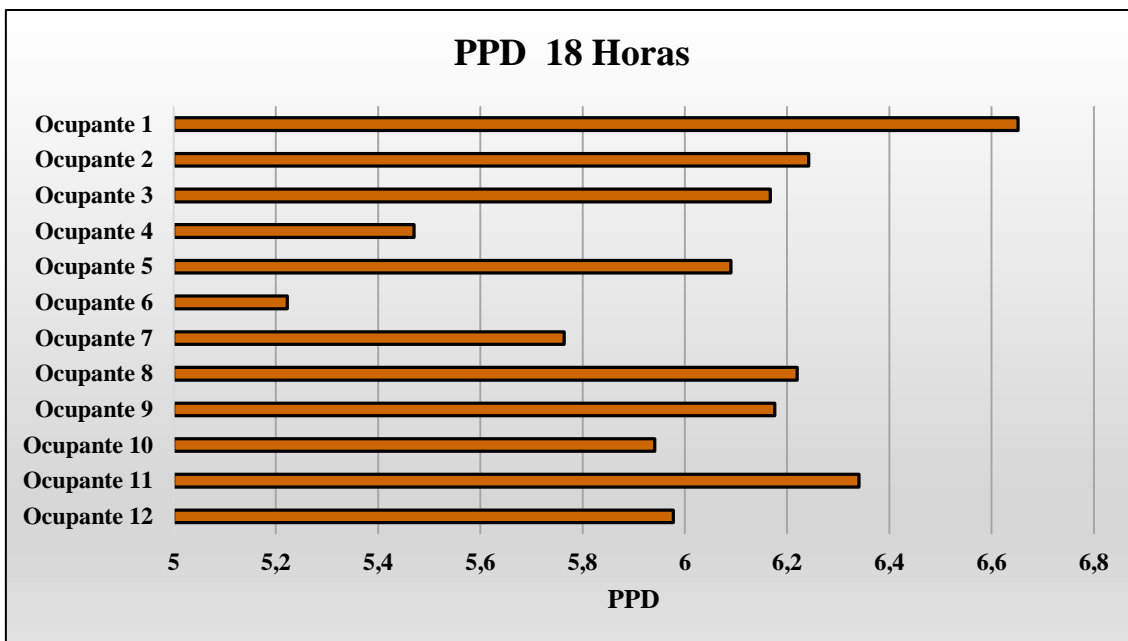


Figura 29 – Distribuição do valor PPD às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

Na análise global aos 4 períodos (figura 31), constata-se que a exposição solar da fachada ventilada tem uma relação direta com o aumento do desconforto dos ocupantes da sala. Neste gráfico da figura 31 para que fosse legível a sua interpretação foi assumido um valor máximo no PPD de 14%. Os resultados não visíveis prejudicam a interpretação por terem valores de PPD muito elevados, perto dos 70%.

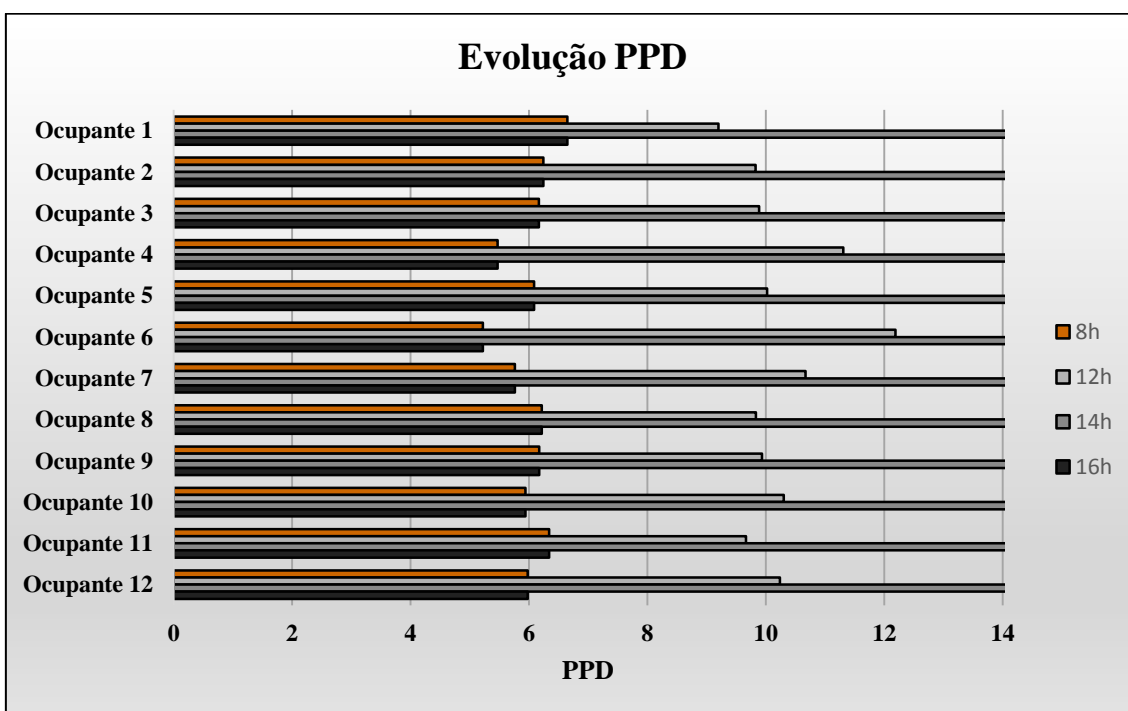


Figura 30 - Evolução do valor PPD para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno

### Análise do número de conforto térmico

Os resultados da análise ao conforto térmico dos ocupantes deverá ser inversamente proporcional aos resultados obtidos no PPD.

Quando os níveis de desconforto diminuem isso reflete naturalmente um aumento do nível de conforto térmico.

A análise do conforto térmico às 8 horas (figura 32) reflete tal como esperado um nível de conforto superior para o “Ocupante 6”, mas aqui também a aparecer o “Ocupante 4” com condições de conforto favoráveis, com resultados muito próximos entre si. Os ocupantes “1” e “2” são nesta primeira abordagem os que apresentam um nível de conforto térmico mais baixo, sendo que não significa que não estejam termicamente confortáveis.

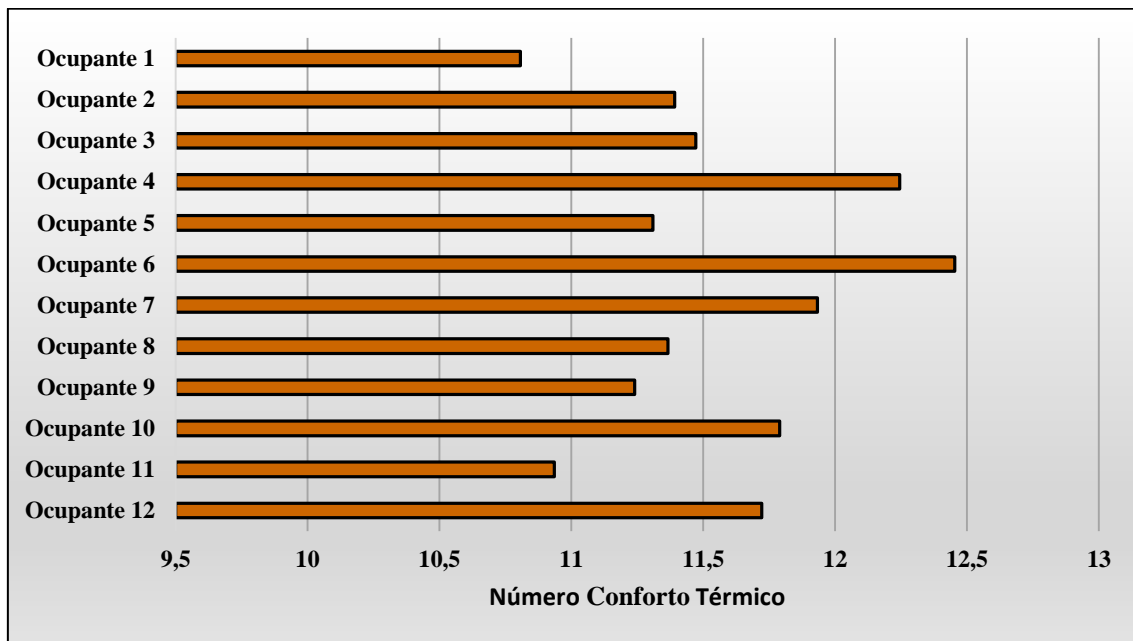


Figura 31 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

Na análise do conforto térmico as 12 horas (figura 33), verifica-se no geral que todos os ocupantes se encontram termicamente mais desconfortáveis.

Ao fazer a comparação neste exato periodo entre todos os ocupantes, verifica-se que o nível de conforto do “Ocupante 6” baixou consideravelmente, tornando-o o mais desconfortável entre os restantes. Em contrapartida o “Ocupante 1” apesar de também ter baixado o nível de conforto térmico é o que se apresenta com melhores índices.

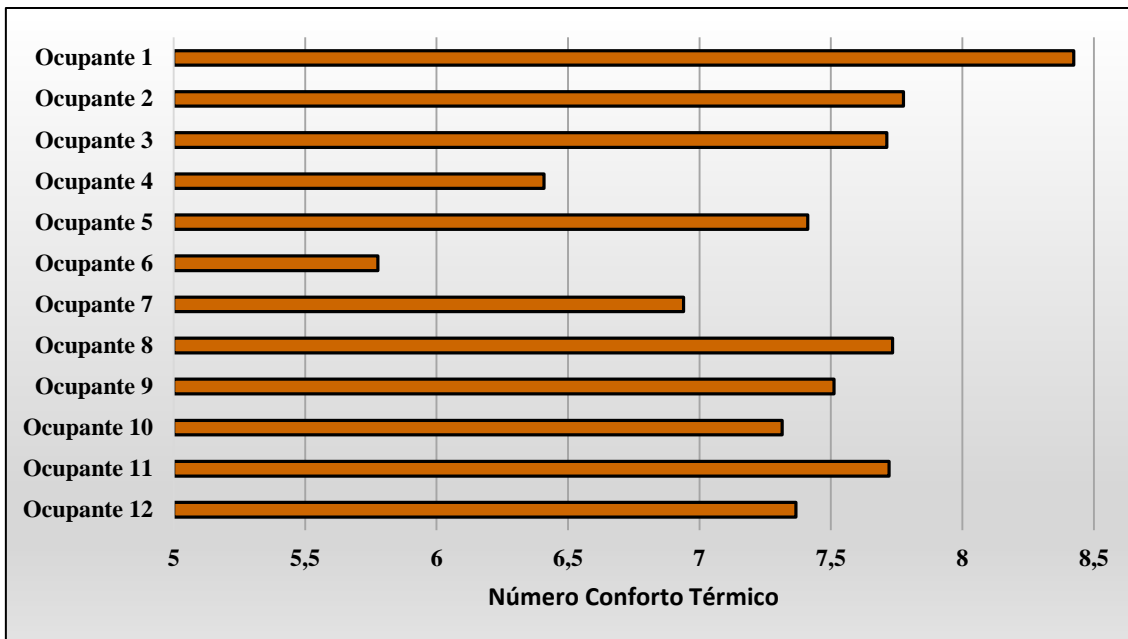


Figura 32 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

Tal como esperado a análise das 14 horas (figura 34) é a mais desfavorável para os ocupantes com os níveis de conforto térmico a baixarem drasticamente. Isto sugere que a temperatura na sala está muito alta, provocada pela elevada exposição solar da fachada ventilada. Às 18 horas (figura 35) os níveis de conforto térmico voltam a aumentar após a redução de exposição solar. Começa a tornar-se evidente a semelhança entre os resultados obtidos às 8 horas e às 18 horas.

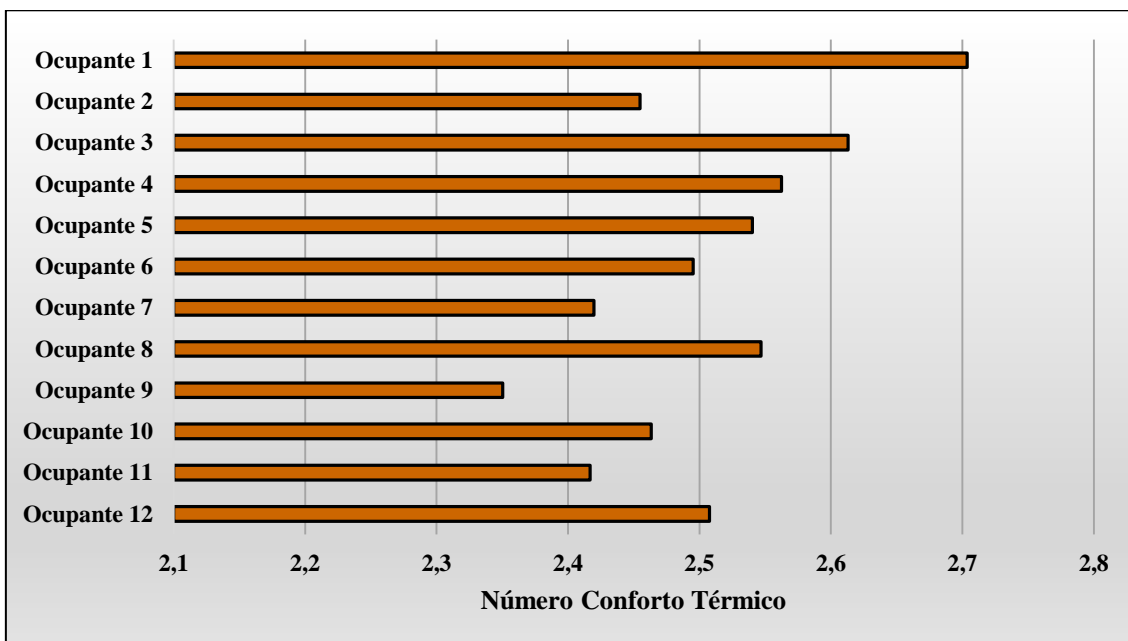


Figura 33 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

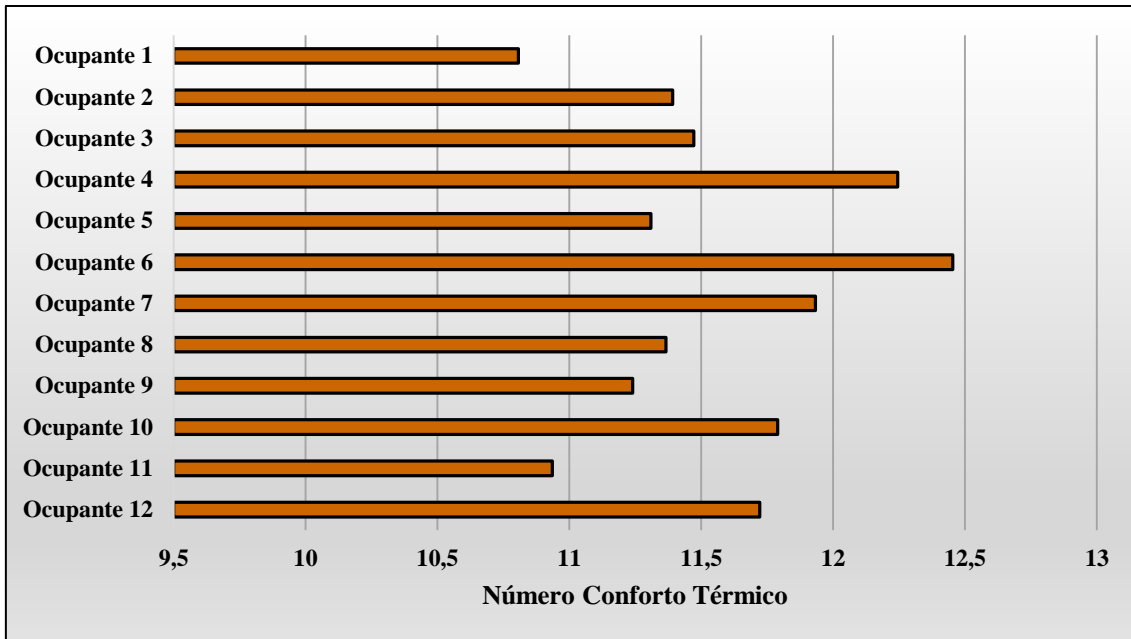


Figura 34 - Distribuição do valor Conforto Térmico às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

O gráfico de evolução do NTC (figura 36) resume as 4 amostragem do período da simulação, verificando-se facilmente que as horas de menor calor traduzem um conforto termico mais favoravel aos ocupantes.

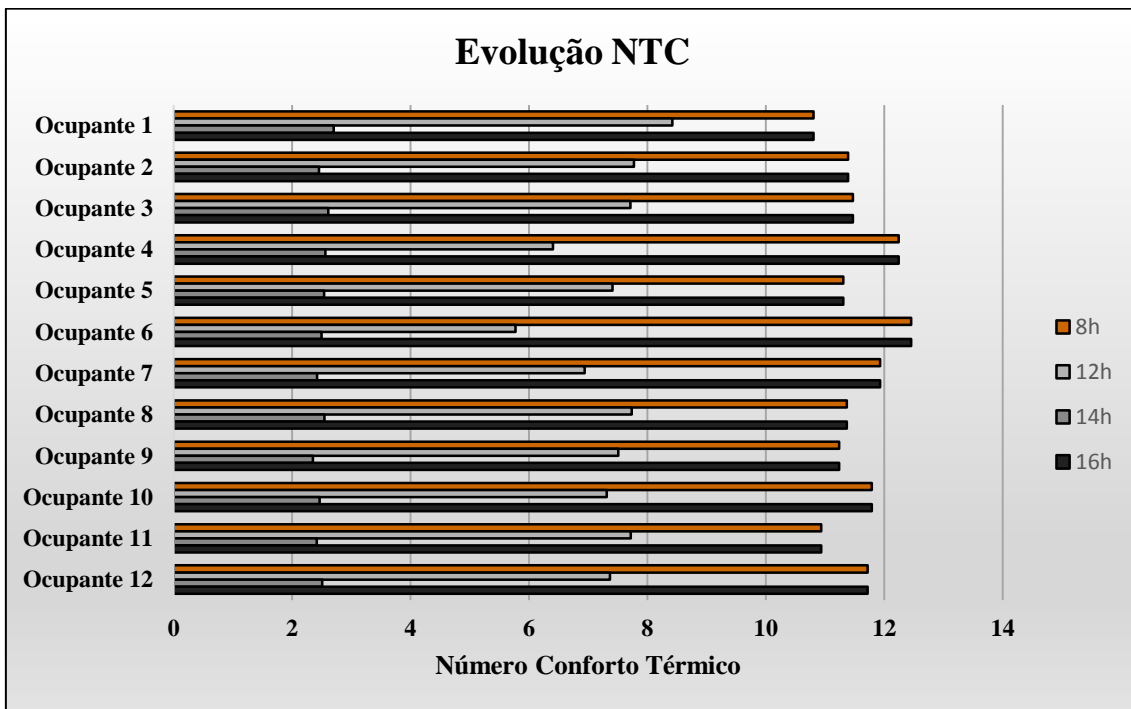


Figura 35 - Evolução do Conforto Térmico para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno

### Análise do ADI (Air Distribution Index)

O ADI sendo um método que conjuga os resultados obtidos pela análise a qualidade do ar e a eficácia do sistema de ventilação para a obtenção dos níveis de conforto térmico dos ocupantes é de estimar que exista correlações entre gráficos, neste caso entre os anteriormente analisados e os gráficos do ADI.

A análise ao período das 8 horas (figura 37) demonstra que novamente o “Ocupante 6” e o “Ocupante 4” têm as condições mais favoráveis, no entanto a discrepância de resultados fixa-se abaixo de 1 unidade ADI

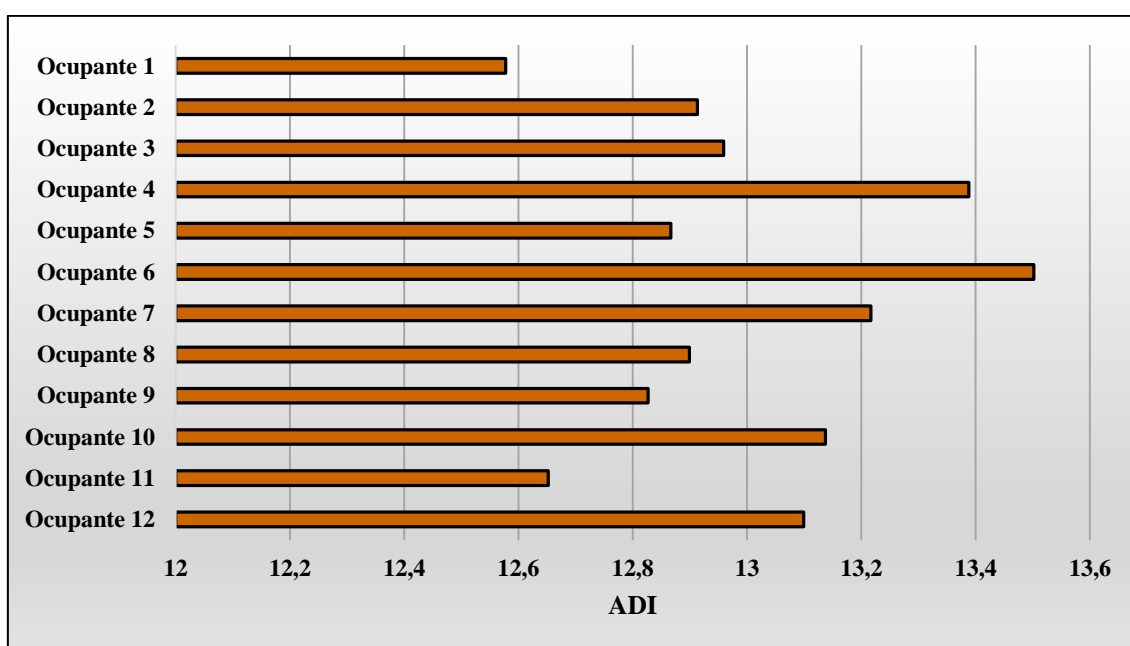


Figura 36 - Distribuição do valor ADI às 8 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

A análise do ADI às 12 horas (figura 38) revela resultados semelhantes aos do conforto térmico e do PPD com o “Ocupante 1” a ser neste caso o que apresenta os melhores índices do ADI. Espectável eram os resultados do ADI as 14 horas (figura 39), onde diminuíram quase todos para metade face a primeira análise.

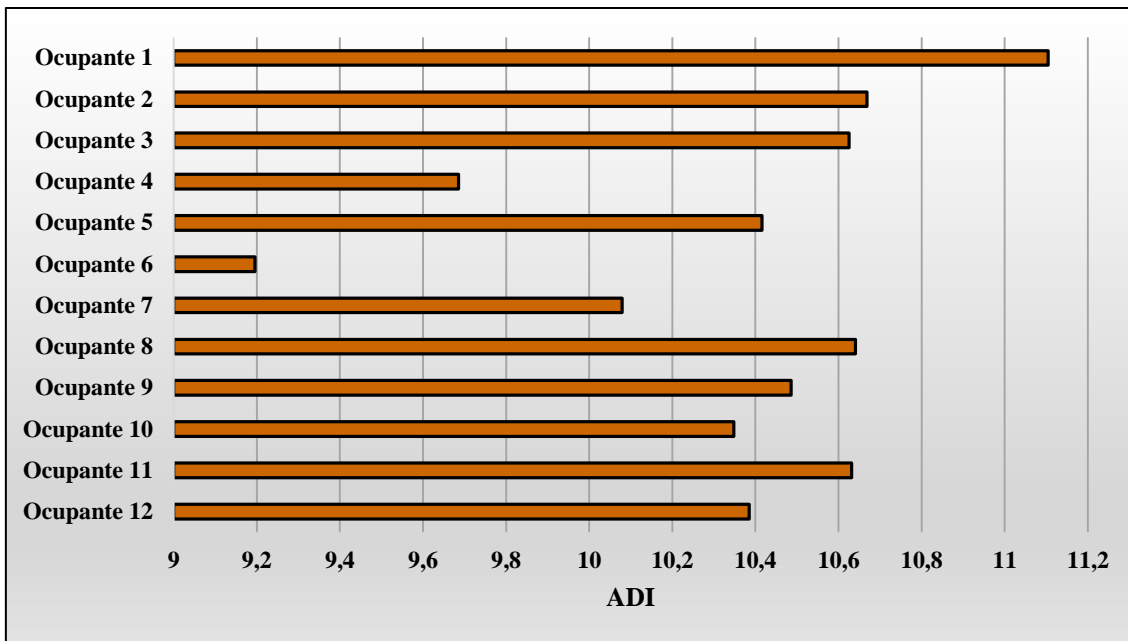


Figura 37 - Distribuição do valor ADI às 12 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

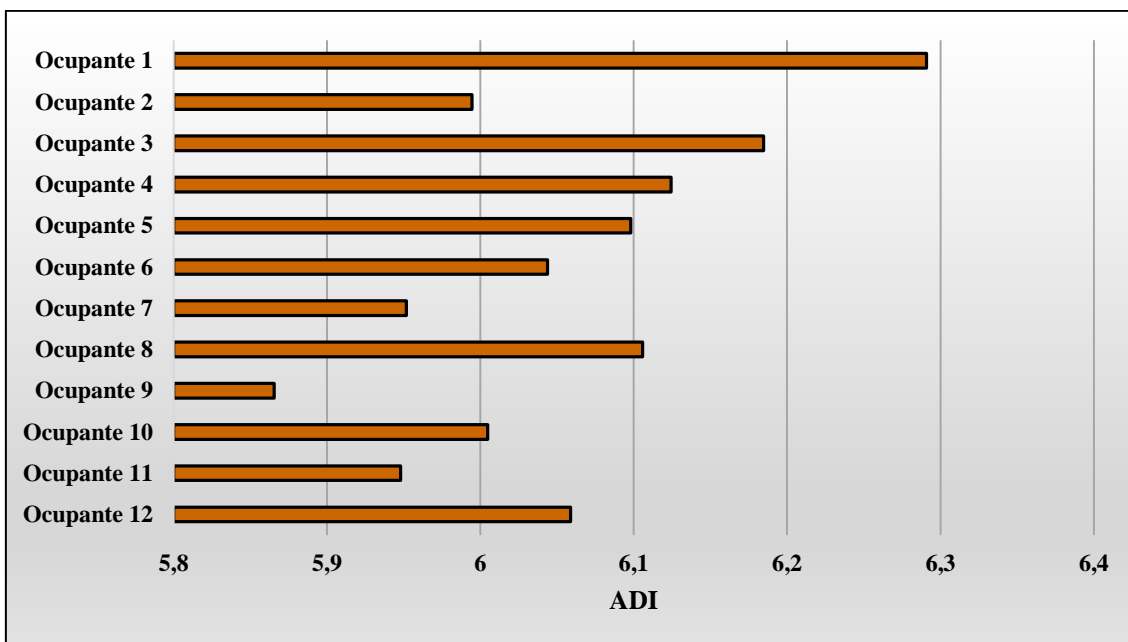


Figura 38 - Distribuição do valor ADI às 14 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

Às 18 horas (figura 40) os resultados do ADI voltam a ser muito semelhantes a análise das 8 horas. Graficamente (figura 41) não é possível distinguir os resultados obtidos nestes dois períodos, onde as diferenças entre eles são apenas de algumas décimas.

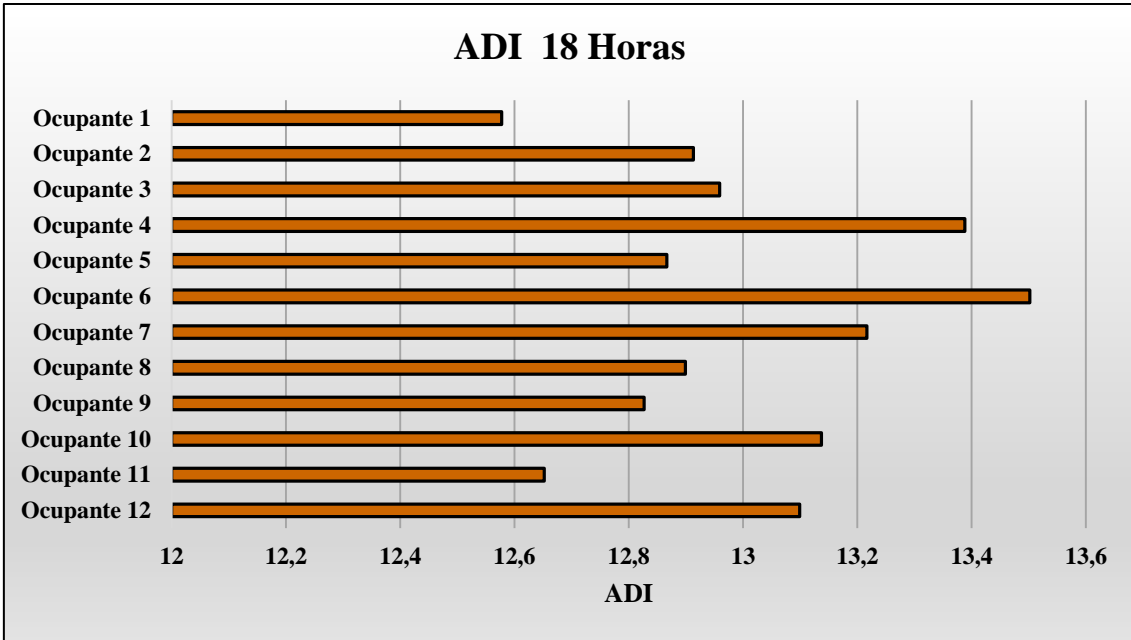


Figura 39 - Distribuição do valor ADI às 18 Horas. Jatos Descendentes em condições de Inverno

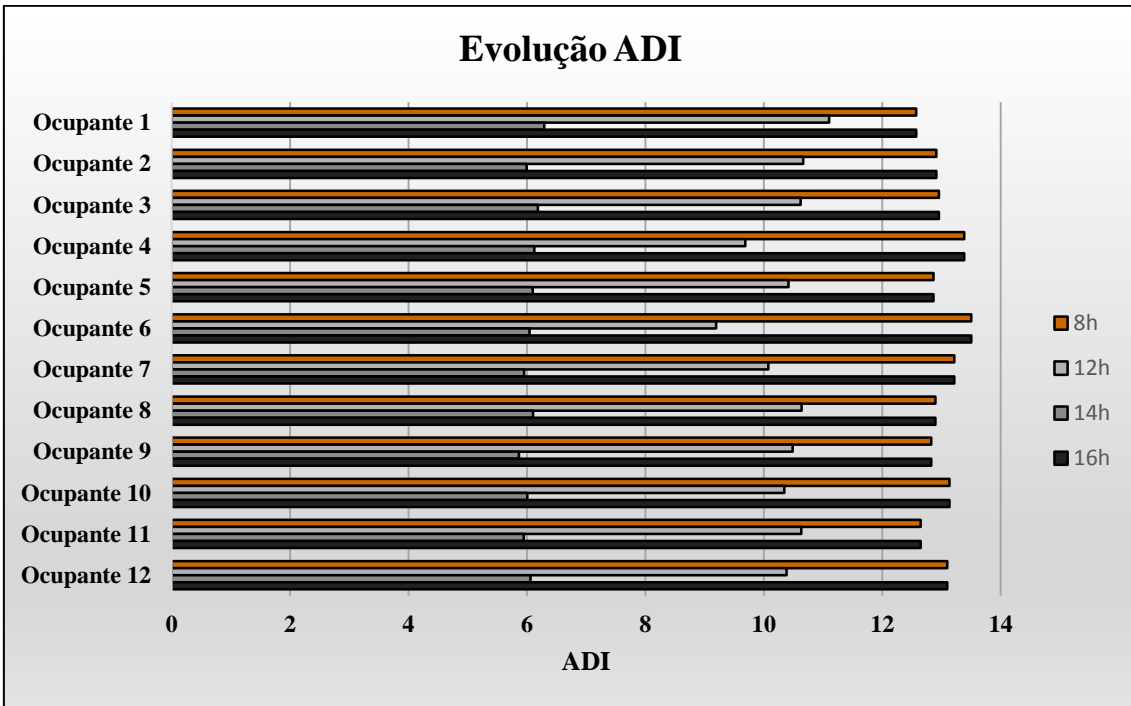


Figura 40 - Evolução do valor do ADI para um sistema de jatos descendentes em condições de Inverno

## 7. Discussões de resultados

O conforto térmico dos ocupantes e a busca por soluções que proporcionassem um melhor ADI numa sala de aula, foi tomado como o objetivo máximo deste trabalho. Numa análise global á concentração de CO<sub>2</sub>, verifica-se que, no caso da mistura perfeita do ar, esta variável é superior em relação em a concentração na simulação dos jatos descendentes.

Comparando novamente os dois métodos, agora numa abordagem ao conforto térmico dos ocupantes, conclui-se que ambas dão resultados semelhantes.

A simulação numérica utilizada para os jatos descendentes apresenta resultados satisfatórios para o conforto térmico nos períodos de fraca exposição solar. O PPD, como parâmetro que define a percentagem de pessoas insatisfeitas, diz-nos que esse valor não poderá ser superior a 15%. Valores esses que são cumpridos nas análises das 8,12 e 18 horas em que atingem no máximo 12,5%. O mesmo não acontece para a análise das 14 horas em que o PPD supera os 70%.

Quanto a simulação usada para a “mistura perfeita” os dados do PMV não sugerem que exista um ambiente climatérico extremo dentro da sala apesar de haver oscilações consideráveis. PMV varia entre -1.8 e 0.9. Em condições perfeitas o PMV tem de assumir valores entre -0.5 e 0.5 em todas as analises para que haja consistência de resultados.

Relacionando os resultados obtidos nas duas simulações afirma-se que há condições ótimas de conforto na análise das 12 horas, em que o PMV e o PPD assumem os valores segundo as normas.

Para melhorar o conforto térmico nas horas de fraca exposição solar ou em períodos noturnos, como é o caso das 8 horas e 18 horas, é necessário que haja reservas de calor para injetar nestas condições.

Em contraste com os restantes períodos, a análise das 14 horas revela uma grande produção de calor na fachada ventilada, mais em evidência na fachada DSF, climatizando como previsto o ar da sala. Este é o caso que há maior discordância entre simulações. A simulação dos jactos descendentes remete para um desconforto elevado dos ocupantes ao invés da simulação que analisa o PMV, em que os valores ótimos se encontram as 12 horas e as 14 horas.

## **8. Conclusões**

A objetividade deste projeto que consistia em aplicar sistemas de aquecimento ou arrefecimento passivo através de energias renováveis, foi totalmente atingida.

Na elaboração deste projeto há que realçar o desconhecimento prévio dos resultados possíveis das simulações por se tratar de um conceito totalmente diferente dos sistemas AVAC habitualmente instalados em edifícios. Isto permitiu que todos os resultados, incluindo todos os que se revelaram inconclusivos, nos levassem a uma aprendizagem sobre este novo sistema e quais os pontos que podiam ser revistos e melhorados, de maneira encontrar uma solução passível de análise.

Face aos objetivos propostos apenas foram conseguidos resultados para o sistema de jatos descendentes.

A utilização das fachadas ventiladas revelaram-se um sucesso na climatização de espaços utilizando apenas como fonte de energia a radiação solar. Estes sistemas pela quantidade de energia em excesso que produzem podem ser aplicados em espaços maiores ou mesmo em fachadas de edifícios. Ficou também provado que estes sistemas conseguem obter resultados bastante satisfatórios para climas mais excessivos nas estações de Inverno

## 6. Bibliografia

- Agrawal, P. (1989). A review of passive systems for natural heating and cooling of buildings. *Solar Wind Technol.*, 557-567.
- Alemdag, L., & Beyhan, F. (2017). A Research on Constrution Systems of Double Skin Facades. *Journal of Science, Gazi University*, 17-30.
- ANSI/ASHRAE Standard 55. (2010). Thermal Environmental Conditions for HUMAN Occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.
- Athienits, A., & Santamouris, M. (2002). Thermal Analysis and Design of Passive Solar Buildings. *James & Jaes Science Publishers Ltd*.
- Chantrasrisalai, C., & Fisher, D. (2006). An in situ experimental method for the development and validation of slat-type blind models in cooling load calculations. *J.Sol. Energy Eng.*, 189-198.
- Chantrasrisalai, C., & Fisher, D. (2006). An in situ experimental method for the development and validation of slat-type blind models in cooling load calculations. *J. Sol. Energy Eng.* , pp. 128, 189–198.
- Collins, M. R., Harrison, S. J., Oosthuizen, P. H., & Naylor, D. (2002). Heat transfer from an isothermal vertical surface with adjacent heated horizontal louvers. *ASME J. Heat Transf.*, 1072-1077.
- Collins, M., & Harrison, S. (2004). Calorimetric analysis of the solar and thermal performance of windows with louvered blinds. *ASHRAE Trans.*, 474-485.
- Conceição, E. (1996). Estudo aero-térmico de habitáculos de veículos de transporte de passageiros.
- Conceição, E. (1999). Avaliação de condições de conforto térmico: simulação numérica do sistema térmico do corpo humano e do vestuário. *Proceedings of the CIAR*.
- Conceição, E. (2000). Evaluation of thermal comfort and local discomfort conditions using the numerical modelling of the human and clothing thermal system. *RoomVent'2000-7th International Conference on Air Distribution in Rooms*, 131-136.
- Conceição, E. (2003). Numerical simulation of buildings thermal behaviour and human thermal comfort multi-node models. *Proceedings of the 8th International IBPSA Conference-Building Simulation*.
- Conceição, E. Z., Santiago, C. I., & Awbi, H. (19 de July de 2016). Numerical Study of Different Ceiling Mounted Localized Air Distribution Systems For a Virtual Classroom. *Indoor and Building Environment*.
- Conceição, E., & Awbi, H. (2013). Comfort and airflow evaluation in spaces equipped with mixing ventilation and cold radiant floor. *Build Simul*, 51-67.
- Conceição, E., & Lucio. (2009). Numerical study of the thermal efficiency of a school building with complex topology for different orientations. *Indoor and Built Environment* 18 (1), 41-51.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2001). Numerical and subjective responses of human thermal sensation. *Proceedings of the BioEng 2001*.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2002). Influence of non-uniform airflow from different directions in the thermal comfort level in seated persons. *Proceedings of ROOMVENT 2*.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2006). Air quality inside a school building: air exchange monitoring, evolution of carbon dioxide and assessment of ventilation strategies. *International journal of ventilation* 5(2), 259-270.

- Conceição, E., & Lucio, M. (2006). Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Summer Conditions. *Proceedings of the Healthy Buildings 2006*, 195-200.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2010). Evaluation of thermal comfort conditions in a localized radiant system placed in front and behind two students seated nearby warmed curtains. *Building and environment* 45 (10), 2100-2110.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2010). Numerical simulation of passive and active solar strategies in buildings with complex topology. *Building Simulation* 3(3), 245-261.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2010). Numerical study of the influence of opaque external trees with pyramidal shape on the thermal behaviour of a school building in summer conditions. *Indoor and Built Environmental* 19 (6), 657-667.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2011). Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom equipped with radiant cooling systems and subjected to uniform convective environment. *Applied Mathematical Modelling* 35 (3), 1292-1305.
- Conceição, E., & Lucio, M. (2016). Numerical simulation of the application of solar radiant systems, internal airflow and occupants' presence in the improvement of comfort in winter conditions. *Buildings* (6), 38.
- Conceição, E., Da Silva, M., Andre, J., & Viegas, D. (2000). Thermal behaviour simulation of the passenger compartment of vehicles. *International Journal of Vehicle Design* 24 (4), 372-387.
- Conceição, E., Gomes, J., & Ruano, A. (2018). Application of HVAC systems with control based on PMV index in university buildings with complex topology. *IFAC-PapersOnLine* 51 (10), 20-25.
- Conceição, E., Lucio, M., & Awbi, H. (2013). Comfort and airflow evaluation in spaces equipped with mixing ventilation and cold radiant floor. *Buildings Simulation* 6 (1), 51-67.
- Conceição, E., Lúcio, M., & Farinho, J. (2007). Experimental and numerical study of personalized of ventilation in classrooms desks. *Proceedings of the 10th International Conference in Rooms, Room Vent 2007*.
- Conceição, E., Lucio, M., & Lopes, M. (2008). Application of an indoor greenhouse in the energy and thermal comfort performance in a kindergarten school building in the south of Portugal in winter conditions. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 4, 644-654.
- Conceição, E., Lucio, M., & Lopes, M. (2008). Energy and Thermal Comfort Management in a Kindergarten School Building in the South of Portugal in Winter Conditions. *Proceedings of the 4th WSEAS/IASME International Conference on Energy*.
- Conceição, E., Lucio, M., Lourenço, T., & Brito, A. (2006). Evaluation of thermal comfort in slightly warm ventilated spaces in non-uniform environments. *HVAC&R Research* 12 (3), 451-475.
- Conceição, E., Lucio, M., Ruano, A., & Crispim, E. (2009). Development of a temperature control model used in HVAC systems in school spaces in Mediterranean climate. *Building and Environment* 44 (5), 871-877.
- Conceição, E., Lucio, M., Vicente, V., & Rosão, V. (2008). Evaluation of local thermal discomfort in a classroom equipped with cross flow ventilation. *International Journal of Ventilation* 7 (3), 267-277.
- Conceição, E., Nunes, A., Gomes, J., & Lucio, M. (2010). Application of a school building thermal response numerical model in the evolution of the adaptive

- thermal comfort level in the mediterranean environment. *International Journal of Ventilation* 9 (3), 287-304.
- Conceição, E., Rosa, S., Lucio, M., Custodio, P., & Andrade, R. (2010). Study of Airflow Around Occupants Seated in Desks Equipped With Upper and Lower Air Terminal Devices for Slightly Warm Environments. *Journal on Heating Air Conditioning and Refrigerant Research, ASHRAE* 16 (4).
- Conceição, E., Santiago, C., & Awbi, H. (2016). Numerical study of different ceiling-mounted-localized air distribution systems for a virtual classroom environment. *Indoor and Built Environment*, 1-15.
- Conceição, E., Santiago, C., Lucio, M., & Awbi, H. (2018). Predicting the Air Quality, Thermal Comfort and Draught Risk for a Virtual Classroom with Desk-Type Personalized Ventilation Systems. *Buildings* 8 (2).
- Conceição, E., Silva, A., & Lucio, M. (2004). Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Winter Conditions. *Proceedings of the 9th Conference on Air Distribution in Rooms-Roomvent 2004*.
- Conceição, E., Silva, M., & Viegas, D. (1997). Air quality inside the passenger compartment of a bus. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 7 (4), 521-534.
- Conceição, E., Silva, M., & Viegas, D. (1997). Airflow around a passenger seated in a bus. *HVAC&R Research* 3 (4), 311-323.
- Conceição, E., Silva, M., André, J., & Viegas, D. (1999). A computational model to simulate the thermal behaviour of the passengers compartment of vehicles. *SAE transactions*, 1483-1492.
- Conceição, E., Vicente, V., & Lucio, M. (2008). Airflow inside school building office compartments with moderate environments. *HVAC&R Research* 14(2), 195-207.
- Fanger, P. (1970). Thermal comfort. *Danish Technical Press, Copenhagen*.
- Final Energy Consumption by sector and buildings Energy Mix. (2010). *Internacional Energy Agency*.
- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). Conceitos Bioclimaticos para os Edificios em Portugal. *INETI*.
- Gratia, E., & de Herde, A. (2004). Optimal operation of a south double-skin façade. *Energy Build*, 36, 41-60.
- Guardo, A., Coussirat, M., Egusquiza, E., Alavedra, P., & Castilla, R. (2009). A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of active transparent façades in Mediterranean climates. *Energy Build*, 534-542.
- Gupta, N., & Tiwari, G. N. (2016). Review of passive heating/cooling systems of buildings. *Energy Science & Engineering*, 305-333.
- Hazem, A., Ameghchouche, M., & Bougriou, C. (2015). A numerical analysis of the air ventilation management and assessment of the behavior of double skin facades. *Energy and Buildings, Elsevier*, 225-236.
- Manz, H., & Menti, U. (2012). Energy performance of glazings in European climates. *Renew Energy*, 226-232.
- Parra, J., Guardo, A., Egusquiza, E., & Alavedra, P. (2015). Thermal Performance of Ventilated Double Skin Façades with Venetian Blinds. *Energies*, 4882-4898.
- Phillips, J., Naylor, D., Oosthuizen, P., & Harrison, S. (2002). Modeling of the conjugate heat transfer from a window adjacent to a louvered shade. *Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer, Madrid*.
- Poirazis, H. (2004). Double SkinFaçades for Office Buildings. *Report EBD-R; Lund Institute of Technology*.

- Ricardo. (2005). Solar radiation. *journal*.
- Ruano, A., & Ferreira, P. (2014). Neural network based hvac predictive control. *IFAC Proceedings Volumes 47 (3)*, 3617-3622.
- Tzempelikos, A. (2008). The impact of Venetian Blind geometry and tilt angle on view, direct light transmission and interior illuminance. *Sol. Energy*, 1172-1191.
- Tzempelikos, A., & Athienitis, A. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Sol. Energy*, 369-382.
- Xu, L., & Ojima, T. (2007). Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin facade system. *Build. Environ.*
- Yao, R. L. (1973-1988). Energy policy and standard for built environment in China. *Renewable Energy*, 30(13).