

**Rui Manuel Dias Leonardo**

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO  
NO CAMPUS DE GAMBELAS DA  
UNIVERSIDADE DO ALGARVE**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

**2018**

**Rui Manuel Dias Leonardo**

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO  
NO CAMPUS DE GAMBELAS DA  
UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

Mestrado Integrado em Engenharia  
do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação de:  
Professor Doutor Eusébio Conceição



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

**2018**

# ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO NO CAMPUS DE GAMBELAS DA UNIVERSIDADE DO ALGARVE

## Declaração de autoria de trabalho

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

---

Rui Manuel Dias Leonardo

© *Copyright*: Rui Manuel Dias Leonardo.

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

## Agradecimentos

Neste concretizar de um percurso de aprendizagem e conhecimento gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que contribuíram para o meu desenvolvimento humano e académico, e que me ajudaram a chegar a este patamar.

Assim, agradeço em especial:

Ao meu orientador Professor Doutor Eusébio Conceição pelo incentivo, entusiasmo, e por todo o empenho e dedicação prestados ao longo deste percurso. Obrigado pelo seu acompanhamento, disponibilidade, conselhos e pelo especial incentivo e motivação que se revelou fundamental para que a conclusão do trabalho fosse bem-sucedido.

À minha irmã Rita pela amizade, por todo o apoio prestado, pelas birras e pelos sorrisos sem os quais eu não seria a pessoa que sou hoje.

À Vera e às minhas filhas Letícia e Leonor, por todo o amor e por todos os momentos que tornam a minha vida mais rica e bela.

Por fim, com um significado muito especial dedico este trabalho aos meus Pais, por todo o esforço, todo o carinho e sobretudo por fazerem de mim quem sou.

## Resumo

Ao longo do tempo tem-se verificado um aumento dos padrões de conforto dos ocupantes dos edifícios, que se tem traduzido no respetivo aumentado do consumo de energia, pelo que é fundamental que estes sejam energeticamente mais eficientes.

O presente estudo avaliou as condições de conforto térmico, da qualidade do ar e do consumo de energia associado aos principais sete edifícios do *Campus* de Gambelas da Universidade do Algarve (UALg), através da aplicação de um modelo numérico de simulação da resposta térmica dos edifícios.

Neste trabalho foram estudadas seis alternativas de climatização para os edifícios: ventilação natural, sistema de geotermia com radiação em todas as superfícies ou apenas nas superfícies horizontais dos compartimentos, sistema de aquecimento ventilação e ar-condicionado (AVAC) controlado alternativamente, pelo índice PMV adaptativo, pelo índice PMV Fanger ou pela temperatura do ar.

Nas simulações, para um dia típico de verão e um de inverno, foram avaliadas a qualidade do ar e o conforto térmico dos ocupantes e calculada a respetiva quantidade de horas de desconforto devido ao calor (HDC) ou ao frio (HDF) e ainda o consumo de energia associado ao uso de cada sistema de climatização.

De um modo geral a qualidade do ar foi boa, prevendo-se na maioria dos compartimentos concentrações de CO<sub>2</sub> inferiores aos limites legais aplicáveis e de referência, ainda que em algumas salas de aula se tenha identificado a necessidade pontual de aumentar da taxa de renovação do ar.

Considerando o nível de conforto térmico do índice PMV (Predicted Mean Vote), os resultados demonstraram que na generalidade dos compartimentos, as várias alternativas do sistema AVAC garante boas condições de conforto para os ocupantes.

Os resultados obtidos sugerem que a regulação do funcionamento do sistema AVAC através de índice PMV adaptativo permite minimizar significativamente o tempo de exposição dos ocupantes a ambientes térmicos desconfortáveis e diminuir o consumo de energia associado, garantindo a qualidade do ar interior.

**Palavras-chave:** climatização de edifícios, comportamento térmico de edifícios, conforto térmico, eficiência energética, qualidade do ar interior, simulação numérica.

## Abstract

Over time there has been an increase in the comfort standards of the occupants of the buildings, which has resulted in the respective increase of the energy consumption, reason why they are energetically more efficient.

The present study evaluated the conditions of thermal comfort, air quality and energy consumption associated with the main seven buildings of the Gambelas Campus of the University of Algarve (UAlg), through the application of a simulation model of the thermal response of buildings.

In this work, six climatic alternatives were studied for the buildings: natural ventilation, geothermal system with radiation on all surfaces or only on the horizontal surfaces of the compartments, ventilation and air conditioning system (HVAC) alternately controlled by the PMV index by the PMV Fanger index or by the air temperature.

In the simulations, for a typical summer day and a winter day, the air quality and the thermal comfort of the occupants were evaluated and the respective number of hours of discomfort due to heat (HDC) or cold (HDF) was calculated, and the energy consumption associated with the use of each technology.

In general, the air quality was good, with CO<sub>2</sub> concentrations lower than the applicable legal and reference limits in most of the compartments, although in some classrooms the occasional need to increase the air.

Considering the thermal comfort level of the PMV (Predicted Mean Vote) index, the results demonstrated that in most of the compartments, the various alternatives of the HVAC system guarantee good conditions of comfort for the occupants.

The results suggest that the regulation of the operation of the HVAC system through the adaptive PMV index allows to significantly reduce the occupants exposure time to uncomfortable thermal environments and reduce the associated energy consumption, guaranteeing indoor air quality.

**Keywords:** air conditioning of buildings, building thermal behavior, thermal comfort, energy efficiency, indoor air quality, numerical simulation.

# Índice Geral

<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Enquadramento geral do trabalho.....</b>	<b>2</b>
<b>3 Estado atual do conhecimento .....</b>	<b>4</b>
3.1 . Caraterização energética dos edifícios .....	4
3.2 . Regulamentação térmica .....	6
3.3 . Resposta térmica dos edifícios .....	7
3.4 . Radiação solar .....	8
3.5 . Qualidade do ar.....	9
3.6 . Conforto térmico .....	10
3.7 . Conforto Adaptativo .....	12
3.8 . Sistemas de Climatização.....	14
<b>4 Caso de Estudo .....</b>	<b>16</b>
<b>5 Metodologia.....</b>	<b>19</b>
<b>6 Resultados e Discussão .....</b>	<b>26</b>
6.1 Edifício 1 (FCHS) .....	26
6.2 Edifício 2 (FCT) .....	38
6.3 Edifício 3-4 (CP) .....	42
6.4 Edifício 5 (Biblioteca) .....	45
6.5 Edifício 6 (Cantina).....	48
6.6 Edifício 7 (FCT) .....	51
6.7 Edifício 8-9 (FCT-FE) .....	54
6.8 Comparação do consumo de energia entre os edifícios .....	58
<b>7 Conclusão.....</b>	<b>61</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>64</b>

## Índice de Figuras

Figura 4.1 – Imagem aérea do Campus de Gambelas, com os edifícios em estudo.....	17
Figura 4.2 – Vista 3D do modelo de simulação desenvolvido para os edifícios em estudo.....	18
Figura 5.1 – Esquema da constituição das paredes dos edifícios. ....	20
Figura 5.2 – Vista 3D do Edifício 1 (FCHS), com numeração dos compartimentos.....	22
Figura 6.1 – Edifício 1: Evolução da concentração de CO <sub>2</sub> durante um dia típico de ocupação (verão e inverno). ....	28
Figura 6.2 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de verão, climatização natural.....	29
Figura 6.3 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de inverno, climatização natural. ....	29
Figura 6.4 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de verão, geotermia e todas as sup. radiantes. ....	29
Figura 6.5 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de inverno, geotermia e todas as sup. radiantes. ....	29
Figura 6.6 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de verão, geotermia com sup. horiz. radiantes. ....	30
Figura 6.7 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de inverno, geotermia com sup. horiz. radiantes. ....	30
Figura 6.8 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice aPMV. ....	30
Figura 6.9 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice aPMV. ....	30
Figura 6.10 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice PMV. ....	30
Figura 6.11 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice PMV. ....	30
Figura 6.12 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por T <sub>ar</sub> . ....	30
Figura 6.13 – Edifício 1: Evolução da T <sub>ar</sub> durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por T <sub>ar</sub> . ....	30
Figura 6.14 – Edifício 1: Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, climatização natural.....	31
Figura 6.15 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, climatização natural.....	31
Figura 6.16 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, geotermia e todas as sup. radiantes. ....	32
Figura 6.17 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, geotermia e todas as sup. radiantes. ....	32
Figura 6.18 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, geotermia com superfícies horizontais radiantes. ....	32

Figura 6.19 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, geotermia com superfícies horizontais radiantes.....	32
Figura 6.20 – Edifício 1: Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice aPMV.....	32
Figura 6.21 – Edifício 1: Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice aPMV.....	32
Figura 6.22 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice PMV.....	33
Figura 6.23 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice PMV.....	33
Figura 6.24 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por Temperatura do Ar.....	33
Figura 6.25 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por Temperatura do Ar.....	33
Figura 6.26 – Consumo médio diário anual de energia do sistema AVAC estimado para os vários edifícios.....	58
Figura 6.27 – Rácio do consumo de energia do sistema AVAC por ocupante, para os vários edifícios.....	60

## Índice de Tabelas

Tabela 5.1 – Coeficientes dos materiais das paredes dos edifícios.....	21
Tabela 5.2 – Quantidade de superfícies e compartimentos considerados na modelação.....	21
Tabela 5.3 – Número de ocupantes por ciclo de ocupação dos compartimentos dos edifícios.....	23
Tabela 5.4 – Parâmetros e configurações de cálculo do <i>software</i> de simulação numérica.....	25
Tabela 6.1 – Horas de desconforto total devido à qualidade do ar (CO <sub>2</sub> ) no Edifício 1.....	28
Tabela 6.2 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 1.....	34
Tabela 6.3 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 1.....	34
Tabela 6.4 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 1.....	35
Tabela 6.5 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 1.....	36
Tabela 6.6 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 2.....	38
Tabela 6.7 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 2.....	39
Tabela 6.8 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 2.....	39
Tabela 6.9 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 2.....	41
Tabela 6.10 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 3-4. ...	42
Tabela 6.11 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 3-4.....	43

Tabela 6.12 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 3-4....	43
Tabela 6.13 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 3-4. ....	45
Tabela 6.14 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 5.....	46
Tabela 6.15 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 5. ....	46
Tabela 6.16 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 5.....	47
Tabela 6.17 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 5.....	48
Tabela 6.18 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 6.....	49
Tabela 6.19 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 6. ....	49
Tabela 6.20 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 6.....	50
Tabela 6.21 – Consumo de energia (kW.h/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 6.....	51
Tabela 6.22 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 7.....	52
Tabela 6.23 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 7. ....	52
Tabela 6.24 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 7.....	53
Tabela 6.25 – Consumo de energia (kW.h/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 7.....	54
Tabela 6.26 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 8-9. ...	55
Tabela 6.27 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 8-9.....	55
Tabela 6.28 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 8-9....	56
Tabela 6.29 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 8-9. ....	57
Tabela 6.30 – Número de horas de desconforto térmico no <i>Campus</i> para as várias opções de climatização. ....	59

## Siglas e Abreviaturas

aPMV – Adaptive Predicted Mean Vote (voto médio previsto adaptativo)

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

EU – União Europeia

HDC – Horas de desconforto por calor

HDF – Horas de desconforto por frio

IEA – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)

INE – Instituto Nacional de Estatística

ISO – International Organization for Standardization

PMV – Predicted Mean Vote (voto médio previsto)

PORDATA – Base de Dados de Portugal Contemporâneo

PPD – Predicted Percentage Dissatisfied (percentagem de pessoas insatisfeitas prevista)

RCCTE – Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios

RECS – Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Comércio e de Serviços

REH – Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Habitação

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios

Ualg – Universidade do Algarve

# 1 Introdução

Atualmente é urgente tornar os edifícios energeticamente mais eficientes, através da implementação de ações e medidas que promovam uma melhor utilização da energia e simultaneamente proporcionem boas condições de conforto dos ocupantes.

Neste contexto, o presente trabalho pretende avaliar as condições de conforto térmico e de qualidade do ar dos ocupantes nos principais edifícios do *Campus* de Gambelas da Universidade do Algarve.

Assim, os objetivos gerais deste trabalho são os seguintes:

1. Simular numericamente e avaliar o nível de conforto térmico e a qualidade do ar dos ocupantes nos compartimentos dos principais edifícios do *Campus* de Gambelas;
2. Simular numericamente e quantificar para vários perfis de ocupação o consumo de energia dos edifícios associados a diferentes sistemas alternativos de climatização.

Para tal pretendeu-se estudar a climatização dos espaços com recurso a:

- Ventilação e radiação térmica natural;
  - Aplicação de geotermia combinada com coletores solares térmicos, com superfícies radiantes em todas as superfícies dos compartimentos;
  - Aplicação de geotermia combinada com coletores solares térmicos, com superfícies radiantes apenas nas superfícies horizontais dos compartimentos;
  - Sistema AVAC controlado alternativamente:
    - pelo índice PMV adaptativo;
    - pelo índice PMV Fanger;
    - pela temperatura do ar.
3. Comparar os níveis de conforto térmico dos ocupantes associados às diferentes alternativas de climatização avaliadas;
  4. Identificar eventuais soluções AVAC energeticamente mais eficientes para os edifícios analisados;
  5. Avaliar a eficácia da modelação numérica e auxiliar o desenvolvimento contínuo do programa de simulação numérica da resposta térmica de edifícios;

6. Demonstrar e avaliar a importância do recurso de ferramentas de simulação na definição de soluções que promovam o uso mais eficiente da energia em edifícios, bem como contribuir de forma positiva para futuras investigações.

Na prossecução destes objetivos começou-se pela recolha das características específicas dos edifícios em estudo, seguiu-se o desenvolvimento do modelo 3D e a simulação do respetivo comportamento térmico e da qualidade do ar. Através da simulação numérica quantificaram-se as horas de desconforto dos ocupantes (por frio, calor e devido à qualidade do ar), e calculou-se o consumo de energia associada às diferentes alternativas de climatização.

Este estudo foi realizado considerando simultaneamente a avaliação do nível de conforto térmico, da qualidade do ar e do consumo de energia para vários perfis de utilização, de ocupação e de climatização. A conjugação dos resultados obtidos permitiu identificar as soluções de climatização que proporcionam melhorar eficiência da climatização dos edifícios, garantindo um bom compromisso entre o conforto dos ocupantes e o consumo de energia.

## **2 Enquadramento geral do trabalho**

Nas últimas décadas, de um modo geral, a população mundial tem vindo a aumentar e como consequência do desenvolvimento científico e tecnológico tem vindo a usufruir de melhores condições de vida. A conjugação destes fatores traduziu-se numa forte urbanização e no aumento exponencial do consumo de energia global, em particular do consumo de energia dos edifícios (Silva, 2006).

Em Portugal os edifícios (dos setores de serviços e doméstico) são os maiores consumidores de energia (55.1 %), pelo que a adoção de medidas de eficiência energética apresenta grande potencial para a redução do consumo de energia (PORDATA, DGEG/MEc, 2018).

A nível europeu, o sector dos edifícios representa cerca de 40% de energia primária e as medidas de eficiência energética poderão contribuir para a redução deste consumo em mais de 50%, diminuindo as emissões de dióxido de carbono até 400 milhões de toneladas anuais (IEA, 2014).

Atualmente, na Europa as pessoas passam em média entre 80 e 90% do seu tempo dentro de edifícios, pelo que é essencial que a edificação seja desenvolvida de forma mais sustentável, minimizando os custos de operação e manutenção, garantindo melhores condições de conforto (Pinheiro, 2006).

O desenvolvimento de novos padrões de conforto na sociedade atual e a evolução da construção em que muitas vezes é dada primazia a questões estéticas e económicas de curto prazo, face a técnicas de construção mais sustentáveis, gerou a necessidade de recurso a soluções tecnológicas de climatização, nem sempre as mais eficientes, com consumos energéticos significativos (Lanham *et al.*, 2004).

O aumento exponencial das necessidades energéticas aliado ao aumento do custo da energia, tem promovido o recurso a fontes de energia renováveis e de tecnologias com consumos energéticos mais eficientes nos edifícios. A utilização da energia do próprio edifício através da recuperação do calor e do frio existente no ar e no solo pode diminuir significativamente as necessidades energéticas exógenas do edificado (Omer, 2008).

O Algarve ainda que possua um clima moderado com níveis de radiação solar relativamente elevados durante todo o ano, apresenta valores indicativos de desconforto quer no verão quer no inverno, que se traduzem na necessidade do funcionamento de sistemas de controlo de conforto nos edifícios e consequente no consumo de energia (Conceição *et al.*, 2008c).

A capacidade térmica é definida como a capacidade de absorção, armazenamento e libertação de calor que os materiais possuem, ou seja, a capacidade de armazenar calor durante um período em que ocorrem temperaturas mais elevadas, libertando-o mais tarde no período do dia mais fresco (Geros *et al.*, 1999; ASHRAE 1999, *in* Yang *et al.*, 2008; Yam *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2008).

Um dos parâmetros, entre outros, que permite avaliar o desempenho térmico de um edifício é a sua capacidade de armazenamento térmico (Conceição *et al.*, 2006b), que inclui a estrutura do edifício, o mobiliário e as paredes internas (Conceição *et al.*, 2003). O aproveitamento desta capacidade nos edifícios pode reduzir a necessidade de aquecimento ou arrefecimento destes, minimizando o respetivo consumo de energia (Olesen, 2002).

Os espaços interiores do edificado, principalmente onde existe ocupação humana, requerem que se utilizem sistemas de AVAC de modo a atingir a qualidade, temperatura e humidade relativa (Conceição *et al.*, 2007b; 2007c), bem como um caudal de ar que garanta a renovação do mesmo para níveis aceitáveis para os ocupantes (Lopes *et al.*, 2008).

Ao longo dos anos, estas normas têm vindo a ser substancialmente cada vez mais exigentes (Olesen, 2002), em acordo com o desenvolvimento de novos padrões de conforto na sociedade atual, nomeadamente em edifícios de serviços, escritórios ou escolas, cujas

necessidades dos seus ocupantes carecem de locais de trabalho com maior conforto e qualidade (Aluclu *et al.*, 2005).

De acordo com Conceição *et al.*, (2006b), para um desenvolvimento energeticamente mais sustentável, é fundamental conhecer o desempenho e eficiência térmica dos edifícios, de preferência na fase de projeto, de forma a se poder articular um conjunto de fatores que permitam o conforto térmico e a qualidade do ar aceitáveis em todas as divisões dos edifícios, com um menor consumo de energia.

A avaliação do desempenho energético dos edifícios é um ponto fulcral para a eficiência energética. No entanto, essa avaliação é um processo que apresenta um elevado grau de dificuldade, pois cada edifício é um sistema complexo, em que cada subsistema (paredes exteriores, interiores, cobertura e envidraçados) tem um papel determinante no desempenho energético global (Silva, 2006).

Os *softwares* de simulação térmica de edifícios, como o utilizado no presente estudo, são baseados em equações de transferência de energia térmica e consideram a estrutura do edifício e as variáveis ambientais exteriores a que o edifício está ou irá ficar sujeito ao longo do ano (Conceição, 2003; Conceição *et al.*, 2006a; 2006c; 2007a, 2008a; 2008b; 2008c).

### **3 Estado atual do conhecimento**

#### **3.1. Caracterização energética dos edifícios**

A contribuição global dos edifícios para o consumo de energia elétrica em Portugal tem vindo a aumentar nos últimos anos, representando o conjunto do consumo doméstico, não doméstico e edifícios do estado 55.1% da energia consumida, face ao consumo de 44.5% do conjunto da indústria, agricultura e iluminação das vias públicas (PORDATA, DGEG/MEC, 2018). O consumo de energia dos sistemas AVAC é particularmente significativo, representando cerca de 50% do consumo dos edifícios (Pérez-Lombard *et al.*, 2008).

Entre os países da União Europeia (28 países) Portugal encontra-se entre os países com maior dependência energética exterior (PORDATA, DGEG/MEC, 2018), pelo que a construção de edifícios energeticamente mais eficientes traduzir-se-á não só na diminuição dos custos operacionais dos edifícios, mas também na diminuição significativa da dependência energética do país.

A qualidade dos edifícios residenciais e do conforto a eles associados têm aumentado ao longo do tempo, particularmente nos últimos anos.

Atualmente não só as necessidades mais básicas (como água quente, equipamentos para cozinhar e de refrigeração), mas também necessidades de conforto térmico (sistemas AVAC), e ainda o uso de equipamentos eletrodomésticos e de entretenimento, são comodidades que têm vindo a ser assumidas como fundamentais. Estas comodidades traduzem-se num acréscimo do investimento e num maior consumo de energia, que evidenciam a necessidade de melhoria da eficiência energética dos edifícios, dos equipamentos e a alteração comportamental dos consumidores (Pinheiro, 2006).

Os consumos de energia nos edifícios residenciais distribuem-se, de modo geral, da seguinte forma: cozinhas e águas quentes sanitárias 50%, iluminação e equipamentos eletrodomésticos 25% e sistemas AVAC 25% (DGE, 2002).

Os edifícios de serviços têm uma taxa de crescimento de consumo energético geralmente superior aos edifícios residenciais. Neste tipo de edifícios verifica-se uma enorme heterogeneidade na sua utilização: lojas, restaurantes, hotéis, grandes superfícies comerciais, hospitais e escolas são algumas das suas utilizações mais comuns. Assim, o desempenho energético deste grupo de edifícios tem de ser analisado de forma distinta, em função da sua tipologia de utilização (DGE, 2002).

De acordo com o estudo da Direção Geral de Energia (2002), em Portugal, o consumo de energia nos edifícios hoteleiros apresenta a seguinte distribuição: 30 a 35% pelos sistemas AVAC, 10 a 18% pelas águas quentes sanitárias e 40 a 47% por equipamentos e iluminação. Por sua vez os edifícios comerciais e de serviços apresentam uma distribuição do consumo energético significativamente distinta, cerca de 70% pelos sistemas AVAC e 20 % pela iluminação.

Relativamente ao consumo de energia dos edifícios escolares, em Portugal, não existem dados suficientes que permitem uma clara categorização dos consumos associados. Pode-se, no entanto, referir-se que existem evidências que o consumo de energia tem vindo a aumentar, em grande parte devido à renovação do parque escolar, com a implementação de equipamentos AVAC (até então inexistentes) com vista à melhoria da qualidade do ar e do conforto térmico dos ocupantes.

Dado o elevado consumo de energia elétrica pelos sistemas AVAC e a sua tendência de aumento, considera-se que existe um elevado potencial para a aplicabilidade de técnicas de redução do consumo energético associado à climatização dos espaços interiores dos edifícios.

### 3.2. Regulamentação térmica

Com o objetivo de melhorar a qualidade da construção em Portugal, na década de 90, foi aprovado o primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este regulamento visava a diminuição do consumo energético dos edifícios através da imposição de requisitos aos projetos de novos edifícios, que garantissem a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios, sem necessidades excessivas de energia.

Posteriormente este regulamento foi substituído, e atualmente em Portugal estão em vigor dois regulamentos de desempenho térmico dos edifícios: o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006), promulgado pelo Decreto-Lei 80/2006, e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE, 1998), promulgado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006. Como complemento aos dois regulamentos anteriores, encontra-se ainda em vigor o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios (SCE, 2006), promulgado pelo Decreto-lei nº 78/2006.

O Decreto-Lei 80/2006, de 4 de abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), estabelece requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e de pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização, nomeadamente ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos. Este regulamento impõe limites aos consumos energéticos para climatização e produção de águas quentes, num claro incentivo à utilização de sistemas eficientes e de fontes energéticas com menor impacte em termos de energia primária. Esta legislação impõe ainda a instalação de painéis solares térmicos e valoriza a utilização de outras fontes de energia renovável (RCCTE, 2006).

Posteriormente o Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto de 2013, transpôs para o direito nacional a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Esta Diretiva introduz novas disposições com o objetivo de reforçar a promoção do desempenho energético nos edifícios, tendo por base as metas e os desafios acordados pelos Estados-Membros para 2020.

O decreto-lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, conjuntamente com a portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro, veio definir as novas exigências em matéria de qualidade do ar interior, nomeadamente, ao nível dos valores mínimos de caudal de ar novo por espaço e dos limiares de proteção para as concentrações de poluentes do ar interior. Atribui, ainda, competências em matéria de fiscalização do cumprimento dos limiares de proteção à Inspeção Geral da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território (IGAMAOT), estando previsto na portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro, que essa fiscalização seja feita de acordo com uma metodologia estabelecida pelas entidades competentes nos domínios do ambiente e da saúde.

O Decreto-Lei 28/2016, de 23 de junho, procedeu à 4ª alteração e à republicação do Decreto-Lei 118/2013, de 20 de agosto, que aprovou o Sistema de Certificação de Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, completando a transposição para o direito nacional da Diretiva 2010/31/UE, de 19 de maio.

A implementação deste sistema de certificação energética vem permitir informar o cidadão sobre a qualidade térmica os edifícios, aquando da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos (SCE, 2006). Este aspecto é de grande importância, pois permite verificar o cumprimento dos regulamentos a que os edifícios estão sujeitos, nomeadamente o RCCTE e o RSECE, resultando potencialmente na construção de edifícios energeticamente mais eficientes e garantindo o conforto térmico e a qualidade do ar interior.

### 3.3. Resposta térmica dos edifícios

A temperatura dos edifícios é fortemente dependente das variáveis climáticas como a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar é a variável indutora das trocas de calor do edifício, promovendo no Inverno a ocorrência de perdas térmicas e no Verão ganhos térmicos (Gonçalves *et al.*, 2004).

A temperatura exterior apresenta-se como a principal responsável pelas perdas térmicas dos edifícios (no Inverno), que originam a diminuição da sua temperatura interior. Por sua vez no Verão (temperatura elevada no exterior) é responsável pelo fluxo de transferência de calor que origina o sobreaquecimento do edifício e consequentemente do seu interior.

A redução dos fluxos térmicos através da implementação de melhores isolamentos nos elementos opacos (paredes e coberturas) e nos elementos transparentes, como as janelas

com vidros duplos, apresentam-se como as medidas mais eficazes e energeticamente mais eficientes, capazes de melhorar as condições de conforto no interior de edifícios (Gonçalves *et al.*, 2004).

Assim, a fase de projeto dos edifícios, nomeadamente do projeto térmico, é de extrema importância, pois pode antecipadamente permitir a adoção de técnicas construtivas que se traduzem num menor consumo de energia, com níveis de conforto aceitáveis. Nesta fase os programas de simulação numérica são de uma importância crucial na previsão do comportamento térmico do edifício e na avaliação dos níveis de consumo de energia e nos níveis de conforto dos seus ocupantes (Conceição *et al.*, 2006a; 2007a; 2007b; 2007c).

### 3.4. Radiação solar

A radiação solar é uma variável que tem um papel determinante no conforto térmico dos edifícios. No Inverno constitui uma importante fonte de calor, que contribui para o aumento da temperatura interior, mas no Verão pode gerar o seu aumento, podendo causar desconforto nos ocupantes (Gonçalves *et al.*, 2004).

A receção de energia solar depende da trajetória do Sol e da duração da exposição solar. A trajetória solar define a duração da exposição solar e o ângulo de incidência dos raios solares determinam a intensidade da radiação (Lanham *et al.*, 2004).

A captação da energia solar quer nos sistemas passivos e em alguns sistemas ativos consiste em aproveitar o efeito de estufa, sendo para tal utilizadas superfícies seletivas como o vidro, que permitam a passagem da radiação solar (Mendonça, 2005).

A edificação deve ser construída de modo a maximizar os ganhos de radiação no inverno, permitindo minimizar os ganhos radiativos através de da colocação de dispositivos que condicionem a incidência da radiação solar no verão (Gonçalves *et al.*, 2004).

Um outro benefício que deve ser aproveitado, além do efeito térmico da radiação, é a iluminação natural (luz solar) em detrimento da iluminação artificial, que para além de mais desconfortável, faz aumentar os consumos de energia dos edifícios (West, 2001).

Em termos energéticos, a iluminação natural pode promover poupanças significativas, nomeadamente em edifícios comerciais onde a iluminação artificial pode chegar aos 33 % do consumo energético total (West, 2001).

### 3.5. Qualidade do ar

No interior dos edifícios tem-se verificado que muitas vezes os novos métodos construtivos e os novos materiais originam problemas no que se refere aos níveis de humidade relativa e da temperatura do ar interior desejáveis, e conseqüentemente provocam um maior desconforto aos ocupantes (Pinto, 2007).

A garantia de uma boa ventilação apresenta-se como fundamental no controlo da qualidade do ar interior. A norma ASHRAE Standard 62.1-2016 define um limite para a concentração do dióxido de carbono em ambientes interiores de 1800 mg/m<sup>3</sup> e um caudal de renovação do ar por ocupante e pelo tipo de espaço. Para edifícios escolares esta norma recomenda valores compreendidos entre 3.8 l/s e 5 l/s (unicamente renovação) e entre 4 l/s e 9.5 l/s (renovação e recirculação) por pessoa (Conceição *et al.*, 2008c).

A nível nacional, o é imposto o Limiar de proteção do CO<sub>2</sub> de 2250mg/m<sup>3</sup> no interior dos edifícios, conforme estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, conjuntamente com a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro. Para salas de aula é definido, na mesma portaria, que o caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação é 24 m<sup>3</sup>/(hora.pessoa).

De forma a garantir que os regulamentos existentes sejam cumpridos, os edifícios necessitam de permitir trocas de ar entre o interior e o exterior, quer através de ventilação natural (dependente da temperatura e do vento), quer através de ventilação forçada com recurso a equipamentos mecânicos (Gonçalves *et al.*, 2004).

A escolha do sistema AVAC deve depender do clima onde se insere o edifício. Estes sistemas controláveis podem ser de baixa permeabilidade ao ar da envolvente (climas mais frios), de ventilação natural (controlo quase nulo) e de elevada permeabilidade ao ar da envolvente (climas mais quentes) (Liddament, 1996).

Em Portugal, no Inverno, a temperatura exterior apresenta maioritariamente valores abaixo das condições de conforto, pelo que interessa limitar as infiltrações. No Verão é necessário que os sistemas de ventilação permitam uma boa a ventilação natural, nomeadamente no período noturno, por ser o momento em que as temperaturas exteriores permitem efetuar a diminuição da carga térmica dos edifícios (Gonçalves *et al.*, 2004).

Assim, para garantir uma boa qualidade do ar do ambiente interior é necessário existirem sistemas AVAC que permitam a circulação das massas de ar de modo a proporcionar níveis de

conforto térmico aceitáveis e permitam a extração dos contaminantes libertados pelos ocupantes (Conceição *et al.*, 2006d)

A norma ISO 7730:2005 define um caudal de renovação de ar em função do nível de conforto dos ocupantes e apresenta três categorias de qualidade do ar: 10%, 20% e 30% de pessoas insatisfeitas. Nesta filosofia, baseada nas unidades Olf e Decipol, desenvolvida por Fanger (1988), são considerados os ocupantes e os materiais existentes nos compartimentos. (Conceição *et al.*, 2006d)

### 3.6. Conforto térmico

A sensação de conforto térmico pode ser definida, segundo a norma ISO 7730:2005 e pela norma *ASHRAE Standard 55-2017*, como “a satisfação expressa quando sujeito a um determinado ambiente térmico”, ou seja, a pessoa está termicamente confortável num determinado ambiente quando não sente nem frio nem calor.

Esta definição supõem um certo grau de subjetividade individual, associada a aspetos físicos (ambiente térmico) e aspetos intrínsecos subjetivos (ambiente psicológico) do ocupante (Fanger,1970).

De acordo com a mesma norma o nível de conforto térmico de um indivíduo resulta da capacidade de manter em equilíbrio as trocas de calor entre o seu corpo e o ambiente, permitindo conservar a temperatura interior do corpo aproximadamente igual a 37°C.

Através da regulação da temperatura do ar é possível condicionar o nível de conforto térmico de um indivíduo e o Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE, 2006), estabelece as temperaturas de referência de 20°C (Inverno) e de 25°C (Verão) como as ideais para proporcionar um nível de conforto térmico adequado.

No entanto, ao contrário da regulamentação internacional mais recente, o RCCTE não refere níveis de conforto específicos e limita-se a estabelecer temperaturas de referência, cujo efeito pode depender dos ocupantes do espaço em particular.

Neste contexto, sendo o conforto térmico resultado da sensação pessoal de cada ocupante, a avaliação do nível de conforto térmico em ambientes moderados (não suscetíveis de causar variações significativas na temperatura do corpo humano) deve ser avaliado recorrendo aos índices: PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) (Fanger,1970).

Estes índices definem que a neutralidade térmica do indivíduo é atingida quando o calor perdido pelo corpo equivale ao produzido pelo próprio metabolismo (PMV igual a zero). No entanto, dada a variabilidade dos ocupantes de um espaço e da consequente dificuldade de obter iguais condições de neutralidade térmica para todos, as normas preveem um intervalo para as condições de conforto consideradas admissíveis (Conceição *et al.*, 2006c).

A estimativa da sensação térmica média sentida pelos ocupantes expostos às mesmas condições ambientais de um determinado compartimento tem por base o modelo do PMV, combina quatro variáveis físicas (temperatura do ar em torno do ocupante, temperatura média radiante das superfícies do compartimento, velocidade do ar e humidade relativa) e duas variáveis pessoais (vestuário e nível de atividade metabólica dos ocupantes) (Fanger, 1970).

De acordo com as normas ISO EN 7730:2005, a sensação térmica corporal é avaliada pelo índice PMV, que representa o valor médio de voto de um grupo significativo de pessoas, numa escala de sete níveis que traduz a satisfação ou insatisfação dos ocupantes com o ambiente interior do compartimento. A escala é simétrica em relação ao ponto “0” (ambiente neutro) e varia no intervalo -3 a +3, correspondendo os valores negativos a sensação de frio (-3 – muito frio; -2 – frio, 1 – levemente frio) e os valores positivos a sensação de calor (1 – levemente quente; 2 – quente e 3 – muito quente).

O índice PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) representa a percentagem de ocupantes insatisfeitos com a temperatura do ambiente interior, englobando quer os indivíduos que sentem desconforto por frio quer por calor. Este índice é determinado em função do PMV, quanto mais afastado de (0) estiver o PMV maior será a percentagem de ocupantes insatisfeitos.

A norma ISO 7730:2005 e ASHRAE Standard 55-2017 classificam o ambiente térmico em três categorias: A, B e C, em função dos índices de PMV e PPD:

- Categoria A:  $-0.2 < PMV < 0.2$ ; PPD <6%;
- Categoria B:  $-0.5 < PMV < 0.5$ ; PPD <10%;
- Categoria C:  $-0.7 < PMV < 0.7$ ; PPD <15%.

Importa ainda referir que vários autores verificaram que as normas ISO EN 7730:2005 e ASHRAE Standard 55-2017, não são aplicáveis em todos os ambientes, tendo-se verificado que

a sensação térmica dos ocupantes varia em função das condições ambientais interiores e exteriores do edifício (Glicksman *et al.*, 2001).

De acordo com Khedari *et al.*, (2000) verifica-se uma variação significativa na sensação térmica, em função da relação da temperatura, da humidade relativa e da velocidade de circulação do ar. O aumento da velocidade da circulação do ar interior (não superior a 1 m/s) permite garantir níveis semelhantes de conforto dos ocupantes mesmo a temperaturas no interior das salas ligeiramente superiores, o que se poderá traduzir na diminuição significativa do consumo de eletricidade da unidade AVAC.

Assim, têm-se vindo a constatar que as condições de conforto consideradas aceitáveis dependem da diversidade dos indivíduos presentes em determinado espaço, e de igual modo é muito difícil especificar condições de conforto que satisfaçam simultaneamente todos os ocupantes.

O conforto térmico depende de fatores quantificáveis como a temperatura do ar, a velocidade do ar e a humidade, mas também de fatores não quantificáveis, como a cultura, o estado psicológico, os hábitos e a educação dos ocupantes, ou seja, é função da aclimatização individual ao ambiente envolvente (Khedari *et al.*, 2000).

### **3.7. Conforto Adaptativo**

A definição de um bom clima interno é importante para o sucesso de um edifício, não só por ser confortável para os ocupantes, mas também porque vai influenciar o consumo de energia do edifício e assim a sua sustentabilidade (Nicol *et al.*, 2002).

As pessoas têm uma tendência natural para se adaptar às condições do ambiente envolvente. A teoria adaptativa assume que as pessoas conscientemente ou inconscientemente respondem a um determinado ambiente térmico ao qual são expostas, a fim de restaurar o seu próprio conforto térmico (Nicol *et al.*, 2002).

O mesmo ambiente térmico pode ser percebido diferentemente por diferentes ocupantes ou diferentes ocupantes podem sentir o mesmo nível de conforto térmico em diferentes ambientes térmicos. Assim, é fundamental entender as perceções dos ocupantes do ambiente interno de um edifício e o seu comportamento adaptativo perante ele (Nicol *et al.*, 1996; Conceição *et al.*, 2012).

Em edifícios naturalmente ventilados têm-se verificado que o índice PMV prevê sensações térmicas mais quentes do que aquelas que os ocupantes realmente sentem nesse tipo de edifícios, sobrestimando a resposta inata dos ocupantes à variação da temperatura envolvente, o que se traduz na utilização excessiva dos sistemas de climatização e do aumento do consumo de energia (Brager e Dear, 1998).

Os ocupantes podem atingir o conforto térmico através do ajuste pessoal às suas condições do ambiente onde se inserem, nomeadamente através do ajuste do vestuário, da adaptação e exposição às janelas e ligando ou desligando o ar-condicionado (Yao *et al.*, 2010).

Atualmente, no domínio da investigação de conforto térmico existem duas abordagens possíveis: modelos estáticos de equilíbrio de calor do corpo humano, com base em estudos de laboratório e modelos adaptativos baseados em estudos de campo (Conceição *et al.*, 2012).

O equilíbrio térmico estático mais conhecido é o baseado em estudos laboratoriais, recorrendo aos índices votação média previsível (PMV) e a percentagem de pessoas termicamente insatisfeitas (PPD). O modelo adaptativo é descrito como uma função de quatro variáveis ambientais (temperatura do ar interior, temperatura radiante média, humidade relativa do ar interior e velocidade do ar interior) e duas variáveis pessoais (nível de atividade corporal e de vestuário dos ocupantes (Conceição *et al.*, 2012).

A dimensão psicológica de adaptação e os aspetos sociais e culturais de um ocupante também têm de ser considerados, pois estes parâmetros são importantes por possuírem uma forte relação na adaptação comportamental entre ocupante e meio ambiente envolvente (Singh *et al.*, 2011).

As pesquisas mais recentes revelam que há uma forte relação entre adaptação comportamental do ocupante e ambiente onde se insere. Isto é, as dimensões psicológicas de adaptação são fortemente influenciadas pela localização geográfica, pelo clima local e pelas condições socioculturais (Conceição *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, de modo a determinar o modelo que combine estas duas ideias, alguns investigadores têm vindo a desenvolver um modelo adaptativo do conforto térmico considerando fatores como a cultura, o clima e as adaptações sociais, psicológicas e comportamentais, que têm impacto no sentido da determinação do conforto térmico (Yao *et al.*, 2009; Conceição *et al.*, 2012).

Neste contexto, foi desenvolvido o índice aPMV – voto médio previsto adaptativo, que para além da combinação das quatro variáveis físicas (temperatura do ar em torno do ocupante, temperatura média radiante das superfícies do compartimento, velocidade do ar e humidade relativa) e das duas variáveis pessoais (vestuário e nível de atividade metabólica dos ocupantes), consideradas nos índices PMV e PPD desenvolvidos por Fanger (1970), entre em consideração com o fator psicológico comportamental das pessoas a um determinado ambiente envolvente.

### 3.8. Sistemas de Climatização

Nas últimas décadas, tem-se assistido a um desenvolvimento significativo do conhecimento, da tecnologia e da regulamentação relacionadas com a qualidade do ambiente interior, visando garantir o conforto dos ocupantes e a eficiência energética dos edifícios.

O desenvolvimento de diversas tecnologias tem sido significativo, visando garantir a crescente procura de maior conforto térmico (geralmente, implicando maiores necessidades de aquecimento ou arrefecimento) e de melhor qualidade do ar interior, conseguindo melhores eficiências energéticas.

Enquanto para garantir o conforto da qualidade do ar interior (onde em muitos casos os poluentes remanescentes derivam somente aos seus ocupantes), é suficiente a ventilação natural, para garantir o conforto térmico é fundamental instalar sistemas de aquecimento e arrefecimento nos compartimentos ou nos edifícios.

Atualmente, o principal sistema de climatização residencial e industrial é sistema AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado), cujo funcionamento pode ser regulado em função da temperatura do ar ou em função do conforto térmico dos ocupantes (Liang *et al.*, 2008).

A variação da temperatura do ar (em alguns casos associada ao nível de humidade relativa do ar) é forma de regulação mais utilizada nos sistemas AVAC atuais (Liang *et al.*, 2008; Gorni *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de sistemas de regulação em função do conforto térmico dos ocupantes é um tema de pesquisa que tem recebido grande atenção nos últimos anos. Este método é significativamente mais complexo, pois os ocupantes passam a ser considerados nos próprios sistemas de climatização (Álvarez *et al.*, 2018).

Ainda que a aplicabilidade da regulação em função do conforto térmico dos ocupantes, em termos comerciais seja ainda muito limitada, os resultados das simulações com este tipo de tecnologia, mostram o aumento significativo da eficiência energética e do nível de conforto dos ocupantes (Conceição *et al.*, 2018; Álvarez *et al.*, 2018).

Outra tecnologia que tem um potencial significativo para fornecer energia elétrica ou térmica à escala global é a geotermia. Esta tecnologia tem sido utilizada essencialmente para gerar eletricidade, no entanto apresenta grande potencial para a climatização dos edifícios através de transferência da carga térmica do subsolo para as superfícies do edifício, permitindo o aquecimento (inverno) e o arrefecimento (verão) dos edifícios (Tester *et al.*, 2015).

Com vista à otimização energética a geotermia pode ser associada a coletores solares. Os coletores solares consistem num permutador de calor que absorve radiação solar, convertendo-a em calor que é distribuído através de um fluido, como óleo, água ou o ar. A energia térmica retida no fluido pode ser depois distribuída através da recirculação do fluido pelo edifício ou usada no auxílio do sistema AVAC (Shahare e Tirumalachetty, 2016).

A distribuição da energia térmica derivada quer da geotermia quer de coletores solares pode ser distribuída, para aquecer ou arrefecer os compartimentos de um edifício, através da implementação de um sistema de superfícies radiantes (Safizadeh *et al.* 2018).

O funcionamento das superfícies radiantes (piso, paredes ou teto) consiste na impulsão de um fluido a determinada temperatura, através de circuitos reticulado de tubos, envolvidos numa camada de argamassa que vai absorver a energia térmica do fluido e dissipa-la pelas superfícies do edifício.

## 4 Caso de Estudo

O crescimento sustentável é uma das prioridades definidas no âmbito da Estratégia da União Europeia, através do qual se pretende promover uma economia que seja não só mais competitiva, mas também mais eficiente em termos de utilização dos recursos.

O presente estudo centra-se na avaliação do conforto térmico, da qualidade do ar e do consumo energético dos edifícios principais do *Campus* de Gambelas, da Universidade do Algarve.

Os edifícios em análise foram construídos ao abrigo de regulamentação antecedente, menos exigente que a atual e encontram-se a funcionar na plenitude das funções no ensino universitário.

A Universidade do Algarve, criada em 1979, compreende três *campi* (Penha, Gambelas e Saúde), na cidade de Faro e um campus na cidade de Portimão. Atualmente conta com uma população aproxima de 7.500 estudantes, 800 docentes e 400 funcionários (Ualg, 2015).

O *Campus* de Gambelas, onde a área de estudo se insere, localiza-se na periferia da cidade de Faro, sendo circundado nos quadrantes sul/oeste pela Mata do Pontal (Parque Natural da Ria Formosa), a norte por campos agrícolas e a este pelo aglomerado populacional de Gambelas.

O caso de estudo proposto consiste na avaliação do nível de conforto dos ocupantes, nomeadamente conforto térmico, da qualidade do ar e o consumo energético associado á climatização do ambiente interior dos edifícios principais do *Campus* de Gambelas: Faculdade de Ciências Humanas e Sociais (edifício 1), a Faculdade de Ciências e Tecnologia (edifícios 1, 2, 7 e 8), a Faculdade de Economia (edifício 9), do Complexo Pedagógico (edifício 3-4), a Biblioteca (edifício 5) e a Cantina (edifício 6), como se apresenta em seguida na figura 4.1.

Este trabalho surge como sequência de alguns estudos já efetuados e tem por base as plantas digitais dos edifícios, em desenho assistido por computador (*CAD 3D*) já minimamente trabalhadas. Atualmente procedeu-se a várias correções e ajustes nas plantas, para efetiva aproximação à realidade e a novos desenvolvimentos no *software* de forma a conseguir melhorar capacidade de modelação.

O estudo destes edifícios universitários foi iniciado por Pragma *et al* (2007), com o estudo “Simulação do Comportamento Térmico de Edifícios Escolares na Região do Algarve”, do qual faziam parte a então Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, doravante designada por Edifício 7 (FCT) e o Complexo Pedagógico, doravante Edifício 3-4 (CP). Posteriormente

Abrantes (2011) desenvolveu no âmbito da dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente, o *Estudo térmico de um edifício escolar com topologia complexa*, onde abordou o edifício da Faculdade de Economia e Recursos Naturais e da Faculdade de Economia, agora denominado edifício 8-9 (FCT-FE). Subsequentemente Pires (2012) estudou os edifícios 1, 7 e 8, no âmbito da dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente – *Conforto e Energia em Edifícios Escolares Universitários*”.

Os principais edifícios do *Campus* possuem o mesmo estilo arquitetónico, mas têm tipologia diferenciada associada às diferentes vocações. O consumo de energia é elevado e está maioritariamente associado aos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado (AVAC) e à iluminação (não avaliado no presente estudo). Caracterizam-se pela ocupação quase exclusiva durante o dia e essencialmente são frequentados por discentes, docentes e funcionários de toda a comunidade universitária.

Na figura 4.1 apresenta-se um esquema com a localização dos edifícios no *Campus* de Gambelas. Na figura 4.2 apresenta-se um esquema 3D do modelo de simulação desenvolvido, com a totalidade dos edifícios modelados.



Figura 4.1 – Imagem aérea do Campus de Gambelas, com os edifícios em estudo.  
(Fonte: *Google Earth*, acedido a 15/09/2018)

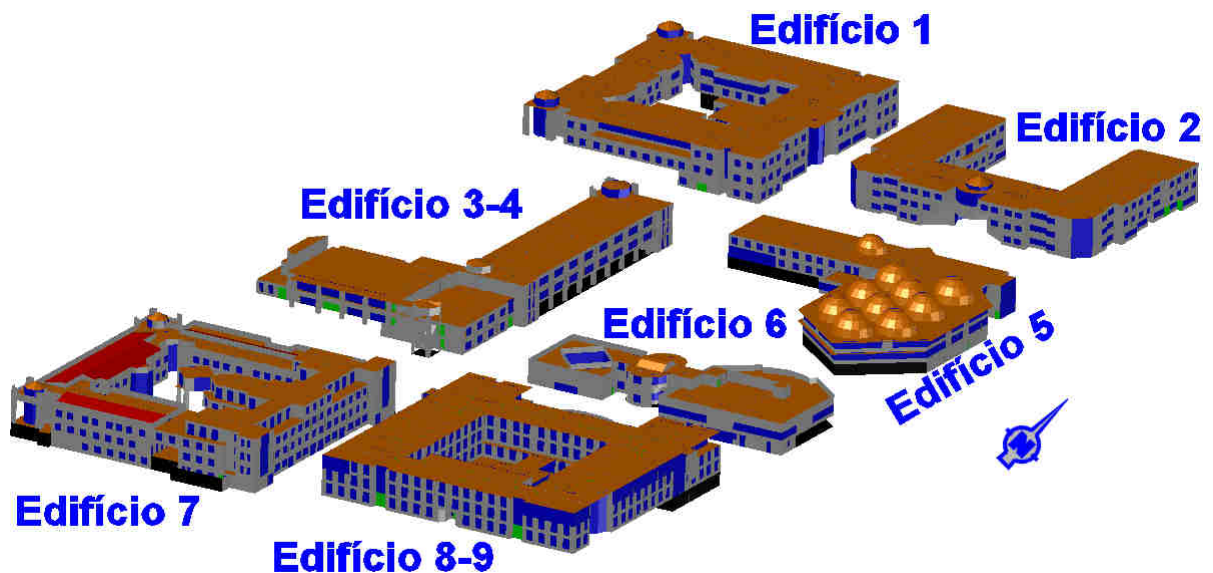


Figura 4.2 – Vista 3D do modelo de simulação desenvolvido para os edifícios em estudo.

Resumidamente os edifícios modelados apresentam a seguinte geometria:

- O edifício 1 (Faculdade de Ciências Humanas e Sociais) é constituído por três pisos, dos quais um fica parcialmente abaixo do solo, e possui maioritariamente gabinetes de docentes e algumas salas de aula, de reuniões, laboratórios, um anfiteatro e um bar.
- O edifício 2 (Faculdade de Ciências e Tecnologia) é constituído por três pisos à superfície e possui essencialmente gabinetes de docentes e laboratórios. Tem três salas de aula, uma sala de seminários, uma sala de estudo e um bar.
- O edifício 3-4 (Complexo pedagógico e Grande Auditório) é constituído por três pisos à superfície e possui maioritariamente salas de aula, e ainda quatro anfiteatros, um grande auditório e um bar.
- O edifício 5 (Biblioteca) é constituído por três pisos. No piso -1, abaixo do nível do solo, encontra-se o arquivo, nos pisos 0 e 1 existem gabinetes de estudo e de serviços.
- O edifício 6 (Refeitório) é constituído por três pisos. No rés-do-chão localiza-se, parcialmente abaixo do nível do solo, o armazém e alguns compartimentos de serviços. No piso 1 existe a sala de refeições, a cozinha e um bar. No último piso existe um restaurante.
- O edifício 7 (Faculdade de Ciências e Tecnologia) contém quatro pisos, dos quais um fica parcialmente a baixo do solo, e é essencialmente constituído por laboratórios e gabinetes, para além de algumas salas de aula, uma sala de informática e um bar.

- O edifício 8-9 (Faculdade de Ciências e Tecnologia e Faculdade de Economia) possui quatro pisos e é essencialmente constituída por salas de aulas, laboratórios e gabinetes, havendo também três secretarias, dez anfiteatros, duas salas de informática e um bar.

## 5 Metodologia

O programa de simulação da resposta térmica dos edifícios tem vindo a ser desenvolvido e os seus resultados validados, ao longo dos últimos anos na Universidade do Algarve. Este *software* permite simular numericamente e avaliar várias variáveis de compartimentos individualizados em edifícios complexos, nomeadamente a qualidade do ar, o comportamento térmico dos compartimentos, dos ocupantes e o consumo energético associado aos sistemas de climatização (Conceição *et al.*, 2004, 2006a; 2008a; 2008b; 2008c).

O *software* utilizado é baseado no modelo de comportamento térmico multi-nodal, que funciona em condições transitórias, tendo por base equações de balanço de massa e balanço térmico, resolvidas através do método de Runge-Kutta-Fehlberg com controlo de erros (Conceição *et al.*, 2003; 2008c).

O modelo considera os fenómenos de condução, convecção, radiação e transferência de massa. As equações integrais de balanço térmico e de massa são aplicadas para os diversos compartimentos e são consideradas as trocas por condução nas principais estruturas dos edifícios (portas, teto, solo, paredes, etc.), as trocas por convecção e as trocas radiativas (quer da radiação solar direta, quer a transferência de calor entre superfícies). No cálculo radiativo considera o efeito de sombreamento causado pelas superfícies envolventes (Conceição *et al.*, 2003; 2008c).

De referir que o *software*, antes de ser implementado, já tinha sido validado em edifícios escolares de topologia complexa, nas condições de inverno e verão (Conceição *et al.*, 2006b; 2009).

O *software* de simulação numérica carece da introdução de alguns parâmetros e configurações, neste contexto, foi efetuado o levantamento:

- das características do edificado, nomeadamente: geometria tridimensional dos edifícios a modelar e dos obstáculos envolventes (edifícios ou outros elementos que provoquem sombreamento significativo) relevantes para a exposição solar do edifício alvo;

- das propriedades térmicas (condutibilidade térmica, resistência térmica e massa específica) de todos os materiais envolvidos no edifício, considerando a estratificação térmica e a espessura das diferentes camadas constituintes das paredes;
- das variáveis ambientais externas (insolação, temperatura, humidade, velocidade do ar) e a geolocalização dos edifícios;
- dos dados relativos ao uso e funcionamento dos vários compartimentos dos edifícios e respetivos ciclos de ocupação.

De acordo com o levantamento efetuado *in situ*, e tendo por base os projetos de arquitetura dos vários edifícios, considerou-se adequado definir as paredes dos compartimentos com as características que se ilustram na figura 5.1.

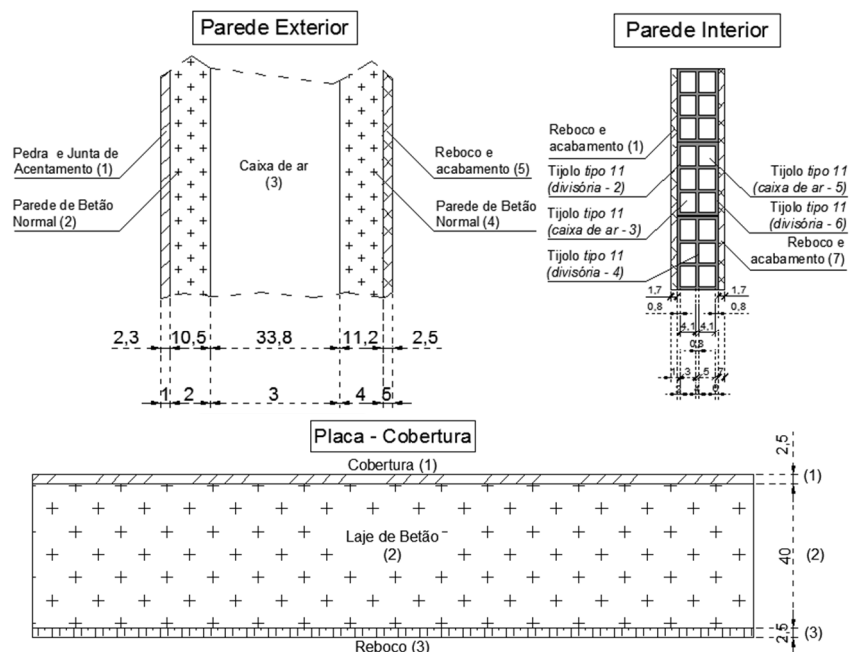


Figura 5.1 – Esquema da constituição das paredes dos edifícios.

Na tabela 5.1 indicam-se os coeficientes dos materiais que constituem as paredes dos vários edifícios, conforme apresentado no esquema da figura 5.1 e que foram considerados na modelação. Para além das paredes foram identificadas todas as janelas e superfícies envidraçadas dos edifícios, distinguindo as caixilharias de vidro simples e de vidro duplo.

Tabela 5.1 – Coeficientes dos materiais das paredes dos edifícios.

Tipo de parede	Espessura (m)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor Especifico (J/kg.K)	Condutibilidade térmica (W/(m.°C))
<b>Parede Exterior (5 camadas)</b>				
1 - Pedras calcárias	0,023	2035	920	1,4
2 - Betão armado de inertes correntes	0,105	2300	1040	2
3 - Caixa-de-ar	0,338	1223	1000	0,025
4 - Betão Armado de inertes correntes	0,112	2300	1040	2
5 - Reboco e acabamento	0,025	1800	1046	1,3
<b>Parede Interior (7 camadas)</b>				
1 - Reboco e acabamento	0,017	1800	1046	1,3
2 - Tijolo 11 (Parede exterior <i>a</i> )	0,008	1000	920	0,41
3 - Tijolo 11 (Caixa de Ar <i>a</i> )	0,041	1223	1000	0,025
4 - Tijolo 11 (Parede interior <i>1</i> )	0,008	1000	920	0,41
5 - Tijolo 11 (Caixa de Ar <i>b</i> )	0,041	1223	1000	0,025
6 - Tijolo 11 (Parede exterior <i>b</i> )	0,008	1000	920	0,41
7 - Reboco e acabamento	0,017	1800	1046	1,3
<b>Laje de Cobertura Placas (3 camadas)</b>				
1 - Cobertura Placas de Calcário	0,023	2035	920	1,4
2 - Laje de Betão	0,4	2300	1040	2
3 - Reboco	0,025	1800	1046	1,3

Fontes: Santos *et al*, 2006; Mendonça, 2005.

Na tabela 5.2 indica a quantidade de superfícies opacas e transparentes (envidraçados) e número de compartimentos considerados na modelação dos vários edifícios.

Tabela 5.2 – Quantidade de superfícies e compartimentos considerados na modelação.

Edifício		Opacas	Transparentes	Compartimentos (volumes)
Ed1	FCHS	2721	350	275
Ed2	FCT	2341	240	212
Ed3-4	CP	1522	125	109
Ed5	Biblioteca	2661	239	133
Ed6	Refeitório	773	100	37
Ed7	FCT	3158	426	314
Ed8-9	FCT-FE	2892	404	344
<b>Total</b>		<b>16068</b>	<b>1884</b>	<b>1424</b>

Na figura seguinte apresenta-se um esquema exemplificativo 3D, no caso do edifício 1 (FCHS), onde é possível visualizar os vários compartimentos e superfícies que compõem o edifício.

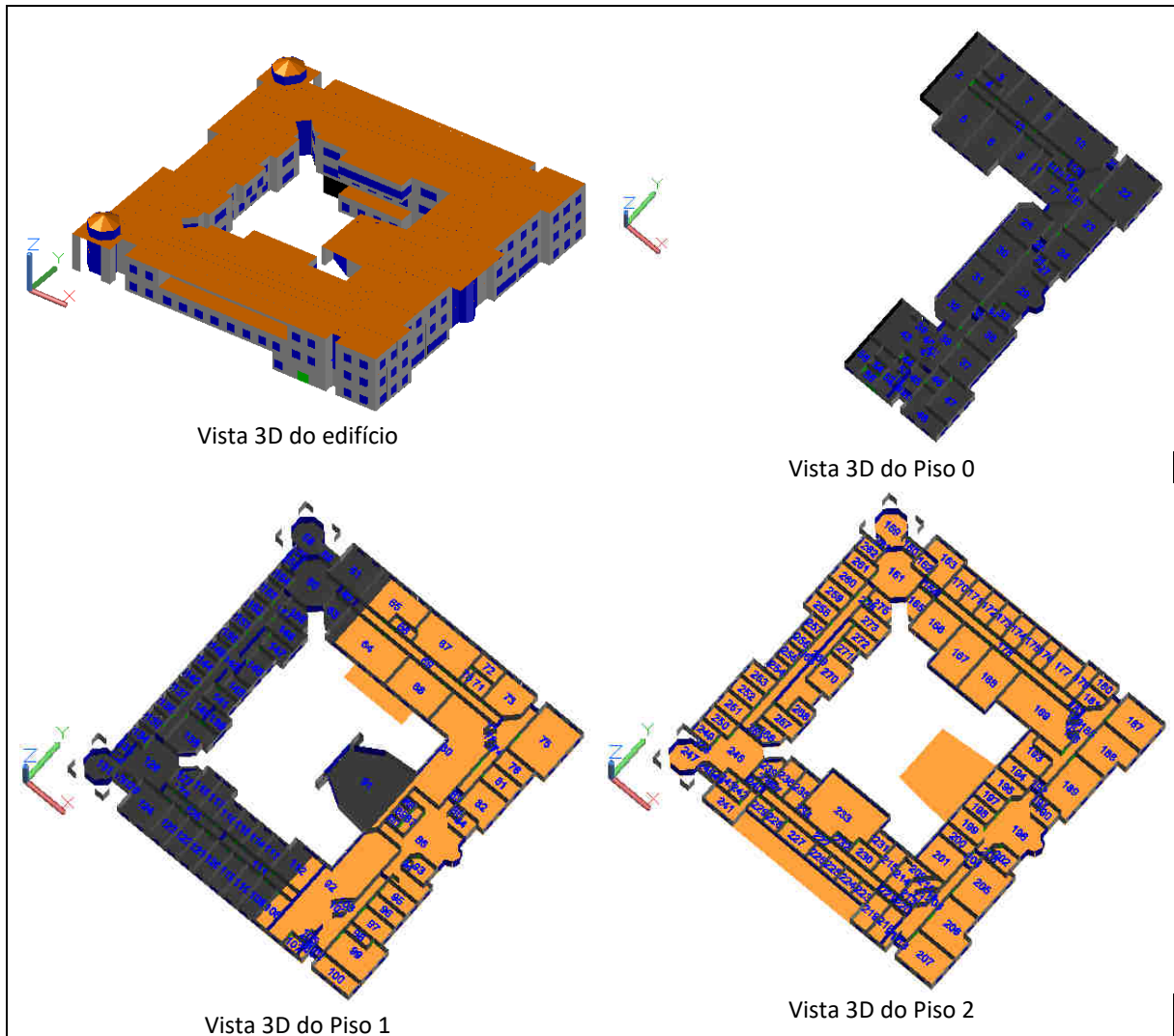


Figura 5.2 – Vista 3D do Edifício 1 (FCHS), com numeração dos compartimentos.

Embora tenham sido simulados todos os compartimentos dos 7 edifícios analisados, os resultados assumem relevância nos compartimentos que possuem ocupação humana, sendo avaliado o conforto térmico e da qualidade do ar dos ocupantes e o consumo de energia associado, para as condições ambientais externas de um dia típico de inverno e verão.

De referir que o modelo tem em consideração quer a exposição individualizada de cada compartimento às condições ambientais externas (considerando a orientação das respetivas fachadas – norte, sul, este e oeste), bem como a exposição das paredes internas no edifício.

Na tabela 5.3 apresenta-se os ciclos de ocupação e o número de ocupantes dos diferentes compartimentos tipo dos edifícios.

Tabela 5.3 – Número de ocupantes por ciclo de ocupação dos compartimentos dos edifícios.

Compartimentos	Ciclo horário (horas)													
	20h30	8:30	10:00	10:25	11:45	12:00	13:30	13:45	15:25	15:30	17:00	17:25	18:45	19:00
	às 8h30	às 10:00	às 10:25	às 11:45	às 12:00	às 13:30	às 13:45	às 15:25	às 15:30	às 17:00	às 17:25	às 18:45	às 19:00	às 20:30
Salas de aula pequenas	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	0
Salas de aula grandes	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	0
Gabinetes	0	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	0	0	0
Laboratórios	0	4	0	4	4	0	0	4	0	4	0	4	0	0
Áreas de passagem	0	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0
Cantina	0	0	0	0	0	150	150	0	0	0	0	0	50	50
Biblioteca - Sala de Leitura	0	30	66	130	130	80	130	130	130	130	130	80	66	20

Para adequar o modelo à realidade, de acordo com Conceição *et al.*, (2008d), foram consideradas as seguintes taxas de renovação de ar:

- nos espaços abertos ou no período em que estão abertos (corredores, salas de aula, gabinetes, anfiteatros, laboratórios e secretaria) 5,36 renovações de ar por hora;
- nos espaços fechados (arrecadações, casas de banho, salas de apoio) ou quando existe ocupação do espaço com as portas fechadas 2,42 renovações de ar por hora.

Tendo por base o Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE, 2006), com vista a proporcionar um nível de conforto térmico de um indivíduo adequado, considerou-se como referencia a temperatura do ar interior nos compartimentos: 20°C para a simulação de inverno e de 25°C para a simulação de verão.

Para avaliar o nível de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos, utilizou-se o índice PMV, considerando os seguintes parâmetros:

- nível de atividade dos ocupantes (1.2 Met);
- roupas (1 Clo para a simulação de inverno e 0,5 Clo para as condições de verão);
- temperatura média do ar (foi calculada numericamente para cada compartimento);
- humidade relativa média do ar (foi calculado numericamente para cada compartimento);
- temperatura média radiante (obtida através do valor médio das temperaturas das superfícies circundantes do compartimento);

- velocidade média do ar (0,15 m/s nas condições de inverno e 0,25 m/s nas condições de verão).

O programa de simulação da resposta térmica dos edifícios possui uma base de dados com as condições ambientais externas (temperatura do ar, radiação, velocidades e direção do vento), determinando automaticamente a respetiva evolução ao longo do dia em função da geolocalização dos edifícios e do dia do ano a simular.

Neste caso, de forma a permitir uma avaliação em condições meteorológicas médias anuais, foram selecionados para modelação dias típicos com condições médias de Inverno e Verão, considerando-se como representativos os dias 22 de dezembro e 19 de junho.

A simulação foi realizada considerando as variações ambientais externas típicas ao longo do dia (24 horas), sendo considerados os resultados referentes ao 5º dia simulado, por corresponder ao período de tempo em que as condições ambientais no interior do edifício (compartimentos) apresentavam estabilidade representativa da realidade.

A climatização dos compartimentos dos vários edifícios apenas foi proporcionada quando os compartimentos possuíam ocupantes, ou seja, foi definido que o sistema AVAC apenas entrava em funcionamento (consumo de energia) durante cada ciclo de ocupação.

A atividade de funcionamento do sistema AVAC foi controlada pela temperatura do ar (considerando como referência 20º C no verão ou 25ºC no inverno) ou pelos índices PMV ou aPMV.

No caso do controlo pelos índices PMV e aPMV, foi definida como condição de conforto térmica aceitável a Categoria C (15% de ocupantes termicamente insatisfeitos) da norma ASHRAE Standard 55-2017, ou seja, tendo por base o índice PMV (voto médio estimado) desenvolvido por Fanger e o índice PPD (quantidade estimada de pessoas insatisfeitas termicamente com as condições do ambiente), o sistema AVAC atua quando ocorrem valores de PMV fora do intervalo  $-0.7 < PMV < 0.7$  (Categoria C).

O programa de simulação calculou o número de horas em que os ocupantes estão em condições termicamente insatisfeitas ( $-0.7 < PMV < 0.7$ ;  $PPD < 15\%$ ).

Na tabela 5.5 apresentam-se os parâmetros e configurações de cálculo atribuídos no software de simulação numérica da resposta térmica dos edifícios.

Tabela 5.4 – Parâmetros e configurações de cálculo do *software* de simulação numérica.

Parâmetros	Configurações: Verão / Inverno
Dias de cálculo	22 junho / 22 dezembro
Latitude [°]	39 (Faro)
Ângulo de incidência do vento [°]	-1.2 / -109,2
Concentração exterior de CO <sub>2</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	0.0005
Temperatura da Terra [°C]	18
Temperatura do ar a atingir [°C]	25 / 20
Temperatura dos corpos opacos [°C]	25 / 20
Temperatura das superfícies transparentes [°C]	25 / 20
Temperatura dos corpos interiores [°C]	25 / 20
Massa de vapor nas superfícies [kg]	0.001
Massa de vapor absorvido [kg]	0
Densidade (ρ ar) [kg/m <sup>3</sup> ]	1.1614
Cp ar [J/(kg.K)]	1007
Condutibilidade ar (W/m <sup>2</sup> /°C)	0.0263
Expansão (γ)	0.00333
Viscosidade (m <sup>2</sup> /s)	1.581 x 10 <sup>-6</sup>
Prandtl	0.7
Volume [m <sup>3</sup> ]	1 x 106
Coeficiente da leitura da radiação [%]	1
Coeficiente da caixilharia das janelas [%]	0.75
Coeficiente da emissão das janelas [%]	0.85
Coeficiente de absorção das paredes exteriores [%]	0.5
Coeficiente de absorção das paredes interiores [%]	0.5
Coeficiente de emissão das paredes [%]	0.85
Massa corporal [kg]	70
Altura Corporal [m]	1.7
Área corporal [m <sup>2</sup> ]	1.805483
H <sub>2</sub> O gerado corporalmente [mg/m <sup>3</sup> ]	8.3 x 10 <sup>-6</sup>
CO <sub>2</sub> gerado corporalmente [mg/m <sup>3</sup> ]	8.8 x 10 <sup>-6</sup>
Vestuário [clo]	0.5 / 1
Taxa metabólica [met]	70

Os resultados obtidos foram posteriormente tratados, permitindo avaliar, de forma crítica, a aplicabilidade e benefícios das diferentes opções de climatização, considerando a relação do consumo de energia associado e o menor número de horas de desconforto dos ocupantes.

Foi efetuada a simulação numérica dos edifícios considerando alternativamente seis opções para a climatização dos compartimentos:

- Ventilação natural;
- Geotermia com radiação em todas as superfícies dos compartimentos;
- Geotermia apenas nas superfícies horizontais dos compartimentos;
- Sistema de climatização AVAC controlado alternativamente:
  - índice PMV adaptativo;
  - índice PMV Fanger;
  - temperatura do ar.

## 6 Resultados e Discussão

Neste capítulo são analisados os principais resultados obtidos nas simulações do comportamento térmico dos 7 vários edifícios, para as 6 alternativas de climatização avaliadas, considerando os seguintes indicadores:

- Qualidade do ar [Concentração de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )];
- Conforto térmico dos ocupantes [Temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), índices PMV e aPMV];
- Consumo de energia associada às opções de climatização.

Para a avaliação do conforto e da qualidade do ar foram considerados os limites definidos na norma ASHRAE Standard 62.1-2016, ISO 7730:2005 e ASHRAE Standard 55-2017, dado que ao contrário da regulamentação internacional, o RCCTE (Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, conjuntamente com a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro) apenas define limites (menos restritivos) para a concentração de  $\text{CO}_2$  e relativamente aos níveis de conforto apenas estabelece temperaturas de referência (20°C no inverno e de 25°C no verão), para os compartimentos interiores.

Em seguida apresenta-se a análise dos resultados para os vários edifícios, considerando a implementação das várias alternativas de climatização. Para além da análise e avaliação global de cada edifício, apresenta-se a título exemplificativo, a análise detalhada da evolução dos vários parâmetros analisados ao longo do dia (durante o período de ocupação), em compartimentos tipo do Edifício 1.

Dado que os resultados são semelhantes nos vários compartimentos e edifícios estudados, considera-se redundante a apresentação e análise particular de todos os compartimentos, pelo que apenas se efetua a análise detalhada a título exemplificativo de compartimentos tipo do Edifício 1.

### 6.1 Edifício 1 (FCHS)

O Edifício 1 é constituído por três pisos e maioritariamente é composto por gabinetes voltados para todas as fachadas do edifício, por algumas salas de aulas voltadas maioritariamente a este e por alguns laboratórios nas fachadas norte e sul.

Foram analisados os resultados de todos os 275 compartimentos do edifício, dos quais 138 possuem ocupantes. Com o objetivo de demonstrar os resultados pormenorizados, foram selecionados os seguintes espaços típicos do edifício:

- Sala de aula, com 15 ocupantes durante períodos de 1,5 horas, com intervalos de 30 minutos sem ocupantes : compartimento n.º 206 com fachada voltada a este (E);
- Laboratório, com 4 ocupantes durante períodos de 1,5 horas, com intervalos de 30 minutos sem ocupantes: compartimento n.º 118, com fachada voltada a norte (N);
- Gabinetes com ocupação contínua, variável entre 2 e 4 ocupantes: compartimento n.º 120 com a fachada voltada a sul (S) e n.º 199 com fachada voltada a oeste (W).

Com o intuito de demonstrar a evolução da qualidade do ar ao longo de um dia típico, apresenta-se na figura 6.1 em gráfico com a evolução da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do período de ocupação diário, em condições de verão e inverno.

A concentração de CO<sub>2</sub> gerado pelos ocupantes dos diferentes espaços varia consoante o número de ocupantes presentes, da atividade do seu metabolismo, do volume do compartimento e da taxa de ventilação aplicada.

A concentração máxima de dióxido de carbono permitida em espaços interiores, de acordo com a norma ASHRAE Standard 62.1-2016, é de 1800 mg/m<sup>3</sup>, enquanto o limiar de proteção imposto na legislação nacional é 2250mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, conjuntamente com a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro. Dado os limites definidos pela norma ASHRAE Standard 62.1-2016 serem mais restritivos e mais próximos do recomendado pela Organização Mundial de Saúde, no presente estudo considerou-se adequado efetuar a avaliação considerando os respetivos limites.

Tal como acontece na realidade, no modelo de simulação foi considerado que a taxa de renovação do ar dos compartimentos apenas ocorre no final de cada ciclo de ocupação devido à abertura das portas para entrada e saída dos ocupantes, pelo que os resultados apresentados são iguais para todos os 6 sistemas de climatização avaliados.

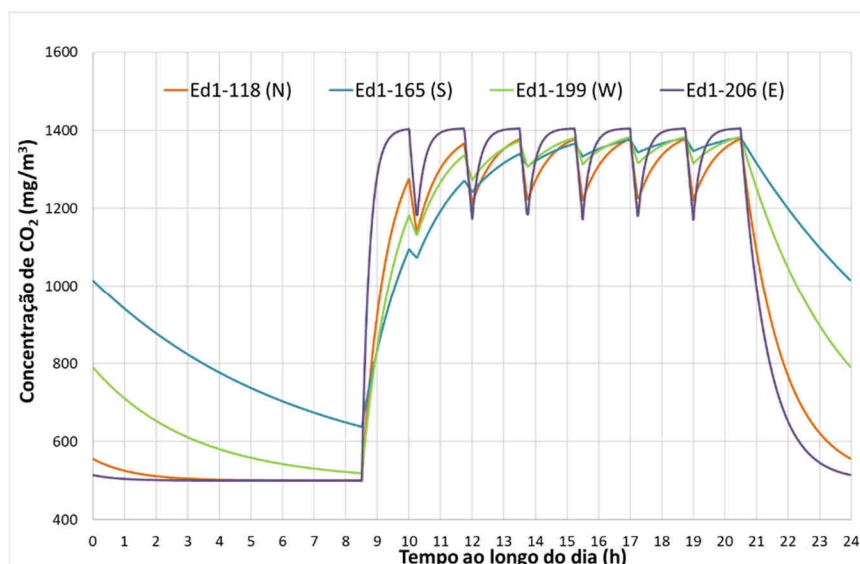


Figura 6.1 – Edifício 1: Evolução da concentração de CO<sub>2</sub> durante um dia típico de ocupação (verão e inverno).

Na tabela 6.1 apresenta-se o número total de horas de desconforto diário acumulado nos ocupantes do Edifício 1 devido à qualidade do ar (concentração de CO<sub>2</sub>), considerando a implementação dos diferentes sistemas de climatização avaliados.

Tabela 6.1 – Horas de desconforto total devido à qualidade do ar (CO<sub>2</sub>) no Edifício 1.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Total
Climatização Natural	Verão	0	0	2	0	2
	Inverno	0	0	2	0	2
Geotermia com painéis radiantes em todas as superfícies	Verão	0	0	2	0	2
Coletores solares térmicos com painéis radiantes em todas as superfícies	Inverno	0	0	2	0	2
Geotermia com painéis radiantes apenas nas superfícies horizontais	Verão	0	0	2	0	2
Coletores solares térmicos com painéis radiantes nas superfícies horizontais	Inverno	0	0	2	0	2
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV Adaptativo	Verão	0	0	2	0	2
	Inverno	0	0	2	0	2
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	0	0	2	0	2
	Inverno	0	0	2	0	2
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	0	2	0	2
	Inverno	0	0	2	0	2

De acordo com os resultados apresentados na figura 6.1 e a tabela 6.1 os compartimentos com ocupação do Edifício 1 apresentam uma boa qualidade do ar com os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> inferiores a 1800 mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido a norma ASHRAE

Standard 62.1-2016 e inferior a  $2250\text{mg}/\text{m}^3$ , conforme estabelecido na legislação nacional pela Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro

Em alguns dos compartimentos do edifício, nomeadamente nos laboratórios em que a relação espaço/ocupantes é menor, ao final de cada ciclo de ocupação a concentração de dióxido de carbono atinge valores ligeiramente superiores aos limites de referência da ASHRAE Standard 62.1-2016, ou seja, durante curtos períodos de tempo ao final de cada ciclo de ocupação estima-se que se verifique desconforto dos ocupantes, no total diário acumulado de 2 horas.

Face aos resultados obtidos, sublinha-se que a eventual ocupação dos espaços avaliados durante períodos de tempo mais prolongados, nomeadamente para atividades que exigem melhores condições de conforto e qualidade do ar interior poderá traduzir-se na diminuição progressiva do conforto dos ocupantes, devido ao aumento da concentração de  $\text{CO}_2$ .

Nas figuras seguintes 6.2 a 6.13 apresenta-se a variação da temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) ao longo do tempo no interior dos compartimentos. De referir que se considerou apenas o funcionamento dos sistemas de climatização quando ocorreu ocupação dos compartimentos.

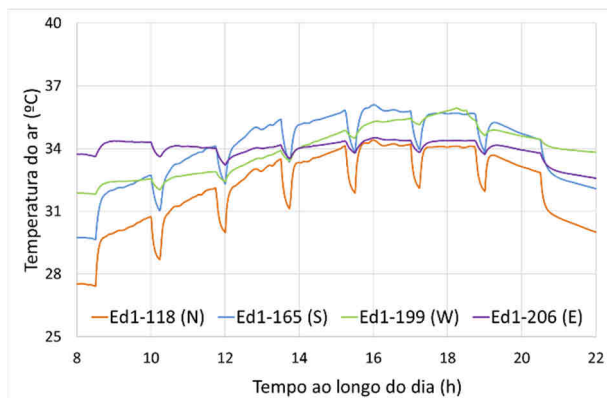


Figura 6.2 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de verão, climatização natural.

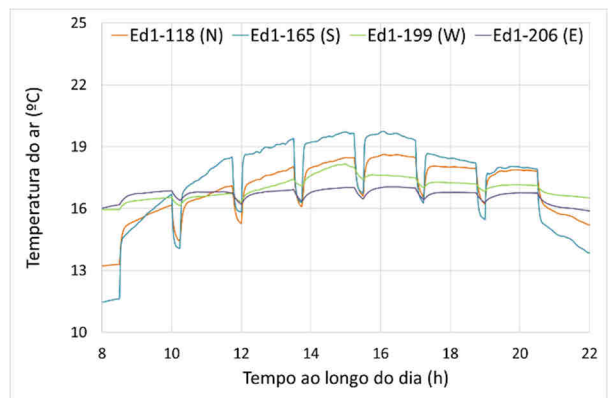


Figura 6.3 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de inverno, climatização natural.

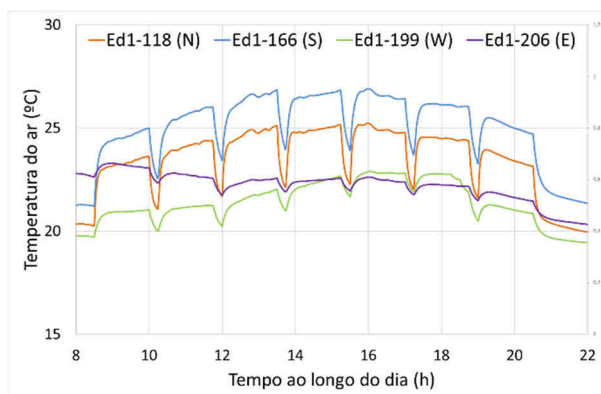


Figura 6.4 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de verão, geotermia e todas as sup. radiantes.

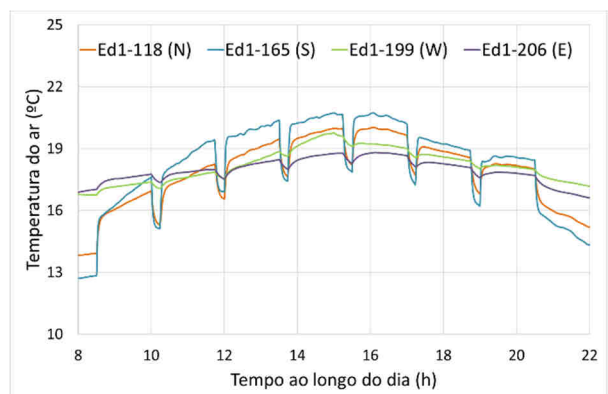


Figura 6.5 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de inverno, geotermia e todas as sup. radiantes.

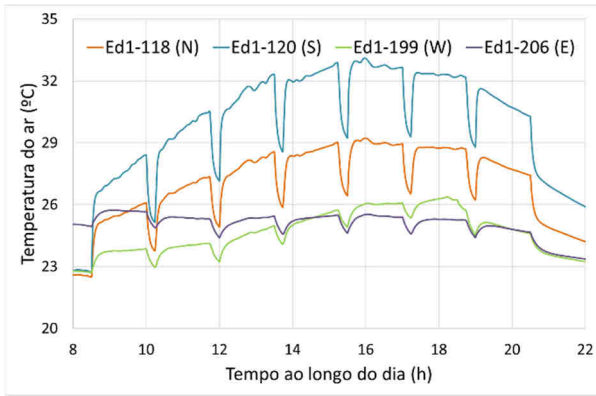


Figura 6.6 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de verão, geotermia com sup. horiz. radiantes.

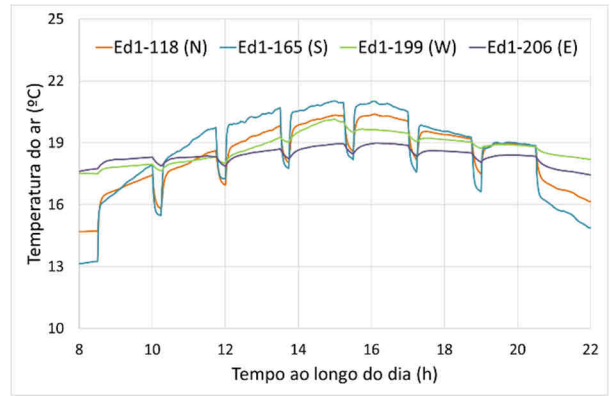


Figura 6.7 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de inverno, geotermia com sup. horiz. radiantes.

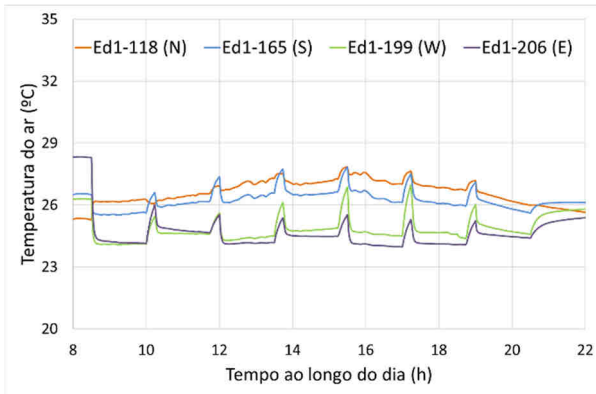


Figura 6.8 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice aPMV.

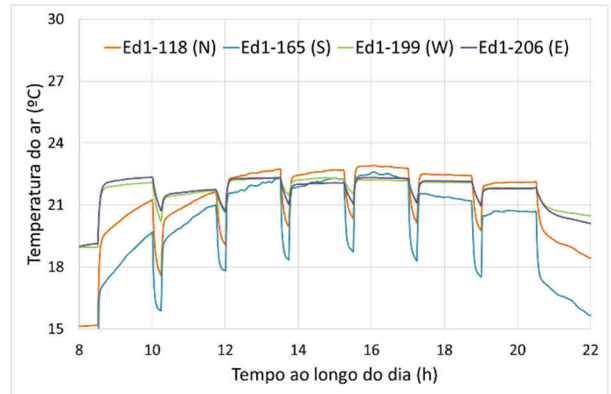


Figura 6.9 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice aPMV.

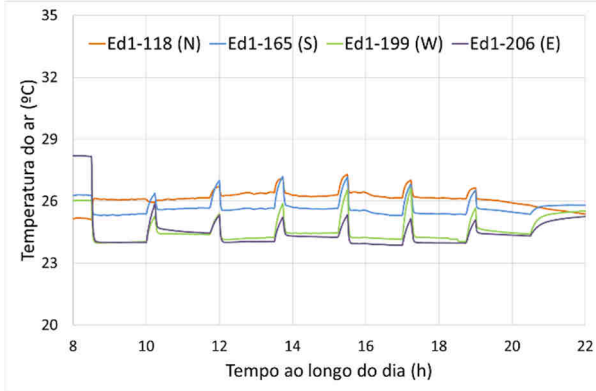


Figura 6.10 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice PMV.

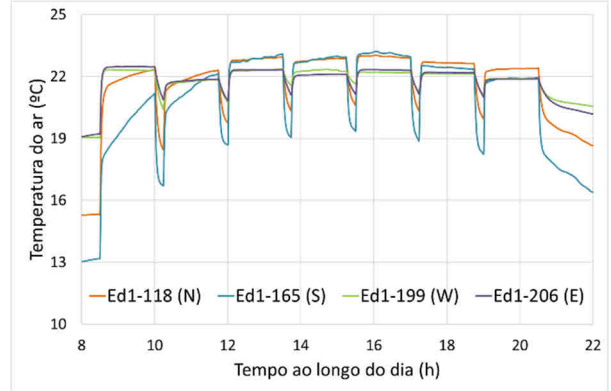


Figura 6.11 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice PMV.

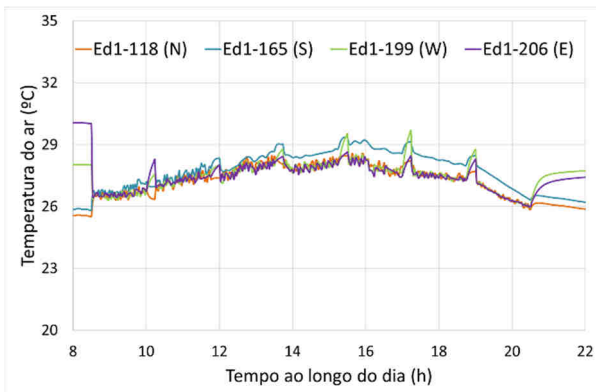


Figura 6.12 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por  $T_{ar}$ .

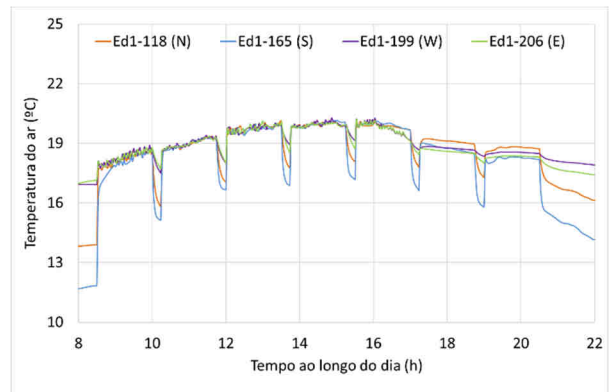


Figura 6.13 – Edifício 1: Evolução da  $T_{ar}$  durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por  $T_{ar}$ .

De acordo com as figuras anteriores (Figura 6.2 a Figura 6.13) verifica-se que na ausência de ocupação (e conseqüente não utilização do sistema AVAC) os valores de temperatura do ar aumentam no verão e diminuem no inverno.

A atuação do sistema AVAC controlado pelo índice de Fanger, índice adaptativo e pela temperatura do ar interior, proporciona temperaturas no interior das salas que de acordo com o índice PMV são aceitáveis.

De acordo com as figuras 6.2 e 6.3 a temperatura nos compartimentos com janelas orientadas a este e a sul, tal como seria de esperar, é superior em cerca de 2 a 4 graus respetivamente, pois são as janelas que recebem mais radiação, o que conseqüentemente faz subir a temperatura do ar interior.

Nas figuras seguintes apresenta-se a avaliação do conforto térmico considerando o índice PMV, ao longo do tempo em que há ocupação dos compartimentos.

Os resultados avaliados considerando o intervalo de referência  $-0.2 < PMV < 0.2$ , correspondente à Categoria C (norma ASHRAE Standard 62.1-2016), com 15% dos ocupantes insatisfeitos. Este índice permite uma análise global dos ocupantes, pois considera a temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar, humidade relativa do ar, vestuário e nível de atividade metabólica dos ocupantes.

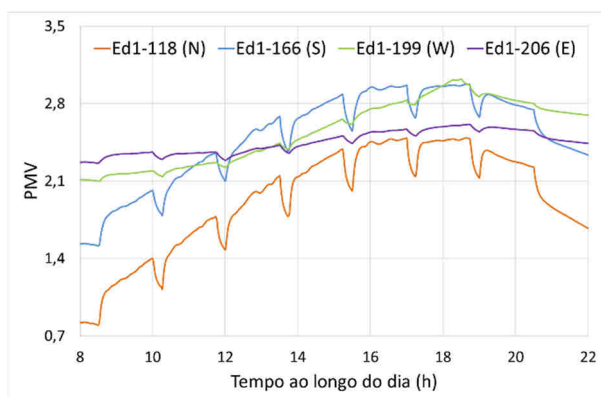


Figura 6.14 – Edifício 1: Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, climatização natural.

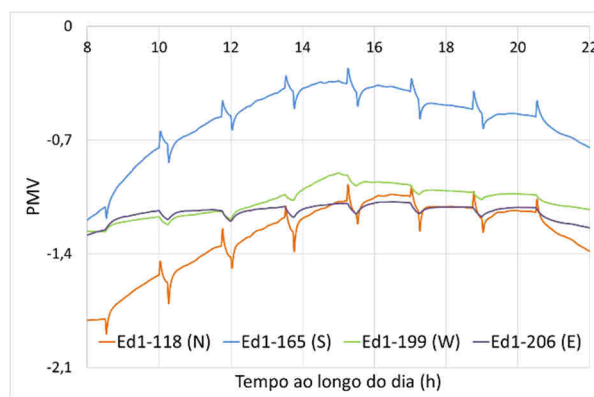


Figura 6.15 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, climatização natural.

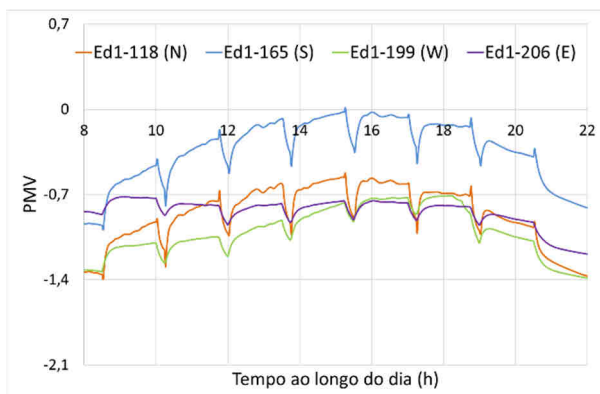


Figura 6.16 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, geotermia e todas as sup. radiantes.

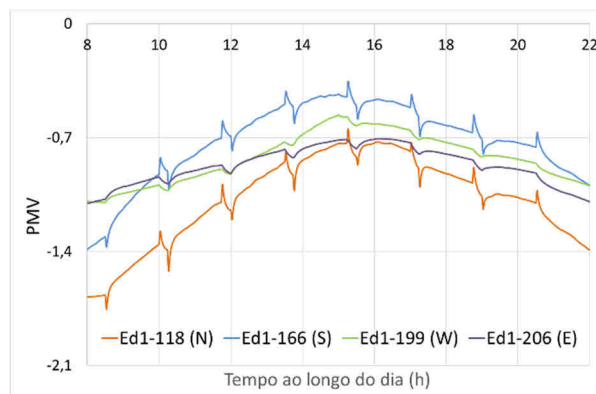


Figura 6.17 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, geotermia e todas as sup. radiantes.

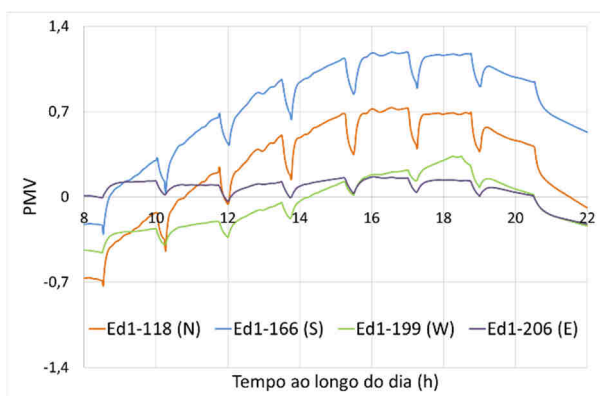


Figura 6.18 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, geotermia com superfícies horizontais radiantes.

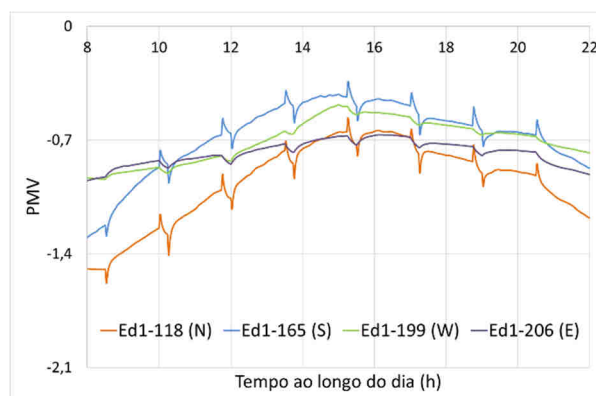


Figura 6.19 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, geotermia com superfícies horizontais radiantes.

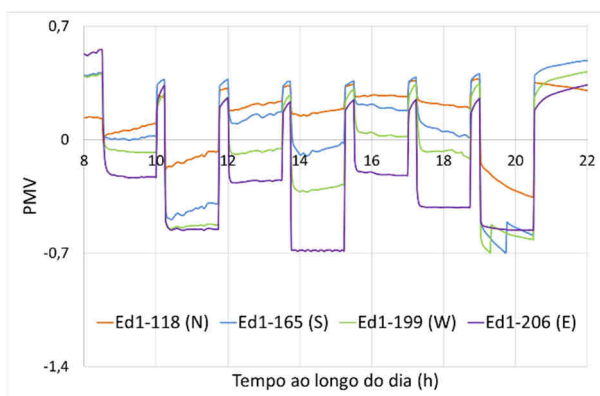


Figura 6.20 – Edifício 1: Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice aPMV.

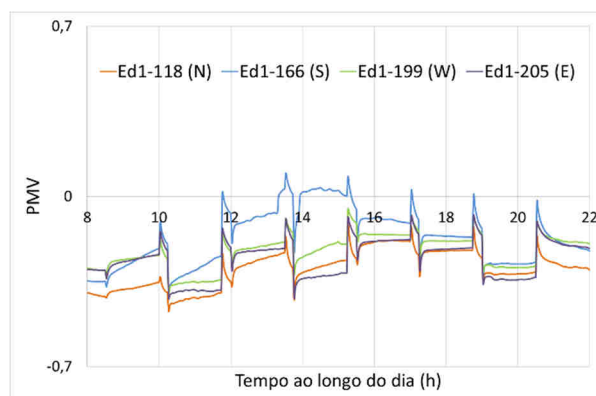


Figura 6.21 – Edifício 1: Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice aPMV.

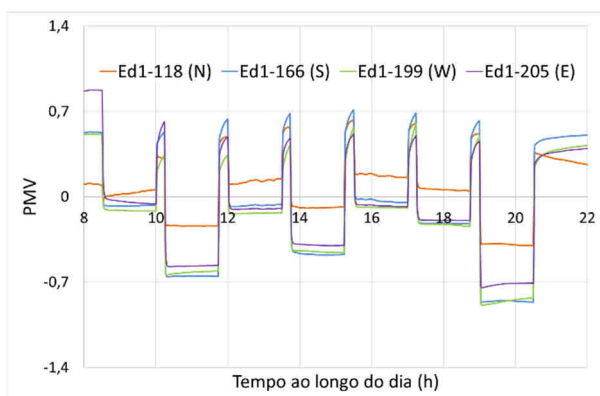


Figura 6.22 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por índice PMV.

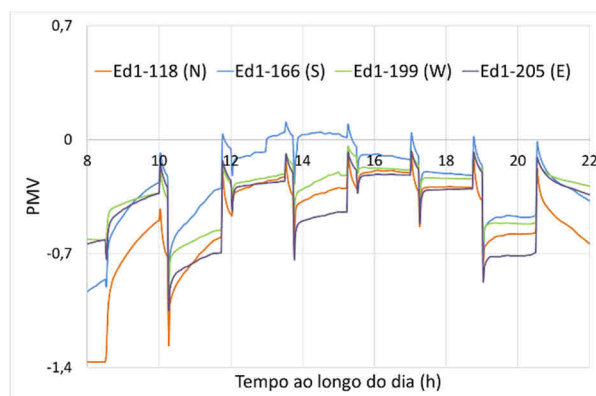


Figura 6.23 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por índice PMV.

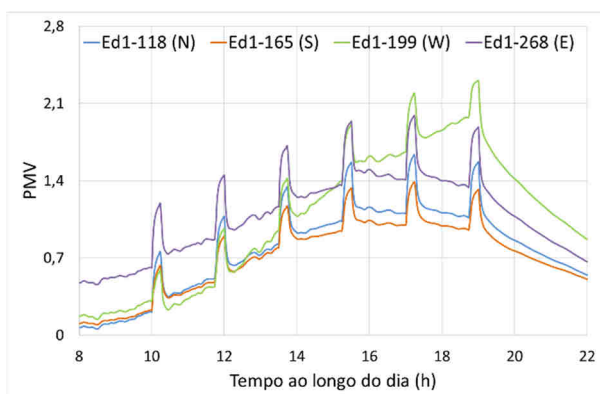


Figura 6.24 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de verão, AVAC com controlo por Temperatura do Ar.

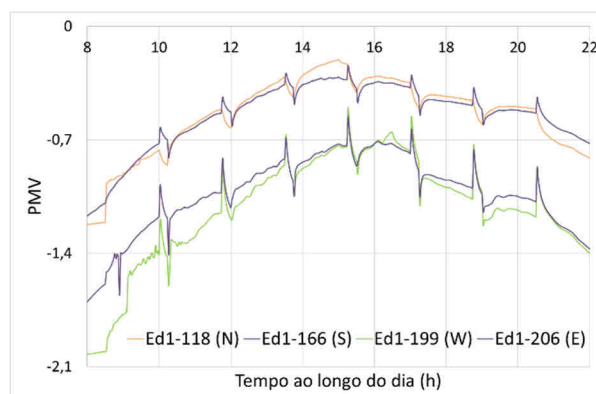


Figura 6.25 – Evolução do nível de conforto PMV durante um dia típico de inverno, AVAC com controlo por Temperatura do Ar.

De acordo resultados apresentados nas figuras 6.14 a 6.15, é possível verificar que na ausência sistema de climatização, num dia típico de verão e de inverno, de modo geral verifica-se desconforto dos ocupantes.

A ISO EN 7730:2005 que admite serem aceitáveis ambientes térmicos em que  $-0,7 < PMV < 0,7$  (Categoria C), ou seja, em que não mais de 15% dos ocupantes se sentem desconfortáveis.

Com o funcionamento dos diferentes sistemas de climatização avaliados (figuras 6.16 a 6.25), verifica-se que com a atuação dos vários sistemas de climatização o ambiente interior, no caso dos compartimentos 118 (voltado a norte), 165 (voltado a sul), 199 (voltado a W) e 268 (voltado a oeste), pode ser considerado confortável.

Na tabela 6.2 apresenta-se as horas de conforto dos ocupantes do Edifício 1, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.3 e na tabela 6.4 apresenta-se,

respetivamente, as horas de desconforto devido ao frio e devido ao calor, para os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos), permitindo uma análise da adequabilidade das diferentes tecnologias às diferentes funções e uso dos compartimentos.

**Tabela 6.2 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 1.**

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	5148	2267	60	2	7477
Geotermia com painéis radiantes em todas as superfícies	997	13	-	-	2	2380
Coletores solares térmicos com painéis radiantes em todas as superfícies	-	-	1356	12		
Geotermia com painéis radiantes apenas nas superfícies horizontais	1	541	-	-	2	1657
Coletores solares com painéis radiantes nas superfícies horizontais	-	-	1095	18		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	5	0	18	2	25
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	155	259	314	76	2	806
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	10	1175	1051	63	2	2301

**Tabela 6.3 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 1.**

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	2267
	Inverno	1551	196	467	53	2267	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	730	61	203	3	997	2353
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	926	123	271	36	1356	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	1	0	0	0	1	1096
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	741	91	228	35	1095	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	20	47	63	25	155	469
	Inverno	189	33	71	21	314	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	5	4	1	10	1061
	Inverno	704	115	213	19	1051	

Tabela 6.4 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 1.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	3439	644	1004	61	5148	5208
	Inverno	60	0	0	0	60	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	13	0	0	13	25
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	12	0	0	0	12	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	333	130	74	4	541	559
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	18	0	0	0	18	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo	Verão	5	0	0	0	5	23
	Inverno	18	0	0	0	18	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	162	24	73	0	259	335
	Inverno	76	0	0	0	76	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	740	136	282	17	1175	1238
	Inverno	63	0	0	0	63	

De acordo com os resultados obtidos, apresentados anteriormente, é possível verificar que as diferentes alternativas de climatização, traduzem-se em níveis distintos de conforto global dos ocupantes. A diferença mais significativa no número total de horas de desconforto dos ocupantes verifica-se entre a adoção do sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo, e considerando apenas a climatização natural dos compartimentos.

Como era expectável, a ventilação natural dos espaços (com entrada de ar apenas quando os ocupantes entram e saem dos compartimentos) e radiação natural das paredes, traduz-se em níveis de desconforto elevados (devido ao frio no inverno e ao calor no verão).

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, verifica-se que a climatização através de sistema AVAC controlado através do índice PMV adaptativo, proporciona melhores níveis de conforto, ou seja, um menor número de horas total de desconforto dos ocupantes.

Relativamente à geotermia (verão) combinada com coletores solares térmicos (inverno), verifica-se que quando aplicada com painéis radiantes em todas as superfícies (chão, paredes e teto) se traduz num maior número de horas de desconforto devido ao frio, quer no verão quer no inverno, do que se aplicada apenas nas superfícies horizontais (chão e teto). Esta diferença deve-se essencialmente à elevada carga térmica transmitida por todas as

superfícies, traduzindo-se na diminuição significativa da temperatura do ar no compartimento.

Importa ainda referir, que a aplicabilidade de painéis radiantes em todas as superfícies interiores se afigura difícil, além de onerosa, devido à inexistência de espaço exterior do edifício suficiente para instalação da totalidade dos coletores solares térmicos, necessários à bom funcionamento de todo o sistema.

Verifica-se ainda que o maior número de horas de desconforto é verificado nos gabinetes, apesar de o número acumulado de ocupantes por dia nos gabinetes ser significativamente inferior ao número acumulado de ocupantes por dia nas salas de aula. Este facto deve-se à relação do volume dos compartimentos com o número de ocupantes e pela orientação da fachada em que estão expostos, maioritariamente voltados a sul e oeste, enquanto as salas de aula estão maioritariamente voltadas a este (maior exposição à radiação solar ao início da manhã e menor ao final do dia).

Na tabela 6.5 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

**Tabela 6.5 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 1.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total</b>
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	36	21	17	5	79	128
	Inverno	22	11	10	6	49	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	41	24	19	6	90	144
	Inverno	24	12	11	7	54	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	33	20	13	3	69	148
	Inverno	36	21	17	5	79	

De acordo com os resultados anteriores, para Edifício 1, a tecnologias passivas (climatização natural e geotermia combinada com coletores solares) como era esperado, não têm consumo energético ou o seu consumo pode ser considerado desprezável. No entanto, dado o elevado número de horas de desconforto dos ocupantes, neste caso considera-se que a sua implantação (mesmo não considerando os custos de instalação, que é significativamente superior ao sistema AVAC) é pouco eficiente.

O sistema AVAC tem consumos diferenciados, associados à forma como o seu funcionamento é controlado. De acordo com os resultados o sistema AVAC controlado através do índice PMV adaptativo, para além de um menor número de horas de desconforto dos ocupantes, traduz-se no menor consumo de energia e num nível de conforto significativamente superior dos ocupantes.

Neste contexto, considerando a relação consumo de energia e conforto dos ocupantes, dada a tipologia dos compartimentos e o tipo de ocupação existente no Edifício 1, conclui-se que o sistema AVAC controlado através do índice PMV adaptativo apresenta a melhor relação entre o menor consumo de energia e um menor número de horas de desconforto dos ocupantes.

Assim, no edifício 1 é possível verificar que:

- De forma geral a qualidade do ar interior (concentração de CO<sub>2</sub>) é boa, com os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> inferiores a 1800 mg/m<sup>3</sup>;
- Em alguns compartimentos (laboratórios) as concentrações de CO<sub>2</sub> atinge no final dos ciclos valores ligeiramente acima do valor de referência, traduzindo-se no total de 2 horas de desconforto por dia;
- O sistema AVAC controlado pelo índice aPMV traduz-se no menor número de horas de desconforto;
- O sistema de climatização por geotermia apresenta um elevado número de horas de desconforto, o que o torna inadequado.

## 6.2 Edifício 2 (FCT)

O edifício 2 é composto por três pisos: rés-do-chão, primeiro e segundo andar. Este é constituído maioritariamente por gabinetes e laboratórios. Os compartimentos têm janelas voltadas para as fachadas Norte, Sul, Este e Oeste.

Na tabela 6.6 apresenta-se o número total de horas de desconforto acumulado dos ocupantes do Edifício 2, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.7 e na tabela 6.8 apresenta-se, respetivamente, o número total de horas de desconforto acumulado devido ao frio e devido ao calor, considerando os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos) do edifício.

Tabela 6.6 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 2.

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	2367	907	50	3	3327
Geotermia (todas as sup.)	3	29	-	-	3	598
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	-	-	562	1		
Geotermia (apenas sup. horizontais)	0	1102	-	-	3	1549
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	-	-	439	5		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	192	0	22	3	217
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	102	268	228	60	3	661
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	102	653	526	52	3	1336

**Tabela 6.7 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 2.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (horas)</b>
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	907
	Inverno	568	0	284	55	907	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	3	0	0	0	3	565
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	391	0	141	30	562	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	439
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	317	0	97	25	439	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV Adaptativo	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	33	0	63	6	102	330
	Inverno	148	0	65	15	228	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	33	0	63	6	102	628
	Inverno	353	0	149	24	526	

**Tabela 6.8 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 2.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (horas)</b>
Climatização Natural	Verão	1514	0	819	34	2367	2417
	Inverno	50	0	0	0	50	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	14	0	15	0	29	30
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	1	0	0	0	1	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	692	0	410	0	1102	1107
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	5	0	0	0	5	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	168	0	24	0	192	214
	Inverno	22	0	0	0	22	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	229	0	39	0	268	328
	Inverno	60	0	0	0	60	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	433	0	204	16	653	705
	Inverno	52	0	0	0	52	

De acordo com os resultados da tabela 6.6, considerando em todos os casos que a renovação do ar apenas ocorrer com a entrada e saída dos ocupantes, apresenta uma boa qualidade do ar, com os níveis de concentração de CO<sub>2</sub> inferiores ao valor de referência 1800 mg/m<sup>3</sup> (norma ASHRAE Standard 62.1-2016) e inferior a 2250mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido na legislação nacional pela Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro

No entanto, nos compartimentos onde relação espaço/ocupantes é menor, ao final de cada ciclo de ocupação a concentração de dióxido de carbono atinge pontualmente valores ligeiramente superiores aos limites de referência da ASHRAE Standard 62.1-2016, sendo o número de horas total diárias acumuladas de desconforto 3 horas.

De referir que este valor pode ser considerado desprezável, pois resulta do somatório das horas de desconforto ao longo do dia, que em muitos casos são poucos minutos por cada ciclo de ocupação, ou seja, na prática não tem relevância para os ocupantes.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente nas tabelas 6.6, 6.7 e 6.8, no caso particular do Edifício 2 (constituído maioritariamente por gabinetes e laboratórios) verifica-se que a opção de climatização que apresenta um menor número de horas acumuladas por dia de desconforto dos ocupantes é o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo. Como era expectável, a climatização natural dos espaços (com entrada de ar apenas quando os ocupantes entram e saem dos compartimentos e radiação natural das paredes), traduz-se em níveis de desconforto elevados (devido ao frio no inverno e ao calor no verão).

Ao contrário do que acontece no Edifício 1, cuja geometria e volume dos compartimentos é diferente, o sistema composto por geotermia (verão) combinada com coletores solares térmicos (inverno), com painéis radiantes em todas as superfícies apresenta, neste edifício, um número de horas de desconforto dos ocupantes próximo do sistema AVAC (tabelas 6.6). No entanto, a geotermia combinada com coletores solares térmicos, com painéis radiantes apenas nas superfícies horizontais (chão e teto), neste caso apresenta um elevado número de horas de desconforto, o que se deve à dimensão das superfícies horizontais dos compartimentos (em particular dos gabinetes) não ser suficiente para permitir transferência de energia térmica suficiente capaz de gerar um ambiente termicamente confortável.

Verifica-se ainda, à semelhança do Edifício 1, que o maior número de horas de desconforto é verificado nos gabinetes, devido à relação do volume dos compartimentos com o número de

ocupantes e da orientação da fachada em que estão expostos, maioritariamente voltados a sul e este (maior exposição à radiação solar ao início da manhã e menor ao final do dia).

Na tabela 6.9 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

**Tabela 6.9 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 2.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total</b>
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	0
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	0
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	0
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	17	2	17	1	<b>37</b>	60
	Inverno	9	4	9	1	<b>23</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	21	3	19	1	<b>44</b>	69
	Inverno	10	5	9	1	<b>25</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	18	0	14	0	<b>32</b>	45
	Inverno	4	4	4	1	<b>13</b>	

No Edifício 2, de acordo com os resultados da tabela 6.9, o sistema AVAC que apresenta menor consumo de energia é o controlo através da temperatura do ar, seguido do controlado pelo índice PMV adaptativo. No entanto, importa referir que as diferenças no consumo de energia entre os três sistemas AVAC é reduzida.

Neste caso particular, considerando a relação custo / benefício (consumo de energia e conforto dos ocupantes), dada a tipologia dos compartimentos e o tipo de ocupação existente no Edifício 2, conclui-se que o sistema AVAC controlado através do índice PMV Adaptativo apresenta a melhor relação entre o menor consumo de energia e um menor número de horas de desconforto dos ocupantes.

Refere-se ainda, que neste edifício a geotermia com painéis radiantes em todas as superfícies apresenta-se, para a fase de exploração, como a opção com melhor relação custo / benefício (sem consumo de energia para aquecimento ou arrefecimento e número de horas de

desconforto dos ocupantes semelhante ao sistema AVAC), no entanto, dado que o edifício já se encontra construído a sua implementação traduzir-se-ia em custos desproporcionados, que tornam a opção economicamente inviável.

### 6.3 Edifício 3-4 (CP)

O edifício 3-4 é composto por três pisos: rés-do-chão, primeiro e segundo andar. Apresenta uma vocação essencialmente destinada ao ensino, sendo constituído maioritariamente por salas de aula (fachadas este e oeste), e possui quatro anfiteatros, um grande auditório.

Na tabela 6.10 apresenta-se o número total de horas de desconforto acumulado dos ocupantes do Edifício 2, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.11 e na tabela 6.12 apresenta-se respetivamente o número total de horas de desconforto acumulado devido ao frio e devido ao calor, considerando os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos) do edifício.

Tabela 6.10 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 3-4.

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	1813	628	0	51	2492
Geotermia (todas as sup.)	26	332	-	-	51	1108
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	-	-	699	0		
Geotermia (apenas sup. horizontais)	0	963	-	-	51	1254
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	-	-	240	0		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	0	0	0	51	51
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	145	3	263	0	51	462
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	2	196	434	0	51	683

**Tabela 6.11 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 3-4.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (horas)</b>
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	628
	Inverno	123	423	41	41	628	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	3	16	5	2	26	725
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	117	485	43	54	699	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	240
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	65	136	24	15	240	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	8	72	46	19	145	408
	Inverno	45	152	45	21	263	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	0	2	0	2	436
	Inverno	66	301	36	31	434	

**Tabela 6.12 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 3-4.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (horas)</b>
Climatização Natural	Verão	153	1403	46	211	1813	1813
	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	14	274	0	44	332	332
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	39	780	19	125	963	963
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	1	2	0	0	3	3
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	166	9	21	0	196	196
	Inverno	0	0	0	0	0	

De acordo com os resultados da tabela 6.10 a qualidade do ar, dada a renovação, neste caso, ser independente das tecnologias de climatização (apenas ocorre com a entrada e saída dos

ocupantes), traduz-se em número de horas de desconforto ar (concentração de CO<sub>2</sub> superior a 1800 mg/m<sup>3</sup>) igual para as diferentes alternativas de climatização.

Relativamente ao número de horas total diárias acumuladas de desconforto (51 horas) ocorrem nas salas de aula (total de 28 horas acumuladas por dia) e nos anfiteatros (total de 23 horas acumuladas por dia), derivam da relação da ocupação (elevado número de ocupantes confinados) com o volume dos compartimentos, e evidencia a necessidade de implementação de um sistema de renovação forçada de ar.

De referir, que os resultados apresentados vão de encontro à forma de uso das salas e anfiteatros, em que na prática se verifica que os utilizadores tendem a manterem as portas e janelas das salas semiabertas, nomeadamente quando as aulas têm maior duração, que se traduz no aumento da saturação do ar disponível.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente nas tabelas 6.10, 6.11 e 6.12, no caso particular do Edifício 3-4 (constituído maioritariamente por salas de aula) verifica-se que a opção de climatização através do sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo permite condições de total conforto dos ocupantes. Refere-se ainda, que o sistema AVAC com controlo por índice PMV Fanger também apresenta um número horas total acumuladas de desconforto bastante reduzida (3 horas por dia no verão), ou seja, permite boas condições de conforto dos ocupantes.

Como era expectável, a ventilação natural dos espaços (com entrada de ar apenas quando os ocupantes entram e saem dos compartimentos) e radiação natural das paredes, traduz-se em níveis de desconforto elevados (devido ao frio no inverno e ao calor no verão).

Relativamente à geotermia combinada com os coletores solares térmicos no inverno, traduz-se num número total de horas acumuladas significativo, quer no inverno quer no verão. De assinalar que no verão estima-se a existência de desconforto por frio e no inverno por calor, nos ocupantes que estão mais próximos das paredes – superfícies radiantes.

Verifica-se ainda, à semelhança dos Edifícios 1 e 2, uma um menor número de horas de desconforto dos ocupantes dos gabinetes, ainda que pouco significativa.

Na tabela 6.13 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

Tabela 6.13 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 3-4.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	0
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	0
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	0
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	3	60	17	11	<b>91</b>	156
	Inverno	3	33	24	5	<b>65</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	3	72	20	12	<b>107</b>	179
	Inverno	3	36	28	5	<b>72</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	2	59	11	9	<b>81</b>	113
	Inverno	2	12	17	1	<b>32</b>	

No Edifício 3-4, de acordo com os resultados da tabela 6.13, o sistema AVAC que apresenta menor consumo de energia é o controlo através da temperatura do ar, ainda que muito próximo do controlado pelo índice PMV adaptativo e pelo índice PMV Fanger.

Neste caso particular, considerando a relação custo / benefício (consumo de energia e conforto dos ocupantes), dada a tipologia dos compartimentos e o tipo de ocupação existente no Edifício 3-4, conclui-se que o sistema AVAC controlado através do índice PMV adaptativo apresenta a melhor relação entre o consumo de energia e o conforto dos ocupantes.

#### 6.4 Edifício 5 (Biblioteca)

O Edifício 5 (Biblioteca) é composto por três pisos: rés-do-chão (arquivo), primeiro e segundo andar, onde se localizam essencialmente salas de leitura e serviços.

Este edifício, de características especiais, possui uma grande sala de leitura com janelas nas fachadas sul, este e oeste. Possui ainda diversos gabinetes de estudo localizados maioritariamente na fachada Sul e alguns (serviços administrativos) na fachada Norte.

Na tabela 6.14 apresenta-se o número total de horas de desconforto acumulado dos ocupantes do Edifício 2, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.15 e na tabela 6.16 apresenta-se respetivamente o número total de horas de desconforto acumulado devido ao frio e devido ao calor, considerando os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos) do edifício.

**Tabela 6.14 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 5.**

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	1839	961	740	0	<b>3542</b>
Geotermia (todas as sup.)	345	78	-	-	0	<b>1083</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	-	-	647	13		
Geotermia (apenas sup. horizontais)	7	434	-	-	0	<b>1101</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	-	-	647	13		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	12	0	19	0	<b>31</b>
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	83	468	332	29	0	<b>913</b>
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	3	740	642	28	0	<b>1414</b>

**Tabela 6.15 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 5.**

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>961</b>
	Inverno	467	486	8	0	<b>961</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	240	105	0	0	<b>345</b>	<b>992</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	270	377	0	0	<b>647</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	4	3	0	0	<b>7</b>	<b>654</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	270	377	0	0	<b>647</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	11	7	65	0	<b>83</b>	<b>416</b>
	Inverno	82	192	59	0	<b>333</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	0	3	0	<b>3</b>	<b>645</b>
	Inverno	224	372	46	0	<b>642</b>	

**Tabela 6.16 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 5.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Gabinetes</b>	<b>Salas de Aula</b>	<b>Laboratórios</b>	<b>Anfiteatros ou equivalentes</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (horas)</b>
Climatização Natural	Verão	742	1041	57	0	<b>1840</b>	<b>2581</b>
	Inverno	195	507	39	0	<b>741</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	78	0	0	<b>78</b>	<b>91</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	13	0	0	<b>13</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	68	366	0	0	<b>434</b>	<b>447</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	13	0	0	<b>13</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	1	11	0	0	<b>12</b>	<b>31</b>
	Inverno	0	19	0	0	<b>19</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	64	404	0	0	<b>468</b>	<b>497</b>
	Inverno	0	29	0	0	<b>29</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	195	507	39	0	<b>741</b>	<b>769</b>
	Inverno	0	28	0	0	<b>28</b>	

De acordo com os resultados da tabela 6.14 a qualidade do ar, independente das tecnologias de climatização (apenas ocorre com a entrada e saída dos ocupantes), é confortável para todos os ocupantes (a concentração de CO<sub>2</sub> é sempre inferior a 1800 mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido a norma ASHRAE Standard 62.1-2016 e inferior a 2250mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido na Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro).

De acordo com os resultados apresentados anteriormente nas tabelas 6.14, 6.15 e 6.16, no caso particular do Edifício 5 (constituído pela sala de leitura e maioritariamente por salas de estudo) verifica-se que a opção de climatização através do sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo permite condições conforto dos ocupantes significativamente melhores que as restantes soluções de climatização.

Como era expectável, a ventilação natural dos espaços (com entrada de ar apenas quando os ocupantes entram e saem dos compartimentos) e radiação natural das paredes, não é suficiente para garantir condições de conforto aceitáveis para os ocupantes, traduzindo-se num elevado número de horas acumuladas (3540 horas considerando o verão e o inverno).

Relativamente á geotermia combinada com os coletores solares térmicos no inverno, e dada a dimensão significativa do volume da sala de leitura, verifica-se que também se traduz num número total de horas acumuladas de desconforto elevado, quer no inverno quer no verão.

Na tabela 6.17 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

**Tabela 6.17 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 5.**

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	9	17	46	0	72	178
	Inverno	8	6	92	0	106	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	10	21	48	0	79	220
	Inverno	9	8	124	0	141	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	8	19	17	0	44	182
	Inverno	5	3	130	0	138	

No Edifício 5, de acordo com os resultados da tabela 6.17, o sistema de climatização que apresenta menor consumo de energia, e se traduz em níveis de conforto significativamente melhores é o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo. Neste contexto, o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo proporciona a melhor relação entre um menor consumo de energia e um menor número de horas de desconforto dos ocupantes.

### 6.5 Edifício 6 (Cantina)

O edifício 6 – Refeitório é composto por três pisos: rés-do-chão (armazém, reprografia, restaurante “grelhados” e serviços), primeiro andar (bar e sala de refeições da cantina) e segundo andar (restaurante “VIP”). A sala de refeições e o restaurante “VIP” possuem janelas voltadas para todas as fachadas.

Na tabela 6.18 apresenta-se o número total de horas de desconforto acumulado dos ocupantes do Edifício 2, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.19 e na tabela 6.20 apresenta-se respetivamente o número total de horas de

desconforto acumulado, devido ao frio e devido ao calor, considerando os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos) do edifício.

**Tabela 6.18 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 6.**

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	60	0	0	0	60
Geotermia (todas as sup.)	0	0	-	-	0	7
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	-	-	7	0		
Geotermia (apenas sup. horizontais)	0	0	-	-	0	7
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	-	-	7	0		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	0	0	0	0	0
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	48	0	28	0	0	76
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	7	12	0	0	0	19

**Tabela 6.19 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 6.**

Tipo de Tecnologia	Época	Reprografia	Restaurantes	Cantina	Bar	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia com painéis radiantes em todas as superfícies	Verão	0	0	0	0	0	7
Coletores solares térmicos com painéis radiantes em todas as superfícies	Inverno	0	0	7	0	7	
Geotermia com painéis radiantes apenas nas superfícies horizontais	Verão	0	0	0	0	0	7
Coletores solares térmicos com painéis radiantes nas superfícies horizontais	Inverno	0	0	7	0	7	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	0	0	48	0	48	76
	Inverno	0	0	28	0	28	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	0	7	0	7	7
	Inverno	0	0	0	0	0	

**Tabela 6.20 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 6.**

<b>Tipo de Tecnologia</b>	<b>Época</b>	<b>Reprografia</b>	<b>Restaurantes</b>	<b>Cantina</b>	<b>Bar</b>	<b>Subtotal</b>	<b>Total (horas)</b>
Climatização Natural	Verão	0	0	60	0	<b>60</b>	<b>60</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV Adaptativo	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	0	12	0	<b>12</b>	<b>12</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	

De acordo com os resultados da tabela 6.18 a qualidade do ar, independente das tecnologias de climatização (apenas ocorre com a entrada e saída dos ocupantes), é confortável para todos os ocupantes (a concentração de CO<sub>2</sub> é sempre inferior a 1800 mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido a norma ASHRAE Standard 62.1-2016 e inferior a 2250mg/m<sup>3</sup>, conforme estabelecido na Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro).

De acordo com os resultados apresentados anteriormente nas tabelas 6.18, 6.19 e 6.20, no caso particular do Edifício 6, que possui características arquitetônicas e de uso particulares (amplas salas de refeições, com ocupação no período de almoço), todas as opções de climatização apresentam níveis de conforto aceitáveis. O sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo permite condições conforto dos ocupantes ideais, no verão e de inverno, em 100% dos ocupantes.

Na tabela 6.21 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

Tabela 6.21 – Consumo de energia (kW.h/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 6.

Tipo de Tecnologia	Época	Reprografia	Restaurantes	Cantina	Bar	Subtotal	Total
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	0	0	19	0	<b>19</b>	<b>19</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	0	0	21	0	<b>21</b>	<b>33</b>
	Inverno	0	0	12	0	<b>12</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	0	13	0	<b>13</b>	<b>13</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	

No Edifício 5, de acordo com os resultados da tabela 6.21, o sistema de climatização que apresenta menor consumo de energia, e se traduz em níveis de conforto significativamente melhores é o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo. Neste contexto, o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo proporciona a melhor relação entre o menor consumo de energia e um menor número de horas de desconforto dos ocupantes.

## 6.6 Edifício 7 (FCT)

O edifício 7 (FCT) é composto por quatro pisos, maioritariamente constituído por gabinetes e laboratórios, com janelas voltadas para as fachadas Norte, Sul, Este e Oeste.

Na tabela 6.22 apresenta-se o número total de horas de desconforto acumulado dos ocupantes do Edifício 7, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.23 e na tabela 6.24 apresenta-se respetivamente o número total de horas de desconforto acumulado devido ao frio e devido ao calor, considerando os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos) do edifício.

Tabela 6.22 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 7.

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	4545	4898	0	13	9456
Geotermia (todas as sup.)	0	3873	-	-	13	6514
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	-	-	2628	0		
Geotermia (apenas sup. horizontais)	0	2518	-	-	13	4947
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	-	-	2416	0		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	3	0	0	13	16
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	414	62	1842	2	13	2333
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	11	980	2622	0	13	3626

Tabela 6.23 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 7.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	4898
	Inverno	2710	229	1879	80	4898	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	0	2628
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	1443	100	1043	42	2628	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	2416
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	1331	76	969	40	2416	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	0	85	328	1	414	2256
	Inverno	817	130	847	48	1842	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	3	8	0	11	2633
	Inverno	1357	165	1045	55	2622	

Tabela 6.24 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 7.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	2406	549	1454	136	<b>4545</b>	<b>4545</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	2065	404	1305	99	<b>3873</b>	<b>3873</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	1243	336	851	88	<b>2518</b>	<b>2518</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	2	0	1	0	<b>3</b>	<b>3</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	41	0	20	1	<b>62</b>	<b>64</b>
	Inverno	2	0	0	0	<b>2</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	559	73	336	12	<b>980</b>	<b>980</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	

De acordo com os resultados da tabela 6.22, a qualidade do ar dado neste caso a renovação ser independente das tecnologias de climatização traduz-se em número de horas de desconforto (concentração de CO<sub>2</sub> superior a 1800 mg/m<sup>3</sup>) igual para as diferentes alternativas de climatização.

Relativamente ao número de horas total diárias acumuladas de desconforto (13 horas), pode considerar-se que o mesmo é desprezável, e ocorre pontualmente nas salas com menor relação volume / ocupação.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente nas tabelas 6.22, 6.23 e 6.24, no caso particular do Edifício 7 (constituído maioritariamente por gabinetes e laboratórios) verifica-se que a opção de climatização que apresenta um menor número de horas acumuladas por dia (verão e inverno) de desconforto dos ocupantes é o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo.

Como era expectável, a ventilação natural dos espaços e radiação natural das paredes, traduz-se em níveis de desconforto elevados (devido ao frio no inverno e ao calor no verão).

Verifica-se ainda, à semelhança do Edifício 1 e 2, que o maior número de horas de desconforto é verificado nos gabinetes, devido à relação do volume dos compartimentos com o número

de ocupantes e da orientação da fachada em que estão expostos, maioritariamente voltados a sul, este e oeste (maior exposição à radiação solar ao longo do dia).

Na tabela 6.25 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

Tabela 6.25 – Consumo de energia (kW.h/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 7.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	45	30	0	0	75	184
	Inverno	70	39	0	0	109	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	50	35	0	0	85	220
	Inverno	86	49	0	0	135	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	27	21	0	0	48	137
	Inverno	55	34	0	0	89	

No Edifício 7, de acordo com os resultados da tabela 6.25, o sistema AVAC que apresenta menor consumo de energia, quer no verão quer no inverno, é o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo.

Neste caso particular, considerando a relação custo / benefício (consumo de energia e conforto dos ocupantes), dada a tipologia dos compartimentos e o tipo de ocupação existente no Edifício 7, conclui-se que o sistema AVAC controlado através do índice PMV adaptativo proporciona uma melhor relação entre o menor consumo de energia e melhores índices de conforto dos ocupantes.

## 6.7 Edifício 8-9 (FCT-FE)

O edifício 8-9 (FCT-FE) é composto por quatro pisos, com fachadas voltadas para os quatro quadrantes. No piso -1 localizam-se os anfiteatros que ficam abaixo da superfície do solo. Nos restantes pisos existem, maioritariamente, salas de aula, gabinetes e laboratórios.

Na tabela 6.26 apresenta-se o número total de horas de desconforto acumulado dos ocupantes do Edifício 8-9, associados às diferentes alternativas de climatização analisadas. Na tabela 6.27 e na tabela 6.28 apresenta-se respetivamente o número total de horas de desconforto acumulado devido ao frio e devido ao calor, considerando os vários tipos de compartimentos (com níveis de ocupação também distintos) do edifício.

**Tabela 6.26 – Horas de desconforto total para as várias opções de climatização do Edifício 8-9.**

Tipo de Tecnologia	Verão		Inverno		Horas de desconforto devido à qualidade do ar [CO <sub>2</sub> ]	Total (horas)
	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor	Horas de desconforto por frio	Horas de desconforto por calor		
Climatização Natural	0	5718	4132	79	131	<b>10191</b>
Geotermia (todas as sup.)	1052	140	-	-	131	<b>3645</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	-	-	2143	48		
Geotermia (apenas sup. horizontais)	0	1045	-	-	131	<b>3312</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	-	-	1952	53		
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	0	6	0	49	131	<b>317</b>
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	444	126	1585	88	131	<b>2505</b>
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	2	1065	2264	81	131	<b>3674</b>

**Tabela 6.27 – Horas de desconforto devido ao frio nos vários compartimentos do Edifício 8-9.**

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinets	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>4132</b>
	Inverno	2387	375	1219	151	<b>4132</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	699	17	321	15	<b>1052</b>	<b>3195</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	1256	155	668	64	<b>2143</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>1952</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	1147	138	607	60	<b>1952</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	0	0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>
	Inverno	0	0	0	0	<b>0</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	5	172	197	70	<b>444</b>	<b>2029</b>
	Inverno	747	235	502	101	<b>1585</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	0	1	0	1	<b>2</b>	<b>2266</b>
	Inverno	1220	277	659	108	<b>2264</b>	

Tabela 6.28 – Horas de desconforto devido ao calor nos vários compartimentos do Edifício 8-9.

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total (horas)
Climatização Natural	Verão	2059	1397	2074	188	<b>5718</b>	<b>5797</b>
	Inverno	0	27	52	0	<b>79</b>	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	5	105	30	0	<b>140</b>	<b>188</b>
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	19	29	0	<b>48</b>	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	93	607	312	33	<b>1045</b>	<b>1098</b>
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	20	33	0	<b>53</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	2	4	0	0	<b>6</b>	<b>55</b>
	Inverno	0	16	33	0	<b>49</b>	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	28	72	26	0	<b>126</b>	<b>214</b>
	Inverno	0	30	58	0	<b>88</b>	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	482	195	365	23	<b>1065</b>	<b>1146</b>
	Inverno	0	28	53	0	<b>81</b>	

De acordo com os resultados da tabela 6.29, a qualidade do ar, dado neste caso a renovação ser independente das tecnologias de climatização (apenas ocorre com a entrada e saída dos ocupantes), traduz-se em número de horas de desconforto (concentração de CO<sub>2</sub> superior a 1800 mg/m<sup>3</sup>) igual para as diferentes alternativas de climatização.

No entanto, face aos resultados obtidos, sublinha-se que a eventual ocupação dos espaços avaliados durante períodos de tempo mais prolongados, nomeadamente para atividades que exigem melhores condições de conforto e qualidade do ambiente interior, poderá na prática traduzir-se na diminuição progressiva do conforto e rendimento dos ocupantes, devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub>.

De acordo com os resultados apresentados anteriormente nas tabelas 6.26, 6.27 e 6.28, no caso particular do Edifício 8-9 (constituído maioritariamente por gabinetes e laboratórios) verifica-se que a opção de climatização que apresenta um significativo menor número de horas acumuladas por dia (no verão e no inverno) de desconforto dos ocupantes é o sistema AVAC controlado pelo índice PMV adaptativo.

Como era expectável, a ventilação natural dos espaços (com entrada de ar apenas quando os ocupantes entram e saem dos compartimentos) e radiação natural das paredes, traduz-se em níveis de desconforto elevados (devido ao frio no inverno e ao calor no verão).

Verifica-se ainda, à semelhança do Edifício 1, 2 e 7, que o maior número de horas de desconforto é verificado nos gabinetes, devido à relação do volume dos compartimentos com o número de ocupantes e da orientação da fachada em que estão expostos, maioritariamente voltados a sul, este e oeste (maior exposição à radiação solar ao longo do dia).

Na tabela 6.29 apresenta-se o consumo de energia associado às várias alternativas de climatização avaliadas.

**Tabela 6.29 – Consumo de energia (kWh/dia) associada às várias alternativas de climatização do Edifício 8-9.**

Tipo de Tecnologia	Época	Gabinetes	Salas de Aula	Laboratórios	Anfiteatros ou equivalentes	Subtotal	Total
Climatização Natural	Verão	0	0	0	0	0	0
	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (todas as sup.)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (todas as sup.)	Inverno	0	0	0	0	0	
Geotermia (apenas sup. horizontais)	Verão	0	0	0	0	0	0
Coletores solares térmicos (apenas sup. horizontais)	Inverno	0	0	0	0	0	
Sistema AVAC controlado pelo índice aPMV	Verão	35	74	69	16	194	357
	Inverno	44	41	56	22	163	
Sistema AVAC controlado pelo índice PMV	Verão	41	91	81	17	230	422
	Inverno	55	47	65	25	192	
Sistema AVAC controlado pela Temperatura do ar	Verão	23	73	56	11	163	261
	Inverno	37	18	33	10	98	

No Edifício 8-9, de acordo com os resultados da tabela 6.29, o sistema AVAC que apresenta menor consumo de energia, quer no verão quer no inverno, é o sistema AVAC controlado pela temperatura do ar interior, seguido do índice PMV adaptativo.

Neste caso particular, considerando a relação custo / benefício (consumo de energia e conforto dos ocupantes), dada a tipologia dos compartimentos e o tipo de ocupação existente no Edifício 8-9, conclui-se que o sistema AVAC controlado através do índice PMV adaptativo proporciona melhores índices de conforto.

## 6.8 Comparação do consumo de energia entre os edifícios

As alternativas de climatização dos edifícios estudadas, entre outros aspetos, diferenciavam-se pela necessidade de consumo de energia elétrica. No caso da climatização natural e da geotermia combinada com coletores solares térmicos, para o aquecimento ou arrefecimento dos compartimentos (excluindo o eventual consumo elétrico associado ao controlo operacional dos sistemas, que pode ser considerado desprezável) não se verifica consumo de energia elétrica, pois a energia térmica é obtida do subsolo e do sol.

No caso do sistema AVAC é necessária energia para o funcionamento do sistema e conversão em energia térmica para arrefecimento ou aquecimento dos compartimentos.

Na figura 6.26 apresenta-se a comparação do consumo energético térmico diário anual, para as 3 alternativas de controlo da atividade do sistema AVAC ( $T_{ar}$ , índice PMV e índice aPMV), para os vários edifícios em estudo.

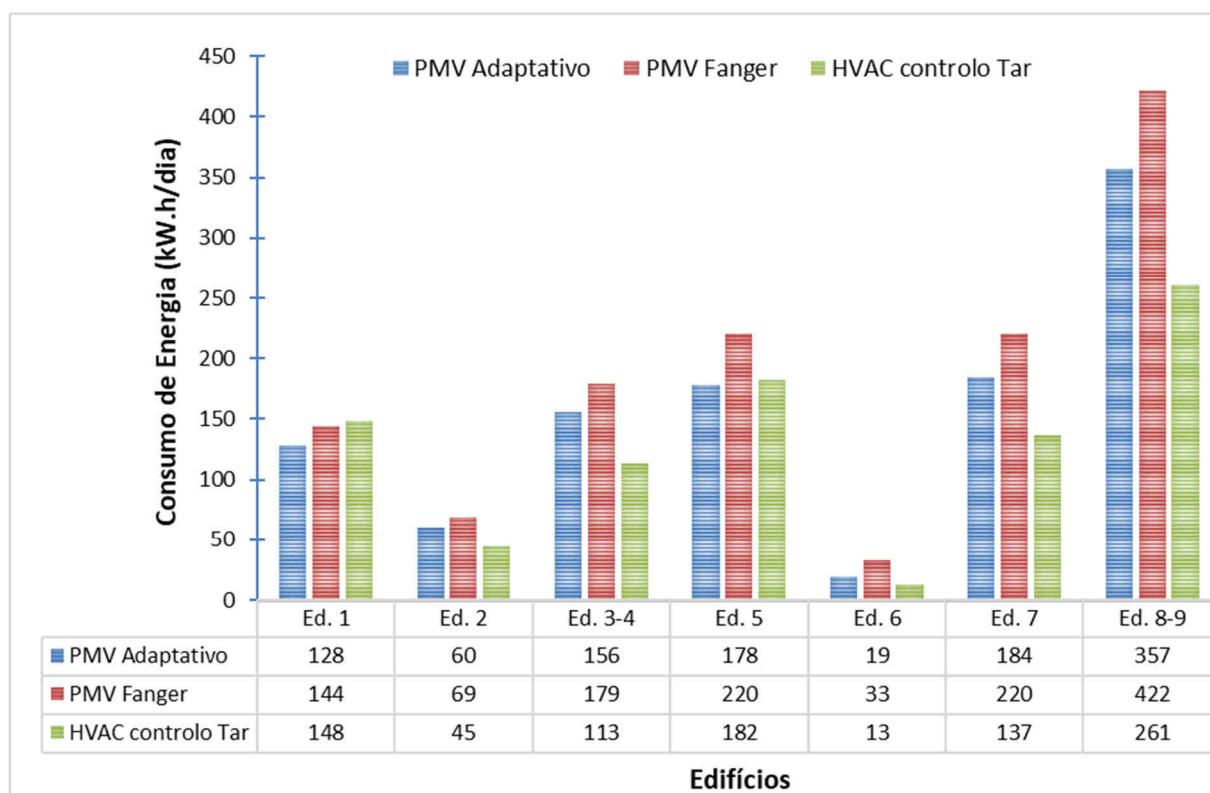


Figura 6.26 – Consumo médio diário anual de energia do sistema AVAC estimado para os vários edifícios.

De acordo com os resultados da figura 6.26 o edifício 8-9 (FCT-FE) apresenta o maior consumo diário associado ao sistema AVAC. O consumo elevado deste edifício, face aos demais, deve-se essencialmente ao maior número de compartimentos com ocupantes, o que se traduz no aumento das necessidades de climatização e consequente aumento do consumo de energia.

O edifício 5 (cantina) apresenta o menor consumo energético associado ao sistema de climatização, o que se deve essencialmente ao facto de o sistema AVAC apenas funcionar no período em que ocorre ocupação, neste caso apenas nos períodos de almoço e jantar.

É possível verificar ainda que o Edifício 1 e o Edifício 5 apresentam um menor consumo energético quando o sistema AVAC é controlado pelo aPMV, enquanto nos restantes edifícios é estimado um ligeiro menor consumo quando o AVAC é controlado pela temperatura do ar. O sistema AVAC controlado através do índice PMV, com exceção do edifício 1 (em que é semelhante às outras alternativas), apresenta um consumo de energia mais elevado comparativamente ao controlo pelo índice aPMV ou pela Tar.

Neste contexto, existindo uma variação significativa no número de compartimentos ocupados e no número de ocupantes, considera-se necessária uma análise mais detalhada. Na tabela 6.30 apresenta-se o número de horas de desconforto térmico nos 7 edifícios avaliados e na figura 6.27 apresenta-se a comparação do consumo de energia térmica associado ao sistema AVAC *per capita*.

Tabela 6.30 – Número de horas de desconforto térmico no *Campus* para as várias opções de climatização.

Edifício	Horas de desconforto dos ocupantes					
	Climatização Natural	Geotermia (todas as sup.)	Geotermia (apenas sup. horizontais)	Sistema AVAC índice aPMV	Sistema AVAC índice PMV	Sistema AVAC Temperatura do ar
Ed. 1	7475	2378	1655	23	804	2299
Ed. 2	3324	595	1546	214	658	1333
Ed. 3-4	2441	1057	1203	0	411	632
Ed. 5	3540	1083	1101	31	912	1413
Ed. 6	60	7	7	0	76	19
Ed. 7	9443	6501	4934	3	2320	3613
Ed. 8-9	9929	3383	3050	55	2243	3412
<b>Total</b>	<b>36212</b>	<b>15004</b>	<b>13496</b>	<b>326</b>	<b>7424</b>	<b>12721</b>

De acordo com os resultados da tabela 6.30 o sistema AVAC regulado através do índice aPMV apresenta um número de horas de desconforto significativamente menor que as restantes alternativas de climatização avaliadas.

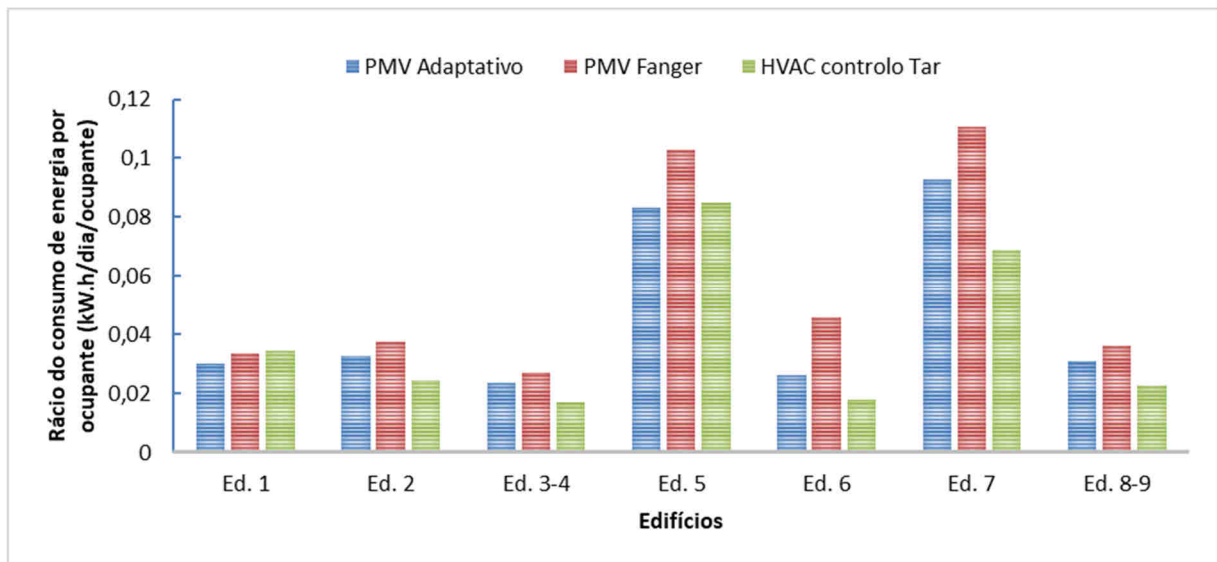


Figura 6.27 – Rácio do consumo de energia do sistema AVAC por ocupante, para os vários edifícios.

De acordo com os resultados da figura 6.27, verifica-se que os edifícios 3-4 e 8-9 são os que apresentam um menor consumo de energia do sistema AVAC por ocupante, ou seja, a conjugação das características físicas e arquitetónicas destes edifícios e o número de ocupantes por compartimento, torna-os, sob o ponto de vista do utilizador, como mais eficientes.

Relativamente ao edifício 8-9 importa referir que sendo o que se estima ter um maior consumo médio diário anual de energia pelo sistema AVAC, apresenta uma das melhores eficiências energéticas entre os 7 edifícios avaliados.

Contrariamente o edifício 5 apresenta uma menor eficiência por ocupante, pois neste caso o volume da sala de refeições da cantina é elevado e o funcionamento do sistema AVAC apenas em dois curtos períodos por dia não permite a estabilização da temperatura, pelo que quando é ativado necessita de funcionar intensivamente para conseguir atingir as condições de conforto definidas para o espaço, o que se traduz num elevado consumo por ocupante.

Neste contexto pode-se concluir que nos casos dos edifícios 1, 2, 5 e 6 a diferença do consumo de energia térmica associada às diferentes formas de controlo do sistema AVAC é negligenciável, ou seja, proporcionando o controlo por aPMV uma redução significativa no número de horas de desconforto dos ocupantes face ao controlo por Tar, apresenta-se como a alternativa energeticamente mais favorável.

No caso dos edifícios 3-4, 7 e 8-9 o controlo do sistema AVAC por aPMV proporciona um significativo menor número de horas de desconforto dos ocupantes, no entanto em apresenta

um consumo energético ligeiramente mais elevado, face ao AVAC controlo por Tar (como acontece atualmente), tornando esta alternativa economicamente mais desfavorável.

## 7 Conclusão

Os *softwares* de modelação numérica, como foi demonstrado, são uma ferramenta de extrema importância para a investigação e desenvolvimento de medidas e estratégias capazes de minimizar o consumo de energia global dos edifícios.

Neste trabalho, os sete principais edifícios do Campus de Gambelas foram avaliados em termos conforto térmico dos ocupantes (considerando como referencia o índice PMV), o conforto devido à qualidade do ar (concentração de CO<sub>2</sub>) nos compartimentos e o consumo de energia associado ao sistema de climatização AVAC, controlado alternativamente pelo índice de Fanger, pelo índice PMV adaptativo e pela temperatura do ar.

De um modo geral a qualidade do ar nos compartimentos com ocupação dos vários edifícios é confortável e cumpre o limite recomendado na norma ASHRAE Standard 62.1-2016 – concentração de CO<sub>2</sub> inferior a 1800 mg/m<sup>3</sup>.

No entanto, verificou-se que pontualmente (fim de cada ciclo de ocupação) existem compartimentos onde a concentração de CO<sub>2</sub> tende a ultrapassar ligeiramente o referido limite, devido à inexistência de renovação do ar forçada (apenas existe ventilação natural decorrente da abertura das portas para entrada e saída dos ocupantes), e devido à relação da quantidade de ocupantes com o volume dos compartimentos.

Face aos resultados obtidos, sublinha-se que a eventual ocupação dos espaços avaliados durante períodos de tempo mais prolongados, nomeadamente para atividades que exigem melhores condições de conforto e qualidade do ambiente interior, poderá na prática traduzir-se na diminuição progressiva do conforto e no sub-rendimento dos ocupantes, devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub>.

Tal como era de esperar, confirmou-se que o maior número de horas de desconforto associado à temperatura do ar ocorre nos compartimentos com menor volume (gabinetes), com fachadas orientadas a este, oeste e sul, em especial no verão onde se verifica maior incidência da radiação solar nas janelas.

Ficou ainda demonstrado que a climatização natural não é suficiente para garantir condições de conforto térmico de referência, gerando um número de horas de desconforto muito significativo em todos os edifícios, evidenciando a necessidade do uso do sistema AVAC.

Relativamente ao conforto dos ocupantes, de forma geral, considerando o índice de avaliação PMV para a Categoria C (no máximo de 15% dos ocupantes desconfortáveis), verificou-se que no inverno os edifícios são confortáveis por valores negativos PMV (temperatura inferior ao valor de referência), enquanto no verão são-no por valores positivos.

No entanto, num dia típico de inverno também se existem em todos os edifícios horas de desconforto devido ao calor, devido essencialmente à incidência da radiação solar nas janelas que faz aumentar a temperatura do ar dos compartimentos. Em alguns compartimentos também se verifica que num dia típico de verão, existem horas de desconforto devido ao frio associada à carga térmica transmitida.

O sistema de climatização por geotermia, de forma geral apresenta um elevado número de horas de desconforto, o que o torna inadequado.

Considerando as opções de climatização por sistema AVAC controlado através do índice de Fanger, do índice adaptativo ou pela temperatura do ar, verificou-se que o sistema controlado pelo índice adaptativo proporciona significativamente menor menos horas de desconforto dos ocupantes e de forma global menor consumo de energia.

No caso específico dos edifícios 1, 2, 5 e 6 a diferença do consumo de energia térmica associada às diferentes formas de controlo do sistema AVAC é negligenciável, ou seja, proporcionando o controlo por aPMV uma redução significativa no número de horas de desconforto dos ocupantes, apresenta-se como a alternativa energeticamente mais favorável. No caso dos edifícios 3-4, 7 e 8-9 o controlo do sistema AVAC por aPMV proporciona um significativo menor número de horas de desconforto dos ocupantes, no entanto o sistema AVAC regulado pela Tar apresenta um consumo energético ligeiramente mais reduzido, tornando esta alternativa economicamente mais desfavorável.

O sistema AVAC controlado pelo índice de Fanger apresenta resultados intermédios, ou seja proporciona um menor número de horas de desconforto comparativamente com a regulação através da temperatura do ar, mas apresenta um consumo de energia ligeiramente superior.

Os resultados demonstram que a implementação de um sistema AVAC controlado pelo índice adaptativo pode proporcionar o aumento do conforto térmico dos ocupantes e uma diminuição significativa do consumo global de energia para climatização dos edifícios.

A análise dos resultados dos compartimentos individualizados permite ainda identificar os compartimentos em que a adoção de medidas de minimização dos ganhos térmicos (sombreamento de janelas em alguns dos compartimentos voltados a este e a sul) apresenta maior potencial de redução do consumo térmico de energia.

Assim, consideram-se atingidos os objetivos propostos, tendo-se demonstrado a capacidade e aplicabilidade do modelo de simulação térmica de edifícios de tipologia complexa, modelados individualmente ou considerando a interação das variáveis ambientais num conjunto de edifícios. A modelação e simulação desenvolvida permitiu avaliar o conforto térmico e a qualidade do ar dos ocupantes nos compartimentos e o consumo de energia associada a diferentes sistemas de climatização, concluindo-se que o sistema AVAC controlado pelo índice adaptativo pode proporcionar o aumento significativo do conforto térmico dos ocupantes e uma diminuição do consumo global de energia.

## Referências Bibliográficas

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (2018). *Tarifas de venda a clientes finais dos comercializadores de último recurso em BTN em Portugal continental 2018*.

Abrantes P. (2011). *Estudo térmico de um edifício escolar com topologia complexa*. Tese de mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade do Algarve, Faro.

Aluclu I., A. Dalgic (2005). *A Case study on natural ventilation characteristics of the Diyarbakir, Surici (Old City) Municipality Building in Turkey*. Engineering and Architectural Faculty, Dicle University, Diyarbakir, Turkey, Elsevier – Building and Environment; vol. 40:1441-1449.

Álvarez J., Costa-Castelló R., Castilla M. (2018). *Repetitive Control to Improve Users' Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings*. Energis 2018, vol. 11: 976.

ASHRAE (2010a/2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2010/2017, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA. 2010/2017.

ASHRAE (2016b). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, *Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA. 2010.

Brager, G., Dear, R. (1998). *Thermal adaptation in the built environment: literature review*. Energy and Buildings, vol. 27(:1), pp. 83-96.

Conceição E. (2003). *Numerical Simulation of Building Thermal Behavior and Human Thermal Comfort Multi-Node Models*. Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade do Algarve, *Eighth International IBPSA Conference*, 11 a 14 de agosto de 2003, Eindhoven, Netherlands.

Conceição E., Gomes J., Antão N., Lúcio M. (2012). *Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces*. Building and Environment; vol. 50:190-201.

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, vol. 51-10, pp. 20-25.

Conceição E., Lopes M., Lúcio M., Lopes M. (2008a). *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; vol. 4:644-654.

Conceição E., Lúcio M. (2006c). *Projecto Térmico de Edifícios Escolares com topologia Complexa na Região do Algarve*. CIES 2006 – XIII Congresso Ibérico e VIII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, 9-10 novembro 2006, Lisboa.

Conceição E., Lúcio M. (2006d). *Quality Inside Compartments of a School Building: Air Exchange Monitoring, Evaluation of Carbon Dioxide and Assessment of Ventilation Strategies*. The International Journal of Ventilation; vol. 5:259-270.

Conceição E., Lúcio M. (2007b). *Conforto em Espaços Climatizados de Edifícios Escolares: Parte I - Conforto Térmico e Desconforto Térmico Local*. Revista O Instalador; vol. 139:46-53.

Conceição E., Lúcio M. (2007c). *Conforto em Espaços Climatizados de Edifícios Escolares: Parte II - Conforto Térmico e Desconforto Térmico Local*. Revista O Instalador; vol. 140:48-51.

Conceição E., Lúcio M. (2008b). *Projecto de um Sistema de Ventilação Eficiente de um Edifício Escolar em Condições de Inverno na Região do Algarve*. Ordem dos Engenheiros, Revista INGENIUM, IIª Série, Ordem dos Engenheiros; vol. 107:76-80.

Conceição E., Lúcio M. (2008c). *Thermal study of school buildings in winter conditions*. Building and Environment; vol. 43:782-792.

Conceição E., Lúcio M., Brito V. (2006a), *Avaliação das Condições de Conforto Interior em Espaços de Grande Dimensão: Parte I. Condições de Verão*. Revista de Informação Técnica e Científica: Construção Magazine; vol. 18:4-8.

Conceição E., Lúcio M., Brito V. (2007a). *Avaliação das Condições de Conforto Interior em Espaços de Grande Dimensão: Parte II. Condições de Verão*. Revista de Informação Técnica e Científica: Construção Magazine n.º 19; vol. 19:48-51.

Conceição E., Lúcio M., Capela T., Brito V. (2006b). *Evaluation of Thermal Comfort in Slightly Warm Ventilated Spaces in Non-Uniform Environments*. International Journal on Heating Air Conditioning and Refrigerating Research; vol. 12: 451-458.

Conceição E., Lúcio M., Vicente V., Rosão V. (2008d). *Evaluation of Local Thermal Discomfort in a Classroom Equipped with Cross Flow Ventilation*. International Journal of Ventilation, Vol. 7:267-277.

Conceição E., Nunes A., Gomes J., Antão N., Lúcio 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; vol. 9:3, pp. 287-304.

Conceição E., Santiago C., Lúcio M., (2014). *Avaliação das condições de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos em espaços equipados com sistemas de chão radiante aquecido*. Estratégias e Tecnologias de AVAC para a Sustentabilidade dos Edifícios. 14.<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia de Climatização, Ordem dos Engenheiros.

Conceição E., Silva A., Lúcio M. (2004). *Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Winter Conditions*. ROOMVENT 2004, Coimbra, Portugal.

Conceição, E., Lúcio, M. (2006e). *Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Summer Conditions*. Healthy Buildings 2006, Lisboa, Portugal.

Conceição, E., Lúcio, M. (2009). *Numerical Study of the Thermal Efficiency of a School Building with Complex Topology for Different Orientations*. Indoor Built Environ; vol. 18;1: 41–51.

Conceição E., Lúcio M., Awbi H. (2013). *Comfort and airflow evaluation in spaces equipped with mixing ventilation and cold radiant floor*. Building Simulation vol. 6: 51–67.

Decreto-Lei n.º 118/2013 (2013) – *Regulamento do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços*. Diário da República de 20 de agosto.

Decreto-Lei n.º 78/06 (2006) – *Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE)*. Diário da República, 4 de abril 2006. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 79/06 (2006) *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)*, Diário da República, 4 de abril 2006. Lisboa.

Decreto-Lei n.º 80/06 (2006) – *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*. Diário da República, 4 de abril 2006. Lisboa.

DGE – Direcção Geral de Energia (DGE) (2002). – *Programa E4 - Eficiência Energética nos Edifícios*. Ministério da Economia, Lisboa. ISBN 972-8268-25-4.

DGEG – Direcção-Geral de Energia e Geologia, (2015), *“Energia em Portugal”*, Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, ano de referência 2013

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill Book Company, USA.

Fanger, P. O. (1988). *Introduction of the Olf and the Decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors*. Energy and Buildings; vol. 12:1-6.

Fanger, P. O. (2005). *What is IAQ?* Journal Indoor Air 2006, 10<sup>th</sup>. Indoor Air Conference. Beijing, China; vol. 16:328–334.

Geros V., M. Santamouris, A. Tsangasoulis, G., Guarracino (1999). *Experimental evaluation of night ventilation phenomena. Energy and Buildings*; vol. 29:141-154.

Glicksman, L.R.; Norford, L.K.; Greden, L.V. (2001) *Energy Conservation in Chinese Residential Buildings: Progress and Opportunities in Design and Policy, Annual Review. Energy Environment*, pp. 83-115.

Glicksman, L.R.; Norford, L.K.; Greden, L.V. (2001) *Energy Conservation in Chinese Residential Buildings: Progress and Opportunities in Design and Policy. Energy Environment - Annual Review*; vol. 26: 83-115.

Gonçalves H., Graça J. M. (2004) *Conceitos Bioclimáticos para os edifícios em Portugal.*, Direcção Geral de Geologia e Energia, Lisboa. ISBN 972-8268-34-3.

Gonçalves H., Nascimento C. (2005). *Premio DGE 2003 – Eficiência Energética dos edifícios.* Direcção Geral de Geologia e Energia, Lisboa. ISBN 972-8268-36-X.

Gorni D., Visioli A. (2018). *Genetic Algorithms Based Reference Signal Determination for Temperature Control of Residential Buildings.* Applied Sciences, vol. 8-11:2129

Horowitz, F. (2015) *Integrating Geothermal Energy Use into Re-building American Infrastructure.* In Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25.

IEA – International Energy Agency (2014). *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*; p. 387.

ISO 7730:2005. *Ergonomics of the Thermal Environments – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.* International Standard. Switzerland.

Khedaria J., Yamtraip N., Pratintong N., Hirunlabh J. (2000). *Thailand ventilation comfort chart.* Energy and Buildings; vol. 32: 245–249.

Kurazumia Y., T. Tsuchikawab, N. Matsubarac e T. Horikoshid (2008). *Effect of posture on the heat transfer areas of the human body.* Building and Environment; vol. 43:1555-1565.

Lanham A., Gama P., Braz R., (2004), *Arquitectura Bioclimática, Perspectivas de inovação e futuro – Seminários de Inovação.* Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. ++=y#=WLi0S\$1G PocitoREP17

- Liang, J., Du, R. (2008). *Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies*. Energy Conversion and Management, vol. 49-4, pp. 517-528.
- Liddament, M. (1996). *Energy-Efficient Ventilation for Apartment Buildings*. Lawrence Berkeley National Laboratory, IEA-ECBCS.
- 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 em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Nicol F, Humphreys M. (2002). *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. Energy Build; vol. 34: 563–572.
- Nicol F, Roaf S. (1996). *Pioneering new indoor temperature standard: the Pakistan project*. Energy Build; vol. 23:169-74.
- Olesen B. (2002). *Radiant Floor Heating in Theory and Practice*. ASHRAE Journal American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, July 2002; vol. 7:19-24.
- Olesen B. (2004). *International standards for the indoor environment*. Journal Indoor Air; vol. 14:18-26.
- Omer A. M. (2008). *Renewable building energy systems and passive human comfort solutions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews; vol.12:1562-1587
- Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. (2008). *A review on buildings energy consumption information*. Energy and Buildings; vol. 40:394-398.
- Pinheiro M.D. (2006). *Ambiente e Construção Saudável*. Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal. ISBN: 972-8577-32-X.
- Pinto M., Freitas V., Viegas J. (2007). *Qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação*. Engenharia e Vida; vol. 38:34-43.
- Pires V. (2012). *Conforto e Energia em Edifícios Escolares Universitários*. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente, Universidade do Algarve, Faro.
- PORDATA, DGEG/MEc (2017/2018). *Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo*Consumo de energia final e de energia eléctrica pelo sector doméstico –última atualização: 2017/2018-0912-1901-1231. [Online]  
<https://www.pordata.pt/DB/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela> Acedido 2018-12-19.

Portaria 353-A/2013 (2013) – *Exigências em matéria de qualidade do ar interior (QAI)*. Diário da República de 4 de dezembro.

Pragana M., Teixeira A. (2007). *Simulação do comportamento térmico de edifícios escolares na região do Algarve: Estudo preliminar*. Universidade do Algarve, no âmbito da disciplina de Projecto Tecnológico da Licenciatura em Engenharia do Ambiente. Faro.

Safizadeh R., Schweiker M., Wagner A. (2018). *Experimental Evaluation of Radiant Heating Ceiling Systems Based on Thermal Comfort Criteria*. *Energies* vol. 11:1-21.

Santos C., Matias L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – Versão atualizada 2006*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Shahare S., Tirumalachetty H. (2016). *Energy Efficient Air Conditioning System Using Geothermal Cooling-Solar Heating in Gujarat, India*. *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 04. 57-71.

Shekar V., Krarti M. (2017). *Control strategies for dynamic insulation materials applied to commercial buildings*. *Energy and Buildings* vol. 154: 305-320.

Silva P. (2006). *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VIsualDOE*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Processos, Universidade do Minho.

Singh M., Mahapatra S, Atreya S. (2011). *Adaptive thermal comfort model for different climatic zones of North-East India*. *Applied Energy*, vol. 88:2420-2428.

Tester, J.W.; Reber, T.; Beckers, K.; Lukawski, M.; Camp, E.; Andrea, G.; Aguirre, A.; Jordan, T.;

Tzikopoulos A. F., Karatza M. C., Paravantis J. A. (2005). *Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings*. *Energy and Building*; vol. 37:529-544.

Universidade do Algarve – Ualg (2015). *Relatório de Atividades da Universidade do Algarve*. Faro.

Viegas J. (2000). *Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios, Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos 2000, Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. ISBN 972-49-1851-3.

Visa I., Duta A. (2016). *Innovative Solutions for Solar Thermal Systems Implemented in Buildings*. *Energy Procedia* vol. 85:594-602.

- Wang, D., Jiang J., Liu Y., Wang Y., Xu Y., Liu J. (2017). *Student responses to classroom thermal environments in rural primary and secondary schools in winter*. Building and Environment; vol. 115: 104–117.
- West S. (2001). *Improving the sustainable development of building stock by the implementation of energy efficient, climate control technologies*. Energy and Environment; vol. 35: 281-89
- Wilde P., Voorden van der, M. (2004). *Providing computational support for the selection of energy saving building components*. Energy and Buildings; vol. 36:749-758.
- Yam J., Li Y., Zheng Z. (2003). *Nonlinear coupling between thermal mass and natural ventilation in buildings*. International Journal of Heat and Mass Transfer; vol. 46: 1251-1264.
- Yang L., Li Y. (2008). *Cooling Load Reduction by Using Thermal Mass and Night Ventilation*. Energy and Buildings; vol. 40:1-22.
- Yang L., Yan H., Lam J., (2014). *Thermal comfort and building energy consumption implications – A review*. Applied Energy; A review on buildings energy consumption information vol. 115: 164–173.
- Yao R., Liu J., Li B. (2010). *Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms*. Applied Energy; vol. 87:1015-1022.
- Yao, R., Li, B., Liu, J. (2009). *A theoretical model of thermal comfort – adaptive predicted mean vote (aPMVaPMV)*. Building and Environment, vol. 44: 2089—2096.
- Zhou J., G. Zhang, Y. Lin, Y. Li (2008). *Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings*. Energy and Buildings; vol. 40:979-986.
- Zmeureanu R., Fazio P., DePani S., Calla R. (1999) *Development of an energy rating system for existing houses*. Energy and Buildings; vol. 29:107-119.