

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

SOLUÇÕES PASSIVAS E ATIVAS INTEGRADAS UTILIZADAS NUMA GESTÃO DE ENERGIA EFICIENTE EM EDIFÍCIOS PÚBLICOS

João Manuel Martins Gomes

Tese para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências do Mar,
da Terra e do Ambiente, ramo de Ciências e Tecnologia do
Ambiente (Especialidade em Energia)

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Professor Doutor Eusébio Conceição

FARO
2016

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

SOLUÇÕES PASSIVAS E ATIVAS INTEGRADAS UTILIZADAS NUMA GESTÃO DE ENERGIA EFICIENTE EM EDIFÍCIOS PÚBLICOS

João Manuel Martins Gomes

Aluno nº 17017

e-mail: jgomes@ualg.pt

Tese para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências do Mar,
da Terra e do Ambiente, ramo de Ciências e Tecnologia do
Ambiente (Especialidade em Energia)

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Eusébio Conceição

FARO

2016

SOLUÇÕES PASSIVAS E ATIVAS INTEGRADAS UTILIZADAS NUMA GESTÃO DE ENERGIA EFICIENTE EM EDIFÍCIOS PÚBLICOS

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.

João Manuel Martins Gomes

© *Copyright*: João Manuel Martins Gomes.

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À memória do meu pai

À minha mãe

Agradecimentos

Manifesto os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Em primeiro lugar um agradecimento muito especial ao meu orientador, o Professor Doutor Eusébio Conceição, pelo apoio ilimitado, empenho, disponibilidade e dedicação sempre presentes ao longo deste percurso. Agradeço também pelo incentivo final sem o qual este trabalho nunca seria apresentado.

Ao Professor Doutor Carlos Cabral pelos conselhos, apoio incondicional e amizade prestados ao longo de todo este árduo percurso que levou à realização deste trabalho.

Às Sras. Cristina Santiago e Cláudia Nunes e ao Sr. Camilo Portela pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

À Marina, por todo o apoio concedido, pela compreensão mostrada durante os períodos mais difíceis da realização deste trabalho e por tudo o resto.

Por fim, à minha mãe que sempre me apoiou e fez acreditar que seria possível concretizar este trabalho.

Resumo

Neste trabalho é efetuado um estudo de soluções passivas e ativas integradas utilizadas numa gestão de energia eficiente, baseada na otimização do nível de conforto térmico e qualidade do ar, para baixos níveis de consumo de energia, em edifícios públicos de educação para as diferentes faixas etárias.

O estudo utiliza um modelo numérico que simula a resposta térmica de edifícios com tipologia complexa e avalia o conforto térmico e a qualidade do ar em ambientes interiores, aplicando sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado com controlo baseado no índice PMV em edifícios públicos, nomeadamente em edifícios de jardim-de-infância, em edifícios de escolas do ensino básico e secundário e em edifícios do ensino universitário.

Este estudo, baseado na utilização de recursos endógenos, nomeadamente na radiação solar, considera nas soluções passivas, entre outras, sistemas de sombreamento, estufas internas, acumulação de energia em edifícios e ventilação natural, e nas soluções ativas, entre outras, sistemas de aquecimento, ventilação forçada e ar condicionado e sistemas de controlo.

Os sistemas de controlo estão associados a modelos baseados no conforto térmico, apresentados na bibliografia especializada, e em modelos desenvolvidos baseados no conforto térmico adaptativo.

O estudo integral considera, não só o consumo de energia, como também o número de horas por desconforto térmico, quer por calor, quer por frio, e o número de horas de desconforto pela qualidade do ar.

De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que as soluções passivas e ativas desenvolvidas garantem bons níveis de conforto para reduzidos consumos de energia. A utilização do modelo adaptativo permite obter menores percentagens de pessoas insatisfeitas e, conseqüentemente, também menores consumos de energia. A avaliação do número de total de horas de desconforto integrado permitiu determinar a taxa de renovação do ar mais eficiente, para diferentes condições ambientais, que garante, simultaneamente, bons níveis de conforto térmico e da qualidade do ar para os ocupantes.

Palavras-chave: energia em edifícios, eficiência energética, simulação numérica, soluções passivas e ativas, sistema de controlo, conforto.

Abstract

In this work is made a study of integrated passive and active solutions used in efficient energy management, based on the optimization of thermal comfort level and air quality, to low energy consumption in public school buildings for different age groups.

The study uses a numerical model that simulates the thermal response of buildings with complex typology and evaluates the thermal comfort and air quality indoors by applying heating, ventilation and air conditioning control based on PMV index in public buildings, including in kindergarten, high schools and university buildings.

This study based on the use of local resources, in particular solar radiation, it considers the passive solutions, among others, shading systems, internal greenhouses, accumulation of energy in buildings and natural ventilation, and the active solutions, among others, heating systems, forced ventilation and air conditioning and control systems.

The control systems are associated with models based on thermal comfort, given in specialized scientific papers, and developed models based on adaptive thermal comfort.

The integral study considers not only the energy consumption but also the number of thermal discomfort hours, either by heat or by cold, and the number of discomfort hours for air quality.

According to the results, it is concluded that the developed passive and active solutions guarantee good levels of comfort for reduced energy consumption. The use of the adaptive model guarantees to obtain smaller percentages of unsatisfied occupants, and thus also lower energy consumption. The evaluation of integrated discomfort total hours allowed to find the most efficient air exchange rate, for different environmental conditions, which ensure, at the same time, good levels of thermal comfort and air quality for the occupants.

Keywords: energy in buildings, energy efficiency, numerical simulation, passive and active solutions, control systems, comfort.

Índice Geral

| | |
|--|-----|
| Agradecimentos | v |
| Resumo..... | vii |
| Abstract..... | ix |
| 1 Introdução..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento geral..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 3 |
| 2 Estado atual do conhecimento | 7 |
| 2.1 O setor dos edifícios | 7 |
| 2.2 Resposta térmica dos edifícios..... | 10 |
| 2.3 Enquadramento legislativo nacional | 13 |
| 2.4 Noção de conforto térmico | 17 |
| 2.5 Variáveis que influenciam o conforto térmico..... | 18 |
| 2.6 Índices de conforto térmico | 19 |
| 2.7 Conforto adaptativo..... | 24 |
| 2.7.1 Noção de conforto adaptativo | 24 |
| 2.7.2 Modelo de conforto térmico adaptativo..... | 28 |
| 2.8 Qualidade do ar | 31 |
| 2.9 Modelos de avaliação integral | 33 |
| 2.10 Tipos de sistemas de controlo de sistemas AVAC..... | 35 |
| 2.11 Sistema de controlo implementado | 40 |
| 2.12 Modelo numérico de simulação da resposta térmica de edifícios | 43 |
| 3 Desenvolvimento do modelo de conforto adaptativo..... | 47 |
| 3.1 Considerações iniciais... .. | 47 |
| 3.2 Jardim-de-infância..... | 50 |
| 3.3 Edifício escolar de 2º e 3º ciclo..... | 53 |
| 3.4 Edifício universitário..... | 56 |
| 4 Casos de estudo..... | 59 |
| 4.1 Dados de entrada..... | 59 |
| 4.1.1 Dados meteorológicos | 59 |
| 4.1.1.1 Condições exteriores..... | 59 |
| 4.1.1.2 Radiação solar | 62 |
| 4.1.2 Ciclo de ocupação | 65 |
| 4.1.3 Topologia de ventilação..... | 65 |
| 4.1.4 Nível de vestuário dos ocupantes | 67 |
| 4.1.5 Nível de atividade dos ocupantes | 67 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.2 | Aplicação dos índices PMV e aPMV em edifícios jardim-de-infância | 68 |
| 4.2.1 | Descrição do edifício | 68 |
| 4.2.2 | Metodologia implementada nas simulações..... | 71 |
| 4.2.3 | Introdução de dados no modelo numérico | 71 |
| 4.2.4 | Apresentação e discussão de resultados..... | 75 |
| 4.2.4.1 | Radiação solar | 75 |
| 4.2.4.2 | Conforto térmico em condições de inverno | 77 |
| 4.2.4.3 | Conforto térmico em condições de verão..... | 81 |
| 4.2.5 | Estudo comparativo | 84 |
| 4.3 | Aplicação dos índices PMV e aPMV em edifícios escolares do 2º e 3º ciclo..... | 85 |
| 4.3.1 | Descrição do edifício | 85 |
| 4.3.2 | Metodologia implementada..... | 86 |
| 4.3.3 | Apresentação e discussão de resultados..... | 89 |
| 4.3.3.1 | Aplicação do modelo de Fanger | 89 |
| 4.3.3.2 | Aplicação do modelo adaptativo | 93 |
| 4.4 | Aplicação dos índices PMV e aPMV em edifícios universitários..... | 98 |
| 4.4.1 | Descrição do edifício | 98 |
| 4.4.2 | Introdução de dados no modelo numérico | 101 |
| 4.4.3 | Casos estudados | 103 |
| 4.4.4 | Análise e discussão dos resultados | 103 |
| 4.4.4.1 | Temperatura do ar..... | 104 |
| 4.4.4.2 | Velocidade do ar..... | 108 |
| 4.4.4.3 | Humidade relativa do ar | 112 |
| 4.4.4.4 | Qualidade do ar | 116 |
| 4.4.4.5 | Temperatura média radiante..... | 118 |
| 4.4.4.6 | Índices PMV e aPMV | 122 |
| 4.4.4.7 | Horas de desconforto e consumo energético | 126 |
| 4.4.5 | Estudo comparativo | 128 |
| 4.5 | Modelos integrais | 131 |
| 4.5.1 | Modelo térmico | 131 |
| 4.5.1.1 | Identificação e descrição do edifício escolar..... | 131 |
| 4.5.1.2 | Introdução de dados no modelo numérico | 137 |
| 4.5.1.3 | Aplicação do índice aPMV | 141 |
| 4.5.1.4 | Conforto térmico integral..... | 147 |
| 4.5.1.5 | Discussão de resultados | 153 |
| 4.5.2 | Modelo aerotérmico..... | 154 |
| 4.5.2.1 | Descrição do edifício | 154 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 4.5.2.2 | Introdução de dados no modelo numérico | 156 |
| 4.5.2.3 | Análise de resultados | 158 |
| 4.5.2.3.1 | Horas desconfortáveis | 158 |
| 4.5.2.3.2 | Evolução do índice PMV | 161 |
| 4.5.2.3.3 | Evolução do nível de qualidade do ar | 166 |
| 4.5.2.4 | Discussão dos resultados..... | 170 |
| 5 | Conclusões..... | 171 |
| | Referências Bibliográficas | 175 |

Índice das Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Relação entre os índices PMV e PPD..... | 23 |
| Figura 2.2 – Sistema de controlo do índice PMV implementado ao sistema AVAC..... | 40 |
| Figura 2.3 – Diagrama de blocos do sistema de controlodo índice PMV implementado no controlo do sistema AVAC..... | 42 |
| Figura 3.1 – Valores dos índices aPMV e AMV em função do índice PMV, em condições de calor, obtidos para o jardim-de-infância de Olhão..... | 52 |
| Figura 3.2 – Valores dos índices aPMV e AMV em função do índice PMV, em condições de frio, obtidos para o jardim-de-infância de Olhão..... | 52 |
| Figura 3.3 – Variação de λ em função da temperatura exterior (Text) para cada sala do jardim-de-infância de Olhão..... | 53 |
| Figura 3.4 – Valores dos índices PMV e AMV em função do índice aPMV em condições de outono, inverno e primavera, obtidos para a escola básica 2/3 de Estoi..... | 54 |
| Figura 3.5 – Variação de λ em função da temperatura exterior (Text) obtido para a escola básica 2/3 de Estoi..... | 55 |
| Figura 3.6 – Linhas de tendência para o valor do coeficiente adaptativo λ em função da temperatura exterior (Text) para o Jardim-de-infância (JI), as Escolas 2º e 3º ciclo (EB) e a Universidade (U) | 57 |
| Figura 4.1 – Valores medidos da temperatura do ar (T_{ar}) e da humidade relativa (HR) no dia 21 de junho..... | 60 |
| Figura 4.2 – Valores medidos da velocidade do ar (Var) e da direção do vento (D) no dia 21 de junho..... | 60 |
| Figura 4.3 – Valores medidos da temperatura do ar (T_{ar}) e da humidade relativa (HR) no dia 21 de dezembro..... | 61 |
| Figura 4.4 – Valores medidos da velocidade do ar (Var) e da direção do vento (D) no dia 21 de dezembro..... | 61 |
| Figura 4.5 – Esquema do jardim-de-infância e edifícios envolventes..... | 69 |
| Figura 4.6 – Identificação dos espaços do jardim-de-infância..... | 70 |
| Figura 4.7 – Geração de malha e identificação dos compartimentos no interior do jardim-de-infância..... | 70 |
| Figura 4.8 – Evolução da radiação solar transmitida (I) calculada nas janelas principais, em condições de inverno (jardim-de-infância de Olhão) | 76 |
| Figura 4.9 – Evolução da radiação solar transmitida (I) calculada nas janelas principais, em condições de verão (jardim-de-infância de Olhão) | 76 |
| Figura 4.10 – Evolução da temperatura do ar interior (T_{ar}) calculada em condições de inverno (jardim-de-infância de Olhão)..... | 79 |
| Figura 4.11 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) calculada em condições de inverno (jardim-de-infância de Olhão). A linha horizontal representa o limite aceitável para o dióxido de carbono..... | 79 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.12 – Evolução do nível de conforto térmico (PMV) calculado em condições de inverno com o modelo de Fanger (jardim-de-infância de Olhão)..... | 80 |
| Figura 4.13 – Evolução do nível de conforto térmico (aPMV) calculado em condições de inverno com o modelo adaptativo (jardim-de-infância de Olhão)..... | 80 |
| Figura 4.14 – Evolução da temperatura do ar interior (T_{ar}) calculada em condições de verão (jardim-de-infância de Olhão)..... | 82 |
| Figura 4.15 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) calculada em condições de verão (jardim-de-infância de Olhão). A linha horizontal representa o limite aceitável para o dióxido de carbono..... | 82 |
| Figura 4.16 – Evolução do nível de conforto térmico (PMV) calculado em condições de verão com o modelo de Fanger (jardim-de-infância de Olhão)..... | 83 |
| Figura 4.17 – Evolução do nível de conforto térmico (aPMV) calculado em condições de verão com o modelo adaptativo (jardim-de-infância de Olhão)..... | 83 |
| Figura 4.18 – Esquema tridimensional da escola básica 2/3 de Estoi..... | 85 |
| Figura 4.19 – Evolução do índice PMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(n) da escola básica 2/3 de Estoi..... | 90 |
| Figura 4.20 – Evolução do índice PMV, durante todo o ano, para a sala de aula SW(n) da escola básica 2/3 de Estoi..... | 91 |
| Figura 4.21 – Evolução do índice PMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(y) da escola básica 2/3 de Estoi..... | 92 |
| Figura 4.22 – Evolução do índice aPMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(n) da escola básica 2/3 de Estoi..... | 95 |
| Figura 4.23 – Evolução do índice aPMV, durante todo o ano, para a sala de aula SW(n) da escola básica 2/3 de Estoi..... | 96 |
| Figura 4.24 – Evolução do índice aPMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(y) da escola básica 2/3 de Estoi..... | 97 |
| Figura 4.25 – Imagem aérea do Campus de Gambelas, com identificação dos edifícios em estudo (Fonte: http://www.bing.com/maps/ , acessado a 15/12/2012) | 99 |
| Figura 4.26 – Desenho em 3D assistido por computador, com o edifício em estudo: fct-8 e fe-9..... | 100 |
| Figura 4.27 – Esquema tridimensional do edifício 8 e 9 do Campus de Gambelas..... | 100 |
| Figura 4.28 – Temperatura do ar (T_{ar}) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 105 |
| Figura 4.29 – Temperatura do ar (T_{ar}) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 106 |
| Figura 4.30 – Temperatura do ar (T_{ar}) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 107 |
| Figura 4.31 – Velocidade do ar (U) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 109 |
| Figura 4.32 – Velocidade do ar (U) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.33 – Velocidade do ar (U) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 111 |
| Figura 4.34 – Humidade relativa do ar (HR) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 113 |
| Figura 4.35 – Humidade relativa do ar (HR) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 114 |
| Figura 4.36 – Humidade relativa do ar (HR) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 115 |
| Figura 4.37 – Valores de CO ₂ para as três situações estudadas no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 117 |
| Figura 4.38 – Temperatura média radiante (TMR) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 119 |
| Figura 4.39 – Temperatura média radiante (TMR) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 120 |
| Figura 4.40 – Temperatura média radiante (TMR) com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 121 |
| Figura 4.41 – Índice PMV na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 123 |
| Figura 4.42 – Índice PMV na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 124 |
| Figura 4.43 – Índice aPMV na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas..... | 125 |
| Figura 4.44 – Esquema dos edifícios escolares analisados: edifício principal (<i>main</i>), edifício noroeste (NW) e edifício nordeste (NE) | 132 |
| Figura 4.45 – Perspetivas do edifício principal escola básica 2/3 de Olhão: a) lado poente; b) lado nascente. (Fonte: http://www.google.pt/maps/ , acedido a 5/10/2016)..... | 133 |
| Figura 4.46 – Disposição dos compartimentos por cada piso do edifício principal da escola básica 2/3 de Olhão: a) rés-do-chão; b) 1º andar; c) 2º andar..... | 134 |
| Figura 4.47 – Perspetiva do edifício noroeste da escola básica 2/3 de Olhão (Fonte: http://www.google.pt/maps/ , acedido a 5/10/2016)..... | 135 |
| Figura 4.48 – Disposição dos compartimentos por cada piso do edifício noroeste da escola básica 2/3 de Olhão: a) rés-do-chão; b) 1º andar..... | 135 |
| Figura 4.49 – Perspetiva do edifício noroeste da escola básica 2/3 de Olhão (Fonte: http://www.google.pt/maps/ , acedido a 5/10/2016) | 136 |
| Figura 4.50 – Disposição dos compartimentos no edifício nordeste da escola básica 2/3 de Olhão.. | 136 |
| Figura 4.51 – Índice aPMV para as salas de aula em janeiro, fevereiro e março (primeiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 142 |
| Figura 4.52 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em abril, maio e junho (segundo trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 142 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.53 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em julho, agosto e setembro (terceiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 143 |
| Figura 4.54 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em outubro, novembro e dezembro (quarto trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 143 |
| Figura 4.55 – Índice aPMV obtido para outras salas em janeiro, fevereiro e março (primeiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 144 |
| Figura 4.56 – Índice aPMV obtido para outras salas em abril, maio e junho (segundo trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 144 |
| Figura 4.57 – Índice aPMV obtido para outras salas em julho, agosto e setembro (terceiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 145 |
| Figura 4.58 – Índice aPMV obtido para outras salas em outubro, novembro e dezembro (quarto trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão..... | 145 |
| Figura 4.59 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO ₂) nas salas de aula quando é utilizada a ventilação cruzada (escola básica 2/3 de Olhão) | 151 |
| Figura 4.60 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO ₂) nas outras salas quando é utilizada a ventilação cruzada (escola básica 2/3 de Olhão) | 151 |
| Figura 4.61 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO ₂) nas salas de aula quando é utilizada a ventilação natural (escola básica 2/3 de Olhão) | 152 |
| Figura 4.62 – Evolução da concentração de dióxido de carbono nas outras salas (CO ₂) quando é utilizada a ventilação natural (escola básica 2/3 de Olhão) | 152 |
| Figura 4.63 – Representação 3D do edifício da biblioteca do campus de Gambelas..... | 154 |
| Figura 4.64 – Visualização 3D dos compartimentos da biblioteca das Gambelas com a respetiva numeração: a) primeiro andar; b) piso térreo; c) cave..... | 155 |
| Figura 4.65 – Evolução dos valores de CUH, WUH, TUH, AQUH e UH em função da variação da taxa de renovação do ar durante um ano (biblioteca das Gambelas) | 159 |
| Figura 4.66 – Evolução dos valores de UH em função da variação da taxa de renovação do ar para cada mês do ano (biblioteca das Gambelas)..... | 160 |
| Figura 4.67 – Evolução do índice PMV para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas) | 163 |
| Figura 4.68 – Evolução do índice PMV para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas) | 164 |
| Figura 4.69 – Evolução do índice PMV para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 12 (biblioteca das Gambelas) | 165 |
| Figura 4.70 – Evolução do índice PMV para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas) | 165 |
| Figura 4.71 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO ₂) para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas).. | 167 |
| Figura 4.72 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO ₂) para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas).. | 168 |

- Figura 4.73 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas).....169
- Figura 4.74 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas).....169

Índice das Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.1 – Dados estatísticos dos alunos participantes na pesquisa (JI de Olhão)..... | 51 |
| Tabela 3.2 – Dados estatísticos dos alunos participantes na pesquisa (EB 2/3 de Estoi)..... | 54 |
| Tabela 3.3 – Dados estatísticos dos alunos participantes na pesquisa (universidade)..... | 56 |
| | |
| Tabela 4.1 – Taxa de renovação do ar obtida nas três salas de aulas para 50% e 100% das janelas abertas..... | 66 |
| Tabela 4.2 – Taxas de renovação do ar (1/h) e caudal volúmico (m ³ /h), médio e local, obtidos em três ensaios experimentais. | 67 |
| Tabela 4.3 – Evolução do número de ocupantes em cada espaço..... | 72 |
| Tabela 4.4 – Caudal volúmico de ar (m ³ /s) utilizado em condições de inverno para os diferentes espaços..... | 73 |
| Tabela 4.5 – Caudal volúmico de ar (m ³ /s) utilizado em condições de verão para os diferentes espaços..... | 74 |
| Tabela 4.6 – Características das salas de aula selecionadas. | 87 |
| Tabela 4.7 – Condições ambientais e nível de vestuário usados neste estudo..... | 89 |
| Tabela 4.8 – Evolução da ocupação nos espaços analisados. | 101 |
| Tabela 4.9 – Caudal volúmico de ar (m ³ /s) utilizado em condições de verão e inverno para os diferentes espaços analisados..... | 102 |
| Tabela 4.10 – Horas de desconforto e consumo energético. | 127 |
| Tabela 4.11 – Identificação dos diferentes compartimentos utilizados na simulação..... | 132 |
| Tabela 4.12 – Ciclo de ocupação nos espaços ocupados durante as aulas e respetivos intervalos. | 138 |
| Tabela 4.13 – Caudal volúmico de ar (m ³ /s) quando se utiliza ventilação natural. | 139 |
| Tabela 4.14 – Caudal volúmico de ar (m ³ /s) quando se utiliza ventilação forçada | 140 |
| Tabela 4.15a – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para as salas de aula, quando se utiliza a ventilação cruzada..... | 148 |
| Tabela 4.15b – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para outros espaços, quando se utiliza a ventilação cruzada. | 148 |
| Tabela 4.16a – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para as salas de aula, quando se utiliza a ventilação natural. | 149 |
| Tabela 4.16b – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para outros espaços, quando se utiliza a ventilação natural | 149 |
| Tabela 4.17 – Ciclo de ocupação em todos os espaços ocupados, durante um dia de utilização da biblioteca. | 157 |
| Tabela 4.18 – Número total de horas desconfortáveis obtidas durante um ano..... | 159 |

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------------|--|
| AMV | <i>Actual Mean Vote</i> (voto médio atual) |
| aPMV | <i>Adaptative Predicted Mean Vote</i> (voto médio previsto adaptativo) |
| AQUH | <i>Air Quality Uncomfortable Hours</i> (horas desconfortáveis devido à qualidade do ar) |
| AVAC | Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado |
| CUH | <i>Cold Uncomfortable Hours</i> (horas desconfortáveis por sensação térmica de frio) |
| EB | Escola Básica |
| INE | Instituto Nacional de Estatística |
| JI | Jardim-de-infância |
| PD | <i>Percentage of Dissatisfied</i> (percentagem de pessoas insatisfeitas devido à concentração de dióxido de carbono) |
| PI | Proporcional Integral |
| PID | Proporcional Integral Derivativo |
| PMV | <i>Predicted Mean Vote</i> (voto médio previsto) |
| PPD | <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (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 |
| RCT | Regulador de Conforto Térmico |
| RTA | Regulador de Temperatura do Ar |
| SCE | Sistema de Certificação Energética dos edifícios |
| TUH | <i>Thermal Uncomfortable Hours</i> (total de horas desconfortáveis por sensação térmica) |
| UH | <i>Uncomfortable Hours</i> (total de horas desconfortáveis) |
| WUH | <i>Warm Uncomfortable Hours</i> (horas desconfortáveis por sensação térmica de calor) |

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral

Os edifícios, espaços onde as pessoas passam mais de 80% do tempo das suas vidas, têm de garantir as adequadas condições de conforto e de qualidade do ar interior (Gonçalves e Nascimento, 2005). Neste contexto, o consumo de energia em Portugal, integrando as vertentes dos serviços e residencial, representou em 2013 cerca de 29,7% do consumo global em energia (Bernardo, 2015), com os edifícios do estado a apresentarem uma taxa anual de crescimento significativo, cerca de 2,4% em média entre 2000 e 2014 (PORDATA, 2016), e com tendência para continuar a crescer.

Nos últimos anos a população mundial conheceu um crescimento significativo, que se traduziu na forte urbanização e no aumento exponencial do consumo de energia devido à melhoria das condições de vida, fruto do desenvolvimento científico e tecnológico.

Este aumento exponencial do consumo de energia levou à redução dos estoques de várias matérias-primas e às crises petrolíferas, pelo que se tornou urgente a necessidade de reduzir o consumo energético e a elevada dependência do petróleo (Silva, 2006).

Na área da construção perderam-se as boas práticas ancestrais e os princípios básicos foram substituídos por motivações económicas e estéticas, o que se traduziu num aumento do desconforto proporcionado pelos edifícios. De modo a suplantar esse desconforto, foi necessário recorrer à introdução de soluções tecnológicas, como sistemas de iluminação desproporcionados e climatização artificial. Isto levou a que os consumos energéticos dos edifícios, sobretudo em energia elétrica, tivessem um elevado crescimento. Por exemplo, em Portugal, entre 1994 e 2014 o consumo de energia elétrica quase que duplicou, com um aumento de aproximadamente 13,5 TWh para aproximadamente 26,3 TWh. Em particular, o consumo de energia elétrica nos edifícios do estado passou de 1,13 TWh para 2,23 TWh (PORDATA, 2016). Esta problemática assumiu particular relevo, não só devido à diminuição dos estoques de combustíveis fósseis, mas também ao aquecimento global, provocado em grande parte pela emissão de gases de efeito de estufa, como o dióxido de carbono (Lanham *et al.*, 2004).

No sul de Portugal, o Algarve possui um clima bastante particular e apresenta altos níveis de radiação solar durante todo o ano, principalmente no verão. Devido a esta característica, durante os meses de inverno, a temperatura do ar, normalmente, não é muito baixa; todavia, podem-se registar valores indicadores de desconforto térmico. Esta situação influencia os

ocupantes dos edifícios, a nível de conforto térmico (Kurazumia *et al.*, 2008) e também contribui para um maior consumo de energia por parte dos edifícios (Conceição e Lúcio, 2007a, Conceição e Lúcio, 2007b, e Conceição e Lúcio, 2007c).

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 na ocorrência dum período do dia mais fresco (Geros *et al.*, 1999, Yang e Li, 2008, Yam *et al.*, 2003, e Zhou *et al.*, 2008).

Um dos parâmetros que nos dá o desempenho térmico de um edifício é a sua capacidade de armazenamento térmico (Conceição *et al.*, 2006b), que inclui a estrutura do edifício, mobiliário, paredes internas, entre outros como referiu também Conceição (2003). O aproveitamento desta capacidade de armazenamento térmico de um edifício pode reduzir o pico de calor ou a carga de arrefecimento e, conseqüentemente, diminuir o consumo de energia (Olesen, 2002), em particular quando é integrado com a ventilação noturna.

Em espaços interiores amplos, os objetivos ambientais requerem que se utilize sistemas ativos de climatização de modo a atingir os valores da qualidade do ar, da temperatura do ar e da humidade relativa do ar padronizados (Conceição e Lúcio, 2007b e Conceição e Lúcio, 2007c), bem como um caudal de ar desejado.

A avaliação do desempenho energético dos edifícios é um ponto essencial para a eficiência energética. No entanto, essa avaliação é um processo bastante difícil, pois um edifício é um sistema complexo, em que cada subsistema (paredes exteriores, interiores, cobertura e envidraçados) tem um papel importante no desempenho energético global (Silva, 2006). Uma forma de ultrapassar este problema é recorrer à simulação do comportamento térmico e do consumo de energia dos edifícios com recurso a programas de simulação de elevada complexidade.

Em estudos de investigação deste cariz, os programas de simulação numérica são vitais quando o objetivo é prever o comportamento térmico do edifício e o nível de conforto dos ocupantes. Estes programas, como a simulação do comportamento térmico de edifícios utilizado no presente estudo, são baseados em fenómenos térmicos e mássicos e devem ser sujeitos a diferentes tipos de testes de validação, quer em condições de verão e de inverno, quer para diferentes tipos de topologias (Conceição *et al.*, 2006a, Conceição e Lúcio, 2006c, Conceição *et al.*, 2007a, Conceição *et al.*, 2008a, Conceição e Lúcio, 2008b, e Conceição e Lúcio, 2008c). É também muito importante, neste tipo de estudo, dispor de informação, não

só relativamente ao edifício, como também ao clima exterior, nomeadamente, às variáveis ambientais esperadas ao longo do ano na região onde o edifício se situa.

1.2 Objetivos

Atualmente urge tornar os edifícios energeticamente mais eficientes, através da implementação de medidas que promovam uma utilização eficiente da energia mantendo simultaneamente o nível de conforto dos ocupantes. Assim, neste trabalho, esta ideia conduziu na busca de diversas soluções passivas e ativas que permitissem alcançar este grande objetivo.

Começou-se por escolher, como objeto de estudo, os edifícios escolares, nas suas diversas tipologias, nomeadamente, os vocacionados para o ensino pré-primário, para o ensino básico e para o ensino universitário. A escolha destes tipos de edifícios permite abranger toda a população estudantil, cuja faixa etária vai desde os 5 anos até bem acima dos 30 anos.

O passo seguinte foi dado no sentido de definir novos índices de conforto, térmico e aerotérmico, que melhor refletissem a influência que a temperatura do ar exterior e a qualidade do ar interior tem nas condições de conforto que os indivíduos, em particular os estudantes dos diversos tipos de ensino atrás referidos, percecionam, na realidade, como sendo as melhores.

Estes novos índices de conforto vão ser utilizados para avaliar as condições de conforto térmico dos diversos compartimentos dos edifícios estudados. Os resultados obtidos são comparados com os resultados obtidos com recurso ao índice de conforto PMV (“Predicted Mean Vote”), habitualmente utilizado.

Após a definição e concretização destes objetivos, avalia-se a aplicação destes novos índices a sistemas de controlo passivos, através da utilização dos recursos endógenos, como sejam a radiação solar (por exemplo, sombreamentos e aproveitamento do efeito de estufa) e estratégias de ventilação natural e forçada, e a sistemas de controlo ativos, nomeadamente, os aplicados a sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC). De acordo com a informação veiculada pela EDP (2016), o consumo de energia destes sistemas é uma parcela bastante significativa do consumo de energia total de um edifício (entre 30 a 40%). Perante estes valores, é importante encontrar soluções que permitam racionalizar o consumo de energia deste tipo de sistemas. Uma solução passa por utilizar uma metodologia de controlo que permita, simultaneamente, garantir essa racionalização de consumo de energia sem comprometer o conforto dos ocupantes.

Ao avaliar o comportamento térmico dos edifícios na perspetiva do conforto térmico dos seus ocupantes, estudam-se também soluções passivas e ativas que permitam obter uma gestão mais eficiente, principalmente, da ocupação das salas de aula e da sua climatização, e com isto garantir uma melhor eficiência na gestão do consumo de energia elétrica. Posto isto, os objetivos gerais deste trabalho são os seguintes:

1. Aplicar um modelo numérico de simulação do comportamento térmico de edifícios com tipologia complexa e que avalia o conforto térmico, a qualidade do ar e o consumo de energia em ambientes interiores;
2. Desenvolver novos modelos de conforto adaptativo e integral que permitam refletir melhor a perceção que os ocupantes de edifícios escolares têm das condições de conforto térmico e da qualidade do ar que, nomeadamente, as salas de aula lhes oferecem;
3. Simular o comportamento térmico de um edifício destinado ao ensino primário, de dois edifícios destinados ao ensino básico e de um edifício destinado ao ensino universitário (biblioteca);
4. Simular o comportamento térmico e o consumo de energia de um edifício destinado ao ensino universitário;
5. Avaliar o nível de conforto térmico e da qualidade do ar, para vários perfis de utilização, ocupação e ventilação dos edifícios escolares estudados;
6. Identificar e estudar soluções ativas e passivas energeticamente mais eficientes para os edifícios analisados;
7. Estudar a aplicação de uma nova metodologia de controlo de um sistema AVAC baseado na utilização de um novo índice de conforto térmico fundamentado num modelo adaptativo;
8. Desenvolver um modelo de integração das horas de desconforto por sensação térmica de frio, das horas de desconforto por sensação térmica de calor e das horas de desconforto devidas à qualidade do ar, e estudar a sua aplicação no desempenho aerotérmico de edifícios escolares.

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta algumas considerações sobre o tema em estudo. Nele são ainda definidos os objetivos gerais do trabalho e feito o resumo do conteúdo dos diferentes capítulos.

No segundo capítulo faz-se uma abordagem ao estado atual do conhecimento, nomeadamente no que se refere ao setor dos edifícios, à noção de conforto térmico, às variáveis que o influenciam e aos índices que o caracterizam. Neste capítulo faz-se também uma descrição do conforto adaptativo, da qualidade do ar, dos modelos de avaliação integral de conforto e dos tipos de controlo de sistemas AVAC. Ainda neste capítulo faz-se a apresentação do tipo de metodologia de controlo e do modelo numérico utilizado na simulação dos edifícios.

No terceiro capítulo desenvolve-se e define-se o índice de conforto adaptativo utilizado nos edifícios pré-escolares, básicos e universitários. Neste ponto é apresentado todo o processo que permite sugerir um novo índice de conforto adaptativo que toma em consideração a temperatura exterior.

No quarto capítulo faz-se uma apresentação dos casos de estudo bem como dos resultados obtidos e respetiva discussão. Tendo por base o índice de conforto adaptativo que aqui é proposto, são apresentados alguns casos de estudo onde se definem estratégias racionais de utilização das salas de aulas com o objetivo de garantir, sempre que possível, em simultâneo o conforto dos seus ocupantes e uma gestão eficiente do consumo de energia. Os casos de estudo apresentados referem-se a um edifício pré-escolar situado em Olhão, a uma escola de 2º e 3º ciclo situada em Estoi e a um edifício universitário (edifício 8 e 9) situado no campus de Gambelas (universidade do Algarve), em Faro. No caso de estudo referente ao edifício universitário é também analisada numericamente uma nova metodologia de controlo de um sistema AVAC. Neste caso, em vez de se utilizar o clássico controlo da temperatura do ar interior, é utilizado o controlo dos valores do índice de conforto térmico. Finalmente, também neste capítulo, são apresentados dois casos de estudo, desenvolvidos numa escola do 2º e 3º ciclo em Olhão e na biblioteca do campus de Gambelas, onde se faz a aplicação de modelos integrais de conforto.

No quinto capítulo é apresentada uma síntese das principais conclusões que resultam deste trabalho. São, ainda, apontadas as perspetivas de evolução futura nos diversos domínios abordados.

2 Estado atual do conhecimento

Neste capítulo será apresentado o atual estado do conhecimento. São feitas referências ao setor dos edifícios, à resposta térmica dos edifícios, ao enquadramento legislativo nacional, ao conforto térmico, à qualidade do ar, ao modelo de Fanger, a modelos adaptativos, aos modelos de avaliação integral, aos tipos de controlo de sistemas AVAC, ao sistema de controlo implementado numericamente e ao modelo numérico de simulação da resposta térmica de edifícios utilizado.

2.1 O setor dos edifícios

O setor dos edifícios está entre os maiores consumidores energéticos e de matérias-primas. É estimado que, mundialmente, sejam emitidas 6 mil milhões de toneladas de dióxido de carbono devido à actividade humana.

Aproximadamente 37,5% destas emissões são, de uma forma geral, devidas ao setor dos edifícios. Na Europa, este sector utiliza cerca de um terço de todas as matérias-primas, consome 35% da energia final e é responsável pela emissão de 36% dos gases relacionados com o efeito de estufa (Econimidou, 2011).

Assim, os edifícios estão entre os grandes poluidores da actualidade. Com a construção de edifícios energeticamente mais eficientes será possível reduzir em 60% as emissões de dióxido de carbono, ou seja, uma redução de 1,35 mil milhões de toneladas (Tzikopoulos *et al.*, 2005).

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

As necessidades básicas (água corrente quente e fria, fogão e frigorífico), as necessidades de conforto térmico (aquecimento e arrefecimento) e ainda o uso de equipamentos electrodomésticos e de entretenimento, são comodidades que têm vindo a ser assumidas como fundamentais. Estas comodidades traduzem-se num acréscimo de investimento e, em geral, num maior consumo de energia, que evidenciam a necessidade dos consumidores estarem particularmente atentos à eficiência energética dos edifícios e respetivos equipamentos.

Os consumos de energia nos edifícios residenciais distribuem-se, de forma geral, deste modo: equipamentos de frio, 32%; equipamentos (eletrodomésticos e multimédia), 22%; climatização e águas quentes sanitárias, 22%; iluminação, 12%, outros, 12% (EDP, 2006).

Em Portugal, entre 2004 e 2014, verificou-se que o crescimento do consumo de energia eléctrica dos edifícios de serviços foi aproximadamente 21,6% (passou de 9,98 TWh para 12,14 TWh), a dos edifícios residenciais diminuiu ligeiramente, cerca de 4,2% (passou de 12,43 TWh para 11,91 TWh), e a dos edifícios do estado também diminuiu cerca de 7,1% (de 2,40 TWh para 2,23 TWh) (PORDATA, 2016).

Os edifícios de serviços apresentam uma grande heterogeneidade desde uma simples loja, que possui menores consumos do que uma residência, até aos grandes restaurantes, piscinas cobertas, hotéis, grandes superfícies comerciais, hospitais e escolas, cujos consumos são dos mais elevados no que se refere aos verificados em todos os edifícios. O desempenho energético deste grupo de edifícios tem de ser analisado de forma distinta, em função do tipo de edifício (DGE, 2002).

Estudos em hotéis e grandes superfícies mostram, por exemplo, que no sector hoteleiro existe uma grande variação de consumos, entre os 50 e os 600 kWh/m² anuais. Verifica-se que o consumo de energia eléctrica, em média, corresponde a, aproximadamente, 45% do consumo energético total, onde os maiores gastos são em aquecimento e arrefecimento ambiente (30 a 35%), seguindo-se as águas quentes sanitárias (10 a 18%), cozinhas (16 a 18%), iluminação e lavandarias (DGE, 2002).

Os hipermercados e grandes superfícies comerciais são os edifícios de serviços onde se verificam os maiores consumos de energia, sobretudo eléctricos (98 a 99%). As utilizações finais mais importantes são, para os centros comerciais, a climatização com 70% e a iluminação com 20%. No caso dos hipermercados, o frio industrial consome cerca de 35% e o conjunto dos sistemas AVAC e de iluminação têm a mesma ordem de grandeza (30%) (DGE, 2002).

Nos 28 países da União Europeia, os estabelecimentos de ensino encontram-se entre os edifícios de serviços maiores consumidores de energia (12%), apenas superados pelo comércio (28%) e pelos escritórios (26%) (Economidou, 2011).

Segundo dados do INE (Instituto Nacional de Estatística), no ano de 2014 existiam um total de 9177 estabelecimentos de ensino em Portugal continental. Os estabelecimentos de ensino representam uma fração significativa no parque edificado nacional, pelo que possuem uma elevada quota no consumo energético final. Dentro dos consumos energéticos, a maior fração, cerca de 66% da energia, é utilizada em sistemas de aquecimento, arrefecimento e ventilação dos espaços (Pereira *et al.*, 2014).

Pereira *et al.* (2015) refere que os estabelecimentos de ensino em Portugal, de modo geral, apresentam consumos anuais por m² relativamente baixos, não querendo isto significar que estes estabelecimentos são energeticamente eficientes, mas sim que os baixos consumos são reflexo, principalmente, da inexistência em sala de aula de sistemas que promovam as melhores condições de conforto.

A existência de consumos de energia elevados nos edifícios são consequência de dois fatores principais, nomeadamente, o uso intensivo de equipamentos (iluminação, climatização e aparelhos elétricos) e o comportamento dissipativo do edifício (desprovidos de isolamento térmico ou com isolamento deficiente).

De um modo geral, um pouco por todo o mundo, estão a ser implementadas medidas de eficiência energética em escolas. Encontram-se na literatura vários exemplos de intervenções realizadas em infraestruturas escolares. Preocupações relacionadas com o consumo de energia, qualidade do ar e conforto térmico são as principais questões abordadas (Dascalaki e Sermpetzoglou, 2011, e Dimoudi e Kostarela, 2009). No Canadá, o consumo médio nacional nas escolas é de 472 kWh/m², enquanto o edifício modelo, de acordo com o *Model National Energy Code for Buildings* do Canadá, deverá ter um consumo aproximado de 357 kWh/m². Na Grã-Bretanha, o *Energy Efficiency Office* tem desenvolvido estudos e orientações práticas para otimizar o uso da energia nos edifícios escolares, nos quais as emissões de dióxido de carbono (CO₂) ascendem aos 6 milhões de toneladas, representando cerca de 1% do total das emissões na Grã-Bretanha (Custódio, 2011).

Em Portugal, a informação existente sobre o consumo de energia em edifícios escolares é relativamente escassa e pouca explorada. A primeira abordagem ao consumo de energia em escolas, efetuada com base na análise tarifária de 57 edifícios escolares de tipologia “escola secundária” foi apresentado em Pereira *et al.* (2013). Além disso, a legislação não é tão precisa como em outros países. Em Portugal, os edifícios escolares são considerados como uma classe dentro do regulamento geral de edifícios (Pereira, 2016).

No entanto, os poucos dados existentes mostram que os edifícios escolares apresentam uma taxa de utilização de energia elétrica crescente. É também um setor muito heterogéneo, com edifícios com uma arquitetura, por vezes, muito complexa, maioritariamente construídos durante o século passado e, na sua maioria, energeticamente pouco eficientes. É, por isso, um setor que requer imperativamente a aplicação de medidas de eficiência energética que conduzam à redução do seu consumo energético.

2.2 Resposta térmica dos edifícios

As variáveis climáticas que mais influenciam os edifícios, em termos de transferência de calor, são a temperatura exterior, a humidade relativa exterior, a radiação solar, a direcção do vento e a velocidade do vento.

A temperatura do ar exterior é a variável indutora das trocas de calor. Normalmente, no inverno promove a ocorrência de perdas térmicas, enquanto no verão, com a inversão natural do sentido do fluxo térmico, proporciona ganhos térmicos (Gonçalves e Graça, 2004).

No inverno, as perdas térmicas, constituem a razão principal para a diminuição da temperatura interior num edifício e é um dos principais aspectos a acautelar num projecto. A redução das perdas constitui pois, uma das medidas mais eficazes no sentido de melhorar as condições de conforto térmico no interior de edifícios, e as medidas normalmente adotadas resultam na utilização de soluções de isolamento térmico nos elementos opacos (paredes, cobertura e pavimentos) e/ou a utilização de vidros duplos nos vãos envidraçados (Gonçalves e Graça, 2004).

No verão, verifica-se o fenómeno inverso. A temperatura elevada no exterior faz com que o sentido da transferência de calor seja entre o exterior e o interior, o que contribui para aumentar a carga térmica do edifício e conseqüentemente a sua temperatura interior (Gonçalves e Graça, 2004).

O ar é constituído por uma mistura de gases e por vapor de água. O limite de saturação do ar é entendido como sendo a quantidade máxima de vapor de água que este pode conter. Esta quantidade é limitada e varia directamente com a temperatura, aumentando ou diminuindo consoante a temperatura do ar aumenta ou diminui.

Designa-se por humidade absoluta (w) à quantidade de massa de vapor de água existente num quilograma da ar seco e é calculada, de acordo com a equação dos gases perfeitos, através de:

$$w = 0,622 \frac{p_a}{p_t - p_a} \quad (1)$$

onde p_a representa a pressão parcial de vapor de água e p_t a pressão total da atmosfera (ar seco e vapor de água).

Designa-se por humidade relativa (HR), dada em percentagem, ao quociente entre a pressão parcial do vapor de água no ar húmido e a pressão parcial do vapor de água saturado (pressão de saturação) para a mesma temperatura:

$$HR = \frac{p_a}{p_s} \quad (2)$$

onde p_s representa a pressão parcial de vapor de água saturado.

A humidade relativa de uma massa de ar varia consoante a temperatura a que esta se encontra, diminuindo quando a temperatura aumenta (devido ao aumento do limite de saturação) e aumentando quando a temperatura desce (devido ao decréscimo do limite de saturação), mantendo-se constante o valor da humidade absoluta.

Sempre que a humidade relativa atinge o valor do limite de saturação, todo o vapor de água além desse valor condensará. A condensação é a passagem ao estado líquido do vapor de água existente no ar em excesso relativamente ao limite de saturação.

O arrefecimento do ar pode provocar condensações do vapor de água, sempre que seja alcançado o valor do limite de saturação correspondente a uma determinada temperatura.

No interior dos edifícios esse arrefecimento dá-se numa forma localizada junto aos paramentos das paredes exteriores, em particular nas zonas onde se verificam pontes térmicas.

No período de inverno as superfícies interiores das paredes exteriores estão, em geral, a uma temperatura inferior à do ar ambiente. Isto provoca o aumento da humidade relativa do ar em contacto com elas, podendo originar condensações superficiais. Como é óbvio, quanto maior for o isolamento térmico das paredes exteriores maior será a sua temperatura superficial interior e menor será a possibilidade de condensação. O correcto isolamento térmico das paredes exteriores é uma das melhores medidas preventivas para evitar as condensações superficiais no futuro (Mendonça, 2005).

O excesso de vapor de água no interior das habitações é transportado para o exterior, ou através da renovação do ar interior, ou atravessando as paredes exteriores por difusão. Caso isto não aconteça, condensa-se nas superfícies do interior, inicialmente nas superfícies envidraçadas e, posteriormente, nas superfícies opacas. O exposto demonstra a importância de proceder a uma correcta ventilação dos espaços (Mendonça, 2005).

A intensidade da radiação solar é função da latitude do local, do dia do ano e da hora do dia, e chega à superfície da terra de dois modos distintos: directamente (radiação directa), sem reflexões nem refrações no seu percurso através da atmosfera; e sob a forma difusa (radiação

difusa), que resulta da dispersão dos raios solares nas moléculas em suspensão na atmosfera. Por sua vez, a quantidade de energia radiante que pode ser captada por um edifício em proveito do seu desempenho térmico depende da orientação e das características das superfícies da sua envolvente. O valor da intensidade da radiação solar depende da duração da exposição solar, definida pela trajetória do sol, e do ângulo de incidência dos raios solares (Lanham *et al.*, 2004)

A radiação solar constitui assim uma variável muito relevante no conforto térmico proporcionado pelos edifícios. No inverno constitui uma importante fonte de calor, que contribui para o aumento da temperatura interior. No entanto, no verão esse contributo, se excessivo, pode causar desconforto nos ocupantes (Gonçalves e Graça, 2004).

A forma mais simples de aproveitar a energia radiante proveniente do sol consiste na sua captação direta através dos vãos envidraçados. Em Portugal, de acordo com o movimento aparente do sol, a orientação a sul recebe radiação direta durante todo dia. O alinhamento das fachadas maiores segundo a direção este-oeste e uma maior distribuição de vãos envidraçados nestas fachadas permite maximizar os ganhos de radiação. Esta disposição é favorável no inverno, onde o objetivo é reduzir as necessidades de aquecimento.

No verão, contudo, esta orientação é a que recebe também a maior quantidade de radiação. Como o pretendido é a redução das necessidades de arrefecimento, no verão deve ser possível minimizar estes ganhos radiativos. Assim, a colocação de palas de sombreamento permite condicionar a incidência da radiação solar. O dimensionamento e a disposição adequada destas palas têm a particularidade de sombrear eficazmente os vãos envidraçados no verão, período do ano em que o sol se encontra mais alto no horizonte, e não prejudicar os ganhos solares no inverno, porque, para a altura solar característica deste período, o sombreamento produzido nas superfícies envidraçadas é diminuto (Ferreira, 2012).

O vento resulta da deslocação de uma massa de ar de uma zona de altas pressões para uma zona de baixas pressões. Esta diferença de pressões tem uma origem térmica e está diretamente relacionada com a radiação solar e os processos de aquecimento das massas de ar. Geralmente, o ar desloca-se horizontalmente sobre a superfície da Terra e pode ser caracterizado pela sua direção, velocidade e intensidade.

Vários parâmetros afetam a sua ocorrência e a sua velocidade que, em geral aumenta com a altitude, sendo que a topografia é um destes fatores. O vento é geralmente uma vantagem no verão porque permite arrefecer a atmosfera e é uma desvantagem no inverno porque é um dos fatores que contribui para o arrefecimento dos edifícios por convecção.

A incidência do vento sobre um edifício cria neste um campo de pressões cuja distribuição depende dos seguintes fatores: localização do edifício, sua conformação geométrica e relação com o contorno, direção e velocidade do vento, entre outros. Na face diretamente exposta ao vento instalam-se pressões positivas, ou sobrepressões, ao passo que na face de tardo, devido à formação de uma zona de recirculação e conseqüente estagnação de fluido, as pressões são negativas, ou seja, correspondem a sucções. Deste modo, pode-se tirar partido desta não uniformidade de pressões nas superfícies da envolvente para originar caudais através de aberturas criteriosamente posicionadas (ventilação cruzada) (Ferreira, 2012).

A ventilação dos locais é necessária por razões de qualidade do ar interior. No entanto, é geralmente fonte de trocas de calor que podem afetar negativa ou positivamente as condições de conforto. Assim, em condições de inverno, a ventilação deve ser reduzida ao mínimo indispensável para manter a qualidade do ar interior, pois a entrada de ar frio exterior tem um impacto negativo ao nível do conforto térmico e do consumo de energia devido ao aquecimento. No verão, a ventilação tem normalmente um impacto menor. Para além disso, na estação quente, a ventilação pode desempenhar um importante papel no desempenho térmico do edifício por constituir um meio passivo a que se pode recorrer, removendo durante o período noturno as cargas térmicas acumuladas em excesso no edifício durante o período diurno, por efeito da inércia térmica. Assim, esta interação entre a ventilação e a inércia térmica contribui para a melhoria do desempenho térmico do edifício, constituindo uma estratégia passiva de arrefecimento dos edifícios muito utilizada na arquitetura bioclimática (Ferreira, 2012).

2.3 Enquadramento legislativo nacional

Nesta secção é feita uma descrição da legislação nacional produzida com o objetivo de regulamentar o comportamento térmico, a qualidade do ar interior e a eficiência energética dos edifícios.

Em 1990 foi aprovado o primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), promulgado pelo Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de fevereiro (RCCTE, 1990), com o objetivo de melhorar a qualidade da construção em Portugal. Este regulamento constitui uma primeira base regulamentar e pressuposto essencial à adoção de medidas quanto à utilização de energia nos edifícios que visava a diminuição do consumo energético dos edifícios através da imposição de requisitos aos projetos de novos edifícios,

que garantissem as adequadas condições de conforto térmico nesses edifícios, e concomitantemente moderando os consumos de energia.

Em 1998 foi promulgado o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE) pelo Decreto-Lei n.º 118/98 de 7 de maio (RSECE, 1998). Este Decreto-Lei veio regulamentar as condições em que se definem as dimensões e se devem processar a instalação e a utilização de equipamentos e sistemas nos edifícios com sistemas energéticos de aquecimento e/ou arrefecimento, com ou sem desumidificação, por forma a assegurar a qualidade das respetivas prestações, com respeito pela utilização racional de energia, pelo ambiente e pela segurança das instalações.

A União Europeia publicou, em 4 de janeiro de 2013, a Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, que, entre outros requisitos, impôs aos estados membros o estabelecimento e atualização periódica de regulamentos para reduzir os consumos energéticos dos edifícios novos e reabilitados, impondo, com poucas exceções, a implementação de todas as medidas pertinentes com viabilidade técnica e económica. A diretiva adota também a obrigatoriedade de uma verificação periódica dos consumos reais nos edifícios de maior dimensão e a disponibilização desta informação ao público que os utilizar, mediante afixação de um certificado apropriado em local bem visível junto da entrada do edifício.

Em 2006, o RCCTE, promulgado em 1990, foi substituído por dois regulamentos de desempenho térmico dos edifícios: o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006), promulgado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, e o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE, 2006), promulgado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, que impôs uma revisão ao RSECE aprovado em 1998 e que transpõe parcialmente para a ordem jurídica nacional a Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho. Como complemento aos dois regulamentos anteriores, entrou em vigor o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE, 2006), promulgado pelo Decreto-lei n.º 78/2006 de 4 de abril.

O Decreto-Lei n.º 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 impacto 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).

O Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) veio definir um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios de serviços e de habitação dotados de sistemas de climatização, os quais, para além dos aspetos relacionados com a envolvente e com a limitação dos consumos energéticos, abrange também a eficiência e manutenção dos sistemas de climatização dos edifícios, impondo a realização de auditorias energéticas periódicas aos edifícios de serviços. Regulamenta ainda a qualidade do ar interior, nomeadamente através da indicação de requisitos relativamente aos caudais mínimos do ar interior por tipo de atividade e às concentrações máximas admissíveis para os principais poluentes (edifícios existentes) (RSECE, 2006).

O Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) resulta da transposição para o direito nacional da Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, de 16 de dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios.

A implementação deste sistema de certificação energética vem permitir informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios, aquando da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos (SCE, 2006). Este aspeto 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.

Em 2013 foi publicado um diploma, o Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto de 2013, que veio transpor 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, que reformulou o regime estabelecido pela Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002. A Diretiva atual vem clarificar alguns dos princípios da anterior e introduzir novas disposições com o objetivo de reforçar o quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, tendo por base as metas e os desafios acordados pelos Estados-Membros para 2020. O presente diploma assegura também uma revisão da legislação nacional, incluindo num único diploma o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e de Serviços (RECS).

A definição de requisitos e a avaliação de desempenho energético dos edifícios passa a basear-se no seguinte: no caso de edifícios de habitação destacam-se o comportamento térmico dos edifícios e a eficiência dos sistemas, aos quais acrescem, no caso dos edifícios de comércio e serviços, a instalação, a condução e a manutenção de sistemas técnicos. São, ainda, definidos princípios gerais, concretizados em requisitos específicos para edifícios novos, edifícios sujeitos a grande intervenção e edifícios existentes.

Este diploma atualiza os requisitos de qualidade térmica e introduz requisitos de eficiência energética para os principais tipos de sistemas técnicos dos edifícios. Os sistemas de climatização, de preparação de água quente sanitária, de iluminação, de aproveitamento de energias renováveis e de gestão de energia ficam, assim, sujeitos a padrões mínimos de eficiência energética.

Em complemento à eficiência energética, mantém-se a promoção da utilização de fontes de energia renovável, com destaque para o aproveitamento do recurso solar. Do mesmo modo, é incentivada a utilização de sistemas ou soluções passivas nos edifícios, bem como a otimização do desempenho em consequência de um menor recurso aos sistemas ativos de climatização.

No desenvolvimento do Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto de 2013 foram publicadas diversas portarias que regulamentam alguns dos pontos específicos presentes neste decreto-lei, nomeadamente:

- A Portaria nº 349-B/2013 de 29 de novembro de 2013 que define a metodologia de determinação da classe de desempenho energético para a tipologia de pré-certificados e certificados do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, bem como os requisitos de comportamento técnico e de eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos e edifícios sujeitos a grande intervenção;
- A Portaria nº 349-C/2013 de 2 de dezembro de 2013 estabelece os elementos que deverão constar dos procedimentos de licenciamento ou de comunicação prévia de operações urbanísticas de edificação, bem como de autorização de utilização, que demonstrem o cumprimento do REH e do RECS;
- A Portaria nº 349-D/2013 de 2 de dezembro de 2013 determina os requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes;
- A Portaria nº 353-A/2013 de 4 de dezembro de 2013 determina os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, bem como os limiares de proteção e as condições de

referência para os poluentes do ar interior dos edifícios de comércio e serviços novos, sujeitos a grande intervenção e existentes e a respetiva metodologia de avaliação.

2.4 Noção de conforto térmico

De um ponto de vista geral, segundo a ASHRAE (2010a), a sensação de conforto térmico pode ser definida como “o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Por outras palavras, uma pessoa está termicamente confortável quando não sente nem calor nem frio.

O conforto térmico resulta das trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente. Um dos requisitos para se obter bem-estar e conforto é manter o equilíbrio térmico entre o corpo humano e o meio ambiente. Isso implica conservar a temperatura interior do corpo à temperatura aproximada de 37°C, independentemente das variações das condições ambientais (ASHRAE, 2010a).

Uma forma simplificada de especificar as condições ambientes satisfatórias é recorrer apenas à temperatura do ar. O Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE, 2006) estabelece as temperaturas de referência de 20°C e de 25°C, respectivamente, para as estações de aquecimento (inverno) e de arrefecimento (verão).

No desenvolvimento do Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto, foi necessário determinar os requisitos de conceção relativos à qualidade térmica da envolvente e à eficiência dos sistemas técnicos dos edifícios novos, dos edifícios sujeitos a grande intervenção e dos edifícios existentes. Esses requisitos, estabelecidos pela portaria n.º 349-D/2013 de 2 de dezembro, referem que deve ser considerada uma temperatura interior compreendida no intervalo de 20°C a 25°C, inclusive. No entanto, contrariamente ao RCCTE, distingue os casos dos edifícios híbridos ou passivos, ao considerar, para este tipo de edifícios, uma temperatura interior compreendida no intervalo de 19°C a 27°C, inclusive.

O RCCTE não refere níveis de conforto, mas sim temperaturas. No entanto, as regulamentações internacionais mais recentes, baseadas no Fanger (1970) referem níveis de conforto e de qualidade do ar.

A noção de conforto térmico é muito subjectiva e depende de pessoa para pessoa, variando inclusivamente ao longo do dia, da noite ou até com o decorrer dos dias. Esta noção está associada a um conjunto de grandezas, que fisicamente caracterizam um ambiente. A criação de condições de conforto pode acontecer naturalmente ou com recurso a um sistema de climatização.

2.5 Variáveis que influenciam o conforto térmico

O conforto térmico depende de dois parâmetros individuais (o vestuário e a atividade) e de quatro parâmetros ambientais (a temperatura média do ar, a temperatura média radiante, a velocidade média do ar e a umidade relativa do ar).

Vestuário (I_{cl})

O nível de vestuário normalmente funciona como uma resistência de calor sensível I_{cl} . A unidade de medida é definida por *clo*, que deriva da palavra inglesa "clothing", sendo $1\ clo = 0,155\ m^2\text{C}/W$. No verão o nível de vestuário típico é de sensivelmente 0,5 clo e no inverno tipicamente pode variar entre 0,9 e 1 clo.

O valor da resistência sensível provocada pelo vestuário pode ser determinado pela combinação das diversas peças de roupa, ou seja, a partir do somatório das respectivas resistências térmicas.

Atividade (M)

O nível de atividade representa uma medida da produção interna de calor por parte do organismo de um ser humano. Este nível de atividade é definido por *met*, que deriva da palavra inglesa "metabolism". Um *met* corresponde a uma potência de $58,15\ W/m^2$ de área de superfície do corpo humano. Uma pessoa típica tem uma superfície aproximada de $1,8\ m^2$, o que corresponde, quando está em repouso, a uma potência aproximada de 100 W.

Temperatura média do ar (T_a)

A temperatura do ar circundante ao corpo de um indivíduo influencia os processos de transmissão de calor por convecção natural, ou mista, e por evaporação. O sensor para medir o valor da temperatura não deve ser influenciado por fenômenos radiantes.

Temperatura média radiante (TMR)

A temperatura média radiante, TMR, influencia a troca de calor sob forma de radiação entre uma pessoa e as superfícies que se encontram em seu redor. A radiação depende da quarta potência da temperatura absoluta, da geometria do habitáculo e da localização do indivíduo no compartimento.

A temperatura média radiante pode ser determinada de duas formas: com base na medição da temperatura das superfícies circundantes e na localização destas em relação ao indivíduo ou

usando um transdutor que simule o corpo humano e integre a radiação das superfícies circundantes.

Se a temperatura média do corpo for superior à das superfícies circundantes, existirá um processo de perda de calor por radiação por parte do organismo, caso contrário, haverá um ganho.

Velocidade média do ar (U)

A velocidade média do ar influencia os processos de perda de calor por parte do organismo, nomeadamente, o processo de transmissão de calor por convecção forçada, ou mista, e por evaporação. O valor médio da velocidade do ar deve ser medido numa zona típica de ocupação por parte dum ser humano. O sensor usado deve ser omnidirecional, a fim de a velocidade média do ar não ser influenciada pela direção do escoamento, já que o corpo humano reage desta mesma forma.

Humidade relativa (HR)

A humidade relativa influencia os processos de perda de calor por evaporação. Em ambientes térmicos moderados a influência da humidade relativa é muito pequena. A sua preponderância reflete-se mais a nível da qualidade do ar.

2.6 Índices de conforto térmico

De acordo com Fanger (1970), o nível de conforto térmico em ambientes moderados (não susceptíveis de causar variações significativas na temperatura do corpo humano) é avaliado recorrendo aos índices votação média previsível (PMV) e percentagem de pessoas termicamente insatisfeitas (PPD).

De modo a definir estes índices, Fanger (1970) desenvolveu uma equação geral de conforto térmico, com a finalidade de estimar e de prever condições de conforto térmico aceitáveis para um indivíduo. Este tipo de equação determina as combinações aceitáveis dos parâmetros ambientais (temperatura média do ar interior, temperatura média radiante, velocidade do ar interior e humidade relativa interior), para um determinado nível de atividade e de nível de vestuário que o indivíduo apresenta.

Esta equação de conforto é baseada em três condições. A primeira condição, que é na realidade uma dupla equação de balanço térmico, assume que a produção de calor por parte do organismo é idêntica à dissipação, isto é:

$$M \pm W - E - R_{es} = \pm K_{cl} = \pm R \pm C \quad (3)$$

Na equação anterior, os parâmetros representam o seguinte:

- M – produção interna de calor por parte do organismo, ou seja, o nível metabólico;
- W – trabalho exterior;
- E – perda de calor por evaporação de suor, E_{sw} , e por difusão de vapor de água da superfície da pele, E_d ;
- R_{es} – perda por respiração devido à diferença de temperatura, R_{esT} , e de vapor de água, R_{esW} , entre o ar inspirado e expirado;
- K_{cl} – condução de calor através do vestuário;
- R – transmissão de calor por radiação;
- C – transmissão de calor por convecção.

A segunda e terceira condições representam os valores limites admissíveis de conforto térmico. A segunda considera a dependência existente entre a temperatura média da pele, T_s , e o nível de atividade. A terceira representa a dependência entre a perda de calor por evaporação do suor da superfície da pele, E_{sw} , e o nível de atividade. Estas duas condições são dadas por:

$$a < T_s < b \quad (4)$$

$$c < E_{sw} < d \quad (5)$$

Um indivíduo alcança o equilíbrio térmico (ou seja, está termicamente confortável), para um determinado nível de vestuário e de atividade, quando as condições das equações (4) e (5) forem verificadas.

Os limites a , b , c e d foram determinados a partir de investigações efetuadas por Fanger (1970). Estas investigações mostraram que a temperatura da pele decresce para elevados níveis de atividade e que a perda de calor por evaporação do suor da superfície da pele aumenta com o nível de atividade. Estas duas reações fazem aumentar a perda de calor do interior do corpo para o ambiente.

O índice PMV, que corresponde à votação média previsível de um painel de avaliadores relativamente às condições de conforto de um dado ambiente térmico moderado, é apresentado pela norma ISO 7730 (2005), norma internacional utilizada para determinar as condições térmicas em espaços interiores, e baseia-se no balanço térmico do corpo humano, onde a produção interna de calor iguala a perda de calor para o meio ambiente quando se verificam condições neutras de conforto. Para determinar este índice é necessário estimar o nível de atividade (metabolismo), o nível do vestuário, a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade média do ar e a pressão parcial do vapor de água.

Neste tipo de ambientes, o sistema termorregulatório do corpo humano modifica a temperatura da pele e a secreção de suor, de forma a manter um balanço térmico. O índice PMV tem em conta as respostas fisiológicas do sistema termorregulatório de uma amostra de indivíduos, ao exprimir as suas sensações térmicas. Desta forma, a partir da análise estatística das respostas de mais de 1300 indivíduos, Fanger (1970) chegou a uma equação que permite calcular o valor do índice PMV em função das grandezas que o influenciam:

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \\
 & \times [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99(M - W) - p_a) \\
 & - 0,42((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5}M \cdot (5867 - p_a) \\
 & - 0,0014M \times (34 - T_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8}f_{cl}((T_{cl} + 273)^4 - (TMR + 273)^4) - f_{cl}h_c \\
 & \times (T_{cl} - T_a)]
 \end{aligned} \tag{6}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 T_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - W) \\
 & - 0,155I_{cl} \left((M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99(M - W) - p_a) \right. \\
 & \left. - 0,42((M - W) - 58,15) - 0,0014M \times (34 - T_a) \right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} & \text{para } 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{U} \\ 12,1\sqrt{U} & \text{para } 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{U} \end{cases} \tag{8}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 0,2I_{cl} & \text{para } I_{cl} < 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases} \tag{9}$$

Nas equações (6) a (9), os parâmetros representam o seguinte:

- M – nível metabólico;
- W – trabalho exterior;
- I_{cl} – resistência térmica do vestuário;
- f_{cl} – relação entre a área do corpo vestida e a área despida;
- T_a – temperatura média do ar interior;
- TMR – temperatura média radiante;
- U – velocidade média do ar interior;
- p_a – pressão parcial do vapor;
- h_c – coeficiente de transmissão de calor por convecção;
- T_{cl} – temperatura média da superfície do vestuário.

A norma ISO 7730 (2005) recomenda a utilização do índice PMV apenas para valores do PMV situados entre -2 e +2. Recomenda também a utilização do índice PMV quando os valores dos seis parâmetros principais se situam dentro dos seguintes intervalos:

- M – 46 a 232 W/m² (0,8 a 4 met);
- I_{cl} – 0 a 0,310 m².°C/W (0 a 2 clo);
- T_a – 10 a 30°C;
- TMR – 10 a 40°C;
- U – 0 a 1 m/s;
- p_a – 0 a 2700 Pa.

O índice PPD exprime a percentagem previsível de pessoas insatisfeitas quando expostas a um dado ambiente térmico. A relação existente entre o índice PMV e o PPD é dada através de uma curva gaussiana (figura 2.1), sendo obtida através da expressão:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)} \quad (10)$$

Os princípios basilares destes 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). As normas prevêm um intervalo admissível nas condições de conforto, dada a dificuldade na obtenção de condições de neutralidade térmica simultaneamente para todas as pessoas que partilham um determinado espaço no mesmo intervalo temporal

(Conceição e Lúcio, 2006c). Como se pode verificar na figura 2.1, mesmo num ambiente termicamente neutro, 5% das pessoas poder-se-ão considerar insatisfeitas.

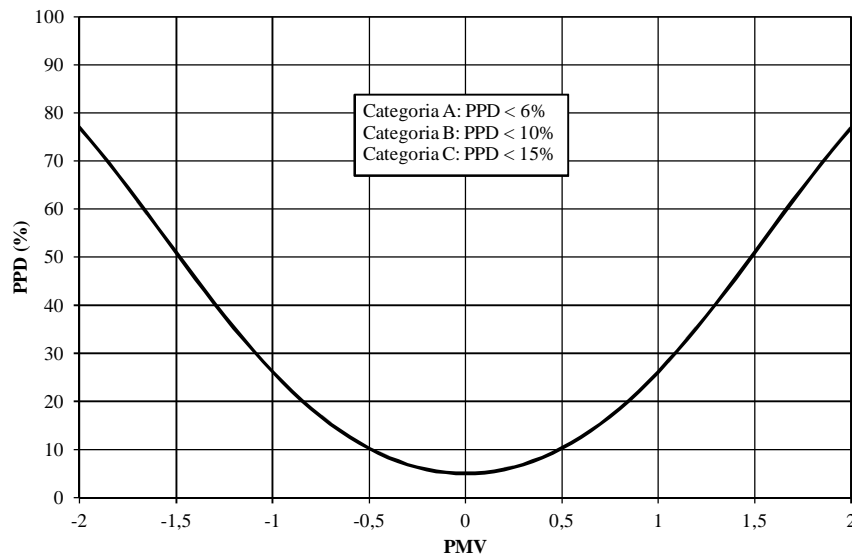


Figura 2.1 – Relação entre os índices PMV e PPD.

Os ambientes térmicos, de acordo com a ISO 7730 (2005) e ASHRAE (2010a), encontram-se classificados segundo três categorias: A, B e C. As referidas normas estipulam que num ambiente térmico caracterizado como sendo de categoria A o índice PMV varia entre $-0,2$ e $0,2$ (PPD < 6%), de categoria B o índice PMV varia entre $-0,5$ e $0,5$ (PPD < 10%) e de categoria C o índice PMV varia entre $-0,7$ e $0,7$ (PPD < 15%) (Olesen, 2004, e Conceição *et al.*, 2006a).

Khedari *et al.* (2000), através dos votos de sensação térmica dos alunos de um liceu onde foram utilizados ventiladores para arrefecer a temperatura da sala, conclui que a temperatura neutra era de $30,6^{\circ}\text{C}$, com uma velocidade do ar de $1,0$ m/s e uma humidade relativa do ar entre 50% a 60%, e de $33,5^{\circ}\text{C}$ com uma humidade relativa entre 50% e 80% e com uma velocidade do ar de $2,0$ m/s.

Em face das diferenças existentes entre indivíduos e também das diferenças existentes entre os diversos espaços de um edifício, é impossível especificar condições de conforto que satisfaçam, simultaneamente, todos os ocupantes desse edifício. Haverá sempre, pelo menos, 5% de ocupantes insatisfeitos.

Note-se que há equilíbrio térmico por sudação ou vasoconstrição, em situações que causam desconforto, como reação a um aumento ou diminuição da temperatura ambiente circundante. Estas variações de temperatura são detetadas por termorreceptores de calor e de frio

distribuídos por toda a superfície do corpo humano. Quando a temperatura ambiente é superior à temperatura interna do organismo (cerca de 37°C) a termorregulação é efetuada a partir de um aumento de perdas de calor latente e sensível, por processos evaporativos: passivos, associados às perdas de água nos processos respiratórios e cutâneos, e ativos, resultantes da segregação das glândulas sudoríparas. Quando a temperatura ambiente é inferior à temperatura interna do organismo ocorre a contracção vascular, ou seja, há uma redução dos fluxos de calor do interior do organismo para as camadas superficiais, diminuindo desta forma a temperatura da pele (neste caso há redução das perdas de calor para o ambiente por convecção e por radiação).

Por outro lado, podem ocorrer situações de desconforto local, por exemplo, originadas por uma corrente de ar (risco de resfriamento), pela assimetria da temperatura radiante, por gradientes de temperatura do ar na vertical ou pelo contacto com o chão com temperaturas demasiado quentes ou frias. As pessoas quando se sentem localmente desconfortáveis necessitam normalmente de níveis de temperatura excessivos para anular este efeito (Conceição, 1996).

Pode então concluir-se que o conforto térmico não é considerado como sendo um conceito exacto, que não implica uma temperatura exacta. O conforto térmico depende de factores quantificáveis – temperatura do ar, velocidade do ar, humidade relativa do ar, etc. e de factores não quantificáveis – estado mental, hábitos, educação, etc. Assim, as preferências de conforto das pessoas variam bastante consoante a sua particular aclimação ao ambiente local (Khedari *et al.*, 2000).

2.7 Conforto adaptativo

Nesta secção é apresentada a evolução da teoria adaptativa e dos modelos de conforto adaptativo ao longo das últimas três décadas. É feita também uma descrição pormenorizada do modelo de conforto adaptativo desenvolvido por Yao *et al.* (2009) que fundamenta a nova metodologia a seguir no modelo de conforto adaptativo proposto neste trabalho.

2.7.1 Noção de conforto adaptativo

A definição de um clima interior adequado é importante para que um edifício seja, nas suas diversas valências, eficiente, não só por ser determinante para o conforto térmico dos seus ocupantes, mas também porque vai influenciar o consumo de energia do edifício e, consequentemente, determinar a sua sustentabilidade (Nicol e Humphreys, 2002).

As pessoas têm uma tendência natural para se adaptar às variações que ocorrem no seu ambiente, ou seja tendem a manter e a melhorar o seu bem-estar através de reações fisiológicas, psicológicas e comportamentais aos estímulos ambientais (Brager e de Dear, 1998). Assim, o mesmo ambiente térmico de um edifício pode ser diferenciadamente percebido pelos seus diversos ocupantes ou diferentes ocupantes podem perceber o mesmo nível de conforto térmico quando integrados em diferentes ambientes térmicos (Singh *et al.*, 2011). É, então, fundamental entender quais são as percepções que os ocupantes têm do ambiente interior de um edifício e o seu comportamento adaptativo perante esse ambiente (Yao *et al.*, 2010).

Atualmente, no domínio da investigação do conforto térmico existem duas abordagens possíveis: modelos de equilíbrio térmico do corpo humano, fundamentados em estudos desenvolvidos em laboratório, e modelos adaptativos baseados em estudos de campo (Conceição *et al.*, 2012). O modelo de equilíbrio térmico do corpo humano mais conhecido, já referido, é o método que recorre aos índices PMV e PPD, baseado em estudos laboratoriais, desenvolvido por Fanger em 1970. Este modelo é descrito como uma função de quatro variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura média radiante, humidade relativa do ar e velocidade do ar) e duas variáveis pessoais (nível de vestuário e de atividade dos ocupantes). De certo modo, os parâmetros físicos e pessoais tomam em consideração a adaptação comportamental até determinado ponto. Contudo, estes parâmetros ignoram completamente a dimensão psicológica da adaptação e os aspetos sociais e culturais de um ocupante, os quais são de extrema importância nos edifícios naturalmente ventilados. Estes parâmetros são importantes devido à forte relação existente entre a adaptação comportamental do ocupante e o meio ambiente (Singh *et al.*, 2011).

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 e Humphreys, 2002). Os recentes desenvolvimentos da teoria do conforto térmico adaptativo explicam o conforto térmico dos ocupantes em diferentes contextos ambientais, particularmente em edifícios naturalmente condicionados, do ponto de vista da adaptação (Brager e de Dear, 2000). Os ocupantes inseridos num dado ambiente térmico podem atingir o seu conforto térmico através do ajuste das suas próprias condições ambientais com recurso, por exemplo, à adaptação do seu vestuário, à ingestão de água, ao abrir ou ao fechar de janelas, ao abrir ou ao fechar de persianas, ao ligar ou desligar de ventoinhas ou do sistema AVAC, etc. (Yao *et al.* 2010).

Auliciems (1981) foi um dos pioneiros em propor um algoritmo de controlo do conforto térmico com características adaptativas. Outros investigadores também apresentaram várias equações empíricas para a temperatura interior de conforto térmico baseadas em questionários efetuados a ocupantes em edifícios desprovidos de sistemas de climatização.

A maioria dos modelos adaptativos são usados para definir a temperatura neutra (temperatura de conforto) como função da temperatura exterior (Nicol e Roaf, 1996, Humphreys, 1976, de Dear e Auliciems, 1985, e de Dear *et al.*, 1997) ou, simultaneamente, em função das temperaturas exterior e interior (de Dear e Auliciems, 1985).

Hwang *et al.*, (2009) utiliza um modelo regressivo para estimar a relação entre as respostas de estudantes de escolas secundárias quanto à aceitabilidade térmica de um determinado espaço e a temperatura operativa para determinar os limites da zona de conforto térmico. Os autores verificaram que as zonas de conforto correspondentes a uma percentagem aceitável de respostas de 90% e 80% ocorriam, respetivamente, para valores de temperatura entre os 20,1°C e os 28,4°C e entre os 17,6°C e os 30°C.

Outros autores (Fanger e Toftum, 2002) propuseram um modelo que estende o índice PMV ao incorporar um “fator de expectativa” de modo a ampliar a aplicabilidade do índice PMV. Este é visto como o motivo principal que explica porque o índice PMV sobrestima a sensação térmica dos ocupantes em edifícios não climatizados e num ambiente térmico quente. As expectativas dos ocupantes e a atividade estimada são vistas como as duas principais razões que levam a uma discrepância entre o valor do índice PMV calculado e a sensação térmica atual dada pelos ocupantes em edifícios não climatizados. Neste método, o valor do “fator de expectativa” varia entre 0,5 e 1, ou seja, entre a situação em que o ambiente está termicamente quente e a situação em que o ambiente está termicamente frio.

Argumenta-se que o modelo adaptativo de conforto térmico não inclui explicitamente as entradas dos parâmetros ambientais, como a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a temperatura média radiante e a velocidade do ar e as variáveis pessoais, tais como o nível de vestuário e o nível de atividade, que possuem um impacto bem conhecido na sensação térmica humana. Como o modelo adaptativo de conforto térmico se baseia em estudos de campo, onde os investigadores geralmente recolhem dados sobre o ambiente térmico e, simultaneamente, a resposta térmica dos indivíduos, todos os modelos adaptativos incluem implicitamente esses parâmetros.

O principal fundamento da teoria adaptativa é expresso pelo princípio adaptativo: se uma mudança no ambiente térmico produz desconforto, as pessoas, conscientemente ou inconscientemente, reagem a fim de restaurar o seu próprio conforto térmico (Nicol e

Humphreys, 2002). As pesquisas revelam que há uma forte relação entre a adaptação comportamental do ocupante e o ambiente onde se insere. Isto é, não se pode ignorar que as dimensões psicológicas, sociais e culturais de adaptação, são fortemente influenciadas pela localização geográfica, pelo clima local e pelas condições socioculturais.

Estudos de campo em edifícios naturalmente ventilados revelaram que o índice PMV prevê sensações térmicas mais quentes do que aquelas que os ocupantes realmente sentem nesse tipo de edifícios (Brager e de Dear, 1998), ou seja, sobrestima a resposta dos ocupantes a temperaturas elevadas e subestima a sua resposta a temperaturas baixas, o que leva à utilização dos sistemas de climatização para além do necessário. Os modelos adaptativos também mostram que a temperatura de conforto térmico é uma função da temperatura exterior.

Singh *et al.* (2011) conduziram um estudo de campo no nordeste da Índia, cuja região é classificada em três zonas climáticas abrangentes (quente e húmida, fresca e húmida e fria e nebulosa), durante as quatro estações do ano. Este estudo permitiu-lhes desenvolver modelos teóricos de conforto térmico baseados em coeficientes adaptativos variáveis para as diferentes estações do ano e também para as diferentes zonas climáticas. Este estudo de campo validou um modelo de conforto térmico adaptativo em edifícios climatizados, mas a questão permanece: será que este modelo adaptativo continuará a adequar-se a novos edifícios quando os padrões de vestuário, os padrões de atividade e os níveis de expectativas dos ocupantes mudam contínua e rapidamente (Singh *et al.*, 2011)?

Para resolver as discrepâncias acima referidas, uma solução passa pela combinação de ambos os modelos, modelo de balanço térmico e modelo adaptativo, que, eventualmente, poderá melhor contabilizar as influências térmicas e não térmicas na resposta dos ocupantes dos edifícios ao seu conforto térmico (Yao *et al.*, 2009). 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 baseado na teoria da “caixa negra”, que toma em consideração fatores como sejam 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). A aplicação deste modelo em estudos experimentais foi utilizado pelos seguintes autores: Yao *et al.* (2009), Wei *et al.* (2010), Conceição *et al.* (2010), Singh *et al.* (2011) e Conceição *et al.* (2012).

2.7.2 Modelo de conforto térmico adaptativo

Os índices PMV e PPD desenvolvidos por Fanger (1970) têm sido utilizados em todo o mundo para prever e avaliar o conforto térmico em edifícios. O método, como é apresentado no ponto anterior, leva em conta o impacto combinado do nível de atividade (M), o nível de vestuário (I_{cl}), a temperatura do ar (T_a), a velocidade do ar (U), a humidade relativa do ar (HR) e a temperatura média radiante (TMR) no nível de conforto térmico (PMV):

$$PMV = f(M, I_{cl}, T_a, U, HR, TMR) \quad (11)$$

Pesquisas experimentais sobre conforto térmico colocaram o modelo PMV em causa, porque este não considera as adaptações do corpo humano às condições ambientais. Estas adaptações desempenham um papel fundamental na determinação da sensação térmica e na percepção de conforto registadas por cada indivíduo (Corgnati *et al.*, 2009, Becker e Paciuk, 2009, Bouden e Ghrab, 2005).

Os estudos experimentais desenvolvidos por Yao *et al.* (2009), Yao *et al.* (2010), Wei *et al.* (2010), Conceição *et al.* (2010), Conceição *et al.* (2012) e Singh *et al.* (2011) mostraram que existe uma discrepância entre os valores médios reais (AMV, “Actual Mean Vote”), dados pelos votos de sensação térmica registados na escala ASHRAE de 7 pontos (-3, muito frio; -2, frio; -1, ligeiramente frio; 0, neutro; +1, ligeiramente quente; +2, quente; +3, muito quente) durante o questionário de sensação de conforto térmico, e os valores do índice PMV calculados. Um fator de correção, denominado coeficiente de adaptação, é derivado matematicamente para relacionar os valores obtidos experimentalmente (dados pelo índice AMV) e os valores obtidos laboratorialmente por Fanger (dados pelo índice PMV). Este factor de correção é adicionado ao índice PMV e é calculado para cada valor da temperatura de ar exterior.

Todas as acções adaptativas são baseadas em mecanismos de feedback e a adaptação no presente é o resultado de expectativas e preferências tidas em experiências passadas. Este é o ponto de partida para uma posterior resposta adaptativa (Brager e de Dear, 1998). É também evidente que os ocupantes dos edifícios estão sempre preparados para as mudanças que ocorrem no ambiente térmico. Por esta razão, as acções adaptativas são um feedback para uma ligação entre o clima interior e o clima exterior e entre o clima interior e os estímulos térmicos.

De acordo com a equação de balanço térmico, o índice PMV pode ser calculado por

$$PMV = G \times \delta \quad (12)$$

Onde

G – Função de transferência entre a fisiologia humana (sistema termorregulatório) e a sensação térmica.

δ – Estímulo físico.

Ao comparar as equações (6) e (12) verifica-se que:

- $G = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)$
- $\delta = (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6,99(M - W) - p_a) - 0,42((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5}M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014M \times (34 - T_a) - 3,96 \cdot 10^{-8}f_{cl}((T_{cl} + 273)^4 - (TMR + 273)^4) - f_{cl}h_c \times (T_{cl} - T_a)$

Na resposta a um estímulo físico, o modelo de balanço térmico desenvolvido por Fanger (1970) encara o indivíduo com um recipiente passivo desse estímulo. Este modelo assume que os efeitos de um determinado ambiente térmico num indivíduo são mediados exclusivamente pela física da troca de calor e de massa entre o corpo e o ambiente. Na realidade a resposta da sensação térmica de um indivíduo a determinado ambiente constitui um sistema desconhecido porque, dentro deste sistema, as reações fisiológicas, psicológicas e comportamentais do indivíduo são extremamente complexas (Yao *et al.*, 2009). Consequentemente, o indivíduo poderá alcançar a sensação de conforto térmico através de adaptações fisiológicas, psicológicas e comportamentais.

As adaptações fisiológicas podem ser alcançadas através da adaptação genética ou da aclimatação. A perspiração, a vasodilatação ou a vasoconstrição são formas comuns de adaptações fisiológicas.

As adaptações psicológicas não são fáceis de contabilizar. Normalmente, considera-se que representa a alteração da percepção ou a reação a um estímulo sensorial devido a experiências e expectativas térmicas passadas.

As adaptações comportamentais resultam numa resposta, consciente ou inconsciente, a determinado estímulo térmico através de reações pessoais, como sejam despir ou vestir uma determinada peça de roupa, ligar ou desligar uma ventoinha, beber uma bebida quente ou fria, que irão naturalmente alterar o balanço térmico do corpo humano.

De acordo com a teoria da “caixa negra”, a adaptação fisiológica está contida dentro de uma caixa negra, mas o estímulo psicológico e comportamental darão um feedback adaptativo (negativo) de modo a corrigir a sensação de desconforto térmico. Assim, o índice aPMV (PMV adaptativo) pode ser obtido usando a seguinte equação:

$$\text{aPMV} = G \times \delta - \text{aPMV} \times K_{\delta} \times G \quad (13)$$

Onde K_{δ} é um coeficiente que representa o impacto (dado pela adaptação) fisiológico, psicológico e comportamental.

Substituindo a equação (12) na equação (13), obtém-se

$$\text{aPMV} = \text{PMV} / \left(1 + \frac{K_{\delta} \times \text{PMV}}{\delta} \right) \quad (14)$$

Admitindo que $\lambda = K_{\delta}/\delta$, o índice aPMV é dado por:

$$\text{aPMV} = \frac{\text{PMV}}{1 + \lambda \times \text{PMV}} \quad (15)$$

Em que λ é o “coeficiente adaptativo”. Este coeficiente mede a proporção entre a resposta adaptativa do indivíduo e o estímulo aplicado.

De acordo com esta análise, o índice aPMV é proposto como modelo de correção do índice PMV de Fanger (Yao *et al.*, 2009, Yao *et al.*, 2010, Wei *et al.*, 2010, e Singh *et al.*, 2011).

Quando o coeficiente adaptativo é positivo, isto significa que a temperatura do ar interior é maior que a temperatura de conforto. Esta situação é geralmente comum no verão para edifícios naturalmente ventilados. De acordo com a equação (15), para situações em que $\lambda > 0$, o valor do índice aPMV é menor que o valor do índice PMV, o que significa que o índice aPMV prevê uma sensação térmica mais amena do que o índice PMV prevê para a mesma condição térmica. Para $\lambda < 0$, o valor da temperatura do ar interior é menor que a temperatura de conforto. Esta situação ocorre habitualmente no inverno em edifícios naturalmente ventilados. A partir da equação (15), observa-se que o índice aPMV prevê um voto de sensação térmica mais quente que o índice PMV para a mesma sensação térmica. Para

$\lambda = 0$, o valor da temperatura do ar interior é igual ao valor da temperatura de conforto, ou seja $aPMV = PMV$, condição teoricamente possível, mas difícil de ocorrer.

A fim de determinar o valor do coeficiente adaptativo foi realizado um estudo experimental utilizando um levantamento de questionários subjetivos em simultâneo com a monitorização dos parâmetros ambientais. Os autores calcularam os valores de λ em condições ambientais de calor e em condições ambientais de frio. Neste estudo, realizado na região de Chongking, China, os valores da temperatura exterior variaram entre os 4,8°C e os 39,2°C (Yao *et al.*, 2009).

2.8 Qualidade do ar

O ar, para além de indispensável para as células do organismo, também é importante para regular a temperatura do corpo através da pele.

Para melhorar a qualidade do ar no interior de um espaço ocupado há que diminuir as fontes de carga poluente. Uma alternativa é aumentar o caudal volúmico de renovação do ar para diluir toda a poluição existente, só que este processo aumenta substancialmente o consumo energético.

A medição com gás traçador é uma técnica muito interessante para a avaliação, local ou global, do efeito de um sistema de ventilação num determinado espaço. A ideia subjacente a esta técnica é conseguir acompanhar o movimento do ar num espaço através de um gás conhecido como traçador. Um bom gás traçador não deverá ser tóxico ou inflamável e nem deverá ter efeitos adversos sobre a saúde nas concentrações usadas. Deve ser incolor, inodoro e não deve poder ser absorvível por acessórios ou superfícies existente no interior do compartimento. O gás traçador deve ter uma massa específica que se aproxima da massa específica do ar ou do poluente que simula.

Existem várias técnicas para a utilização de gases traçadores. A opção por uma delas tem a ver com as características específicas do compartimento, do local onde ocorrem as medições, e do escoamento induzido pelo sistema de ventilação.

Estas técnicas permitem determinar a taxa de renovação de ar, a taxa de fluxo de ar, a idade do ar, a eficiência de renovação do ar e de remoção dos contaminantes, entre outras. Vários estudos têm sido realizados dentro da análise da qualidade do ar, utilizando o método dos gases traçadores. Alguns exemplos podem ser encontrados em Sandberg (1981), Sandberg e Sjoberg (1985), Breum (1988), Crawford e Neill (1989), Niemelä *et al.* (1989), Niemelä *et al.*

(1991), Breum *et al.* (1991), Roulet (1991), Breum (1992), Roulet (1991) e Roulet e Cretton (1992).

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

A garantia de uma boa ventilação apresenta-se como fundamental no controlo da qualidade do ar interior. A norma ASHRAE Standard 62.1-2010 (2010b) define um limite para a concentração do dióxido de carbono em ambientes interiores de 1800 mg/m³ 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.*, 2008d).

O Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril 2006, define um caudal de renovação do ar para ambientes escolares de 30 ou 35 m³/h por ocupante, de acordo com a tipologia do compartimento. Esta norma recomenda igualmente um limite para a concentração do dióxido de carbono em ambientes interiores de 1800 mg/m³.

A renovação do ar interior de um edifício por ar exterior dá-se como resultado da diferença de pressão entre o interior e o exterior, provocando escoamentos em todos os pontos da envolvente em que há aberturas ou frinchas que permitam a passagem do ar. No caso da renovação do ar resultar da existência de aberturas, fixas ou móveis, expressamente criadas na envolvente, o processo corresponde ao que se designa por ventilação. Se, ao contrário, a renovação do ar se processar por aberturas (juntas ou frinchas) não criadas para o efeito, o processo designa-se por infiltração (Ferreira, 2012).

No caso da ventilação, se as diferenças de pressões que causam o movimento do ar forem originadas naturalmente, por efeito da ação do vento ou de diferenças de temperatura, a ventilação diz-se natural; se essas diferenças de pressões forem produzidas artificialmente por um equipamento mecânico de insuflação ou extração do ar, então a ventilação diz-se mecânica (Ferreira, 2012).

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 fluxo de ar) quer através de ventilação forçada, com recurso a equipamentos mecânicos (Gonçalves e Graça, 2004).

A escolha do sistema de ventilação 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 valores maioritariamente abaixo das condições de conforto, pelo que interessa limitar as infiltrações. No entanto, no verão é necessário que os sistemas de ventilação permitam uma boa 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 e Graça, 2004).

Assim, para garantir uma boa qualidade do ar do ambiente interior são necessários sistemas adequados de ventilação, que permitam a circulação da massa de ar de modo a proporcionar níveis de conforto térmico aceitáveis e permitam a extração dos contaminantes libertados pelos ocupantes (Conceição e Lúcio, 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. Neste caso, os ocupantes e os materiais existentes nos compartimentos são considerados fontes de contaminação. Para todas as categorias também é necessário considerar a contaminação causada pelo próprio edifício (incluindo o mobiliário, a tapeçaria e os sistemas de ventilação) (Conceição e Lúcio, 2006d).

No entanto, importa considerar que o conceito de qualidade do ambiente interior é bastante complexo e dependente de um grande número de fatores, como a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a iluminação, a velocidade do ar, os odores, a concentração de microrganismos ou poeiras em suspensão no ar e o nível de ruído (Pinto *et al.*, 2007).

2.9 Modelos de avaliação integral

Nesta secção apresenta-se o modelo que permite avaliar simultaneamente o nível de conforto térmico e o nível da qualidade do ar com base no número de horas desconfortáveis.

Olesen e Parsons (2002) e Van der Linden *et al.* (2002) introduziram as horas desconfortáveis devido à sensação térmica de calor e as horas desconfortáveis devido à sensação térmica de frio, o que permite comparar as situações com diferentes níveis de desconforto térmico durante um longo período de tempo de ocupação.

A fim de avaliar a longo prazo a condição de conforto térmico, a ISO 7730 (2005) apresenta uma metodologia numérica baseada nas horas desconfortáveis devido à sensação de calor e nas horas desconfortáveis devido à sensação de frio:

- Horas desconfortáveis devido à sensação de calor (WUH):

$$WUH = \sum_i \left(\frac{PPD_i}{PPD_{lim}} \right) \Delta t_i \quad \text{para } PMV_i > PMV_{lim} \quad (16)$$

- Horas desconfortáveis devido à sensação de frio (CUH):

$$CUH = \sum_i \left(\frac{PPD_i}{PPD_{lim}} \right) \Delta t_i \quad \text{para } PMV_i < PMV_{lim} \quad (17)$$

O sub-índice (*i*) está associado a um intervalo de tempo e o sub-índice (*lim*) está associado a intervalos de limites aceitáveis para os valores do índice PMV. Esta metodologia considera o tempo em que os valores do índice PMV excedem os limites aceitáveis do nível de conforto térmico, em função da categoria A, B ou C da norma ISO 7730 (2005), que se pretende obter.

Ao usar uma metodologia similar, também é possível avaliar as horas desconfortáveis baseadas no nível de qualidade do ar interior. Na sequência da metodologia utilizada para calcular as horas desconfortáveis devidas à sensação de frio e as horas desconfortáveis devidas à sensação de calor utilizadas na avaliação das condições de conforto térmico, é desenvolvida uma metodologia semelhante aplicada à qualidade do ar. Assim, as horas desconfortáveis devidas à qualidade do ar interior, AQUH, é dada por:

$$AQUH = \sum_i \left(\frac{PD_i}{PD_{lim}} \right) \Delta t_i \quad \text{para } PD_i > PD_{lim} \quad (18)$$

onde PD (“Percentage Dissatisfied”) representa a percentagem de pessoas insatisfeitas em função da concentração de dióxido de carbono e é dada pela seguinte equação:

$$PD = 395 \cdot \exp \left(-15,15 \cdot (CO_2(\text{ppm}))^{-0,25} \right) \quad (19)$$

Na equação (18) o sub-índice (*i*) está associado a um intervalo de tempo e o sub-índice (*lim*) está associado a intervalos de limites aceitáveis para a concentração de dióxido de carbono. Ao utilizar uma concentração de dióxido de carbono admissível de 1800 mg/m³, é previsível uma percentagem de 26,7% de pessoas insatisfeitas.

2.10 Tipos de controlo de sistemas AVAC

Nos últimos anos, a eficiência energética tem-se revelado como uma das mais importantes medidas a tomar de modo a diminuir o aquecimento climático a nível global.

Atualmente, o consumo de energia e o conforto térmico são dois importantes aspetos a considerar no controlo dos sistemas AVAC porque estes são largamente utilizados na indústria e nos edifícios, particularmente nas regiões tropicais e subtropicais. Como exemplo, em Portugal, em 2013, os sistemas AVAC instalados em edifícios escolares consumiram entre 20 a 35% da energia elétrica final (Cunha, 2015). Por outro lado, os requisitos dos utilizadores deste tipo de equipamentos têm vindo a mudar: passaram da simples exigência de aquecimento ou arrefecimento do espaço a climatizar para uma procura cada vez maior de níveis de conforto personalizados que exigem também a possibilidade de ter um controlo personalizado dos sistemas de climatização. Nesta perspetiva, o controlo do conforto térmico desempenha um papel cada vez mais importante e, por conseguinte, torna-se necessário projetar sistemas de controlo de AVAC que possibilitem níveis de conforto elevados e consumos de energia reduzidos (Liang e Du, 2007, Nassif *et al.*, 2008, e Freire *et al.*, 2008).

Os vários tipos de controlo de sistemas AVAC atualmente existentes, genericamente, podem ser divididos da seguinte forma: tipo regulador de temperatura do ar (RTA) e tipo regulador do conforto térmico (RCT). Atualmente, o tipo RTA é o mais utilizado, com alguns deles também a tomar em consideração a humidade relativa do ar; nestes sistemas utilizam-se maioritariamente controlos on/off e controlos PI (proporcional integral) devido ao seu baixo custo. Entretanto, alguns algoritmos de controlo mais avançados também têm sido propostos de modo a melhorar o desempenho destes sistemas. Contudo, embora o tipo RTA consiga manter eficazmente a temperatura/humidade relativa do ar interior dentro dos limites pretendidos, não consegue obter o melhor índice de conforto térmico para o utilizador de acordo com o conceito de conforto térmico. Assim, nos últimos anos, o tipo RCT, onde os índices de conforto mais utilizados são a temperatura efetiva e o índice PMV, têm vindo a ganhar cada vez mais interesse (Liang e Du, 2007).

A temperatura efetiva foi um dos primeiros índices introduzidos pela ASHRAE com base em estudos efetuados por Houghten, Yaglou e Miller entre 1923 e 1925 (Conceição, 1996). Representa uma medida de conforto térmico que foi avaliada a partir das respostas subjetivas de indivíduos e que envolve o efeito combinado da temperatura do bolbo seco, da temperatura do bolbo húmido e da velocidade média do ar. As diversas combinações das três variáveis podem produzir sensações equivalentes de conforto térmico.

No caso de indivíduos vestidos normalmente, com uma actividade normal, para uma velocidade do ar entre 0,1 e 0,3 m/s e para um nível de radiação desprezável, define-se no diagrama de ar húmido uma variação da temperatura efetiva, designada como zona de conforto (Harris, 1988).

É de notar que esta zona de conforto ótima, preferida pela maior parte dos indivíduos, encontra-se definida para humidades relativas do ar compreendidas entre os 30% e os 70%. A zona de conforto de inverno é definida para temperaturas efetivas compreendidas entre os 18,4°C e os 21,7°C, enquanto que a zona de conforto de verão é definida para temperaturas efetivas compreendidas entre os 18,9°C e os 23,9°C.

Esta zona de conforto, definida pela temperatura do bolbo húmido, pela temperatura do bolbo seco, pelas linhas de humidade relativa do ar e pela velocidade do ar, é utilizada em projetos de sistemas de ar condicionado. No entanto, possui limitações intrínsecas. Com efeito, as correntes de ar provocadas pelo sistema de ventilação afetam bastante esta zona. Além disso, o efeito da radiação (não considerado) é muito importante, já que as trocas de radiação entre o corpo humano e as superfícies circundantes influenciam o conforto térmico sentido por um indivíduo. Quando existem fontes de calor radiante no ambiente, as variáveis utilizadas não são suficientemente representativas das verdadeiras condições de exposição ao calor (Conceição, 1996).

A temperatura efetiva também perde representatividade quando aplicada em exposições ao calor em condições distintas das condições de conforto térmico, já que não contempla nenhum fator para avaliação do metabolismo total (Fontanella, 2009).

De modo a incluir o efeito da radiação surge o índice temperatura efetiva corrigida (“Corrected Effective Temperature”, CET) que utiliza a temperatura do globo (em substituição da temperatura do bolbo seco), ou seja, a temperatura média radiante determinada com um termómetro de globo negro (Conceição, 1996).

Em 1971, Gagge introduziu o conceito da nova temperatura efetiva. Este índice é calculado com base nas equações de balanço térmico do corpo humano, considerando a influência do

nível de vestuário e de atividade, da temperatura do ar, da temperatura média radiante, da velocidade do ar e da humidade relativa do ar (Conceição, 1996).

A partir da nova temperatura efetiva, a ASHRAE, em 1974, define uma zona de conforto no diagrama de ar húmido, que derivou de um estudo feito com 1600 indivíduos jovens, em que a velocidade do ar foi mantida baixa, o nível de atividade e de vestuário foram moderados e a radiação era pouca significativa. Esta zona de conforto foi delimitada por uma nova temperatura efetiva compreendida entre os 20°C e os 26°C e por uma humidade absoluta compreendida entre os 4,1 e os 11,8 g/kg (Conceição, 1996).

A temperatura efetiva depende, por conseguinte, do nível de vestuário e atividade desempenhada pelo indivíduo, o que não viabiliza a criação de uma carta global de temperatura efetiva (Fontanella, 2009). A ASHRAE 55 (2010a) propôs então utilizar um conjunto de condições típicas representativas dos ambientes interiores que definem a padronização da avaliação da temperatura efetiva (“Standard Effective Temperature (SET)”).

A temperatura efetiva padrão (SET) pode ser definida como a temperatura do bolbo seco equivalente num ambiente isotérmico com uma humidade relativa do ar de 50%, uma velocidade média do ar inferior a 0,1 m/s, uma temperatura média radiante igual à temperatura média do ar em que um ocupante imaginário, com um nível de vestuário de 0,6 clo e com um nível de atividade física igual a 1,0 met, tem a mesma perda (ou ganho) de calor através da pele que uma pessoa num ambiente real, com o mesmo nível de vestuário e o mesmo nível de atividade.

O conforto térmico tem uma grande influência na produtividade e no bem-estar dos ocupantes de um edifício. Por conseguinte, requerem-se sistemas de climatização eficientes e que consigam obter um bom compromisso entre o seu consumo de energia e o nível de conforto térmico dos ocupantes. Nesta perspetiva, a utilização de sistemas de controlo que permitam otimizar o funcionamento dos sistemas AVAC torna-se muito relevante.

O controlo dos sistemas AVAC são baseados numa única malha de controlo da temperatura do ar ou, nalguns casos, numa malha de controlo de uma temperatura do ar multivariável e da humidade relativa do ar. Contudo, a optimização do conforto térmico deve tomar em consideração outros parâmetros de modo a que os ocupantes sintam uma efetiva satisfação térmica (Huh e Brandemuhel, 2008). De acordo com estes autores, deve-se controlar simultaneamente a temperatura do ar e a humidade relativa do ar, mantendo-as dentro dos limites desejados. É essencial conhecer, quer o desempenho das cargas mais sensíveis, quer o desempenho das cargas latentes, de modo a projetar um sistema mais eficiente que combine o sistema de ar condicionado e o sistema de desumidificação.

A operação de um sistema AVAC torna-se difícil quando se pretende simultaneamente otimizar o consumo de energia do edifício, assegurar o conforto térmico dos seus ocupantes e preservar a qualidade do ar interior. O funcionamento dos sistemas AVAC pode ser melhorado através de estratégias de controlo de supervisão optimizadas (Wang e Ma, 2008). Estas estratégias permitem controlar eficientemente o consumo de energia e, simultaneamente, providenciar um ambiente mais saudável e o desejado conforto térmico de acordo com as condições dinâmicas de funcionamento. Este tipo de controlo de sistemas AVAC consiste em determinar as soluções ótimas (modo de operação e pontos de funcionamento) que minimizem o consumo total de energia ou o custo de operação e, simultaneamente, consigam manter bons níveis de conforto térmico e de qualidade do ar do espaço climatizado. De acordo com o tipo de sistemas AVAC (com sistemas de accionamento eléctricos, com sistemas de accionamento a gás, com sistemas híbridos, sistemas com ou sem armazenamento de energia), assim se terá problemas de controlo de supervisão ótima diferentes. Por exemplo, para sistemas híbridos com significativo armazenamento de energia, o controlo de supervisão ótimo é muito complexo, porque é afetado por muitos fatores como sejam as faturas eléctrica e do gás, o consumo de energia eléctrica, os custos de manutenção dos diferentes “chillers”, as características dos “chillers”, as características do armazenamento de energia, as condições ambientais, o diagrama de carga, etc.

Sistemas de controlo baseados em modelos e ferramentas de análise são os instrumentos essenciais para previamente identificar os problemas e encontrar soluções quando da fase do projeto (Sane *et al.*, 2006, Mendes *et al.*, 2008, Song *et al.*, 2008, Redfern *et al.*, 2006, e Komareji *et al.*, 2008).

Yan *et al.* (2008) utilizam um modelo de controlo adaptativo ótimo com o objetivo de encontrar a optimização global e satisfazer os requisitos de tempo e precisão no controlo de um sistema AVAC. O modelo de controlo adaptativo ótimo inclui o modelo de controlo ótimo, os parâmetros de identificação e o algoritmo de optimização. Hongli *et al.* (2008) utilizam uma nova estratégia de controlo “fuzzy” baseada na sintonia dos parâmetros PID (proporcional integral derivativo) do controlador utilizado no controlo de sistemas AVAC. Esta estratégia retira grande vantagem do facto das tecnologias de controladores PID estarem largamente desenvolvidas para melhorar o projeto do controlador “fuzzy” que é aplicado no controlo da temperatura dos sistemas AVAC. Ly *et al.* (2008) propõem a aplicação de uma nova estratégia de controlo “fuzzy”, diretamente a partir do controlador PID, para controlar a temperatura do ar nos sistemas AVAC de modo a estender a aplicação e as características não lineares dos controladores “fuzzy”. Hong *et al.* (2007) propõem um novo controlo preditivo funcional com base no modelo “fuzzy” de Takagi-Sugeno (T-S) para controlar sistemas

AVAC. O modelo “fuzzy” T-S de um processo de controlo estabilizado é obtido usando o método dos mínimos quadrados, pelo que, a partir do modelo global linear preditivo do modelo “fuzzy” T-S, o processo é controlado pelo funcionamento do controlador preditivo. Hadjiski *et al.* (2007) propõem um novo sistema inteligente híbrido no controlo de sistemas AVAC através da integração de sistemas multiagentes (SMA), ontologia dinâmica (OD) e técnicas de optimização “ant colony” (ACO). A combinação relevante entre dados dirigidos e métodos dirigidos conhecidos resulta numa melhoria significativa de todos os índices comportamentais do controlo do sistema AVAC, como sejam a velocidade, a estabilidade e a taxa de comunicação interna, bem como é robusto perante incertezas e perturbações. Liang e Du (2007) desenvolveram um sistema de controlo inteligente do conforto (SCIC) combinando aprendizagem humana e estratégias de controlo de potência mínima. Com base no índice PMV, a estratégia de aprendizagem humana é projetada para sintonizar a zona de conforto do utilizador através da aprendizagem das preferências de conforto de um utilizador específico.

Leephakpreeda (2008) propõe uma metodologia para a determinação da temperatura interior de conforto para sistemas de controlo de AVAC existentes num ambiente dinâmico de modo a torná-los mais eficientes. A satisfação dos ocupantes com base no conforto térmico varia de acordo com o modo como o ponto de funcionamento da temperatura do ar num sistema AVAC convencional pode ser adequadamente adaptado (normalmente fixo) quando a evolução das condições ambientais interiores variam no tempo. Essencialmente, a temperatura exterior, desconhecida antecipadamente, é sistematicamente prevista por um modelo preditivo. O modelo da teoria de conforto adaptativo (TCA) estabelece a relação entre a temperatura do ar interior de conforto e a temperatura exterior a partir dos resultados obtidos em questionários efetuados a indivíduos sobre a sua perceção do conforto térmico dum determinado ambiente real. Com o modelo preditivo e o modelo TCA, a temperatura do ar interior de conforto prevista pode ser implementada como temperatura de referência no controlo de sistemas AVAC.

Donaisky *et al.* (2007) propõem dois esquemas de controlo de sistemas AVAC a partir de modelos de controlo baseados no controlo preditivo (MBPC, na terminologia em inglês). Utilizam duas estratégias explicitamente baseadas na computação do índice PMV. O índice PMV é usado, numa primeira estratégia, para gerar o sinal correspondente ao ponto de funcionamento do sistema AVAC e, numa segunda estratégia, é utilizado para definir o modelo preditivo.

2.11 Sistema de controlo implementado

Os sistemas de ar condicionado tradicionais baseiam-se no controlo da temperatura do ar interior imposta pelos ocupantes. Neste trabalho é estudada a implementação numérica de um controlo de um sistema AVAC a partir do controlo do valor do índice PMV (ver figura 2.2). Este índice engloba outras variáveis para além da temperatura do ar, nomeadamente, a temperatura média radiante, a velocidade do ar, a humidade relativa do ar, o nível de vestuário e o nível de atividade física dos ocupantes.

Em condições de inverno o sistema de aquecimento é acionado quando os valores do índice PMV atingirem valores inferiores a $-0,7$. Em condições de verão, o sistema de ar condicionado é ligado quando os valores do índice PMV forem superiores a $+0,7$. Estes valores garantem, pelo menos, níveis de conforto aceitáveis de acordo com a Categoria C da ISO 7730 (2005), ou seja, 15% de pessoas termicamente insatisfeitas. Este índice pressupõe que em condições de inverno o desconforto térmico sentido pelos ocupantes do espaço climatizado é por frio, e, em condições de verão, por calor, garantindo que pelo menos 85% dos ocupantes estão confortáveis.

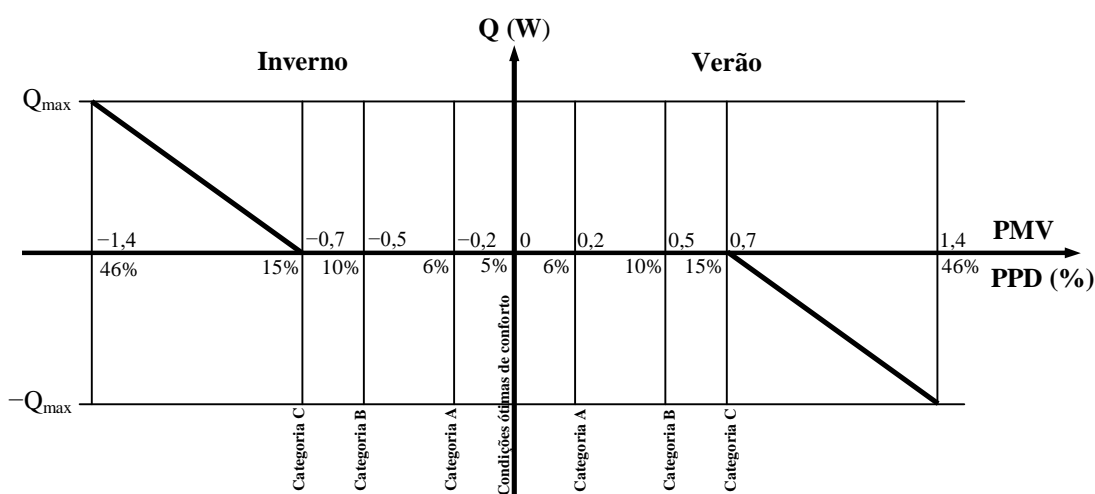


Figura 2.2 – Sistema de controlo do índice PMV implementado ao sistema AVAC.

A metodologia de controlo utilizada neste trabalho considera que o funcionamento do sistema AVAC depende linearmente do valor do índice PMV, como pode ser observado na figura 2.2.

Em condições de inverno, o controlo do valor da potência do sistema de aquecimento, Q , evolui de acordo com a seguinte equação:

$$Q = -Q_{\max} \cdot \frac{PMV}{0,7} - Q_{\max} \quad (20)$$

onde Q_{\max} corresponde à potência máxima do sistema.

A equação (20) representa uma reta com um declive dado por $-Q_{\max}/0,7$. Sempre que as condições de conforto saem dos parâmetros da categoria C, ou seja, sempre que os valores do índice PMV são inferiores a $-0,7$, o sistema de controlo atua e o aquecimento é ativado de forma a restabelecer as condições de conforto térmico no compartimento.

Em condições de verão, o controlo do valor da potência do sistema de ar condicionado, Q , evolui de acordo com a seguinte equação:

$$Q = -Q_{\max} \cdot \frac{PMV}{0,7} + Q_{\max} \quad (21)$$

À semelhança do sistema de controlo implementado em condições de inverno, em condições de verão, sempre que os valores do índice PMV são superiores a $0,7$, o sistema de controlo atua e o sistema de arrefecimento é ativado de forma a restabelecer as condições de conforto térmico no compartimento.

Em condições de verão, quando os valores do índice PMV são maiores que $+1,4$ e em condições de inverno, quando os valores do índice PMV são menores que $-1,4$, o sistema funciona na sua potência máxima.

Esta metodologia de controlo garante ainda menores níveis de consumo de energia do que a metodologia de controlo tradicional da temperatura do ar, porque o sistema, de forma a garantir condições térmicas aceitáveis para 85% de pessoas, considera que durante o inverno as pessoas estarão termicamente confortáveis por valores negativos do índice PMV e durante o verão as pessoas estarão termicamente confortáveis por valores positivos do índice PMV.

O estudo desenvolvido foi apenas numérico. A implementação prática deste tipo de sistema de controlo encontra-se em fase de desenvolvimento. Na figura 2.3 pode observar-se o diagrama de blocos do sistema de controlo do índice PMV implementado no controlo do

sistema AVAC. Os parâmetros ambientais são obtidos do modo que a seguir se descreve. A temperatura do ar e a humidade relativa do ar são obtidas a partir dos respetivos sensores, que devem ser colocados a uma altura de 1,7 m quando as pessoas estão em pé ou a uma altura de 1,6 m quando as pessoas estão sentadas (ISO 7730, 2005). A temperatura média radiante é obtida a partir da média das leituras das temperaturas do teto e das paredes circundantes lidas por uma sonda superficial. A velocidade do ar em torno da pessoa é obtida por estimação, em função do caudal injetado, recorrendo a um programa de CFD (“Computer Fluid Dynamics”) ou à análise de dados obtidos experimentalmente.

Os parâmetros relacionados com o nível de vestuário e o nível de atividade são introduzidos diretamente no controlador pelo operador do sistema.

O controlador irá, ciclicamente, determinar o valor do índice PMV e, em função do valor calculado, determinar se deve ou não atuar no sistema AVAC.

Caso o valor do índice PMV se situe fora do intervalo de valores considerado como zona de conforto (tipicamente, $-0,7 \leq PMV \leq 0,7$), então irá calcular o valor necessário da potência a injetar na máquina de acionamento do sistema AVAC de modo a que este produza o caudal de ar necessário a restabelecer as condições ambientais propícias à existência de um adequado nível de conforto térmico.

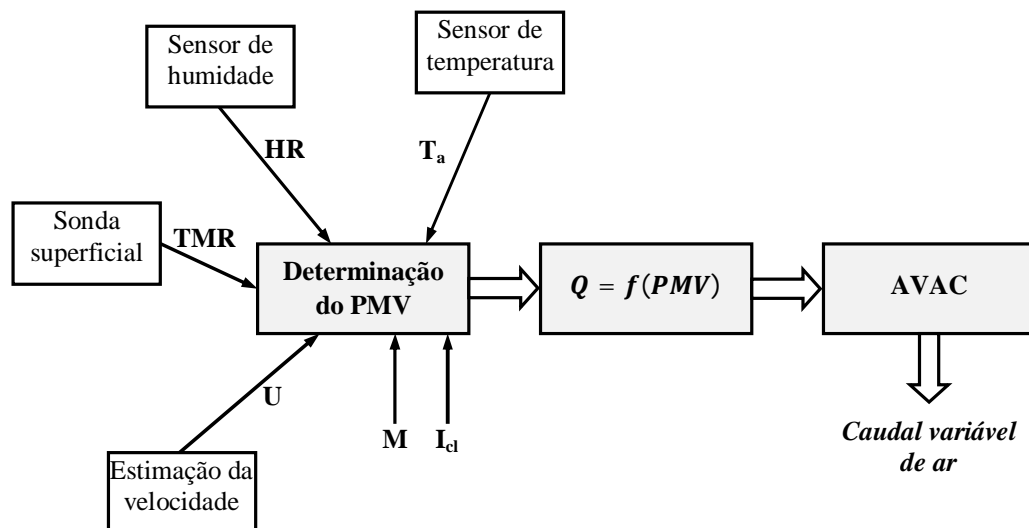


Figura 2.3 – Diagrama de blocos do sistema de controlo do índice PMV implementado no controlo do sistema AVAC.

2.12 Modelo numérico de simulação da resposta térmica de edifícios

Neste trabalho é utilizado um programa que simula o comportamento térmico de edifícios com topologia complexa e avalia, quer a qualidade do ar, quer o conforto térmico. Este programa, como se pode verificar em Conceição *et al.* (2004), Conceição e Lúcio (2005) e Conceição e Lúcio, (2006e), calcula não só a evolução do valor da temperatura do ar no interior dos compartimentos e condutas, das janelas de vidro, dos corpos interiores e das camadas dos corpos principais do edifício e das condutas, como também da massa de vapor de água e dos restantes gases no interior dos compartimentos e das condutas. Este programa calcula ainda as trocas de calor condutivos nas paredes dos edifícios, as trocas de calor evaporativos nos corpos principais e interiores e nos vidros, os caudais mássicos por difusão e convecção, os fenómenos de adsorção/dessorção nos corpos interiores e principais, a distribuição da radiação solar no exterior do edifício e no interior dos compartimentos, as trocas de calor no interior dos espaços, os coeficientes de transferência de calor e massa e a geração de malha em topologia complexa.

Este *software* tem a particularidade, ao contrário dos restantes *softwares*, de simular simultaneamente vários edifícios virtuais, de calcular a interferência do campo de radiação, em considerar a presença humana no interior dos edifícios, o escoamento interno e os sistemas AVAC com controlo.

Este *software* foi validado em condições de inverno em Conceição *et al.*, (2004) e em condições de verão em Conceição e Lúcio (2006e).

O programa calcula ainda a radiação solar que entra através das janelas e que incide nas superfícies dos corpos principais e interiores, as trocas de calor por radiação entre superfícies exteriores do edifício e o céu ou as superfícies envolventes, as trocas radiativas verificadas no interior dos diferentes compartimentos, as propriedades radiativas dos vidros, os fatores de forma no interior de cada um dos compartimentos, o nível de conforto térmico médio em cada espaço, a potência de aquecimento ou arrefecimento do sistema de climatização, entre outros parâmetros. Mais pormenores poderão ser consultados em Conceição (2003), Conceição *et al.* (2004), Conceição e Lúcio (2005) e Conceição e Lúcio (2006e).

O modelo multimodal do comportamento térmico dos edifícios, que funciona em condições transitórias, é baseado nas equações de balanço térmico (equação 22) e de balanço mássico (equação 23) (ver Conceição, 2003, Conceição *et al.*, 2004, e Conceição e Lúcio, 2006e):

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i \quad (22)$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i \quad (23)$$

Na equação (22) m , C_p , T , t e \dot{Q}_i representam, respetivamente, a massa, o calor específico a pressão constante, a temperatura, o tempo e a troca de calor. Os termos do primeiro membro da equação representam a acumulação de calor sensível, enquanto os termos do segundo membro representam a troca de calor devido à condução, convecção, radiação, evaporações e outros.

Na equação (23) m , t e \dot{m}_i representam, respetivamente, a massa, o tempo e o caudal mássico. O termo do primeiro membro da equação representa a acumulação de massa e o termo do segundo membro da equação representa o caudal mássico devido à convecção, difusão, entre outros.

A equação integral do balanço energético para o ar no interior dos espaços é dada por:

$$m_{ar} C_{p_{ar}} \frac{dT_{ar}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_{O_{B_{ar}}} + \sum_j \dot{Q}_{T_{B_{ar}}} + \sum_k \dot{Q}_{I_{B_{ar}}} + \dot{Q}_G + \dot{Q}_O + \dot{Q}_V + \dot{Q}_L + \dot{Q}_D \quad (24)$$

Na equação (24) $\dot{Q}_{O_{B_{ar}}}$ representa a troca de calor existente por convecção entre o ar e as superfícies opacas dos corpos principais do edifício, $\dot{Q}_{T_{B_{ar}}}$ representa a troca de calor existente por convecção entre o ar e as superfícies transparentes (janelas de vidro) do edifício, $\dot{Q}_{I_{B_{ar}}}$ representa a troca de calor existente por convecção entre o ar e as superfícies interiores do edifício, \dot{Q}_G representa o calor gerado no interior do compartimento causado por diferentes fontes (sistema de ar condicionado, lâmpadas, equipamentos informáticos, entre outros), \dot{Q}_O representa o calor gerado pelas pessoas, \dot{Q}_V representa o calor gerado pelos sistemas de ventilação, \dot{Q}_L representa o calor latente trocado por evaporação (ou condensação) entre o ar e as superfícies circundantes e \dot{Q}_D representa o calor trocado por convecção entre o ar e as condutas.

A equação integral do balanço energético para as superfícies transparentes do edifício é dada por:

$$m_{TB} C_{p_{TB}} \frac{dT_{TB}}{dt} = \dot{Q}_{R_{solar}} + \dot{Q}_{R_{sky}} + \dot{Q}_{R_{IN}} + \dot{Q}_{T_{B_{ar}}}^- + \dot{Q}_{T_{B_{ar}}}^+ + \dot{Q}_L \quad (25)$$

Na equação (25) $\dot{Q}_{R_{solar}}$ representa a radiação solar incidente (direta e difusa) nas janelas de vidro, $\dot{Q}_{R_{sky}}$ representa a troca de calor existente por radiação entre as superfícies transparentes (janelas de vidro) do edifício e as superfícies exteriores, $\dot{Q}_{R_{IN}}$ representa a troca de calor existente por radiação no espaço entre as superfícies das janelas interiores e as outras, $\dot{Q}_{TB_{ar}}^-$ representa a troca de calor por convecção entre as janelas de vidro e o ar do ambiente interior, $\dot{Q}_{TB_{ar}}^+$ representa a troca de calor por convecção entre as janelas de vidro e o ar do ambiente exterior e \dot{Q}_L representa o calor latente trocado por evaporação (ou condensação) entre o ar e as janelas de vidro.

A equação integral do balanço energético para os corpos interiores do edifício é dada por:

$$m_{IB} C p_{IB} \frac{dT_{IB}}{dt} = \dot{Q}_{R_{solar}} + \dot{Q}_{R_{IN}} + \dot{Q}_{IB_{ar}} + \dot{Q}_L \quad (26)$$

Na equação (26) $\dot{Q}_{R_{solar}}$ representa a radiação solar incidente (direta e difusa) nos corpos localizados dentro dos compartimentos, $\dot{Q}_{R_{IN}}$ representa a troca de calor existente por radiação no espaço entre as superfícies dos corpos interiores e as outras, $\dot{Q}_{IB_{ar}}$ representa a troca de calor por convecção entre os corpos interiores e o ar do ambiente interior e \dot{Q}_L representa o calor latente trocado por evaporação (ou condensação) entre o ar e os corpos interiores.

A equação integral do balanço mássico para o vapor de água no interior dos espaços é dada por:

$$V \frac{dC}{dt} = \dot{m}_{oi} - \dot{m}_{io} + \dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij} + \dot{m}_g + \dot{m}_{OB} + \dot{m}_{TB} + \dot{m}_{IB} \quad (27)$$

Na equação (27) \dot{m}_{oi} representa o fluxo de vapor de água do compartimento para o ambiente exterior, \dot{m}_{io} representa o fluxo de vapor de água do ambiente exterior para o compartimento, \dot{m}_{ji} representa o fluxo de vapor de água dos outros compartimentos para o compartimento em causa, \dot{m}_{ij} representa o fluxo de vapor de água do compartimento em causa para os outros compartimentos, \dot{m}_g representa a emissão de massa (geração) de vapor de água no interior do compartimento, \dot{m}_{OB} representa o vapor de água trocado entre o ar e as superfícies opacas dos corpos interiores, \dot{m}_{TB} representa o vapor de água trocado entre o ar e as superfícies

transparentes do edifício e \dot{m}_{IB} representa o vapor de água trocado entre o ar e as superfícies dos corpos interiores. V e C representam, respetivamente, o volume do compartimento e a concentração do vapor de água.

O conjunto das equações integrais do balanço mássico para os contaminantes é semelhante à equação (27), com exceção da troca mássica entre as superfícies das janelas e o ar, que não é considerada.

Na resolução do sistema de equações é utilizado o método de Runge-Kutta-Fehlberg com controlo do erro. O modelo considera os fenómenos de condução, convecção, radiação e transferência de massa.

Os dados de entrada do programa são:

- A geometria do edifício e das envolventes (edifícios ou outros elementos que originem sombreamento) quando relevantes para a simulação;
- Os materiais que constituem os diversos elementos do edifício;
- As condições fronteira;
- As propriedades térmicas do edifício (a condutibilidade térmica, a resistência térmica e a massa específica) e de todos os materiais envolvidos no edifício, considerando a estratificação térmica real e a espessura das diferentes camadas constituintes;
- Outras condições, como sejam as condições geográficas e ambientais exteriores (insolação, temperatura do ar, humidade relativa do ar, velocidade do ar, direção do vento, entre outros), as condições iniciais, as perdas de carga, o ciclo de ocupação, os níveis de vestuário e de atividade dos ocupantes e as topologias de ventilação.

Os dados de saída do programa são, entre outras, a evolução:

- Da radiação solar;
- Da temperatura do ar interior;
- Da temperatura média radiante;
- Da humidade relativa do ar interior;
- Da velocidade do ar interior;
- Da concentração de dióxido de carbono;
- Dos índices PMV, aPMV, PPD, CUH, WUH e AQUH;
- Da potência térmica.

3 Desenvolvimento do modelo de conforto adaptativo

Neste capítulo é desenvolvido um modelo de conforto adaptativo para cada um dos edifícios escolares estudados. O modelo aqui proposto foi desenvolvido a partir do modelo de conforto adaptativo proposto por Yao *et al.* (2009).

3.1 Considerações iniciais

De modo a determinar o coeficiente de adaptação λ presente na equação (15) é efetuado um estudo experimental, em diferentes dias típicos do ano (representativos das diferentes condições climáticas que se verificam ao longo do ano), constituído por um questionário subjetivo e, simultaneamente, pela monitorização de parâmetros ambientais, nomeadamente os utilizados no índice PMV (temperatura do ar, temperatura média radiante, humidade relativa do ar e velocidade do ar) e a temperatura do ar exterior.

O questionário foi concebido para refletir a avaliação subjetiva da resposta dos indivíduos ao nível do ambiente térmico interior onde estão inseridos. O conteúdo principal da pesquisa inclui:

- 1) Dados dos inquiridos, como sexo, idade, peso, altura, etc.;
- 2) O vestuário dos inquiridos e a taxa de atividade;
- 3) A sensação subjetiva térmica dos respondentes e o seu grau de satisfação (sim ou não) perante as condições ambientais do espaço onde estão inseridos.

Os questionários foram feitos aos alunos em salas não climatizadas durante o decorrer das aulas em diferentes momentos e com o metabolismo devidamente estabilizado. Em todas as escolas estudadas, os questionários foram feitos a diferentes horas do dia (manhã, meio-dia, tarde), em diversos dias considerados representativos das várias estações do ano: primavera, verão, outono e inverno. Os alunos foram antecipadamente elucidados e preparados para dar respostas que pudessem ser objetivamente validadas, ou seja, devidamente contextualizadas.

A partir das respostas dos alunos quanto à roupa e calçado que trajavam, o nível de vestuário foi obtido a partir da consulta de tabelas, nomeadamente, as tabelas B1 e B2 da norma ASHRAE-55 (2010a). Estas tabelas fornecem o nível de isolamento de cada peça do vestuário. Na posse destes valores foi possível estabelecer o nível de vestuário de cada aluno e assim tomar em consideração, para efeitos do nível de vestuário a introduzir no cálculo do

índice PMV, a média do nível de vestuário de todos os alunos. Nalgumas situações, indicadas posteriormente, foram considerados valores típicos do nível de vestuário representativos da estação do ano em estudo.

De modo a facilitar a resposta dos entrevistados no que se refere à avaliação da sua sensação térmica, foi utilizada uma escala de sensação térmica de sete níveis (ver ISO 7730, 2005) simétrica em torno de (0), onde são atribuídos valores entre (-3) e (+3) de acordo com o balanço térmico corporal, sendo (0) o valor ideal representando a neutralidade térmica. Os níveis presentes nessa escala são os seguintes: (-3) muito frio; (-2) frio; (-1) ligeiramente frio; (0) neutro; (+1) ligeiramente quente; (+2) quente; (+3) muito quente. De acordo com as respostas obtidas sobre o grau de satisfação dos respondentes em relação às condições ambientais do espaço que ocupam é possível determinar o índice PPD que, como foi referido anteriormente, representa a percentagem de ocupantes insatisfeitos com as condições ambientais interiores, tanto os indivíduos que sentem desconforto por frio como os que sentem desconforto por calor. Este índice é determinado em função do índice PMV. Quanto mais afastado de (0) estiver o índice PMV maior será a percentagem de ocupantes insatisfeitos. A norma ISO 7730 (2005) refere que os intervalos de temperatura devem garantir a satisfação térmica de pelo menos 80% dos ocupantes do espaço interior.

Os parâmetros ambientais são obtidos experimentalmente. As temperaturas do ar interior e do ar exterior, a humidade relativa do ar, as temperaturas das paredes e do teto envolventes do compartimento são medidas recorrendo às respetivas sondas termo-higrométricas ligadas ao Babuc-A, da LSI. A velocidade do ar é medida com recurso a uma sonda de anemometria de fio quente também ligada ao Babuc-A. Estas medições são efetuadas em simultâneo com a realização dos inquéritos aos alunos sobre as condições ambientais que percecionam.

As sensações térmicas dos participantes registradas durante a realização dos inquéritos são consideradas como sendo os votos médios atuais (AMV), ou seja, os valores correspondentes ao nível de conforto térmico que na realidade os indivíduos percecionam. Os parâmetros ambientais medidos durante os inquéritos mais os valores do nível de atividade e do nível de vestuário foram utilizados para calcular a média dos votos previstos (índice PMV), de acordo com as equações apresentadas na norma ISO 7730 (2005). O nível de vestuário foi obtido com base nas respostas subjetivas dos alunos, enquanto o nível de atividade foi obtido pela observação do comportamento dos alunos (ISO 7730, 2005).

No estudo que efetuou, Yao *et al.* (2009) verificou que os votos médios reais (obtidos a partir das respostas dos ocupantes dos edifícios) eram inferiores às previstas pelo índice PMV no verão e superiores às previstas pelo índice PMV no inverno. Com o objetivo de obter uma

curva com o mínimo desvio possível entre o conjunto de valores obtidos através dos questionários e o conjunto de valores previstos pelo índice PMV, é utilizado o método dos mínimos quadrados que irá ajustar (adaptar) a diferença entre estes conjuntos de valores. A melhor curva de adaptação $f(x) = x + \lambda$ é a que apresenta o menor erro quadrático, ou seja:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (x_i + \lambda)]^2 = \min \quad (28)$$

onde $x = \frac{1}{PMV}$ e $y = \frac{1}{AMV}$.

Para minimizar o menor erro quadrático:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial [y_i - (x_i + \lambda)]^2}{\partial \lambda} = 2 \sum_{i=1}^n [y_i - x_i - \lambda] = 0 \quad (29)$$

Assim, com os resultados dos questionários e a determinação do índice PMV correspondente, para cada pesquisa experimental e para cada temperatura do ar exterior medida, é possível determinar o coeficiente adaptativo, λ , a partir da seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{n} \quad (30)$$

Onde:

Y_i – Valores relacionados com o índice AMV obtidos a partir das respostas individuais aos questionários sobre a perceção do nível de conforto térmico;

X_i – Valores relacionados com o índice PMV obtidos a partir da equação de Fanger;

n – Número de conjunto de dados obtidos.

A partir deste modelo foram desenvolvidos modelos de conforto adaptativo para os diferentes tipos de edifícios escolares estudados (jardim de infância, escolas de 2º e 3º ciclos e edifícios universitários). Para cada tipo de edifício, foi deduzido o coeficiente de adaptação λ a utilizar na equação (15). A dedução desses modelos para os edifícios atrás referidos é apresentada nos

pontos seguintes. Estes edifícios localizam-se no sul de Portugal, na região central do Algarve, relativamente perto do mar e estão inseridos num clima do tipo mediterrânico.

3.2 Jardim-de-infância

Com objetivo de determinar o valor do coeficiente adaptativo λ , utilizado no modelo de conforto adaptativo, foi realizado um estudo experimental num jardim-de-infância (JI) localizado em Olhão. Esse estudo foi efetuado com recurso a uma pesquisa por questionário subjetivo em simultâneo com a monitorização de parâmetros ambientais, nomeadamente, a temperatura do ar interior, a humidade relativa do ar interior, a velocidade do ar interior, a temperatura média radiante e a temperatura ambiente exterior.

A pesquisa experimental foi realizada simultaneamente em três salas de aula (denominadas de sala rosa, sala verde e sala azul), num dia típico de janeiro e num dia típico de maio de 2007. As crianças do jardim-de-infância foram previamente preparadas e informadas sobre as perguntas que constam do questionário. Foram utilizados métodos educativos para que as crianças percebessem as noções de frio e de calor. As perguntas dos questionários foram efetuados pelas educadoras bem como o registo das respostas das crianças e, simultaneamente, foram obtidos experimentalmente os valores a monitorizar no interior das salas e os valores das temperaturas exteriores. Foram formados três grupos de indivíduos e cada um expressou a sua resposta térmica subjetiva em diferentes salas de aula. Dos sujeitos que participaram no estudo, em janeiro, 42% eram do sexo feminino e 58% eram do sexo masculino e, em maio, 48% eram do sexo feminino e 52% eram do sexo masculino. Os dados estatísticos dos alunos que participaram na pesquisa são apresentados na tabela 3.1.

As relações entre os índices PMV, aPMV e AMV, em condições de calor, são apresentadas na figura 3.1 e as relações entre os índices PMV, aPMV e AMV, em condições de frio, são apresentadas na figura 3.2. As figuras 3.1 e 3.2 mostram que o ajuste entre os votos médios atuais e os votos previstos usando o modelo de conforto adaptativo é bom dentro da gama $-1,4 \leq \text{PMV} \leq 2$.

Para cada temperatura exterior (T_{ext}), a partir da equação (30), obtém-se os pontos presentes na figura 3.3. Por regressão linear obteve-se, para cada sala, a variação do parâmetro λ em função da temperatura exterior.

Tabela 3.1 – Dados estatísticos dos alunos participantes na pesquisa (JI de Olhão).

| | | Inverno | Verão |
|--------------------------------|--------------|---------|-------|
| Número de crianças | “Sala rosa” | 20 | 18 |
| | “Sala azul” | 17 | 14 |
| | “Sala verde” | 15 | 12 |
| | Total | 52 | 44 |
| Sexo do respondente | Feminino | 22 | 21 |
| | Masculino | 30 | 23 |
| Média de idades (anos) | | 4,96 | 5,8 |
| Peso médio (kg) | | 21,41 | 21,01 |
| Altura média (m) | | 1,16 | 1,15 |
| Taxa metabólica estimada (met) | | 1,2 | 1,2 |
| Nível de vestuário (clo) | | 1,0/1,1 | 0,5 |
| Número de inquéritos | “Sala rosa” | 42 | 53 |
| | “Sala azul” | 34 | 40 |
| | “Sala verde” | 42 | 31 |
| | Total | 118 | 124 |

Os resultados experimentais apenas foram obtidos nas três salas acima referidas. Assim, de modo a obter resultados numéricos, para outras salas, foi considerada a média dos resultados obtidos nas três salas de aula, pelo que o respetivo coeficiente adaptativo é dado pela seguinte equação:

$$\lambda_o = 0,1247 \cdot T_{\text{ext}} - 2,7041$$

Os resultados mostram que para uma temperatura exterior de 21,7°C (condições de primavera e outono na região) o coeficiente adaptativo é zero e, assim, o índice aPMV iguala o índice PMV. Para uma temperatura exterior 5,5°C acima (condições de verão), o valor do índice aPMV está cerca de 50% abaixo do valor do índice PMV. Para uma temperatura exterior 5,5°C abaixo (condições de inverno), o valor do índice aPMV está cerca de 30% acima do valor do índice PMV.

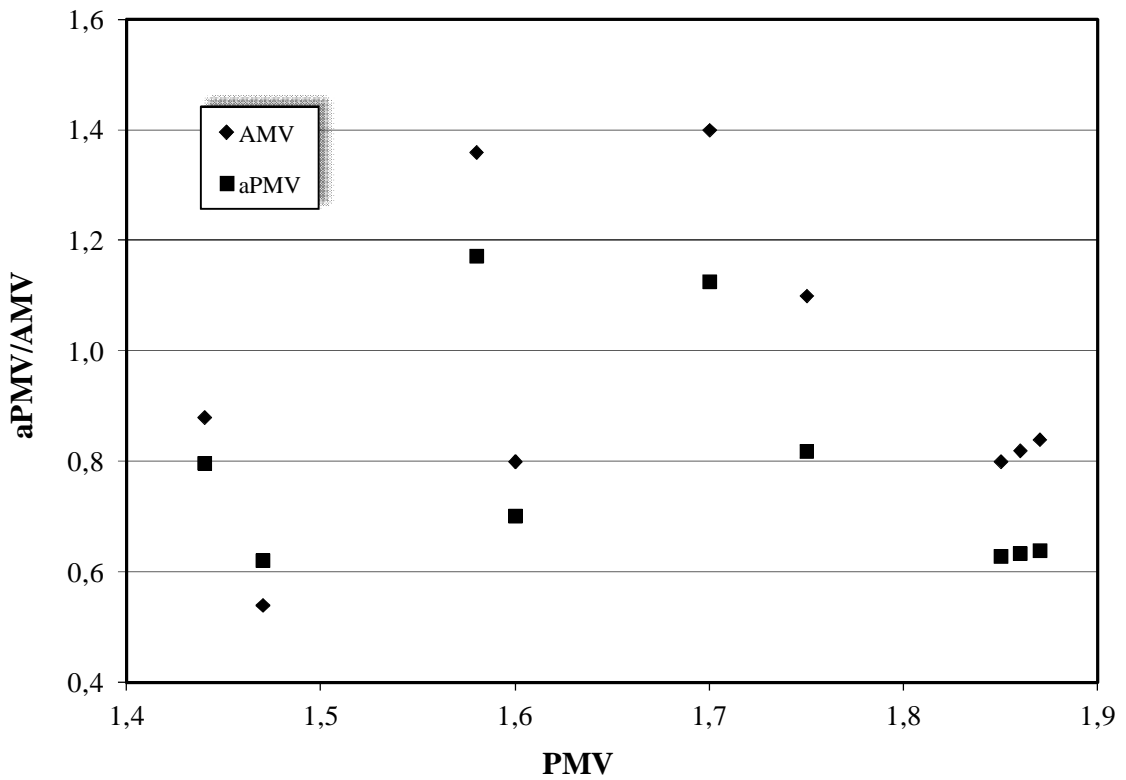


Figura 3.1 – Valores dos índices aPMV e AMV em função dos valores do índice PMV, em condições de verão, obtidos para o jardim-de-infância de Olhão.

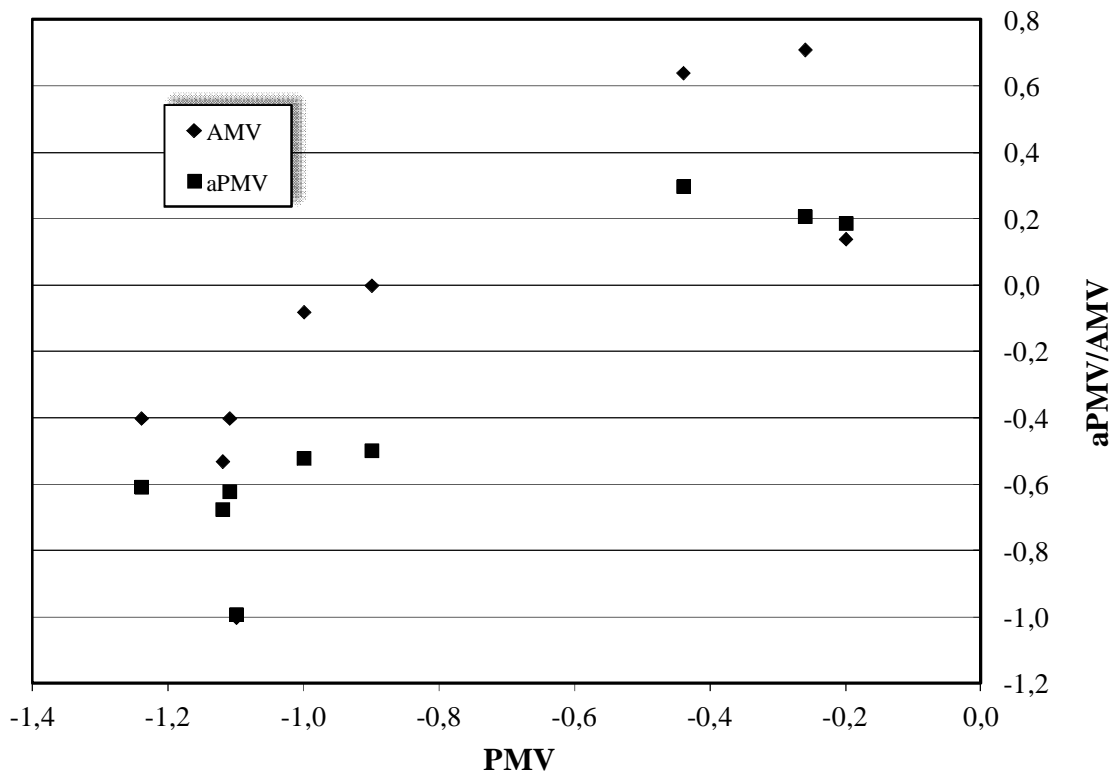


Figura 3.2 – Valores dos índices aPMV e AMV em função dos valores do índice PMV, em condições de inverno, obtidos para o jardim-de-infância de Olhão.

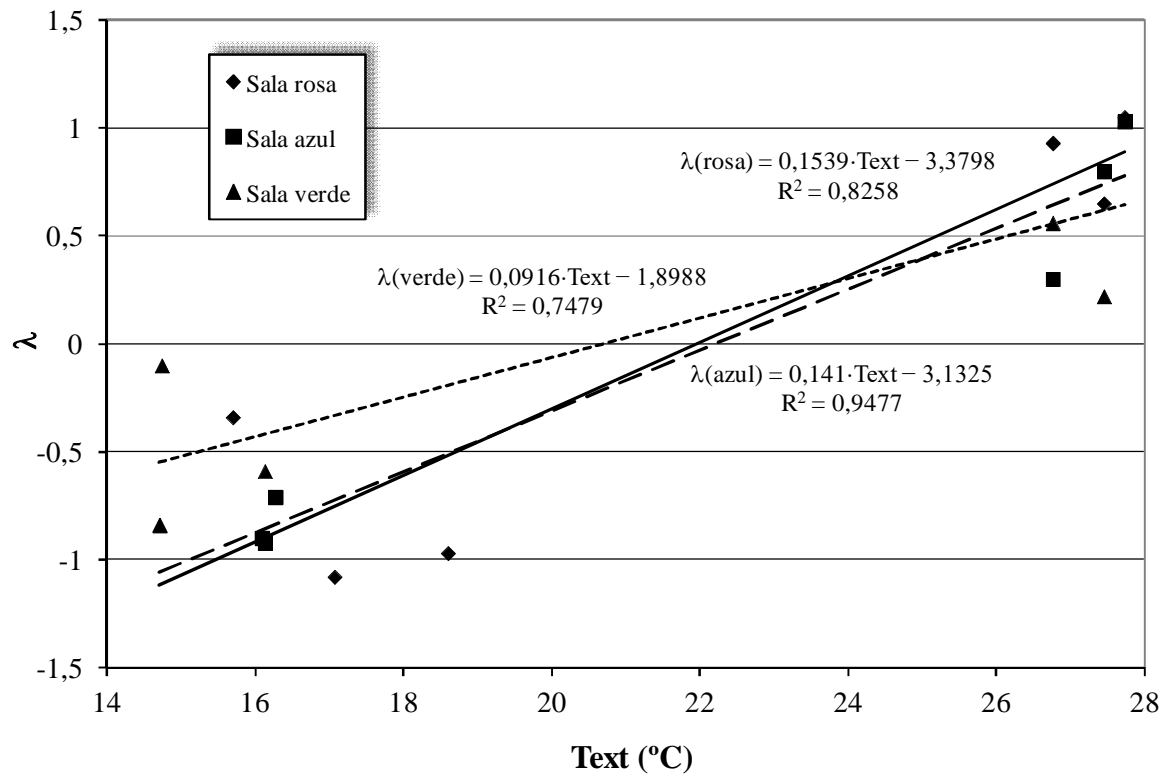


Figura 3.3 – Variação de λ em função da temperatura exterior (Text), para cada sala do jardim-de-infância de Olhão.

3.3 Edifício escolar de 2º e 3º ciclo

Nesta secção é determinado o coeficiente adaptativo λ a inserir no modelo de conforto adaptativo, definido pela equação (15), que será utilizado para avaliar o nível de conforto térmico (índice aPMV) em salas de um edifício escolar vocacionado para o ensino de 2º e 3º ciclo.

O trabalho experimental foi realizado em três salas de aula consideradas típicas, com alunos previamente treinados para o efeito. O número de alunos utilizado na pesquisa foi de 139 (61 homens e 78 mulheres) e as respostas aos questionários, num total de 774, foram obtidas em dias típicos de outono, inverno e primavera. A idade dos participantes situou-se entre os 12 e os 17 anos. Na tabela 3.2, são apresentados os dados estatísticos dos alunos que participaram na pesquisa realizada na escola de 2º e 3º ciclo de Estoi.

Tabela 3.2 – Dados estatísticos dos alunos participantes na pesquisa (EB 2/3 de Estoi).

| | Idade | Altura (m) | Peso (kg) |
|---------------|-------|------------|-----------|
| Média | 14,12 | 1,63 | 55,84 |
| Desvio Padrão | 1,31 | 0,09 | 11,58 |

O trabalho experimental foi realizado em ambiente escolar real, com recurso a uma pesquisa por questionário subjetivo. Simultaneamente foi efetuada a monitorização da temperatura do ar, da temperatura média radiante, da humidade relativa do ar e da velocidade do ar, no interior das salas, e da temperatura ambiente exterior, a fim de determinar o valor do coeficiente de adaptação λ do modelo adaptativo.

As relações entre os índices PMV, aPMV e AMV em condições de outono, inverno e primavera são apresentados na figura 3.4.

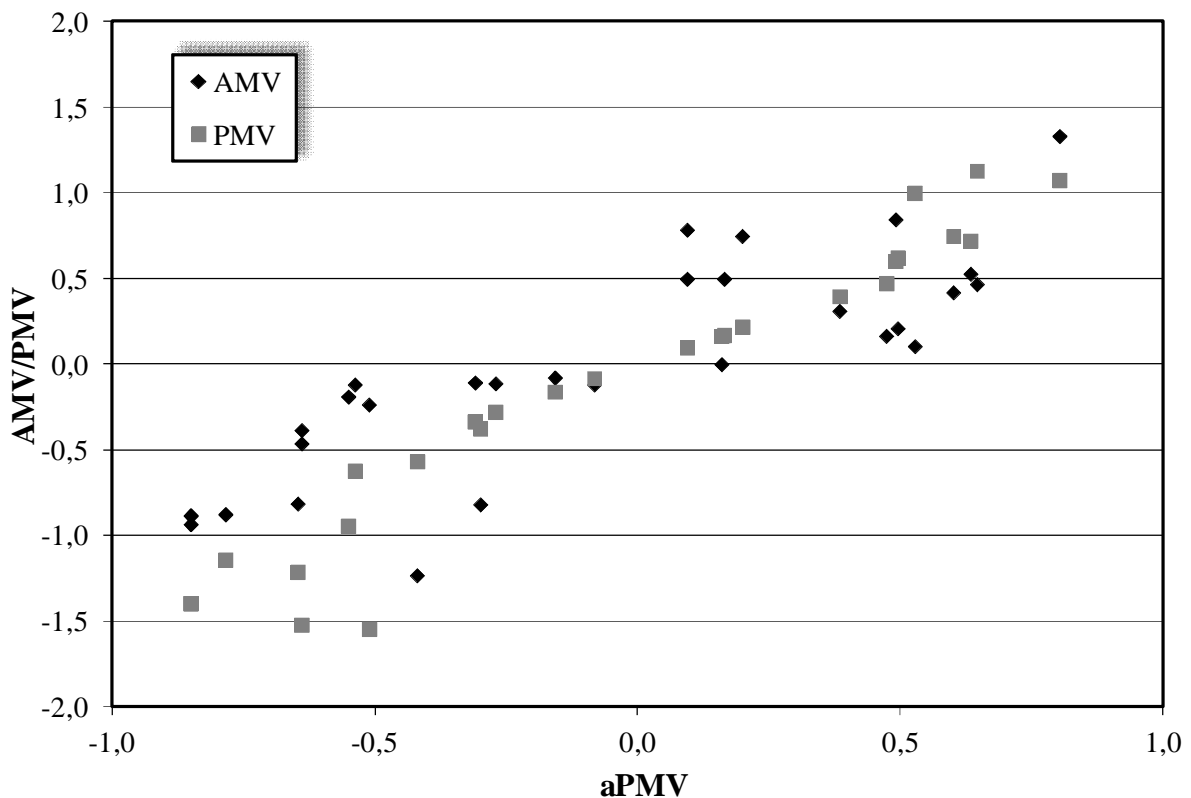


Figura 3.4 - Valores dos índices PMV e AMV em função dos valores do índice aPMV em condições de outono, inverno e primavera, obtidos na escola básica 2/3 de Estoi.

Para cada temperatura exterior, a partir da equação (30), obtém-se os pontos presentes na figura 3.5. Por regressão linear obteve-se a variação do parâmetro λ como uma função da temperatura exterior.

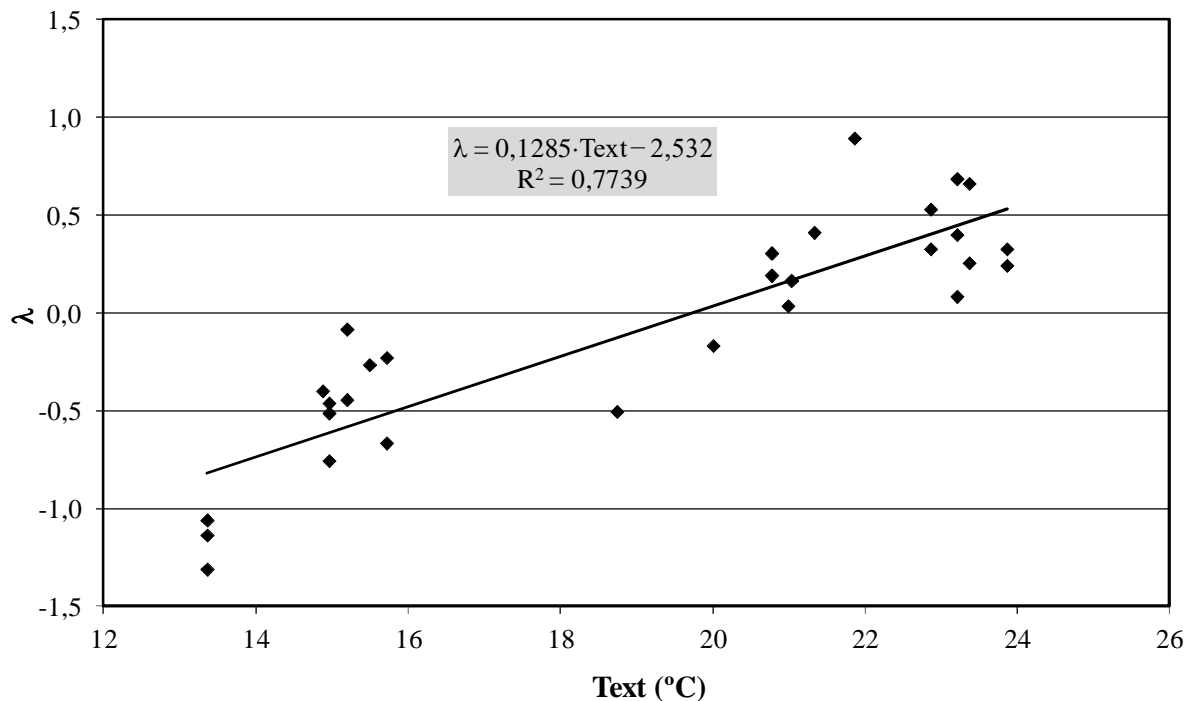


Figura 3.5 – Variação de λ em função da temperatura exterior (Text), obtido para a escola básica 2/3 de Estoi.

De acordo com os resultados apresentados, para uma temperatura exterior em torno dos 19,5°C (temperatura típica para as condições ambientais existentes na região na primavera e no outono), o coeficiente de adaptação é zero e, portanto, o valor do índice aPMV é igual o valor do índice PMV. Para uma temperatura exterior 4°C acima (condições de verão), o valor do índice aPMV está cerca de 16% abaixo do valor do índice PMV. Para uma temperatura exterior 4°C abaixo (condições de inverno), o valor do índice aPMV está cerca de 25% acima do valor do índice PMV.

3.3 Edifício universitário

Nesta secção é determinado o coeficiente adaptativo λ a inserir no modelo de conforto adaptativo, definido pela equação (15), que será utilizado para avaliar o nível de conforto térmico (índice aPMV) em salas de um edifício escolar vocacionado para o ensino universitário.

O número de alunos utilizado na pesquisa foi 44 (30 homens e 14 mulheres) e as respostas aos questionários, num total de 110, foram obtidas em dias típicos de outono, inverno e primavera. A idade dos participantes variou entre os 20 e os 49 anos, com uma média de idades a rondar os 24,6 anos. Na tabela 3.3 são apresentados os dados estatísticos dos alunos que participaram nas respostas aos questionários. Em simultâneo com a realização dos questionários foi efetuada a monitorização dos parâmetros ambientais (temperatura do ar, temperatura média radiante, humidade relativa do ar e velocidade do ar) no interior das salas e da temperatura ambiente exterior.

Tabela 3.3 – Dados estatísticos dos alunos participantes na pesquisa (universidade).

| | Idade | Altura (m) | Peso (kg) |
|---------------|-------|------------|-----------|
| Média | 24,58 | 1,74 | 68,38 |
| Desvio Padrão | 0,58 | 0,08 | 14,46 |

Na figura 3.6 podem ser observadas, comparativamente, as três evoluções obtidas para os diferentes níveis de ensino estudados, nomeadamente, o ensino pré-primário, o ensino básico e o ensino universitário.

Na figura 3.6 pode-se observar que as linhas de tendência para os coeficientes adaptativos dos vários subsistemas de ensino são semelhantes, pelo que se poderá admitir que a adaptação à temperatura exterior por parte dos diferentes grupos etários de estudantes é muito semelhante para o tipo de clima (caracterizado como mediterrânico) em que vivem. No entanto, existem pequenas diferenças relacionadas com o declive da curva e com o ponto de coincidência entre o modelo adaptativo e o modelo de Fanger.

Apesar de o declive das retas dos modelos adaptativos ser semelhante, o modelo adaptativo universitário apresenta um declive ligeiramente menor. Assim, para temperaturas do exterior mais elevadas, o modelo adaptativo universitário coincidirá com o modelo adaptativo do

jardim-de-infância e, para temperaturas do exterior mais baixas, o modelo adaptativo universitário coincidirá com o modelo adaptativo do ensino básico.

Relativamente ao ponto de coincidência, entre o modelo adaptativo e o modelo do Fanger, verifica-se que no caso do ensino pré-primário esse ponto ocorre para temperaturas do ar mais elevadas e que no caso do ensino básico esse ponto ocorre para temperaturas do ar mais baixas. Esse ponto de coincidência ocorre para um valor de temperatura de 19,70°C no caso do ensino básico, para um valor de temperatura de 20,94°C no caso do ensino universitário e para um valor de temperatura de 21,68°C no caso do ensino pré-primário.

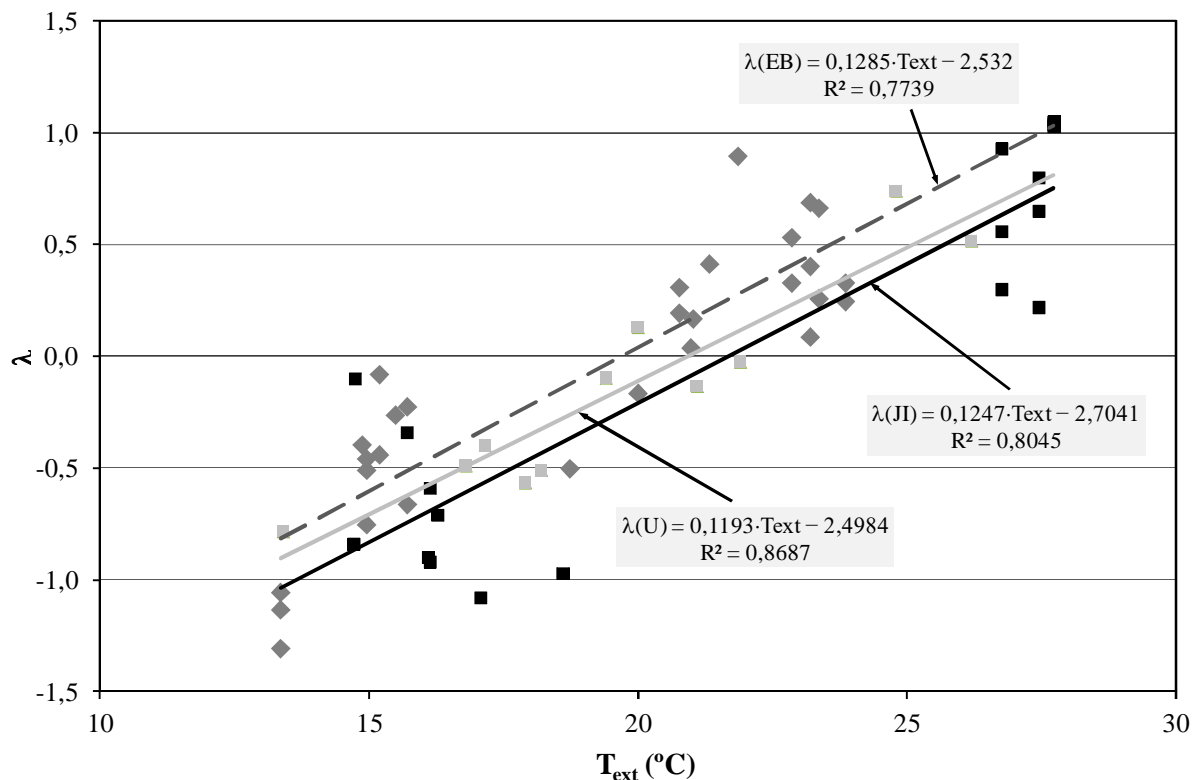


Figura 3.6 – Linhas de tendência para o valor do coeficiente adaptativo λ em função da temperatura exterior (T_{ext}) para o Jardim-de-infância (JI), as Escolas do 2º e 3º ciclo (EB) e a Universidade (U).

Estes resultados mostram que, na avaliação dos níveis de conforto térmico nas escolas da região do Algarve destinadas aos mais diversos graus de ensino, o modelo de Fanger pode ser utilizado como referência quando se verificam valores de temperatura do ambiente exterior entre os 19°C e os 22°C. Para outros valores de temperatura do ambiente exterior, deve ser utilizado o modelo adaptativo desenvolvido para cada grau de ensino.

4 Casos de estudo

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos cinco casos estudados, referentes aos seguintes edifícios escolares: jardim-de-infância de Olhão, escolas do 2º e 3º ciclo de Olhão e Estoi, edifícios 8 e 9 e biblioteca do campus de Gambelas (universidade do Algarve) localizados a 8 km de Faro. Estas escolas foram selecionadas a partir de um vasto conjunto de escolas que tem estado a ser analisadas no Algarve por serem das mais representativas de um grupo heterogéneo de alunos e melhor evidenciarem as diferentes e complexas opções construtivas.

4.1 Dados de entrada

Nesta secção são referidos os dados de entrada que são utilizados no programa de simulação do comportamento térmico dos edifícios e que são comuns aos edifícios apresentados nos casos de estudo.

Em todos os casos de estudo, são verificadas as seguintes situações:

- As condições exteriores foram medidas num dia típico de verão (em particular, o dia 21 de junho) e num dia típico de inverno (em particular, o dia 21 de dezembro), nos casos estudados em condições típicas de verão e de inverno, ou foram medidas num dia típico de cada mês nos casos estudados ao longo do ano.
- De forma a ter em conta a inércia térmica do edifício, foram simulados os cinco dias anteriores.

4.1.1 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados na simulação numérica são definidos pelas condições exteriores e pela radiação solar.

4.1.1.1 Condições exteriores

Os dados de entrada referentes às condições meteorológicas exteriores utilizados na simulação numérica, nomeadamente, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a velocidade do vento e a direção do vento, foram obtidos por uma estação meteorológica instalada no edifício 8 e 9 do campus de Gambelas. Nas figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas as condições exteriores medidas para o dia de verão considerado e nas figuras 4.3 e 4.4 são apresentadas as condições exteriores medidas para o dia de inverno considerado.

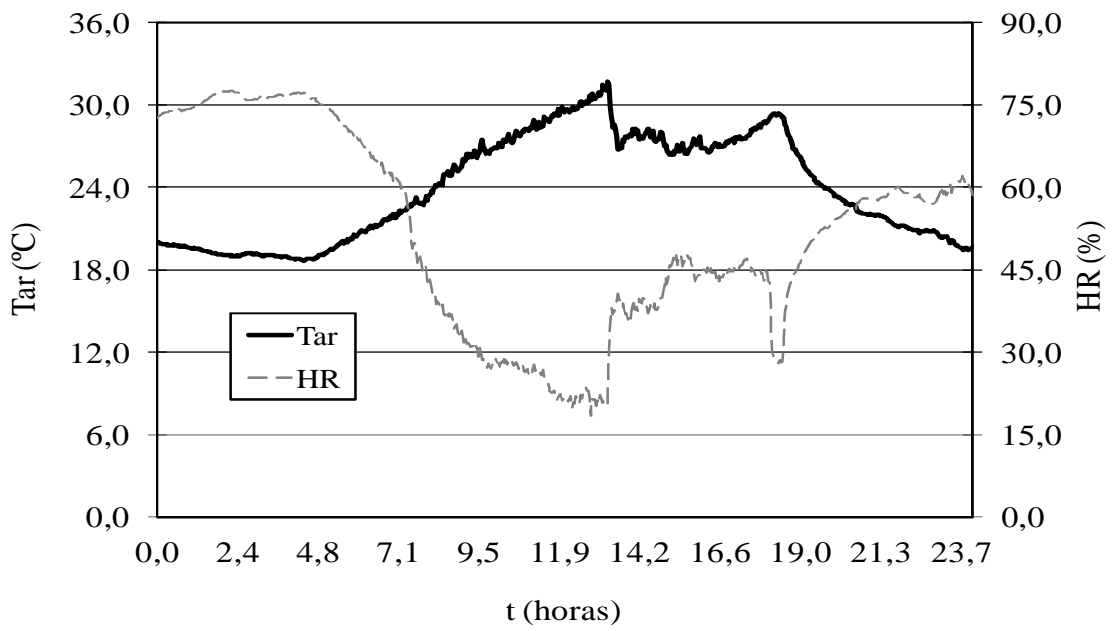


Figura 4.1 – Valores medidos da temperatura do ar (Tar) e da humidade relativa (HR) para o dia 21 de junho.

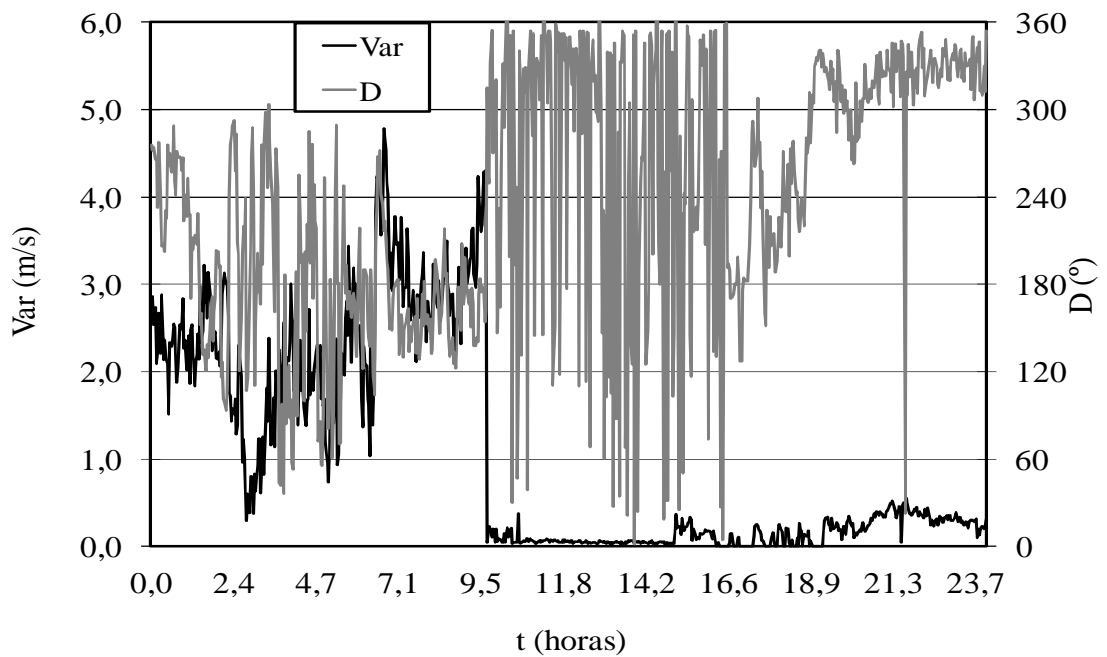


Figura 4.2 – Valores medidos da velocidade do ar (Var) e da direção do vento (D) para o dia 21 de junho.

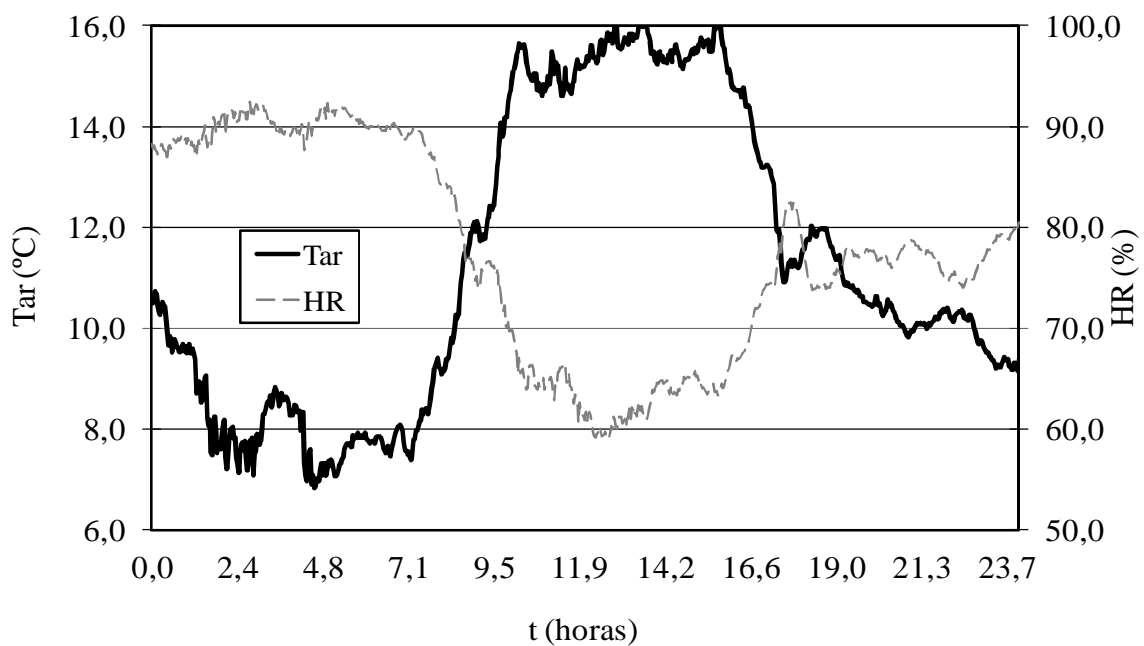


Figura 4.3 – Valores medidos da temperatura do ar (Tar) e da humidade relativa (HR) para o dia 21 de dezembro.

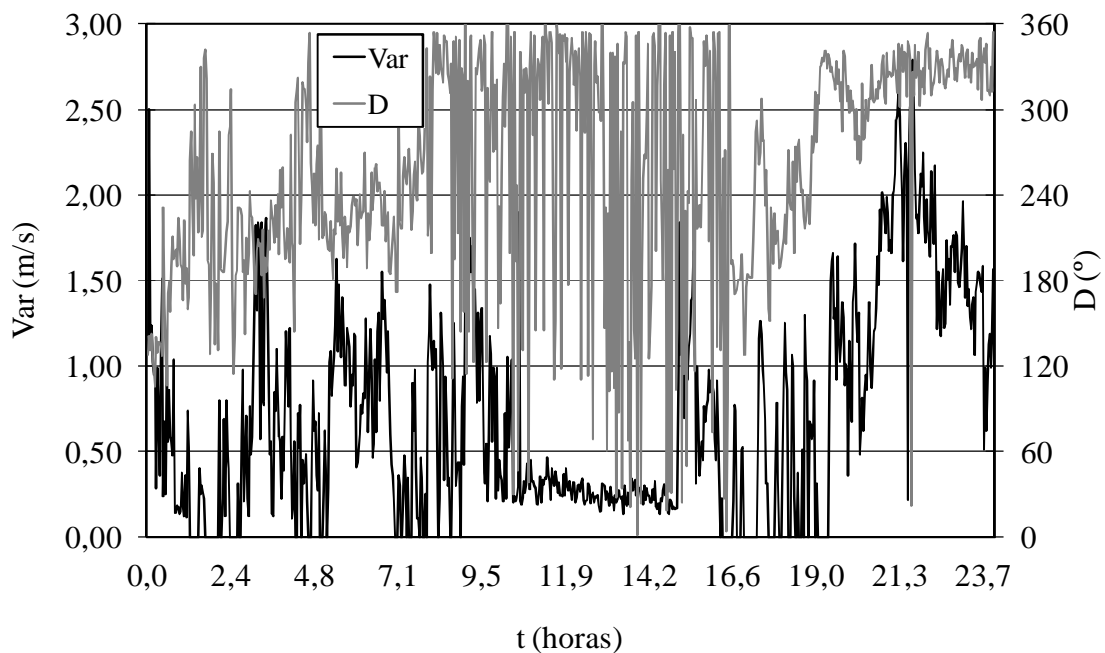


Figura 4.4 – Valores medidos da velocidade do ar (Var) e da direção do vento (D) para o dia 21 de dezembro.

Em junho a temperatura exterior do ar máxima, em média, ronda os 33°C e a temperatura exterior do ar mínima, varia entre os 18°C e os 21°C. Em dezembro a temperatura exterior do ar máxima varia entre os 17°C e os 20°C e a temperatura exterior do ar mínima varia entre os 8°C e os 11°C.

Em junho a humidade relativa do ar exterior máxima, em média, ronda os 60% e a humidade relativa do ar exterior mínima ronda os 30%. Em dezembro a humidade relativa do ar exterior máxima pode chegar aos 100% e a humidade relativa do ar exterior mínima ronda os 50%. Durante cada dia, em geral, a humidade relativa do ar exterior máxima é verificada de manhã e à noite, enquanto a humidade relativa do ar exterior mínima é verificada a meio da manhã e ao fim da tarde.

Durante cada dia, em geral, a velocidade média do vento apresenta valores máximos entre os 15 e os 22 km/h e valores mínimos que não excedem os 5 km/h. No mês de dezembro foi registado o valor máximo da velocidade média do vento.

Em junho a direção principal do vento varia entre sudeste e nordeste. Em dezembro a direção predominante do vento é este.

4.1.1.2 Radiação solar

A determinação da radiação solar incidente (direta e difusa) foi calculada numericamente, a partir de um conjunto de equações empíricas apresentadas em Iqbal (1983) que calcula os termos da irradiação solar global, incidente numa superfície plana e as suas componentes direta e difusa.

A radiação solar no seu trajeto até à superfície terrestre sofre uma atenuação da sua intensidade. Esta atenuação é devida ao fator distância e à presença de constituintes na atmosfera.

A terra desloca-se em torno do sol, segundo uma órbita elíptica, no seu sentido direto, ocupando este um dos focos. A quantidade da radiação solar recebida pelo globo terrestre é inversamente proporcional ao quadrado da distância ao sol. É então conveniente utilizar um valor correto da distância entre o sol e a terra através do fator de correlação da excentricidade da órbita terrestre.

O eixo de rotação da terra define, com a normal ao plano definido pela órbita em torno do sol, um ângulo constante de 23° 27'. A variação anual da inclinação deste eixo relativamente ao sol determina as diferenças existentes nas radiações associadas às diversas estações. Por

consequente é necessário definir algumas relações trigonométricas entre o sol e uma superfície terrestre.

A localização do sol em relação a uma superfície terrestre requer que se conheçam os parâmetros seguintes:

- Declinação (δ), definida pela linha que une os centros do sol e da terra e pelo plano equatorial terrestre;
- Ângulo zenital (θ_z), definido entre o zênite local e a linha que une o observador ao sol;
- Altura solar do sol acima do horizonte local (α);
- Azimute solar (ψ), definido entre o plano do meridiano do observador e o plano que contém o zênite e o sol;
- Ângulo horário (ω), medido sobre o equador celeste, definido entre o plano do meridiano do observador e o plano do meridiano solar;
- Latitude (ϕ), definida entre o equador e o paralelo do lugar, medida sobre o meridiano do observador;
- Ângulo de incidência (θ), definido pela normal à superfície e pelo vetor sol-terra, para superfícies com uma orientação arbitrária;
- Inclinação da superfície em relação à horizontal (β);
- Azimute da superfície (γ), definido no horizonte entre o meridiano do lugar e a projeção da normal à superfície;
- Ângulo horário do nascer do sol (ω_s).

O *dia* é definido para ângulos horários compreendidos entre $-\omega_s$ e ω_s e a *noite* é definida para os restantes ângulos horários (neste caso não existe qualquer tipo de radiação solar). No caso de superfícies inclinadas, os ângulos de nascer do sol e do pôr-do-sol em relação a esta superfície são diferentes. Existe radiação direta numa superfície inclinada se $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ e $-\omega_s < \omega < \omega_s$; sempre que for verificada a última condição existe radiação difusa.

O cálculo da irradiação solar numa superfície terrestre com orientação arbitrária toma em consideração a dispersão da radiação direta extraterrestre pelas partículas da matéria durante a primeira passagem pela atmosfera, as reflexões múltiplas da componente difusa entre a terra e as superfícies da alta atmosfera e à radiação difusa proveniente do céu e à difusa refletida pelo solo.

A dispersão da radiação solar é responsável por dois efeitos: a atenuação do feixe direcional transmitido e a sua reorientação de uma forma mais ou menos isotrópica.

A atenuação da radiação solar direta está associada à presença dos diferentes constituintes atmosféricos, nomeadamente moléculas de ar seco e de ozono, vapor de água, aerossóis, entre outros. Esta atenuação é contabilizada pela razão existente entre a parcela da radiação solar que passa pelo meio ótico e a radiação incidente nesse meio, ou seja, é dada através de um coeficiente de transmissão que considera as dispersões direcionais de Rayleigh, causadas pelas moléculas de ar, de ozono e de água, e de Mie, provocada por pequenas partículas macroscópicas. A intensidade de atenuação da radiação solar incidente depende da natureza e do número de moléculas ou de partículas encontradas pelos raios solares (Iqbal, 1983).

A reorientação da radiação solar dá origem a uma componente de radiação difusa, ou seja, quando a radiação solar embate numa partícula, resulta numa dispersão segundo várias direções (designada por radiação difusa).

A irradiação difusa, de uma superfície com uma orientação arbitrária, proveniente do céu depende essencialmente das condições de nebulosidade do céu. No seu cálculo é utilizado um modelo isotrópico usado quando a radiação difusa, oriunda do albedo solar, se propaga uniformemente (céu nublado).

A componente da radiação difusa proveniente do solo que incide numa superfície inclinada é resultante da reflexão direta no solo das componentes direta e difusa. No seu cálculo é utilizado um modelo isotrópico, o qual considera que o céu se encontra perfeitamente nublado e o solo é um difusor perfeito.

A irradiação global incidente numa superfície com uma orientação arbitrária é dada pela seguinte equação:

$$I = I_b + I_d = I_{b0} r_b(\theta, \theta_z) + I_d^{(sky)} + I_d^{(sr)} \quad (31)$$

Na equação (31), I representa a irradiação global, I_b representa a irradiação direta, I_d representa a irradiação difusa, I_{b0} representa a irradiação normal direta, $r_b(\theta, \theta_z)$ representa a direção projetante da vertical para a normal à superfície considerada, $I_d^{(sky)}$ representa a irradiação difusa proveniente do albedo solar e $I_d^{(sr)}$ representa a irradiação proveniente de reflexões oriundas do solo.

O modelo numérico do cálculo da radiação solar atrás descrito foi desenvolvido por Conceição (1996) e implementado no programa de simulação numérica utilizado neste

trabalho (ver ponto 2.12). As equações matemáticas que caracterizam o modelo são apresentadas e estão deduzidas pormenorizadamente em Conceição (1996).

4.1.2 Ciclo de ocupação

O ciclo de ocupação é uma particularidade de cada edifício, pelo que será apresentado em cada um dos casos de estudo aqui abordados.

4.1.3 Topologia de ventilação

Na definição da topologia de ventilação, ao longo do trabalho, foram utilizadas três metodologias diferentes:

- **Recurso à regulamentação**

Esta metodologia recorre ao disposto na norma portuguesa, decreto-Lei nº 79/06 (2006), anexo VI, que recomenda, em escolas, uma taxa de renovação do ar entre os 30 m³/h (salas de aula, auditórios e bibliotecas) e os 35 m³/h por pessoa (laboratórios).

- **Ensaio experimentais realizados em três salas de um jardim-de-infância**

Os ensaios experimentais são efetuados em três salas de aula. Cada sala de aula possui uma ou duas janelas principais não paralelas e uma porta.

De um modo geral, o caudal de renovação do ar é obtido por infiltração, quando as janelas estão fechadas, ou por ventilação natural cruzada quando as janelas estão abertas. A taxa de renovação do ar é determinada usando a técnica dos gases traçadores.

Na realização dos ensaios experimentais deste trabalho foi utilizado o dióxido de carbono (CO₂) como gás traçador através da concentração decrescente. A leitura da concentração do CO₂ foi obtida com o recurso a uma sonda ligada ao Babuc-A. Não foi necessário recorrer à injeção de um gás traçador para a realização dos ensaios uma vez que se constatou, após a desocupação das salas em estudo, existir uma elevada concentração de CO₂ (resultante do metabolismo dos seus ocupantes).

Os ensaios experimentais nas salas de aula foram efetuados com estas desocupadas. As condições de regime permanente foram mantidas, o céu permaneceu limpo e o valor da velocidade do ar exterior foi muito baixo.

A metodologia utilizada para determinar o número médio de renovações consistiu em determinar a reta que melhor se ajusta aos pontos obtidos experimentalmente, através de

uma regressão logarítmica da concentração de CO₂ em relação ao exterior, e calcular o valor médio do número de renovações através do simétrico do seu declive, ou seja, a partir do método de regressão exponencial. Os resultados obtidos a partir da aplicação desta metodologia são apresentados em Conceição *et al.*, (2012).

Na tabela 4.1 são apresentados os valores da taxa de renovação do ar obtida em cada uma das três salas de aula para duas situações distintas. Como as janelas existentes nas salas de aula são do tipo abrir, os ensaios foram realizados com 50% e 100% das janelas abertas (Conceição *et al.*, 2012).

Tabela 4.1 – Taxa de renovação do ar obtida nas três salas de aulas para 50% e 100% das janelas abertas.

| | 50% das janelas abertas | 100% das janelas abertas |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|
| Sala de aula 3 | 1,999 1/h | 4,410 1/h |
| Sala de aula 13 | 3,521 1/h | 5,192 1/h |
| Sala de aula 16 | 2,843 1/h | 6,224 1/h |

- **Ensaio experimentais realizados numa sala de aula de 2º e 3º ciclo**

Os ensaios experimentais foram realizados numa sala real, de dimensões 10,8×4,8×3,5 m, pertencente a um edifício escolar de 2º e 3º ciclo, localizado em Estoi. Possui três janelas principais, uma porta e quatro janelas pequenas situadas acima das janelas principais e da porta. Esta sala possui também cortinas colocadas apenas à frente das janelas principais.

Foram analisadas 3 situações durante os ensaios experimentais:

- Cortinas abertas e as quatro pequenas janelas abertas;
- Cortinas fechadas e as quatro pequenas janelas abertas;
- Cortinas abertas, as quatro pequenas janelas fechadas, as janelas principais e a porta abertas.

Durante estes ensaios foi usada a técnica dos gases traçadores para determinar a taxa de renovação do ar local e média. Foi utilizado o dióxido de carbono como gás traçador através da concentração decrescente.

A taxa de renovação do ar local e média foi obtida para a zona central da sala de aulas, a 1,2 m de altura do nível do solo, na zona da respiração. Antes da realização dos ensaios experimentais, utilizaram-se dois ventiladores para misturar o dióxido de carbono e o ar. A

concentração do dióxido de carbono para baixas taxas de renovação é medida durante 0,3 horas, enquanto para elevadas taxas de renovação é medida durante um curto intervalo de tempo.

A metodologia utilizada (e explicada no ponto anterior) consistiu em determinar a regressão logarítmica da concentração do CO₂ em função do tempo, no ponto central da sala. Para obter a taxa de renovação do ar local mantém-se os ventiladores desligados durante os ensaios. Para obter a taxa de renovação do ar média mantém-se os ventiladores ligados durante os ensaios (Conceição, 2008d).

Na tabela 4.2 são apresentados os valores da taxa de renovação do ar, média e local, obtidos em cada um dos três ensaios experimentais (Conceição, 2008d).

Tabela 4.2 – Taxas de renovação do ar (1/h) e caudal volúmico (m³/h), médio e local, obtidos em três ensaios experimentais.

| Cortinas | Pequenas janelas | Janelas e porta | Local (1/h) | Médio (1/h) | Local (m³/h) | Médio (m³/h) |
|-----------------|-------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Abertas | Abertas | Fechadas | 2,48 | 1,32 | 449,87 | 239,45 |
| Fechadas | Abertas | Fechadas | 1,90 | 2,42 | 344,66 | 438,99 |
| Abertas | Fechadas | Abertas | 6,49 | 5,36 | 1177,29 | 972,30 |

4.1.4 Nível de vestuário dos ocupantes

O nível de vestuário dos ocupantes é obtido de duas formas:

- A partir do cálculo da soma do nível de isolamento das diferentes peças de vestuário referidas pelos respondentes aos questionários;
- Ou considerando valores típicos: 0,5 clo no verão e 1 clo no inverno.

4.1.5 Nível de atividade dos ocupantes

Como os estudos efetuados desenvolveram-se essencialmente em salas de aula típicas, considerou-se o nível de atividade dos ocupantes igual a 1,2 met o que corresponde a uma atividade sedentária (alunos sentados em salas de aula ou laboratórios).

4.2 Aplicação dos índices PMV e aPMV em edifícios jardim-de-infância

4.2.1 Descrição do edifício

Nesta simulação foram considerados o jardim-de-infância, destinado a crianças de 3, 4 e 5 anos de idade, as duas escolas existentes na área (localizadas a oeste do jardim-de-infância) e três edifícios residenciais circundantes (localizados em áreas situadas a este, sudeste e sul relativamente ao jardim-de-infância), como se pode observar na figura 4.5.

A ideia deste trabalho consistiu na aplicação de um modelo numérico no projeto de definição de estratégias passivas e ativas num jardim-de-infância, com o principal objetivo de garantir, simultaneamente, condições de conforto térmico e qualidade do ar aceitáveis, com baixo nível de consumo de energia.

O jardim-de-infância (EB1/JI nº 4) utilizado neste estudo é localizado em Olhão (sul de Portugal), tem 10 espaços com maior ocupação e 15 espaços com menor ocupação. As salas de aula (números 3, 13 e 16), recreio (número 10), cozinha (número 18), a sala dos professores (número 7) e o corredor (número 25) são considerados como os principais espaços com maior ocupação. O *hall* (espaço número 2) é considerado como o principal espaço com menor ocupação.

Na simulação numérica do jardim-de-infância são considerados 25 compartimentos (salas de aula, recreio, escritório, cozinha, sala de professores, sala de funcionários, corredores, hall, arrumação, WC e sótão), 25 portas de madeira e 42 janelas e painéis de vidro.

Na figura 4.6 estão identificados os espaços do jardim-de-infância.

Na figura 4.7, é apresentado a geração de malha utilizada na simulação numérica do jardim-de-infância. Esta grelha numérica, utilizada na determinação da radiação solar direta no interior e exterior, foi espaçada 30 centímetros em ambos os sentidos, de modo a que a sua distribuição seja muito próxima da realidade. A numeração dos espaços é apresentada na mesma figura.

No que se refere à utilização de estratégias passivas, o jardim-de-infância está equipado com múltiplos dispositivos de sombreamento de alumínio de inclinação variável, colocados acima do nível das janelas transparentes e em frente à porta transparente voltada a sul. Estes dispositivos permitem implementar a melhor inclinação possível no controlo da passagem da radiação solar para o interior dos compartimentos.

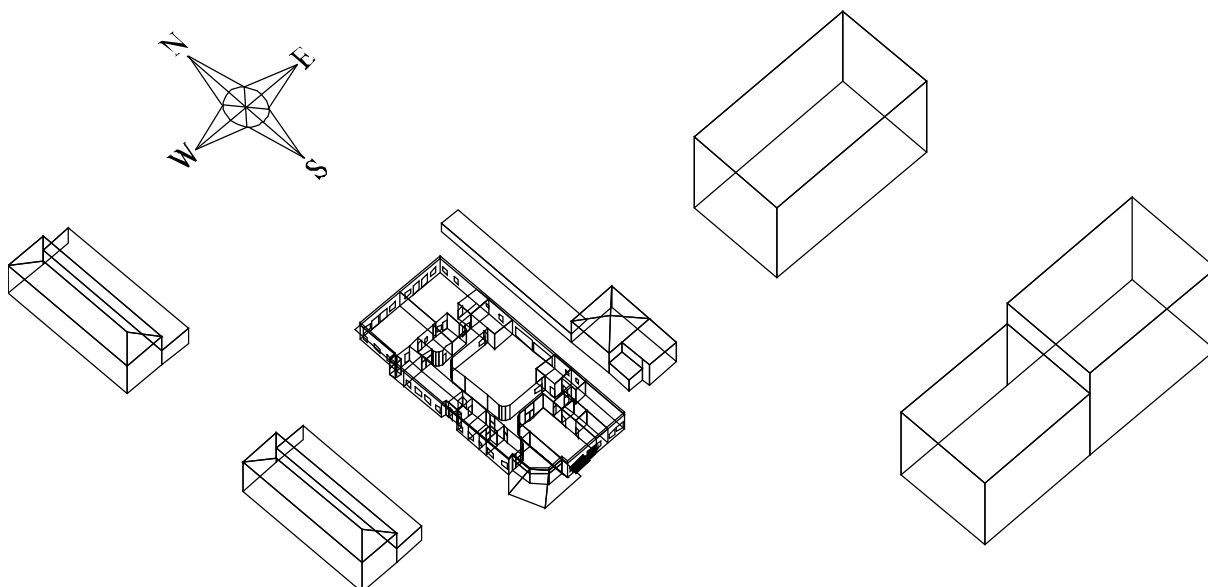


Figura 4.5 – Esquema do jardim-de-infância e edifícios envolventes.

As janelas transparentes e porta transparente, instalados na sala de aula número 3, garantem as condições de passagem máxima de radiação solar no solstício de inverno (21 de dezembro) e evitam a passagem da radiação solar no solstício de verão (21 de junho). É necessário colocar o tipo de dispositivo de sombreamento atrás referido em frente à porta, porque a colocação de um dispositivo de sombreamento vertical não é muito eficiente devido à elevada carga térmica a que está sujeita.

Dispositivos de sombreamento horizontais (sob a forma de toldos de tecido) estão colocados acima dos painéis transparentes virados a sul, sudoeste e oeste. Estes dispositivos opacos são instalados na estufa (zona 2, figura 4.6). Não permitem a passagem da radiação solar nos painéis transparentes virados a sul, sudoeste e oeste durante o horário de aula das crianças (até às 15 horas), em condições térmicas de verão. No entanto, em condições térmicas de inverno, estes sistemas permitem a máxima passagem possível da radiação solar.

Os painéis transparentes virados a sudoeste e oeste não são submetidos a dispositivos de sombreamento, devido ao sombreamento natural provocado pelos edifícios circundantes colocados na área situada a leste.

Em condições de verão foi considerado um espaço subterrâneo, não sujeito à radiação solar direta, colocado abaixo da área do edifício do jardim-de-infância.

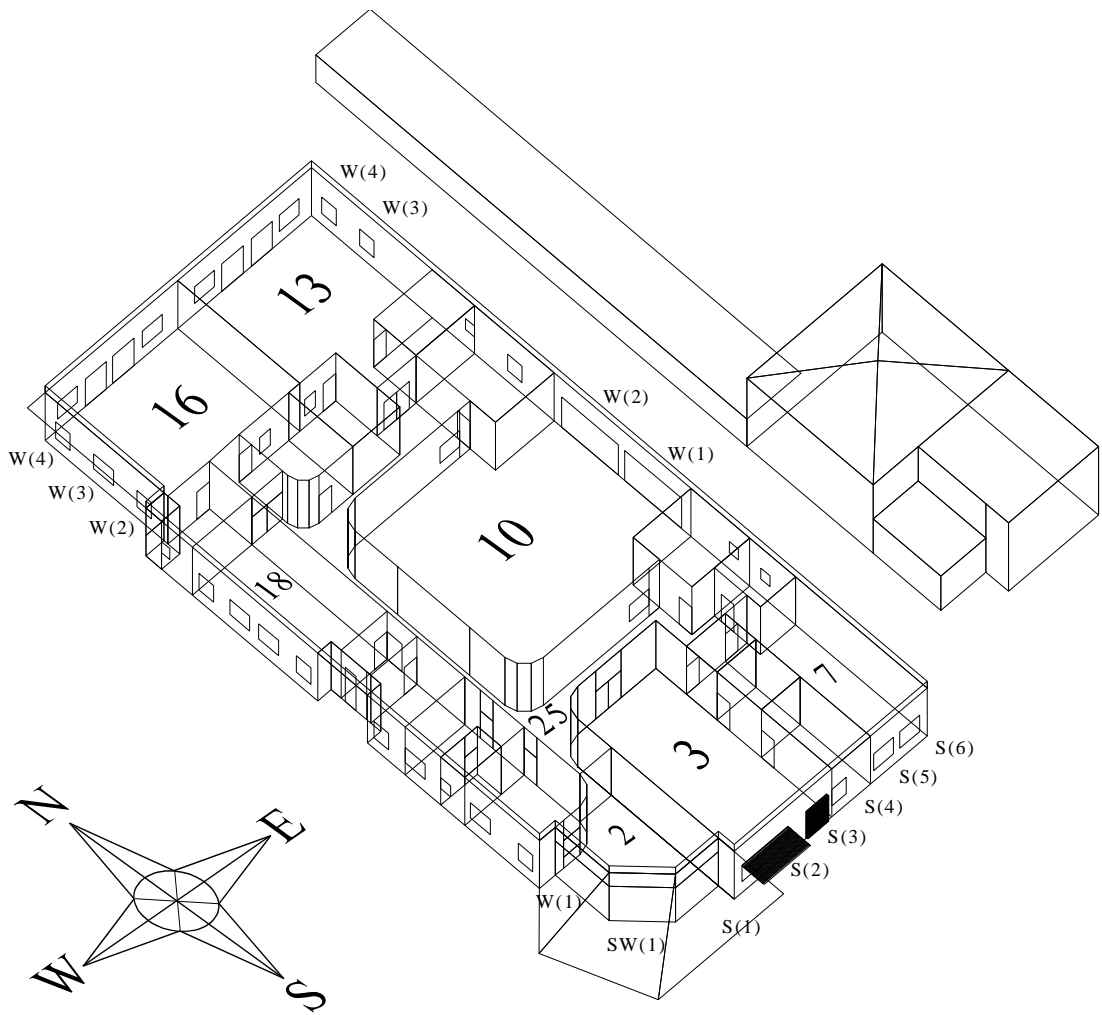


Figura 4.6 – Identificação dos espaços do jardim-de-infância.

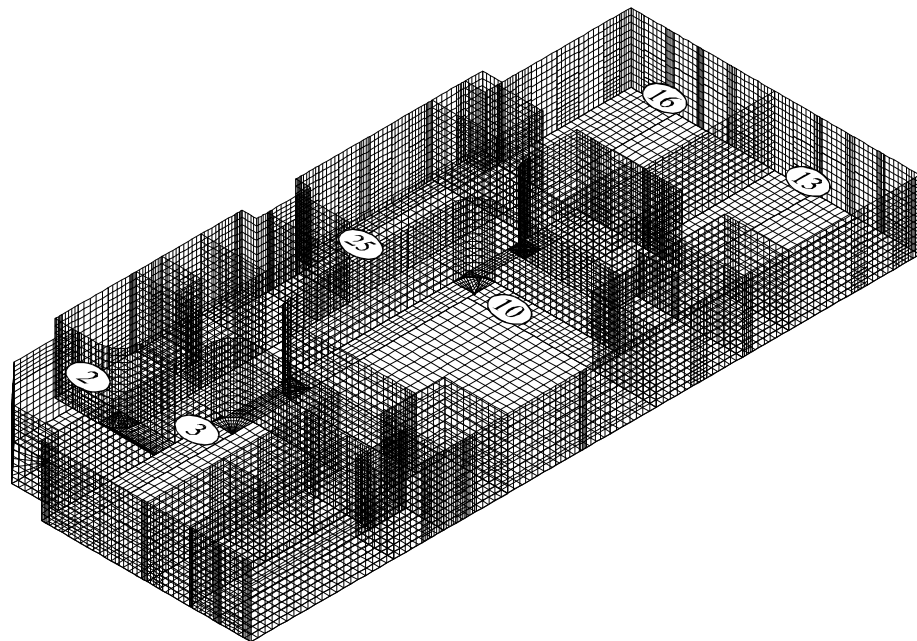


Figura 4.7 – Geração de malha e identificação dos compartimentos no interior do jardim-de-infância.

4.2.2 Metodologia implementada nas simulações

Na metodologia implementada, o caudal de ar obtido na sala é usado como dado de entrada e o modelo adaptativo de conforto térmico é usado na simulação numérica que permite avaliar o conforto térmico existente no jardim-de-infância de acordo com as soluções implementadas.

De um modo geral, o caudal de renovação do ar é obtido por infiltração, quando as janelas estão fechadas, ou por ventilação natural cruzada quando as janelas estão abertas. O processo de obtenção do caudal volúmico é descrito em Conceição *et al.* (2012).

A metodologia implementada envolve duas estratégias de ventilação:

- Estratégia 1 – Esta estratégia é implementada em condições de inverno. Considera que a ventilação natural é introduzida nas salas de aula a partir da abertura das janelas a 50%. A ventilação forçada é introduzida a partir do *hall* (a funcionar como estufa) para o recreio interior.
- Estratégia 2 – Esta estratégia é implementada em condições de verão. Considera que a ventilação natural é introduzida nas salas de aula a partir da abertura das janelas a 100%. A ventilação forçada é introduzida a partir do recreio interior (espaço “frio”) para o *hall*.

4.2.3 Introdução de dados no modelo numérico

Dados meteorológicos

Na introdução de dados no modelo numérico, foram considerados os dados meteorológicos apresentados no ponto 4.1.1.

Ciclo de ocupação

Na tabela 4.3 é apresentada a evolução do número de ocupantes, em cada espaço, durante um dia típico. O jardim-de-infância está ocupado entre as 8 e as 18:30 horas. O seu ciclo de ocupação obedece ao seguinte horário:

- Entre as 9 e as 12 horas e entre as 13 e as 15 horas, as crianças ocupam as salas de aula (salas 3, 13 e 16);
- Entre as 8 e as 9 horas e entre as 15 e as 18:30 horas, as crianças estão no espaço de recreio (espaço 10);
- Entre as 12 e as 13 horas, as crianças estão no refeitório (espaço 10).

Tabela 4.3 – Evolução do número de ocupantes em cada espaço.

| Tempo (horas) | 0 → 8 | 8 → 9 | 9 → 12 | 12 → 13 | 13 → 15 | 15 → 16:30 | 16:30 → 18:30 | 18:30 → 24 |
|--------------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Espaços | | | | | | | | |
| 3 | | | 27 | | 27 | | | |
| 7 | | | 2 | | | 4 | | |
| 10 | | 30 | 4 | 68 | | 20 | 20 | |
| 13 | | | 22 | | 22 | | | |
| 16 | | | 22 | | 22 | | | |
| 18 | | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | |

Topologia de ventilação

De acordo com a topologia de ventilação apresentada no ponto 4.1.3, na tabela 4.1 são apresentados os valores da taxa de renovação do ar obtida em cada uma das três salas de aula para as duas situações acima referidas: 50% e 100% de abertura da área das janelas.

De acordo com os resultados obtidos, a taxa de renovação do ar aumenta com a área de abertura das janelas. As salas de aulas 13 e 16 com duas janelas localizadas em diferentes paredes apresentam uma taxa de renovação do ar maior do que a sala de aula 3 que possui apenas uma janela.

O caudal volúmico do ar utilizado nas condições do inverno e verão, para os intervalos de tempo considerados, nos espaços ocupados, são apresentados, respetivamente, nas tabelas 4.4 e 4.5.

Nos espaços ventilados, quando se opta por uma estratégia de ventilação forçada, considera-se que o caudal volúmico (em m³/s) é dado por 0,00833 vezes o número de pessoas presentes nesse espaço, de acordo com o decreto-lei n° 79/06 (2006).

Nos espaços onde não são efetuadas medições, é considerada uma taxa renovação do ar de 0,11 renovações por hora, que corresponde ao valor médio das taxas de renovação obtidas experimentalmente nas 3 salas de aula com as janelas totalmente fechadas (Conceição et al., 2012).

Em condições de inverno considera-se que, quando as salas de aulas estão ocupadas, as janelas estão 50% abertas e que o ar é renovado naturalmente com o exterior e que, quando as salas estão desocupadas, as janelas estão fechadas e que a renovação do ar se faz naturalmente por infiltrações. Para os outros espaços, a estratégia consiste em utilizar ventilação forçada para trazer ar do exterior para os espaços interiores ao longo do seguinte trajeto: vindo do exterior, o ar entra pela estufa (espaço 2), onde é aquecido, passa pelo corredor (espaço 25) e chega ao recreio (espaço 10). Nesta situação, aproveita-se o ar renovado e aquecido para aquecer e melhorar a qualidade do ar do espaço onde as crianças se encontram quando não estão em aulas.

Tabela 4.4 – Caudal volúmico de ar (m^3/s) utilizado em condições de inverno para os diferentes espaços.

| Tempo (horas) | 0 → 8 | 8 → 9 | 9 → 12 | 12 → 13 | 13 → 15 | 15 → 16:30 | 16:30 → 18:30 | 18:30 → 24 |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|------------|---------------|------------|
| Direção do Ar | | | | | | | | |
| Exterior → Estufa 2 | | 0,2499 | 0,5664 | 0,0100 | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Exterior → Sala de Aula 3 | | 0,0053 | 0,0053 | 0,0974 | 0,0053 | 0,0053 | 0,0053 | |
| Exterior → Recreio 10 | | | | 0,0110 | | | | |
| Exterior → Sala de Aula 13 | | 0,0059 | 0,0059 | 0,1875 | 0,0059 | 0,0059 | 0,0059 | |
| Exterior → Sala de Aula 16 | | 0,0064 | 0,0064 | 0,1519 | 0,0064 | 0,0064 | 0,0064 | |
| Estufa 2 → Corredor 25 | | 0,2499 | 0,5664 | | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Corredor 25 → Recreio 10 | | 0,2499 | 0,5664 | | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Sala de Aula 3 → Exterior | | 0,0053 | 0,0053 | 0,0974 | 0,0053 | 0,0053 | 0,0053 | |
| Recreio 10 → Exterior | | | | 0,0110 | | | | |
| Sala de Aula 13 → Exterior | | 0,0059 | 0,0059 | 0,1875 | 0,0059 | 0,0059 | 0,0059 | |
| Sala de Aula 16 → Exterior | | 0,0064 | 0,0064 | 0,1519 | 0,0064 | 0,0064 | 0,0064 | |

Em condições de verão considera-se que, quando as salas de aulas estão ocupadas, as janelas estão 100% abertas e que o ar é renovado naturalmente com o exterior e que, quando as salas estão desocupadas, as janelas estão fechadas e a renovação do ar faz-se naturalmente por infiltrações. Para os outros espaços, a estratégia consiste em usar ventilação forçada para

trazer ar do exterior para os espaços interiores ao longo do seguinte trajeto: vindo do exterior, o ar entra no recreio (espaço 10), cujas portas se encontram abertas, passa pelo corredor (espaço 25) e sai pela estufa (espaço 2). Nesta situação, aproveita-se o ar renovado vindo do exterior para ventilar (refrescar) e melhorar a qualidade do ar do espaço onde as crianças se encontram quando não estão em aulas.

Tabela 4.5 – Caudal volúmico de ar (m^3/s) utilizado em condições de verão para os diferentes espaços.

| Tempo (horas) | 0 → 8 | 8 → 9 | 9 → 12 | 12 → 13 | 13 → 15 | 15 → 16:30 | 16:30 → 18:30 | 18:30 → 24 |
|-----------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|------------|---------------|------------|
| Direção do Ar | | | | | | | | |
| Exterior → Estufa 2 | | | | 0,0100 | | | | |
| Exterior → Sala de Aula 3 | | 0,0053 | 0,2322 | 0,2322 | 0,0053 | 0,0053 | 0,0053 | |
| Exterior → Recreio 10 | | 0,2499 | 0,5664 | 0,0110 | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Exterior → Sala de Aula 13 | | 0,0059 | 0,2764 | 0,2764 | 0,0059 | 0,0059 | 0,0059 | |
| Exterior → Sala de Aula 16 | | 0,0064 | 0,3328 | 0,3328 | 0,0064 | 0,0064 | 0,0064 | |
| Recreio 10 → Corredor 25 | | 0,2499 | 0,5664 | | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Corredor 25 → Estufa 2 | | 0,2499 | 0,5664 | | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Estufa 2 → Exterior | | 0,2499 | 0,5664 | 0,0100 | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Sala de Aula 3 → Exterior | | 0,0053 | 0,2322 | 0,2322 | 0,0053 | 0,0053 | 0,0053 | |
| Recreio 10 → Exterior | | 0,2499 | 0,5664 | 0,0110 | 0,1666 | 0,1666 | 0,2499 | |
| Sala de Aula 13 → Exterior | | 0,0059 | 0,2764 | 0,2764 | 0,0059 | 0,0059 | 0,0059 | |
| Sala de Aula 16 → Exterior | | 0,0064 | 0,3328 | 0,3328 | 0,0064 | 0,0064 | 0,0064 | |

Nível de vestuário dos ocupantes

O nível de vestuário dos ocupantes está de acordo com o apresentado no ponto 4.1.4.

Nível de atividade dos ocupantes

O nível de atividade dos ocupantes está de acordo com o apresentado no ponto 4.1.5.

4.2.4 Apresentação e discussão dos resultados

Neste estudo é utilizado um o programa que simula a resposta térmica de um edifício com topologia complexa, em condições transitórias. Na simulação, as trocas internas de aquecimento radiativo, as cortinas interiores e os sistemas de aquecimento e de ar condicionado não são considerados.

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos referentes à incidência da radiação solar externa nas superfícies envolventes do jardim-de-infância, às condições térmicas nos espaços interiores do jardim-de-infância, utilizando a temperatura do ar interior, ao nível de conforto térmico dos ocupantes (através dos índices PMV e aPMV) e à qualidade do ar interior (utilizando a concentração de dióxido de carbono), para as condições de inverno e de verão.

4.2.4.1 Radiação solar exterior

A radiação solar desempenha um papel fundamental no conforto térmico dos edifícios. No inverno constitui uma importante fonte de calor, que contribui para o aumento da temperatura do ar interior. Contudo, no verão a radiação solar ao contribuir para o aumento da temperatura do ar interior pode ser causa de desconforto nos ocupantes.

Nas figuras 4.8 e 4.9 pode-se observar a evolução da radiação solar, respetivamente, em condições de inverno e de verão. Nas figuras estão assinaladas as janelas (através da sua numeração e orientação, como se pode ver na figura 4.6), onde se obtém os resultados da radiação solar.

Em condições de inverno, as janelas viradas a sul (S1, S2, S3, S4, S5 e S6) apresentam ao longo dia uma evolução praticamente constante da radiação solar, cuja maior amplitude de variação (cerca de 1000 W) é verificada nas janelas da sala 3 (S2 e S3).

As janelas pertencentes ao espaço 2 orientadas a sudoeste e oeste (SW1 e W1) apresentam o maior nível da radiação solar com uma boa amplitude no período da tarde. A janela SW1 apresenta uma amplitude de cerca de 3500 W entre as 12h e as 15:30 horas e a janela W1 apresenta uma amplitude de cerca de 5500 W entre as 13h e as 15:30 horas.

As janelas viradas a este (E1, E2 e E3), apenas recebem uma radiação solar significativa durante o período da manhã. Entre as 9h e as 12h, a amplitude do valor de radiação solar atinge cerca de 3000 W, 2500 W e 800 W, respetivamente, nas janelas E1, E2 e E3.

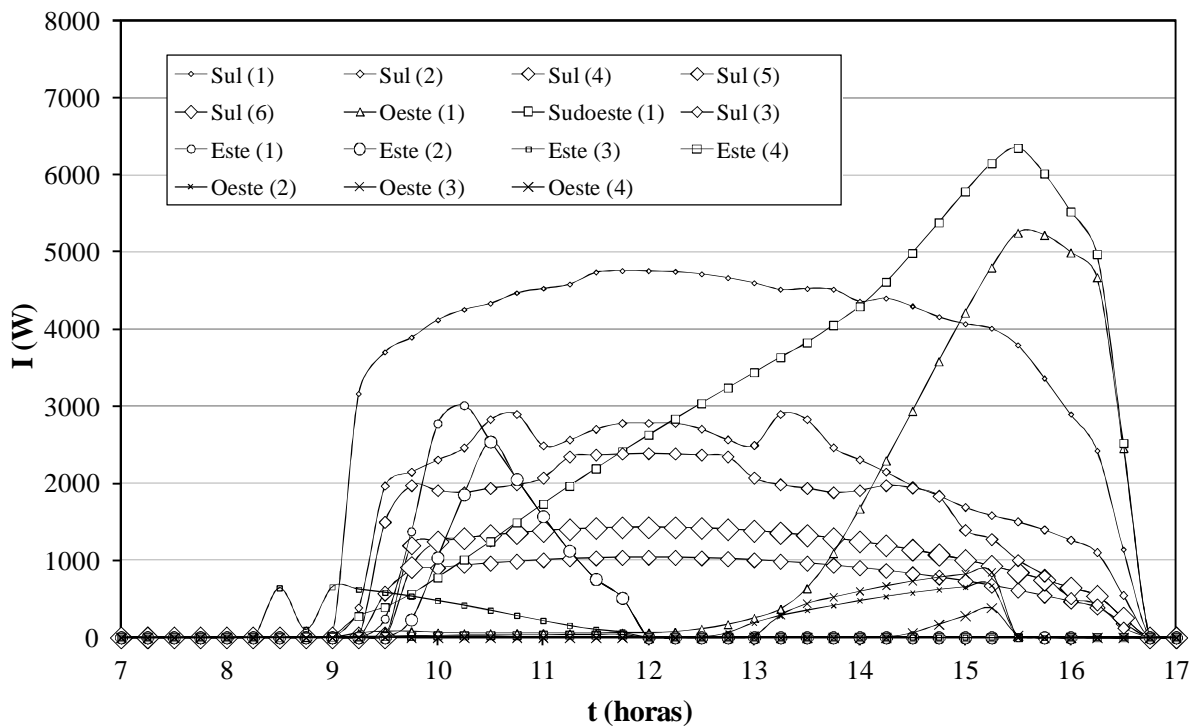


Figura 4.8 – Evolução da radiação solar transmitida (I) calculada nas janelas principais, no dia 21 de dezembro (jardim-de-infância de Olhão).

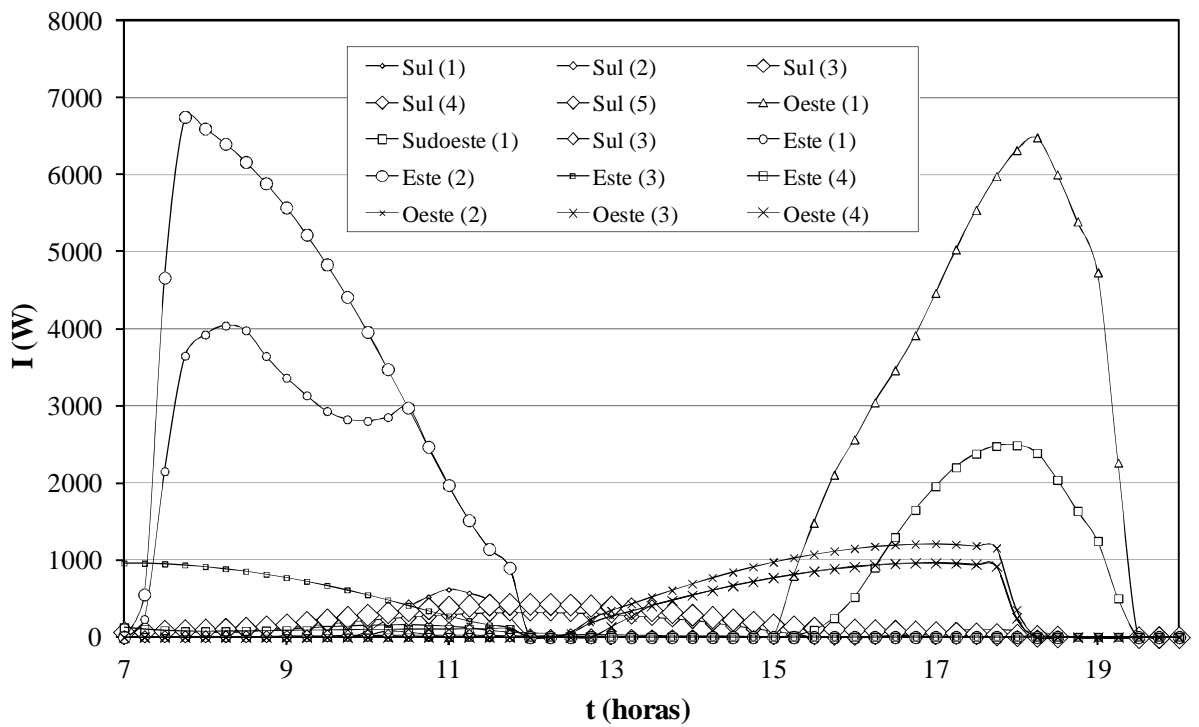


Figura 4.9 – Evolução da radiação solar transmitida (I) calculada nas janelas principais, no dia 21 de junho (jardim-de-infância de Olhão).

Nestas condições e de acordo com o posicionamento dos dispositivos sombreadores existentes (pala e cortinas) verifica-se que, durante o período de ocupação, as salas 3 e 16 recebem níveis de radiação significativos. Como o espaço 2 tem uma boa área de superfícies envidraçadas e recebe uma quantidade de radiação solar significativa pode ser utilizada como estufa na estratégia de ventilação acima proposta.

Em condições de verão, nota-se o efeito na radiação solar devido à existência de dispositivos sombreadores (ver figura 4.6) nas janelas viradas a sul, os quais garantem, durante o tempo em que as salas estão ocupadas, níveis baixos de radiação solar nas superfícies das janelas (essencialmente abaixo dos 500 W), como se pretende.

Os resultados obtidos numericamente mostram também que as salas viradas a este apresentam os maiores ganhos radiativos durante o período da manhã (com uma amplitude próxima dos 7000 W na janela E2 e de 4000 W na janela E1) enquanto as salas viradas a oeste apresentam os maiores ganhos radiativos durante o período da tarde (com uma amplitude próxima dos 6500 W na janela W1; as restantes janelas apresentam amplitudes abaixo dos 2000 W).

No entanto, durante o período de ocupação das salas de aula, o efeito da radiação solar é pouco significativo nestas janelas (com valores de radiação solar maioritariamente abaixo dos 500 W). A colocação dos dispositivos sombreadores e o efeito sombreador dos edifícios adjacentes, que condicionam a incidência da radiação solar, permitem assim minimizar os ganhos radiativos.

4.2.4.2 Conforto térmico em condições de inverno

Nas figuras 4.10 e 4.11 são apresentadas, respetivamente a evolução da temperatura do ar interior (T_{ar}) e da concentração do dióxido de carbono (CO_2) em condições de inverno. Na figura 4.11, a linha horizontal representa o limite aceitável para a concentração do dióxido de carbono: 1800 mg/m^3 .

Nas figuras 4.12 e 4.13 são apresentados o nível de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos, respetivamente, de acordo com o índice PMV (modelo de Fanger) e de acordo com o índice aPMV (modelo adaptativo), em condições de inverno. Nas figuras pode-se observar o número e nome do espaço avaliado, bem como da orientação das janelas (E – este; NE – nordeste; NO – noroeste). Nas figuras 4.12 e 4.13, a linha horizontal com o valor do índice PMV igual a +0,7 representa o limite aceitável para o conforto térmico por calor, enquanto a linha horizontal com o valor do índice PMV igual a -0,7 representa o limite aceitável para o conforto térmico por frio, de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005).

De acordo com os resultados obtidos é possível concluir:

- O nível de qualidade do ar interior, avaliado através da concentração de dióxido de carbono, não é aceitável nas salas de aula (3, 13 e 16), sujeitas a ventilação natural; contudo no espaço do recreio (10), sujeito a ventilação forçada, é aceitável de acordo com a norma ANSI/ASHRAE 62.1 de 2010 e de acordo com o Decreto-Lei nº 79, de 04 de abril de 2006;
- A temperatura do ar interior na sala 3 (virada a este) varia entre os 21°C e os 24°C. A temperatura do ar interior nas restantes salas estudadas (10, 13 e 16) oscila entre os 17°C e os 20°C;
- A utilização do modelo de Fanger mostra que, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), os espaços com as janelas viradas a sul são termicamente confortáveis, por valores positivos do índice PMV, enquanto os espaços com as janelas virados a este, norte e oeste são termicamente desconfortáveis durante a manhã e termicamente confortáveis durante a tarde, por valores negativos do índice PMV;
- Através da utilização do modelo adaptativo, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), verifica-se que todos os espaços são termicamente confortáveis. O espaço com as janelas viradas a sul por valores positivos do índice aPMV e os outros espaços por valores negativos do índice aPMV;
- A aplicação do modelo adaptativo em espaços com valores negativos do índice aPMV sugere que as condições de conforto são melhores que as previstas pelo modelo de Fanger. Contudo, a aplicação do modelo adaptativo em espaços com valores positivos do índice aPMV, em geral, sugere que as condições de conforto são ligeiramente piores do que as previstas pelo modelo de Fanger, embora se mantenham dentro da zona de conforto, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

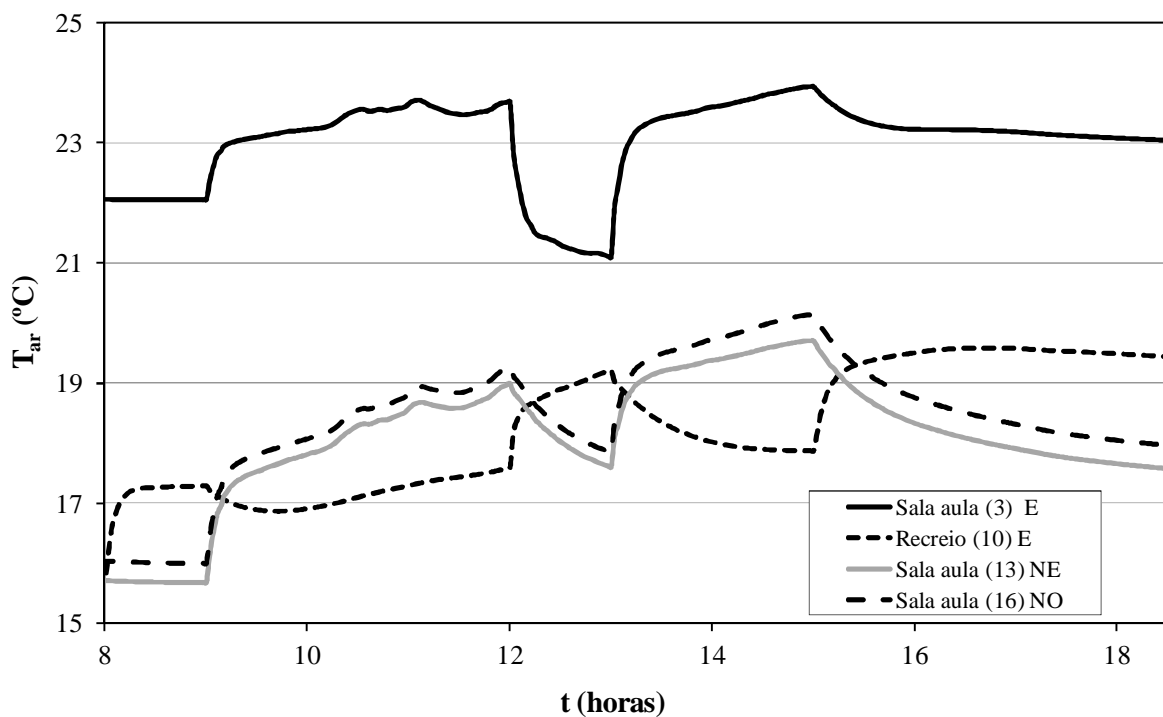


Figura 4.10 – Evolução da temperatura do ar interior (T_{ar}) calculada em condições de inverno (jardim-de-infância de Olhão).

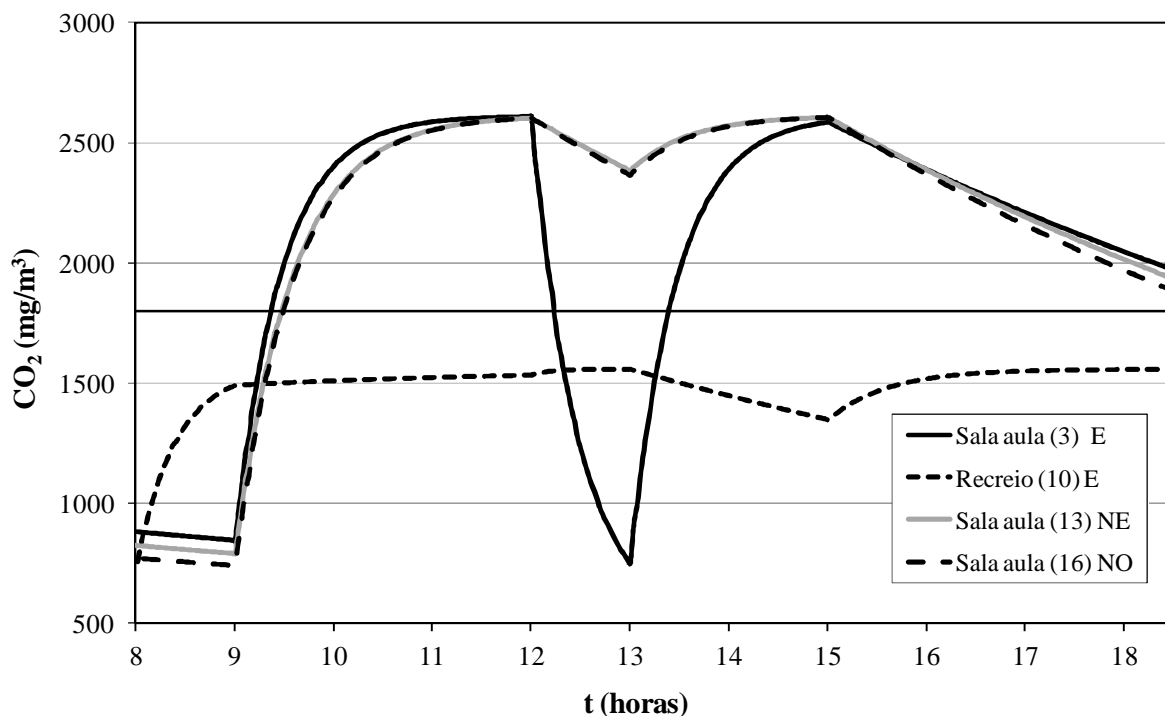


Figura 4.11 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) calculada em condições de inverno (jardim-de-infância Olhão). A linha horizontal representa o limite aceitável para o dióxido de carbono.

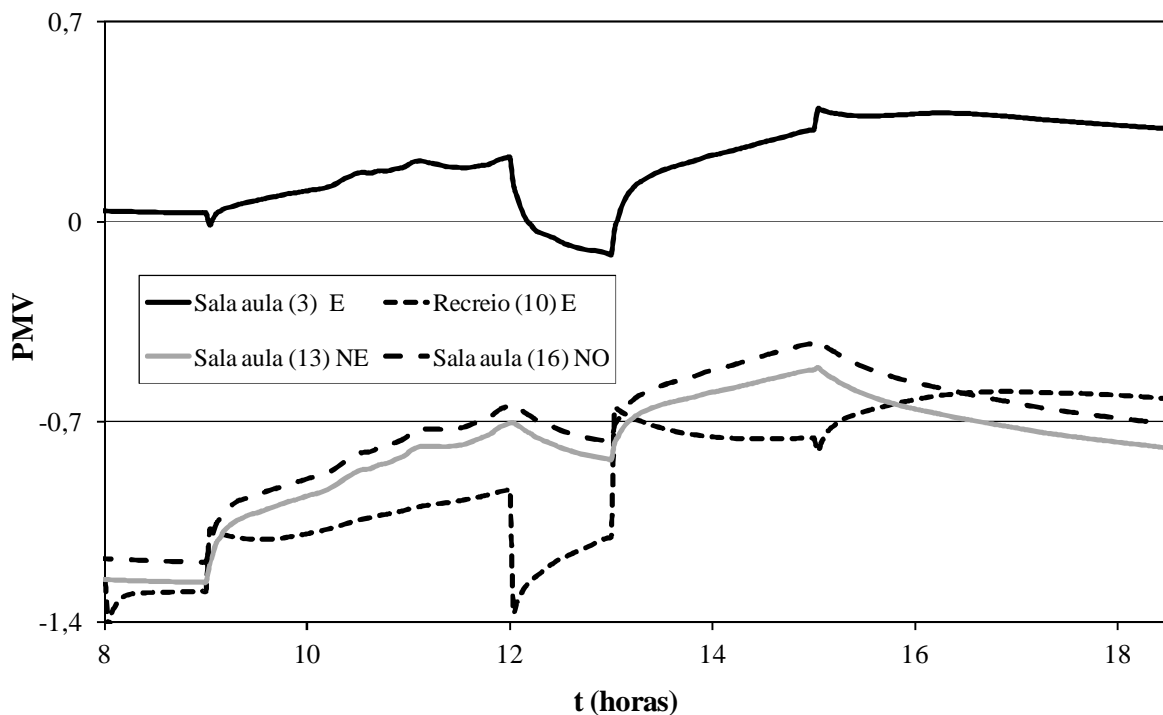


Figura 4.12 – Evolução do nível de conforto térmico (PMV) calculado em condições de inverno com o modelo de Fanger (jardim-de-infância de Olhão).

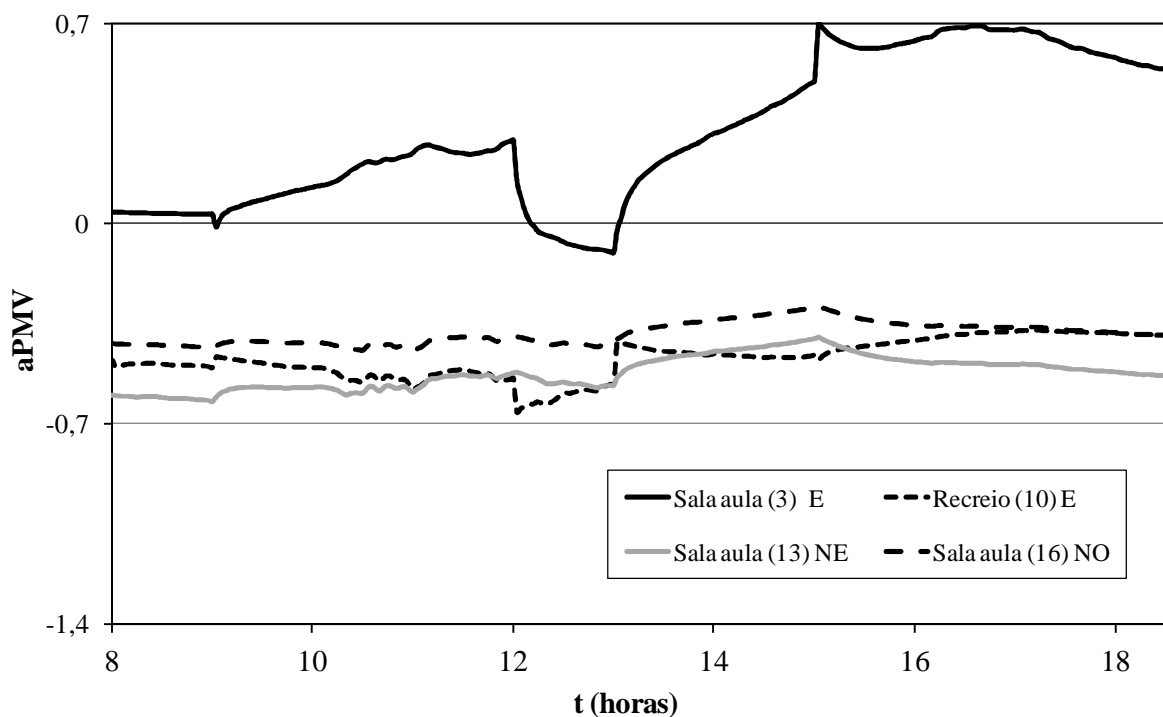


Figura 4.13 – Evolução do nível de conforto térmico (aPMV) calculado em condições de inverno com o modelo adaptativo (jardim-de-infância de Olhão).

4.2.4.3 Conforto térmico em condições de verão

Nas figuras 4.14 e 4.15 são apresentadas, respectivamente a evolução da temperatura do ar interior (T_{ar}) e da concentração do dióxido de carbono (CO_2) em condições de verão. Nas figuras 4.16 e 4.17 são apresentados o nível de conforto térmico a que os ocupantes estão sujeitos, respectivamente, de acordo com índice PMV (modelo de Fanger) e de acordo o índice aPMV (modelo adaptativo), em condições de verão.

De acordo com os resultados obtidos é possível concluir:

- O nível de qualidade do ar interior, avaliado por meio da concentração de dióxido de carbono, é aceitável, de acordo com a norma ANSI/ASHRAE 62.1 de 2010 e com o Decreto-Lei nº 79, de 04 de abril de 2006, em todos os espaços ocupados, o que se explica naturalmente devido à total abertura das janelas;
- A temperatura do ar interior em todas as salas é elevada, com uma variação entre os 28°C e os 35°C;
- O nível de conforto térmico, de acordo com o modelo de Fanger, é termicamente desconfortável por valores positivos do índice PMV em todos os espaços. O recreio interior apresenta os piores níveis de conforto porque duas das principais janelas estão sujeitas à radiação direta durante toda a manhã;
- A aplicação do modelo adaptativo, em geral, leva a condições de conforto térmico aceitáveis por valores positivos do índice aPMV, em torno dos +0,7.

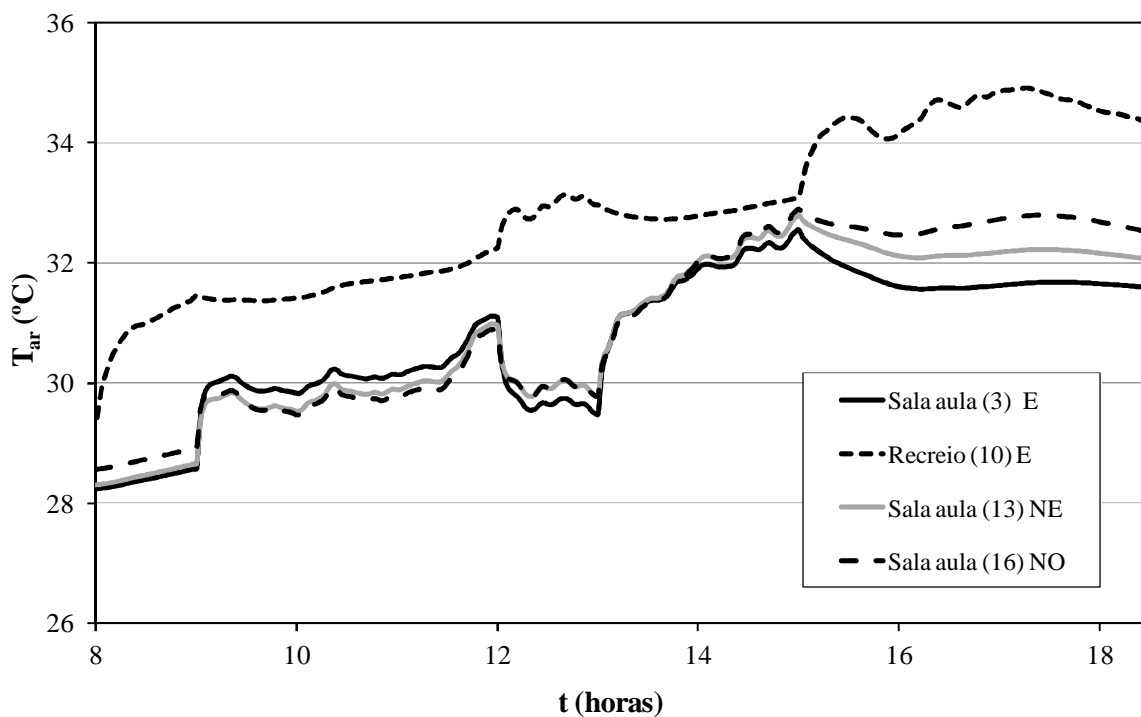


Figura 4.14 – Evolução da temperatura do ar interior (T_{ar}) calculada em condições de verão (jardim-de-infância de Olhão).

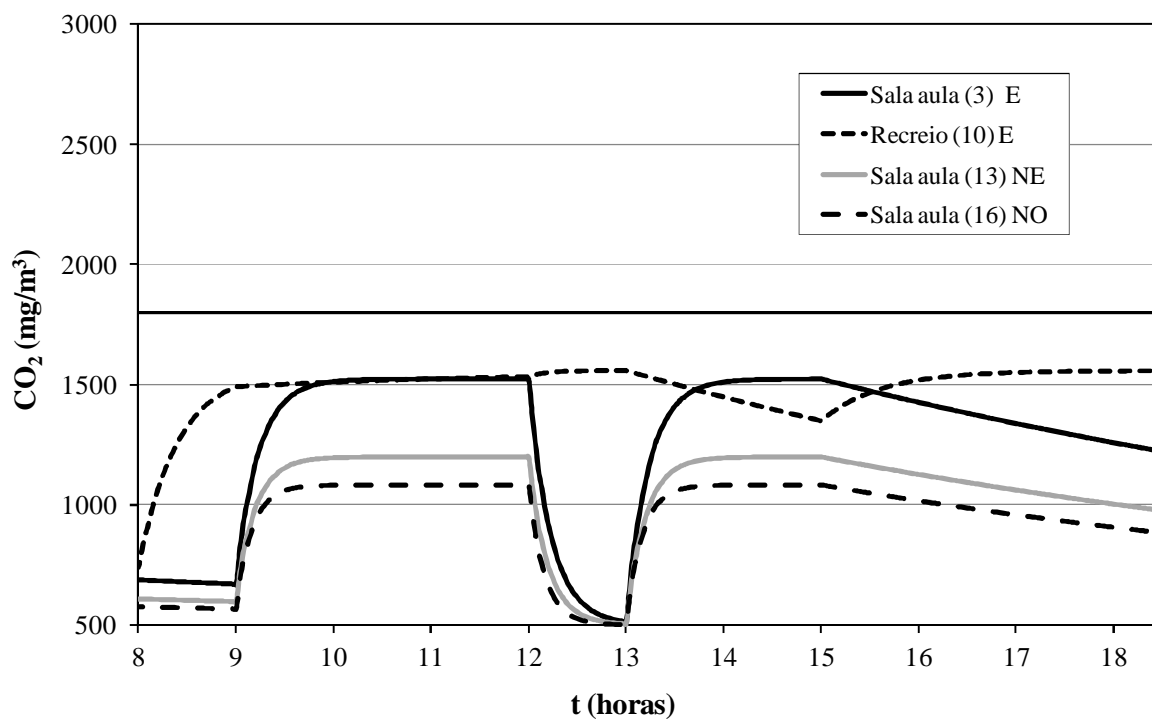


Figura 4.15 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) calculada em condições de verão (jardim-de-infância de Olhão). A linha horizontal representa o limite aceitável para o dióxido de carbono.

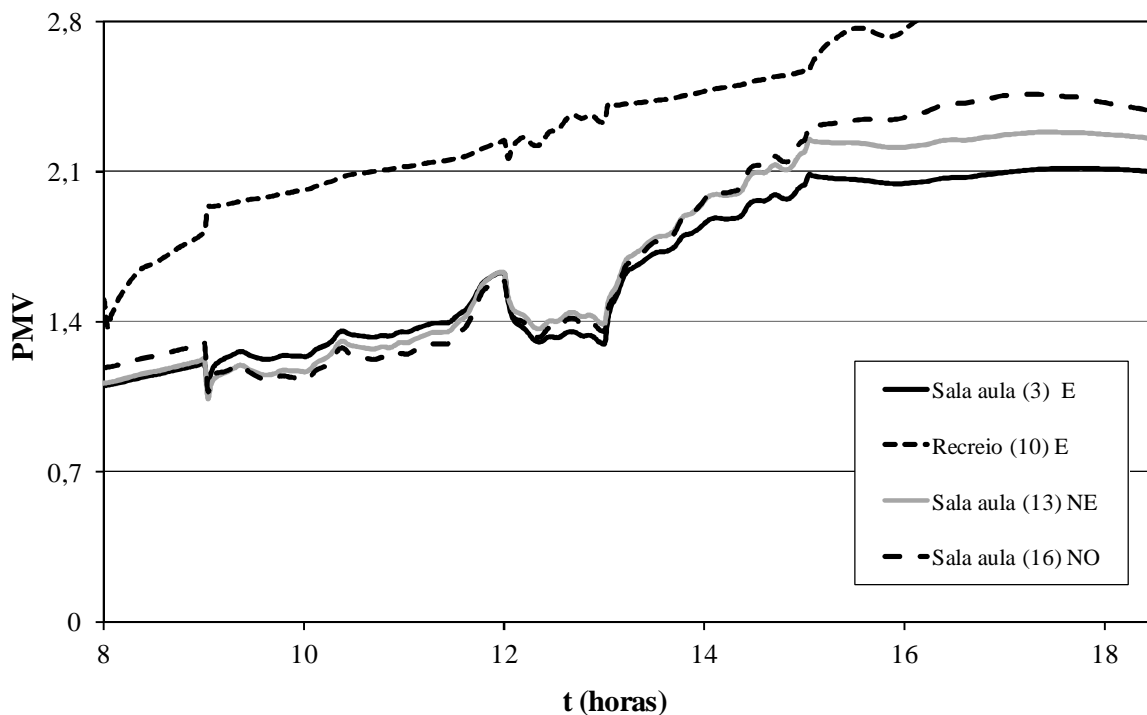


Figura 4.16 – Evolução do nível de conforto térmico (PMV) calculado em condições de verão com o modelo de Fanger (jardim-de-infância de Olhão).

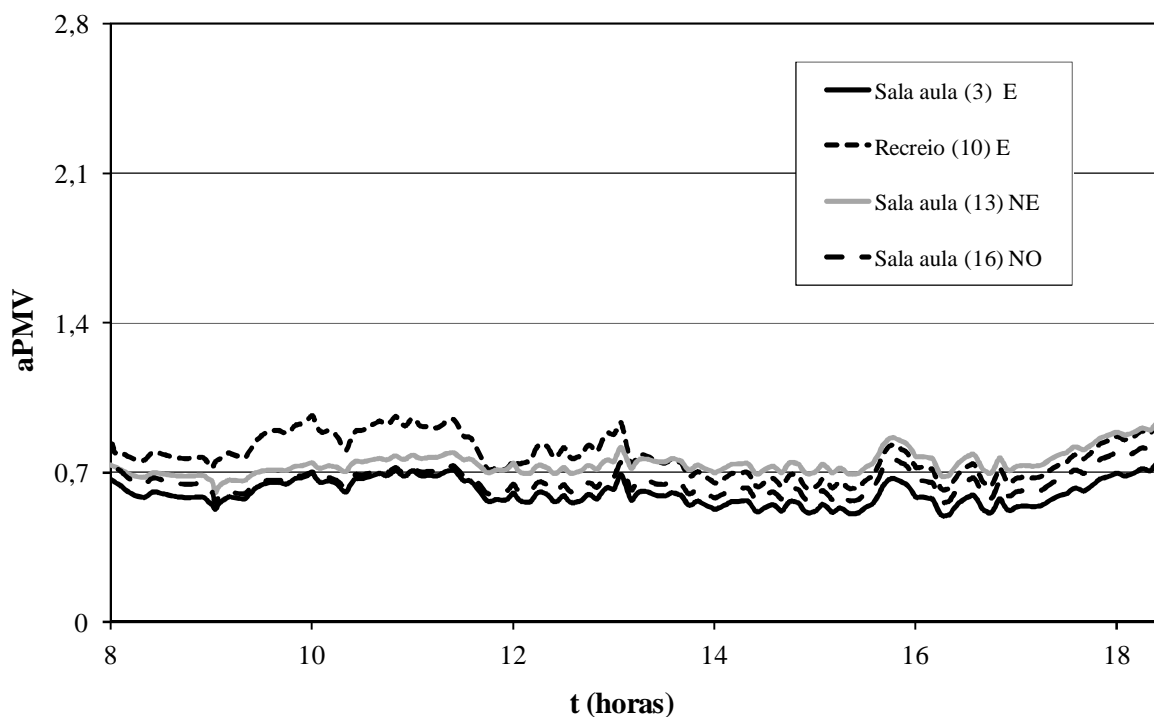


Figura 4.17 – Evolução do nível de conforto térmico (aPMV) calculado em condições de verão com o modelo adaptativo (jardim-de-infância de Olhão).

4.2.5 Estudo comparativo

A simulação numérica e os resultados experimentais mostram que em condições de temperaturas mais elevadas, os valores do índice aPMV são inferiores aos valores do índice PMV (entre 35 até 75%, conforme as salas e a hora do dia), o que significa que a sensação de conforto térmico dos ocupantes integrados num determinado ambiente pode indicar que estes sentem menos calor que o previsto pelo índice PMV de Fanger.

Em condições de temperaturas mais baixas, os valores do índice aPMV são superiores aos valores do índice PMV (entre 20 a 50%, conforme as salas), o que significa que a sensação de conforto térmico dos ocupantes integrados num determinado ambiente pode indicar que estes sentem menos frio que o previsto pelo índice PMV de Fanger.

Em condições de inverno, de acordo com os resultados numéricos, os valores do índice PMV em três salas (10, 13 e 16) mostram que estas salas são durante a maior parte do dia desconfortáveis, por valores negativos, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). Contudo, os valores do índice aPMV verificados nessas mesmas salas mantêm-se dentro dos limites aceitáveis de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). Na sala 3, pelo contrário, quer os valores do índice PMV, quer os valores do índice aPMV, mostram que esta sala é confortável, por valores positivos, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). No entanto, os valores do índice aPMV são ligeiramente superiores aos valores do índice PMV, porque, em condições de inverno, em espaços quentes, os ocupantes sentem mais calor do que na realidade existe. Esta sensação explica-se porque os ocupantes experimentam uma maior diferença entre a temperatura do espaço que consideram quente e a temperatura exterior.

De acordo com as taxas de renovação do ar utilizadas, o modelo adaptativo assegura, em condições de inverno, bons níveis de conforto térmico dentro da categoria C da ISO 7730 (2005) e, em condições de verão, assegura níveis aceitáveis de conforto térmico próximos da categoria C da ISO 7730 (2005). A qualidade do ar interior, em condições de verão é aceitável, com a concentração de dióxido de carbono abaixo dos 1500 mg/m^3 , o que se justifica por as janelas se encontrarem totalmente abertas. Em condições de inverno, porque as janelas se encontram apenas parcialmente abertas, a qualidade do ar interior não é aceitável, porque a concentração do dióxido de carbono, embora próxima, está acima do limite aceitável (1800 mg/m^3).

4.3 Aplicação dos índices PMV e aPMV em edifícios do 2º e 3º ciclo

4.3.1 Descrição do edifício

A escola analisada neste trabalho, Escola Básica 2/3 Poeta Emiliano da Costa, entrou em funcionamento no ano letivo 2001/02, está localizada em Estoi na zona centro sul do Algarve, próximo do mar, e destina-se a alunos do ensino do 2º e 3º ciclo, com idades típicas situadas entre os 10 e os 15 anos. Tem uma população de 403 alunos, 59 docentes e 25 não docentes. É constituída por 19 salas de aula, um refeitório, uma biblioteca, um pavilhão desportivo, um bar e salas destinadas a alunos, a professores, a pessoal não docente, à direção e aos serviços administrativos [Fonte: <http://cm-faro.algarvedigital.pt/4906/escola-eb23-poeta-emiliano-da-costa.aspx>; acedido em 7/10/16].

O esquema tridimensional da escola analisada está apresentado na figura 4.18.

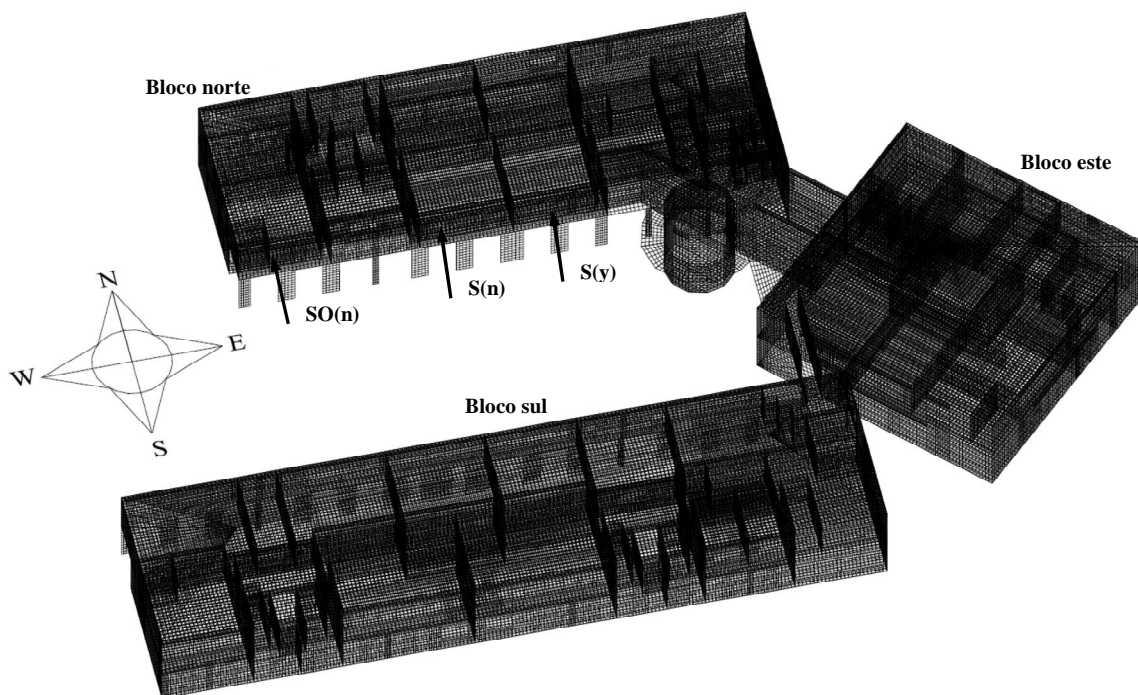


Figura 4.18 – Esquema tridimensional da escola básica 2/3 de Estoi.

A região apresenta características ambientais do tipo mediterrânico. Em geral, os valores das variáveis externas (radiação solar e temperatura do ar) são muito elevados durante o verão, são relativamente elevados durante a primavera e outono e, em geral, não são muito baixos durante o inverno.

Habitualmente, as salas de aula na região do Algarve não estão equipadas com sistemas de ar condicionado. O sistema de ventilação principal funciona naturalmente usando uma metodologia de ventilação cruzada. Em geral, a ventilação é garantida por pequenas janelas, colocadas acima do nível das portas e das janelas principais, ou pelas janelas principais e a porta (Conceição *et al.*, 2008a). As cortinas interiores, localizadas apenas à frente das janelas principais, ou os dispositivos sombreadores externos são utilizados quando as janelas estão sujeitas à incidência da radiação solar, de modo a reduzir o nível da temperatura do ar interior.

4.3.2 Metodologia experimental

Neste trabalho recorre-se à informação ambiental do interior e do exterior da escola obtida remotamente, durante todo o ano, por um sistema de aquisição de dados implementado no edifício escolar. A informação obtida permite monitorizar exaustivamente o comportamento térmico da escola perante todas as condições ambientais verificadas ao longo do ano. Para este efeito, a escola está equipada com:

- Sensores interiores, colocados em salas estratégicas do edifício, que medem a temperatura do ar interior, a humidade relativa do ar, que registam o estado das janelas e das portas (abertas/fechadas) e o estado do sistema AVAC (ligado/desligado);
- Um equipamento exterior que consiste numa estação meteorológica composta por um sistema Envirodata e sensores para medições da temperatura do ar, da humidade relativa do ar, da radiação solar, da velocidade do vento e da direcção do vento.

A informação transmitida pelos sensores foi recolhida localmente num computador constituído por um processador AMD Athalon de 2 GHz, com 512 MB de RAM, e por um disco de 80 GB. A taxa de amostragem utilizada para todas as variáveis foi um minuto. Foram utilizados também 5 *data-loggers*: dois, os mais próximos do computador, comunicam com ele via RS-232, os outros, mais distantes, empregam a rede Ethernet TCP/IP disponível na escola.

Os dados armazenados no computador são automaticamente transferidos, hora a hora, via internet, para um servidor de dados localizado na universidade do Algarve. Este servidor armazena todos os dados e torna-os disponíveis aos utilizadores via um interface WEB. O interface permite ao utilizador seleccionar os sensores relevantes, o tempo de duração das leituras e o formato dos dados. Uma descrição mais detalhada do sistema remoto de aquisição de dados pode ser consultada em Ruano *et al.*, (2006).

Os dados experimentais são medidos em 9 compartimentos: 4 salas de aula, 1 auditório, 1 secretaria, 1 gabinete, 1 sala de professores e uma biblioteca. Os valores da temperatura do ar e da humidade relativa do ar são medidos acima do nível da cabeça, por sensores colocados na área central do espaço em estudo. Neste estudo apenas são avaliadas 3 salas de aula, ocupadas por estudantes.

Na tabela 4.6 são apresentadas as características das 3 salas seleccionadas. As salas estudadas situam-se no 1º piso do bloco norte e estão assinaladas na figura 4.18. Os espaços avaliados não possuem ar condicionado.

Em cada espaço o conforto térmico é avaliado usando o nível de vestuário, o nível de actividade, a disposição das cortinas interiores e o sistema de ventilação natural. No sistema de ventilação natural é possível abrir ou fechar a porta, as janelas principais e as pequenas janelas colocadas acima da porta e das janelas principais.

Tabela 4.6 – Características das salas de aula seleccionadas.

| Sala de aula | Sala de aula S(n) | Sala de aula SO(n) | Sala de aula S(y) |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Volume (m ³) | 181,44 | 175,94 | 124,82 |
| Área das janelas (m ²) | 14,04 | 11,40 | 9,36 |
| Direcção das janelas | sul | sul e oeste | sul |

Os compartimentos apresentam as seguintes características:

- *Sala de aula S(n)*: as janelas, viradas a sul (S), são protegidas por cortinas interiores opacas e a porta principal está em contacto com o corredor interior. O espaço é ocupado, em geral, por alunos e um professor. Esta sala não está equipada com computadores (n).
- *Sala de aula SO(n)*: as janelas, viradas a sul e a oeste (SO), são protegidas por cortinas interiores opacas e a porta principal está em contacto com o corredor interior. O espaço é ocupado, em geral, por alunos e um professor. Esta sala não está equipada com computadores (n).
- *Sala de aula S(y)*: as janelas, viradas a sul (S), são protegidas por cortinas interiores opacas e a porta principal está em contacto com o corredor interior. O espaço é ocupado, em geral, por alunos e um professor. Esta sala está equipada com computadores (y), que geram também uma carga calorífica.

No presente estudo são utilizadas as três principais topologias:

- *Topologia A* – A porta e todas as janelas principais e as pequenas janelas situadas acima do nível da porta e das janelas principais estão fechadas. A recirculação interna do ar é verificada durante os intervalos em que a porta está aberta;
- *Topologia B* – A porta e as janelas principais estão fechadas e as pequenas janelas situadas acima do nível da porta e das janelas principais estão abertas;
- *Topologia C* – A porta e as janelas principais estão abertas.

Nos ensaios experimentais a temperatura média radiante é considerada igual à temperatura média do ar e a velocidade média do ar no interior da sala de aulas é medida experimentalmente para as diferentes topologias consideradas. As velocidades médias do ar, medidas no interior dos compartimentos, são 0 m/s (topologia A), 0,17 m/s (topologia B) e 0,58 m/s (topologia C) (Conceição *et al.*, 2008a).

O nível de actividade dos ocupantes considerado está de acordo com o apresentado no ponto 4.1.5.

O nível de vestuário dos ocupantes, obtido a partir da media da soma do nível de isolamento das diferentes peças de vestuário referidas pelos respondentes aos questionários, toma os seguintes valores neste estudo: 0,39 clo, 0,68 clo, 0,75 clo e 1,30 clo. Estes valores dependem das condições ambientais do mês que se está a avaliar.

Na tabela 4.7, são apresentados o nível de vestuário e a velocidade média do ar considerados na simulação numérica efetuada para avaliar o nível de conforto térmico dos ocupantes do edifício ao longo de um ano.

Tabela 4.7 – Condições ambientais e nível de vestuário usados neste estudo.

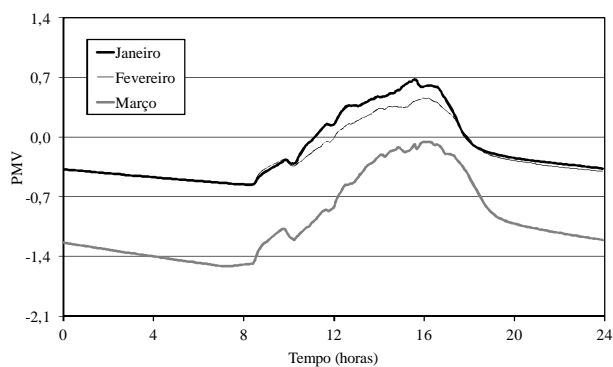
| Mês | Velocidade do ar (m/s) | Nível de vestuário (clo) |
|-----------|------------------------|--------------------------|
| Janeiro | 0,00 | 1,30 |
| Fevereiro | 0,00 | 1,30 |
| Março | 0,17 | 0,75 |
| Abril | 0,17 | 0,75 |
| Maio | 0,17 | 0,68 |
| Junho | 0,58 | 0,39 |
| Julho | 0,58 | 0,39 |
| Agosto | 0,58 | 0,39 |
| Setembro | 0,58 | 0,39 |
| Outubro | 0,17 | 0,68 |
| Novembro | 0,17 | 0,75 |
| Dezembro | 0,00 | 1,30 |

4.3.3 Apresentação e discussão de resultados

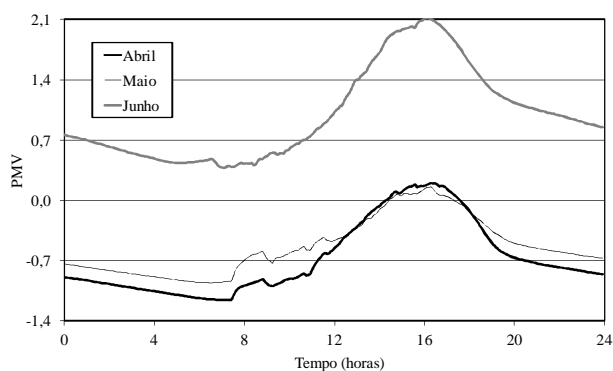
Neste ponto são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de Fanger e da aplicação do modelo adaptativo.

4.3.3.1 Aplicação do modelo de Fanger

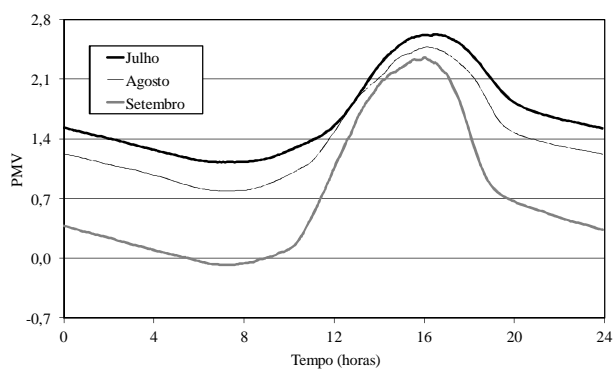
Nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21 são apresentadas a evolução do índice PMV durante todo o ano para, respectivamente, as salas de aula S(n), SO(n) e S(y). Em todas as figuras os resultados mostram o valor médio mensal do índice PMV. Neste estudo mediram-se, diariamente, minuto a minuto, a temperatura do ar e a humidade relativa do ar interior durante um ano. Considerou-se a temperatura média radiante igual à temperatura do ar interior e os valores da velocidade do ar e do nível de vestuário dados pela tabela 4.7. O nível de atividade considerado é igual 1,2 met. Diariamente foi calculado, minuto a minuto, o valor do índice PMV e obtido o seu valor médio diário a partir destes valores. A média mensal do índice PMV corresponde à média dos valores do índice PMV obtidos diariamente.



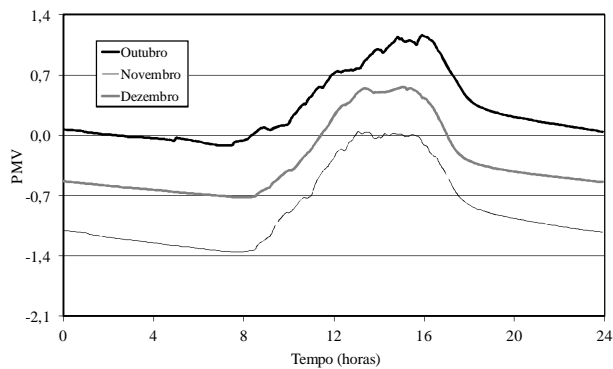
a) 1º Trimestre



b) 2º Trimestre

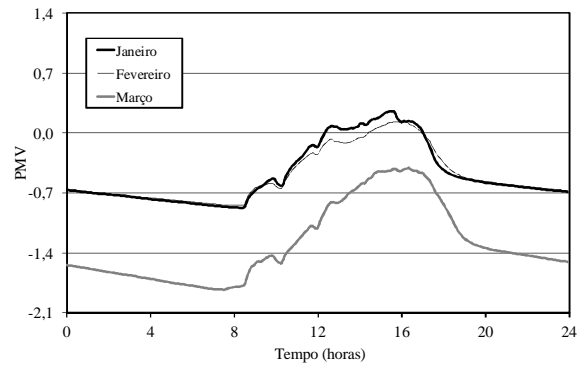


c) 3º Trimestre

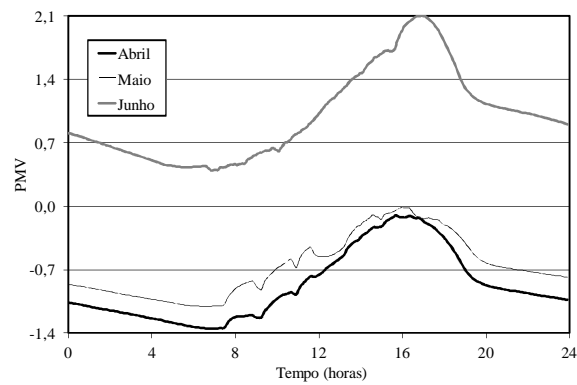


d) 4º Trimestre

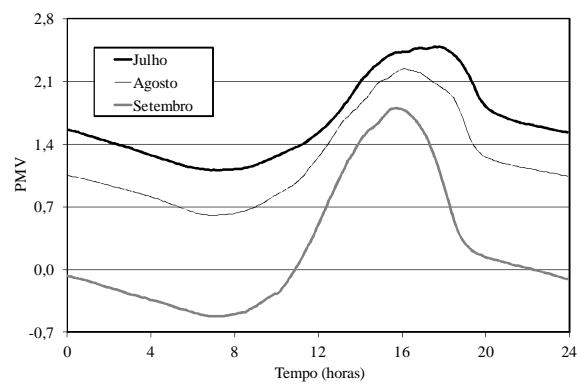
Figura 4.19 – Evolução do índice PMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(n) da escola básica 2/3 de Estoi.



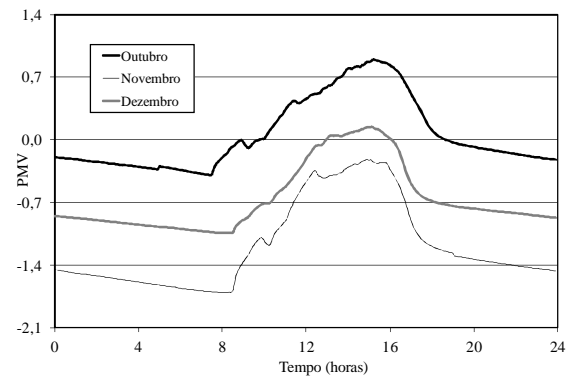
a) 1º Trimestre



b) 2º Trimestre

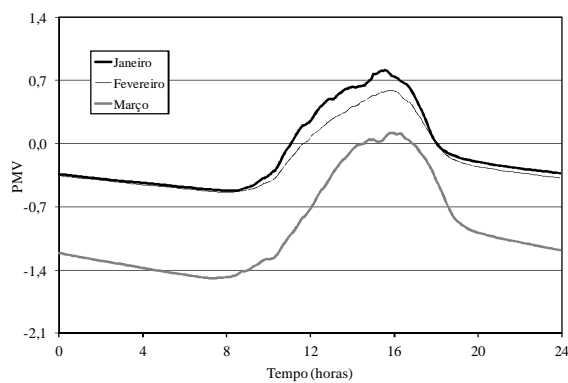


c) 3º Trimestre

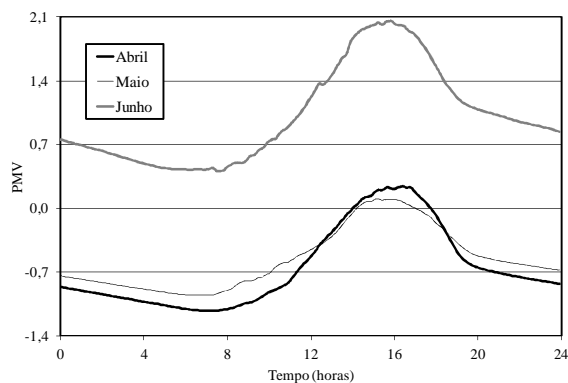


d) 4º Trimestre

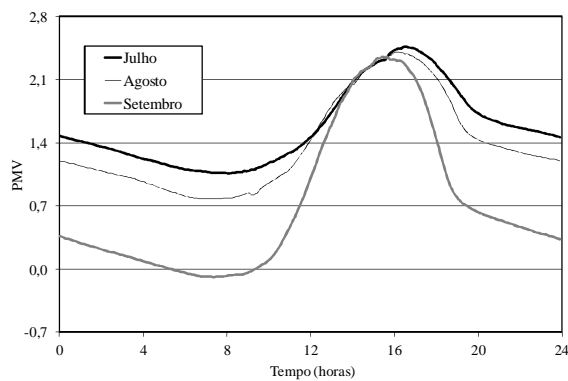
Figura 4.20 – Evolução do índice PMV, durante todo o ano, para a sala de aula SO(n) da escola básica 2/3 de Estoi.



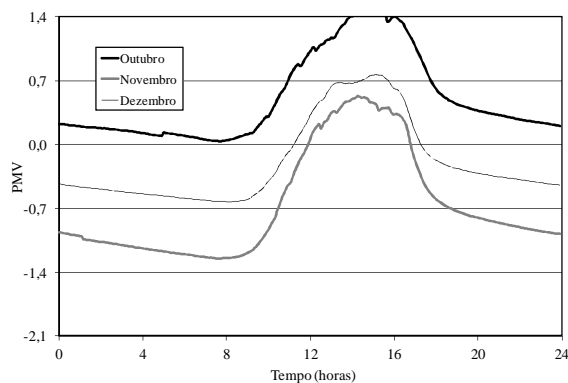
a) 1º Trimestre



b) 2º Trimestre



c) 3º Trimestre



d) 4º Trimestre

Figura 4.21 – Evolução do índice PMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(y) da escola básica 2/3 de Estói.

Em janeiro e em fevereiro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é aceitável, em geral, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). De manhã por valores negativos do índice PMV e à tarde por valores positivos do índice PMV.

Em março, abril e maio o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é genericamente aceitável na parte da tarde, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores negativos do índice PMV. De manhã, o nível de conforto térmico nas salas de aula estudadas é inaceitável (por valores negativos do índice PMV), de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

Em junho, julho, agosto e setembro o nível de conforto térmico nas salas estudadas é, de um modo geral, inaceitável, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores positivos do índice PMV.

Em outubro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é aceitável de manhã, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores positivos do índice PMV. De tarde, o nível de conforto térmico nas salas estudadas é inaceitável (por valores positivos do índice PMV), de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

Em novembro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n) e SO(n) é aceitável de tarde, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores negativos do índice PMV. De manhã, o nível de conforto térmico nessas salas é inaceitável (por valores negativos do índice PMV), de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). Na sala de aula S(y) o nível de conforto térmico é aceitável, em geral, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005); de manhã por valores negativos do índice PMV, enquanto de tarde por valores positivos do índice PMV.

Em dezembro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é aceitável, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005): de manhã por valores negativos do índice PMV, enquanto de tarde por valores positivos do índice PMV.

4.3.3.2 Aplicação do modelo adaptativo

Nas figuras 4.22, 4.23 e 4.24 são apresentadas a evolução do índice aPMV durante todo o ano para, respectivamente, as salas de aula S(n), SO(n) e S(y). Em todas as figuras, os resultados mostram o valor médio mensal do índice aPMV.

Para além dos valores dos parâmetros medidos, necessários para obter o índice aPMV, foi também medido, minuto a minuto, o valor da temperatura do ar exterior. Para cada valor da

temperatura exterior, o coeficiente adaptativo λ é calculado, minuto a minuto, de acordo com a equação obtida para este edifício. Diariamente foi calculado, minuto a minuto, o valor do índice aPMV, através da equação (15), e obtido o valor médio diário a partir destes valores. A média mensal do índice aPMV corresponde à média dos valores do índice aPMV obtidos diariamente.

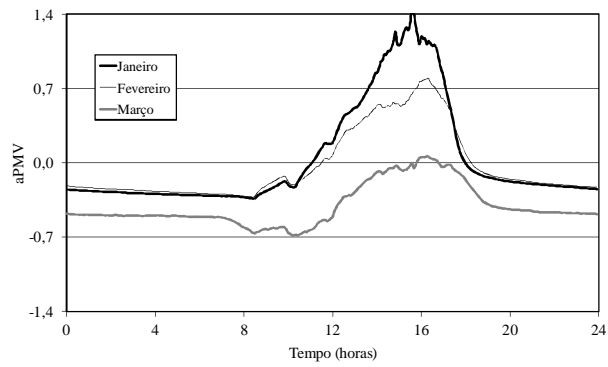
Em janeiro e fevereiro o nível de conforto térmico nas salas de aula SO(n) e S(y) é aceitável, em geral, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). Na sala de aula SO(n), de manhã são obtidos valores negativos do índice aPMV, enquanto de tarde são obtidos valores positivos do índice aPMV. Na sala de aula S(y), durante todo o dia, são obtidos valores positivos do índice aPMV. Na sala S(n), de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), o nível de conforto em janeiro é aceitável de manhã, por valores positivos do índice aPMV, e inaceitável de tarde, por valores positivos do índice aPMV, enquanto que em fevereiro é aceitável, por valores negativos do índice aPMV de manhã e por valores positivos do índice aPMV de tarde.

Em março e abril o nível de conforto térmico na sala de aula S(n) é geralmente aceitável durante todo o dia, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores negativos do índice aPMV. O nível de conforto térmico na sala de aula SO(n) é aceitável de tarde por valores negativos do índice aPMV, enquanto de manhã é inaceitável por valores negativos do índice aPMV, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). O nível de conforto térmico na sala de aula S(y) é aceitável durante todo o dia: de manhã, por valores negativos do índice aPMV, enquanto de tarde por valores positivos do índice aPMV, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

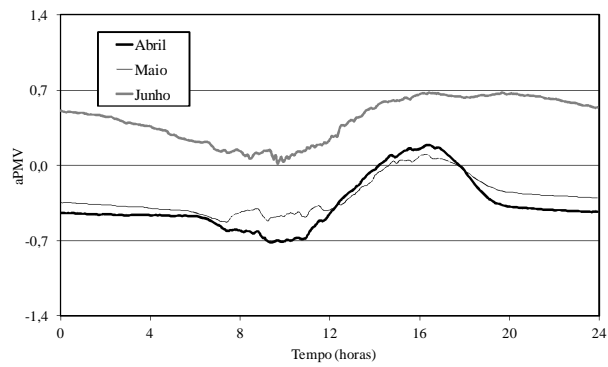
Em maio o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é geralmente aceitável durante todo o dia, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), obtendo-se valores negativos do índice aPMV.

Em junho, julho, agosto e outubro o nível de conforto térmico nas salas de aula estudadas é, em geral, aceitável, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores positivos do índice aPMV.

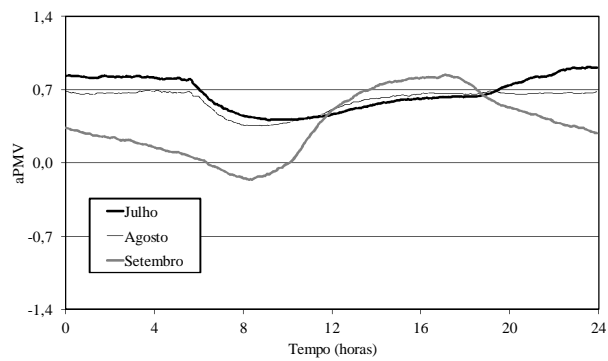
Em setembro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é aceitável durante todo o dia, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), por valores positivos do índice aPMV, exceto na sala de aula SO(n) durante a manhã, por valores negativos do índice aPMV.



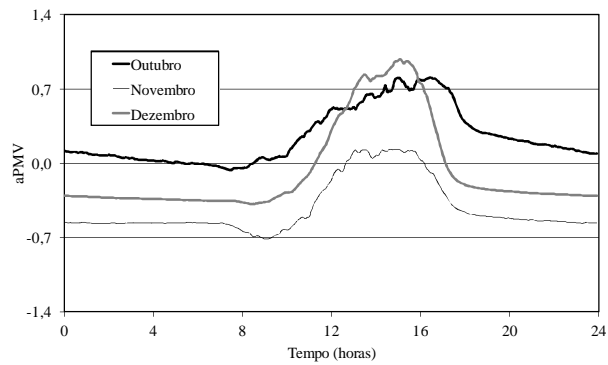
a) 1º Trimestre



b) 2º Trimestre

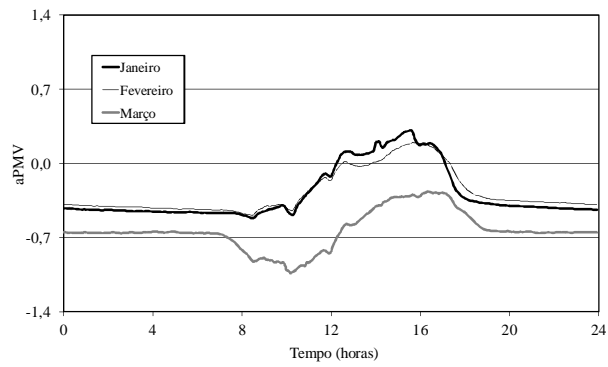


c) 3º Trimestre

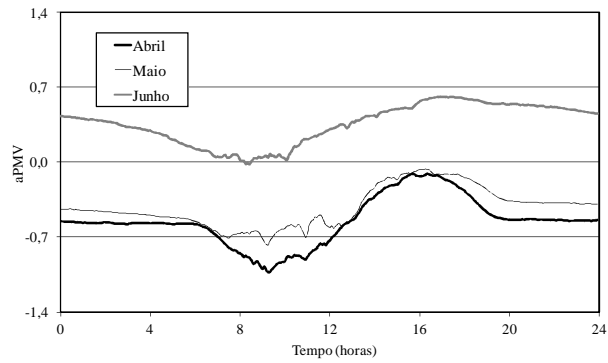


d) 4º Trimestre

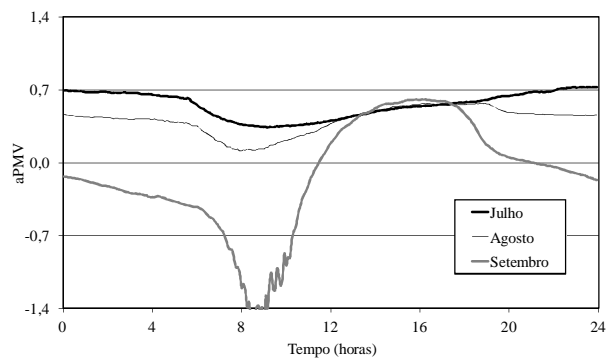
Figura 4.22 – Evolução do índice aPMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(n) da escola básica 2/3 de Estoi.



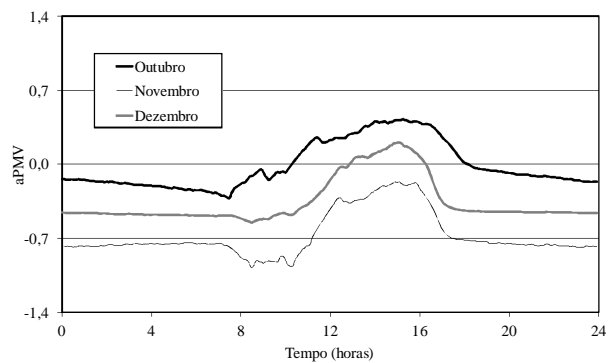
a) 1º Trimestre



b) 2º Trimestre

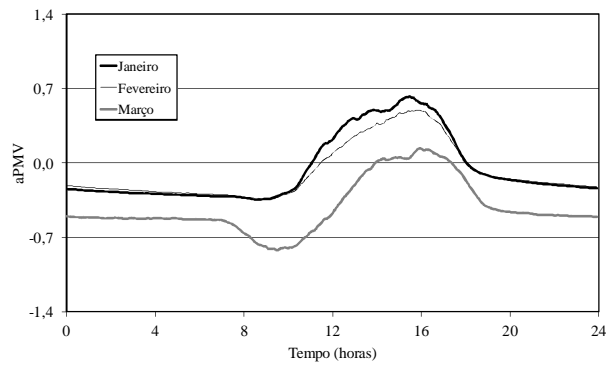


c) 3º Trimestre

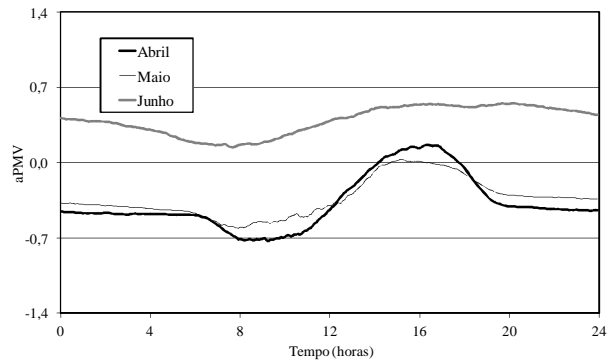


d) 4º Trimestre

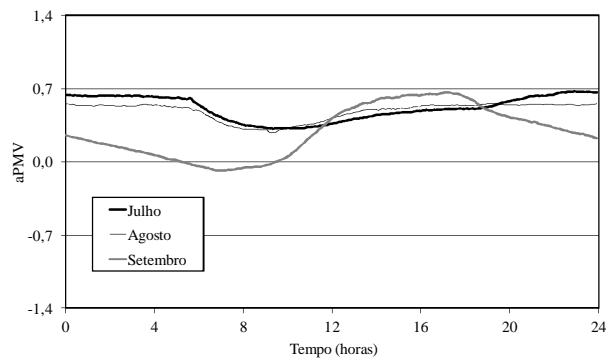
Figura 4.23 – Evolução do índice aPMV, durante todo o ano, para a sala de aula SO(n) da escola básica 2/3 de Estoi.



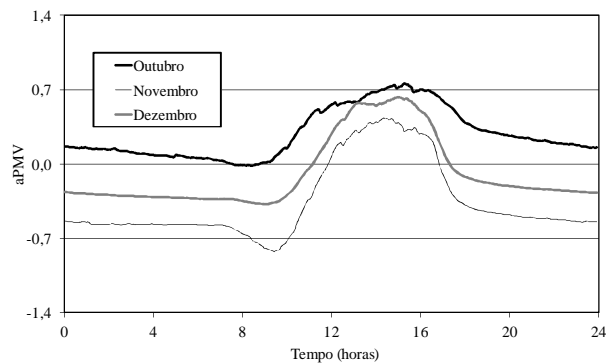
a) 1º Trimestre



b) 2º Trimestre



c) 3º Trimestre



d) 4º Trimestre

Figura 4.24 – Evolução do índice aPMV, durante todo o ano, para a sala de aula S(y) da escola básica 2/3 de Estoi.

Em novembro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n) e S(y) é aceitável, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005), de manhã por valores negativos do índice aPMV e de tarde por valores positivos do índice aPMV. Na sala de aula SO(n) o nível de conforto térmico é aceitável de tarde (por valores negativos do índice aPMV), mas é inaceitável de manhã (por valores negativos do índice aPMV), de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

Em dezembro o nível de conforto térmico nas salas de aula S(n), SO(n) e S(y) é aceitável, em geral, de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). De manhã são obtidos valores negativos do índice aPMV nas salas de aula SO(n) e S(y) e valores positivos do índice aPMV na sala de aula S(n), enquanto de tarde são obtidos valores positivos do índice aPMV nestas três salas.

Em geral, nas salas de aula estudadas, o nível de conforto térmico obtido é melhor quando se utiliza o índice aPMV do que quando se utiliza o índice PMV, sendo aceitável em quase todos os meses de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005).

4.4 Aplicação dos índices PMV e aPMV em edifícios universitários

4.4.1 Descrição do edifício

Neste estudo serão apresentados e discutidos os resultados numéricos da simulação do comportamento térmico e do consumo de energia de um edifício universitário. A simulação foi efetuada para três situações: sem controlo dos sistemas AVAC, com controlo dos sistemas AVAC através do índice PMV (modelo de Fanger) e com controlo dos sistemas AVAC através do índice aPMV (modelo adaptativo).

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, e atualmente conta com uma população de aproximadamente 8500 estudantes, 800 docentes e 400 funcionários (Ualg, 2012).

O Campus de Gambelas (ver figura 4.25), onde o edifício em estudo se insere, localiza-se na periferia da cidade de Faro, e é envolvido a sul e a oeste pela Mata do Pontal (zona protegida, pertencente à área do Parque Natural da Ria Formosa). Na zona norte localizam-se campos agrícolas, não intensivos, e a este localiza-se o povoado de Gambelas.

Os edifícios principais do Campus de Gambelas são as Faculdades de Ciências Humanas e Sociais (edifício 1), de Ciências e Tecnologia (edifícios 1, 2, 7 e 8) e de Economia (edifício

9), o Complexo Pedagógico (edifício 3), a Biblioteca (edifício 6) e a Cantina (edifício 5), como se apresenta na figura 4.25.



Figura 4.25 – Imagem aérea do Campus de Gambelas, com identificação dos edifícios em estudo (Fonte: <http://www.bing.com/maps/>, acessado a 15/12/2012).

Estes edifícios caracterizam-se pela ocupação quase exclusiva durante o dia e são frequentados diariamente por discentes, docentes e funcionários de toda a comunidade universitária.

Os edifícios, ainda que arquitetonicamente semelhantes, possuem tipologia diferenciada e complexa, de acordo com o fim a que se destinam. O consumo de energia é elevado e maioritariamente está associado ao uso de sistemas AVAC e à iluminação.

O consumo de energia elétrica ativa passou de aproximadamente 4,66 MWh para aproximadamente 5,38 MWh, entre os anos de 2003 e 2013, o que corresponde a um crescimento de cerca de 15,5%. No mesmo período, os custos com o consumo de energia passaram de aproximadamente €300000 para aproximadamente €735000, o que corresponde a um aumento de cerca de 145%, enquanto a parcela dos custos correspondentes aos consumos de energia elétrica ativa passou de aproximadamente €240000 para aproximadamente €460000, ou seja, a um crescimento dos custos de consumo próximo dos 92% (Sousa, 2014).

Na figura 4.26 pode observar-se o desenho em 3D assistido por computador do edifício em estudo: faculdade de ciência e tecnologia (fct-8) e faculdade de economia (fe-9).

O estudo numérico realizado foi sobre o edifício com a numeração 8 e 9 do Campus de Gambelas da Universidade do Algarve (ver a figura 4.27, onde é apresentado o esquema tridimensional do edifício). Este edifício é essencialmente constituído por salas de aulas, laboratórios e gabinetes. O edifício, com três pisos, é constituído por 341 compartimentos, 404 corpos transparentes (janelas) e 2900 corpos opacos (paredes interiores e exteriores, placas, chão, telhado e portas).

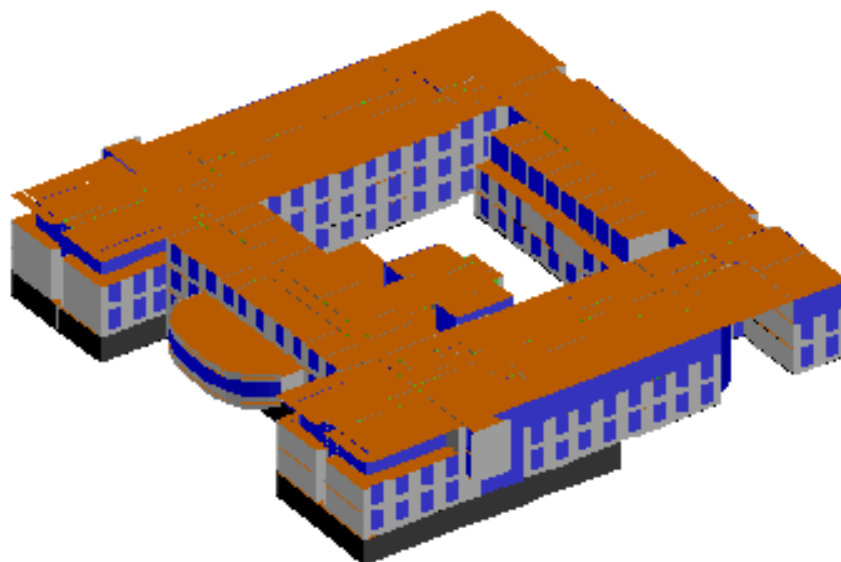


Figura 4.26 – Desenho em 3D assistido por computador, para o edifício em estudo: fct-8 e fe-9.

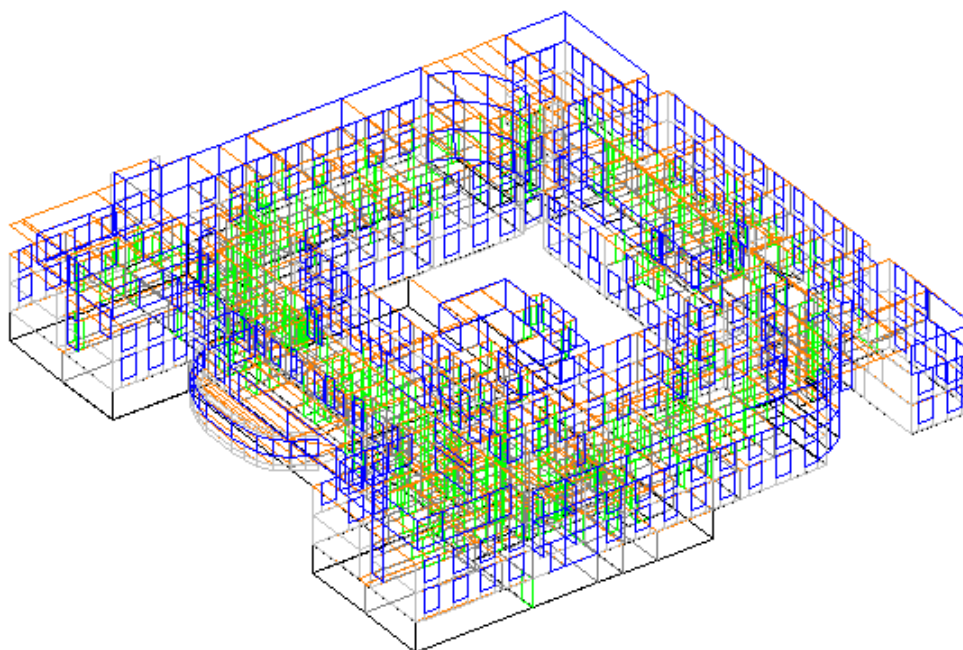


Figura 4.27 – Esquema tridimensional do edifício 8 e 9 do Campus de Gambelas.

4.4.2 Introdução de dados no modelo numérico

Dados meteorológicos

Os dados de entrada referentes às condições meteorológicas exteriores utilizados na simulação numérica, nomeadamente, a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a velocidade do vento e a direção do vento, foram obtidos por uma estação meteorológica instalada no próprio edifício em estudo. Mais pormenores podem ser consultados no ponto 4.1.1.

Ciclo de ocupação

Na tabela 4.8 é apresentada a evolução da ocupação dos espaços analisados: 13 salas de aulas (compartimentos 117, 118, 119, 120, 121, 122, 163, 165, 166, 210, 212, 244 e 339), 1 sala de desenho (compartimento 344) e 1 sala de arquitetura (compartimento 130). As salas escolhidas apresentam as seguintes orientações:

- Este: salas 118, 120, 122, 165, 210, 212 e 339;
- Oeste: salas 117, 119, 121, 130, 163 e 166;
- Sudeste: 244;
- Sudoeste: 344.

As salas foram consideradas ocupadas na sua máxima capacidade e durante todo o dia entre as 8:30 e as 20:30 horas. Foram também considerados intervalos de 15 minutos entre as aulas e que neste período as salas estavam desocupadas.

Tabela 4.8 – Evolução da ocupação nos espaços analisados.

| Espaços | 0 - 8:30 | 8:30 - 10:00 | 10:00 - 10:15 | 10:15 - 11:45 | 11:45 - 12:00 | 12:00 - 13:30 | 13:30 - 13:45 | 13:45 - 15:15 | 15:15 - 15:30 | 15:30 - 17:00 | 17:00 - 17:15 | 17:15 - 18:45 | 18:45 - 19:00 | 19:00 - 20:30 | 20:30 - 24:00 |
|--------------------|----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 117, 118, 339 | 0 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 | 0 | 24 | 0 |
| 119, 120, 121, 122 | 0 | 56 | 0 | 56 | 0 | 56 | 0 | 56 | 0 | 56 | 0 | 56 | 0 | 56 | 0 |
| 130 | 0 | 60 | 0 | 60 | 0 | 60 | 0 | 60 | 0 | 60 | 0 | 60 | 0 | 60 | 0 |
| 163, 166, 210, 212 | 0 | 32 | 0 | 32 | 0 | 32 | 0 | 32 | 0 | 32 | 0 | 32 | 0 | 32 | 0 |
| 165 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 | 70 | 0 |
| 244, 344 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 | 20 | 0 |

Topologia de ventilação

De acordo com a topologia de ventilação apresentada na tabela 4.2 do ponto 4.1.3, o caudal volúmico do ar utilizado nas condições de inverno e de verão nos espaços ocupados, para os intervalos de tempo considerados, está presente na tabela 4.9. Nesta tabela são apresentados os valores correspondentes às trocas entre as salas e o exterior e vice-versa. O caudal volúmico é calculado em função da taxa de renovação e do volume das salas.

Tabela 4.9 – Caudal volúmico de ar (m³/s) utilizado em condições de verão e de inverno para os diferentes espaços analisados.

| Espaços | 0 - 8:30 | 8:30 - 10:00 | 10:00 - 10:15 | 10:15 - 11:45 | 11:45 - 12:00 | 12:00 - 13:30 | 13:30 - 13:45 | 13:45 - 15:15 | 15:15 - 15:30 | 15:30 - 17:00 | 17:00 - 17:15 | 17:15 - 18:45 | 18:45 - 19:00 | 19:00 - 20:30 | 20:30 - 24:00 |
|---------|----------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 | 0,117 | 0,059 |
| 118 | 0,060 | 0,117 | 0,060 | 0,117 | 0,060 | 0,117 | 0,060 | 0,117 | 0,060 | 0,117 | 0,060 | 0,117 | 0,060 | 0,117 | 0,060 |
| 119 | 0,086 | 0,272 | 0,086 | 0,272 | 0,086 | 0,272 | 0,086 | 0,272 | 0,086 | 0,272 | 0,086 | 0,272 | 0,086 | 0,272 | 0,086 |
| 120 | 0,088 | 0,272 | 0,088 | 0,272 | 0,088 | 0,272 | 0,088 | 0,272 | 0,088 | 0,272 | 0,088 | 0,272 | 0,088 | 0,272 | 0,088 |
| 121 | 0,092 | 0,272 | 0,092 | 0,272 | 0,092 | 0,272 | 0,092 | 0,272 | 0,092 | 0,272 | 0,092 | 0,272 | 0,092 | 0,272 | 0,092 |
| 122 | 0,091 | 0,272 | 0,091 | 0,272 | 0,091 | 0,272 | 0,091 | 0,272 | 0,091 | 0,272 | 0,091 | 0,272 | 0,091 | 0,272 | 0,091 |
| 130 | 0,082 | 0,292 | 0,082 | 0,292 | 0,082 | 0,292 | 0,082 | 0,292 | 0,082 | 0,292 | 0,082 | 0,292 | 0,082 | 0,292 | 0,082 |
| 163 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 |
| 165 | 0,128 | 0,340 | 0,128 | 0,340 | 0,128 | 0,340 | 0,128 | 0,340 | 0,128 | 0,340 | 0,128 | 0,340 | 0,128 | 0,340 | 0,128 |
| 166 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 |
| 210 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 | 0,156 | 0,063 |
| 212 | 0,067 | 0,156 | 0,067 | 0,156 | 0,067 | 0,156 | 0,067 | 0,156 | 0,067 | 0,156 | 0,067 | 0,156 | 0,067 | 0,156 | 0,067 |
| 244 | 0,064 | 0,097 | 0,064 | 0,097 | 0,064 | 0,097 | 0,064 | 0,097 | 0,064 | 0,097 | 0,064 | 0,097 | 0,064 | 0,097 | 0,064 |
| 339 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 | 0,081 |
| 344 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 | 0,120 |

Nível de vestuário dos ocupantes

O nível de vestuário dos ocupantes está de acordo com o apresentado no ponto 4.1.4.

Nível de atividade dos ocupantes

O nível de atividade dos ocupantes está de acordo com o apresentado no ponto 4.1.5.

4.4.3 Casos estudados

Neste estudo é utilizado um modelo numérico que simula, em condições transitórias, o comportamento térmico do edifício e os consumos de energia obtidos em condições de verão e inverno. Foram efetuadas 3 simulações:

- Uma simulação em que a ventilação decorre sem controlo, ou seja, é apenas contabilizada a ventilação por infiltrações;
- Uma simulação em que o caudal de ventilação do sistema AVAC é definido a partir do controlo do valor do índice de conforto térmico (PMV) a estabelecer no espaço a climatizar. O objetivo é manter os valores do índice PMV situados entre $-0,7$ e $+0,7$: se o valor do índice PMV for superior a $+0,7$, o ar-condicionado é ligado; se o valor do índice PMV for inferior a $-0,7$, o aquecimento é ligado. Nesta simulação, o cálculo do valor do índice PMV é efetuado de acordo com o modelo de Fanger;
- Uma simulação em que o caudal de ventilação do sistema AVAC é definido a partir do controlo do valor do índice de conforto térmico (aPMV) a estabelecer no espaço a climatizar. O objetivo é manter os valores do índice aPMV situados entre $-0,7$ e $+0,7$: se o valor do índice aPMV for superior a $+0,7$, o ar-condicionado é ligado; se o valor do índice aPMV for inferior a $-0,7$, o aquecimento é ligado. Nesta simulação, o cálculo do índice aPMV é efetuado de acordo com o modelo adaptativo apresentado neste trabalho, o qual depende também da evolução da temperatura exterior.

4.4.4 Análise e discussão dos resultados

Neste ponto são analisados os resultados obtidos nas simulações referidas no ponto anterior em várias salas de aula deste edifício (edifícios 8 e 9), nomeadamente: temperatura do ar, velocidade do ar, humidade relativa do ar, qualidade do ar (obtida através da medição da concentração do dióxido de carbono), temperatura média radiante, índices PMV e aPMV, horas de desconforto e consumo energético. Na legenda das figuras os termos, E, W, SW e SE, colocados entre parenteses, estão associados com as janelas viradas, respetivamente, a este, oeste, sudoeste e sudeste, enquanto o número colocado antes dos parênteses refere-se ao número do compartimento. Na mesma legenda, o termo ed8-9 refere-se ao edifício 8 e 9.

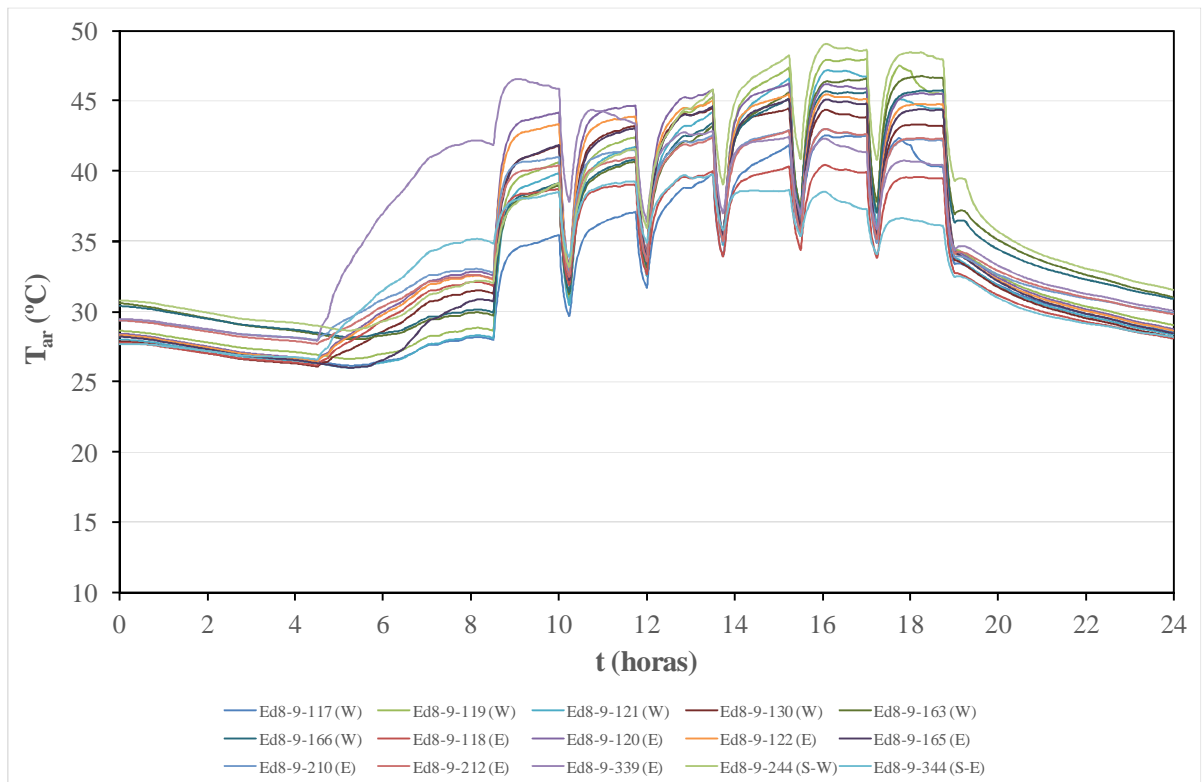
4.4.4.1 Temperatura do ar

Nas figuras 4.28, 4.29 e 4.30 são apresentados os resultados da temperatura do ar (T_{ar}) nas salas de aula dos edifícios 8 e 9, respetivamente, na simulação sem controlo, na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. As figuras a) estão associadas ao verão e as figuras b) estão associadas ao inverno.

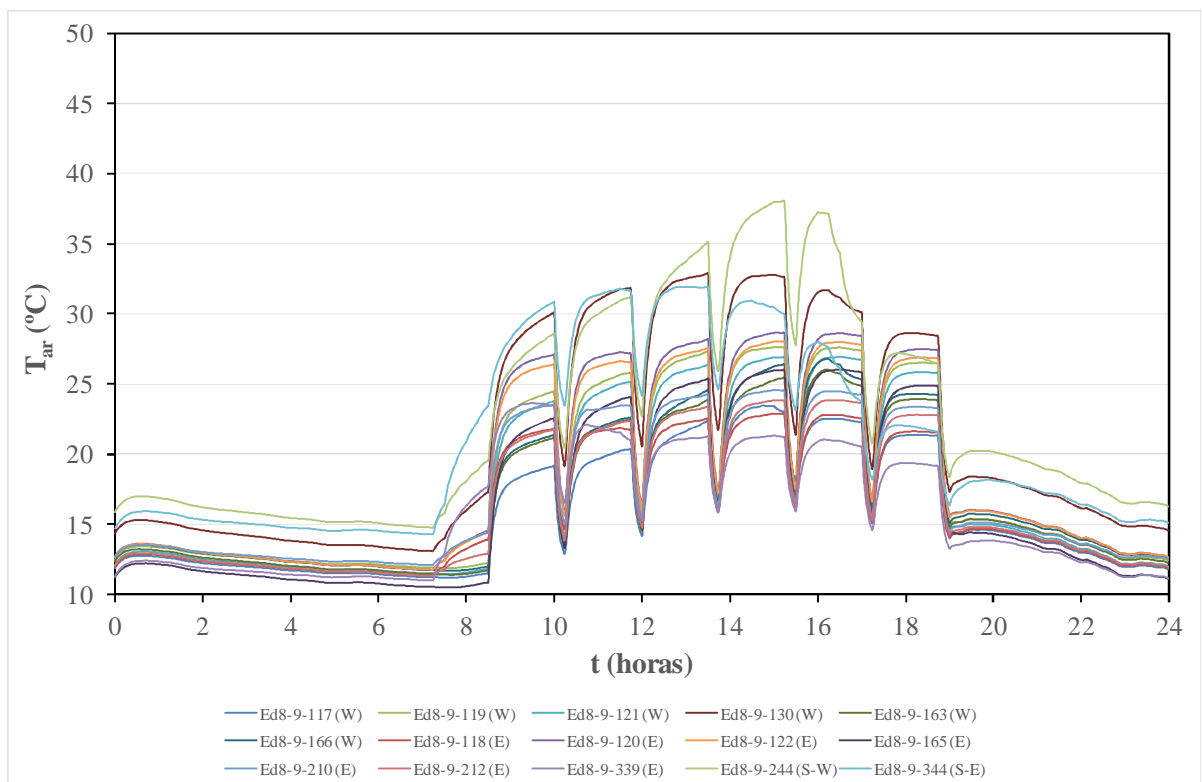
Na simulação sem controlo é possível verificar que, no geral, as temperaturas do ar que se fazem sentir nas salas de aula são mais elevadas no verão do que no inverno. É possível verificar vários picos na temperatura que estão associados à ocupação das salas entre as 8:30 e as 19 horas. A temperatura sobe drasticamente a partir da hora em que as salas são ocupadas (8:30 horas) e baixa quando as salas deixam de estar ocupadas, tanto no verão como no inverno. Durante os períodos de ocupação, no verão, as temperaturas nas salas oscilam entre os 30°C e os 50°C. O dia de inverno não é muito frio. Basicamente, só a ocupação e a radiação solar garantem temperaturas do ar interior acima dos 20°C, inclusivamente, atingem valores muito próximos dos 35°C.

Na simulação com controlo do índice PMV, de acordo com o modelo de Fanger, é possível verificar que, no geral, a temperatura do ar que se faz sentir no interior das salas de aula são mais elevadas no inverno do que no verão. No verão, quando as salas estão ocupadas, o valor da temperatura varia entre os 25°C e os 30°C. No inverno, quando as salas estão ocupadas, de um modo geral, a temperatura do ar é inferior a 25°C e vai crescendo ao longo do dia, atingindo nalgumas salas temperaturas da ordem dos 30°C. Este aumento deve-se ao facto da temperatura média radiante aumentar durante o dia devido à radiação solar. Nas salas orientadas a sul e, por conseguinte, mais expostas à radiação solar, o sistema AVAC é desligado, pelo que, devido a essa exposição solar, a temperatura do ar tende a continuar a aumentar.

Na simulação com controlo do índice aPMV, de acordo com o modelo adaptativo, as conclusões a retirar são semelhantes às observadas na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger.

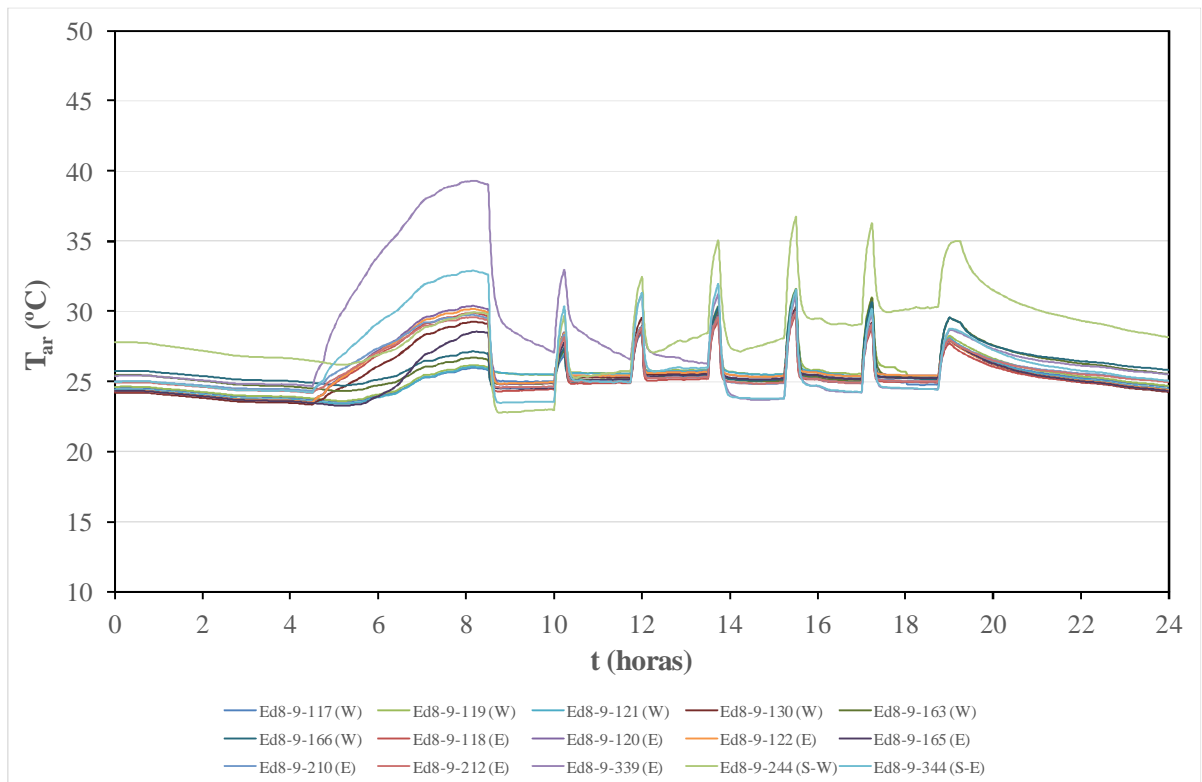


a)

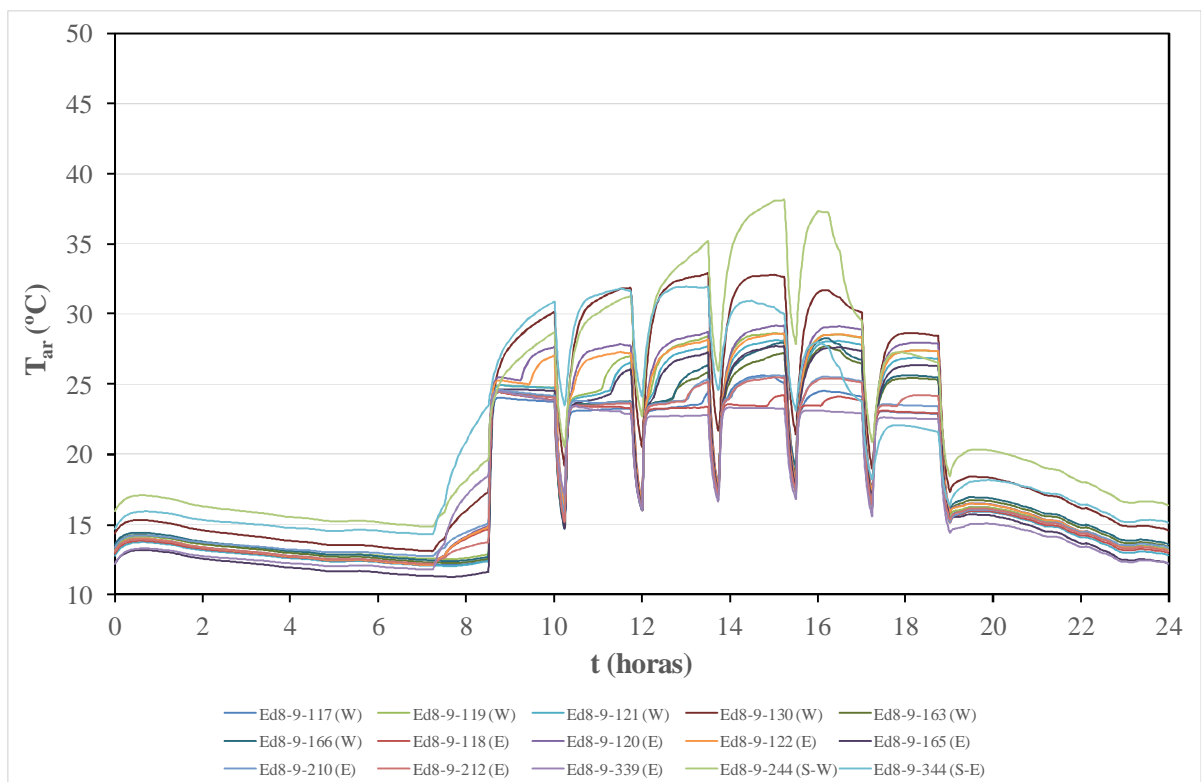


b)

Figura 4.28 – Temperatura do ar (T_{ar}) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

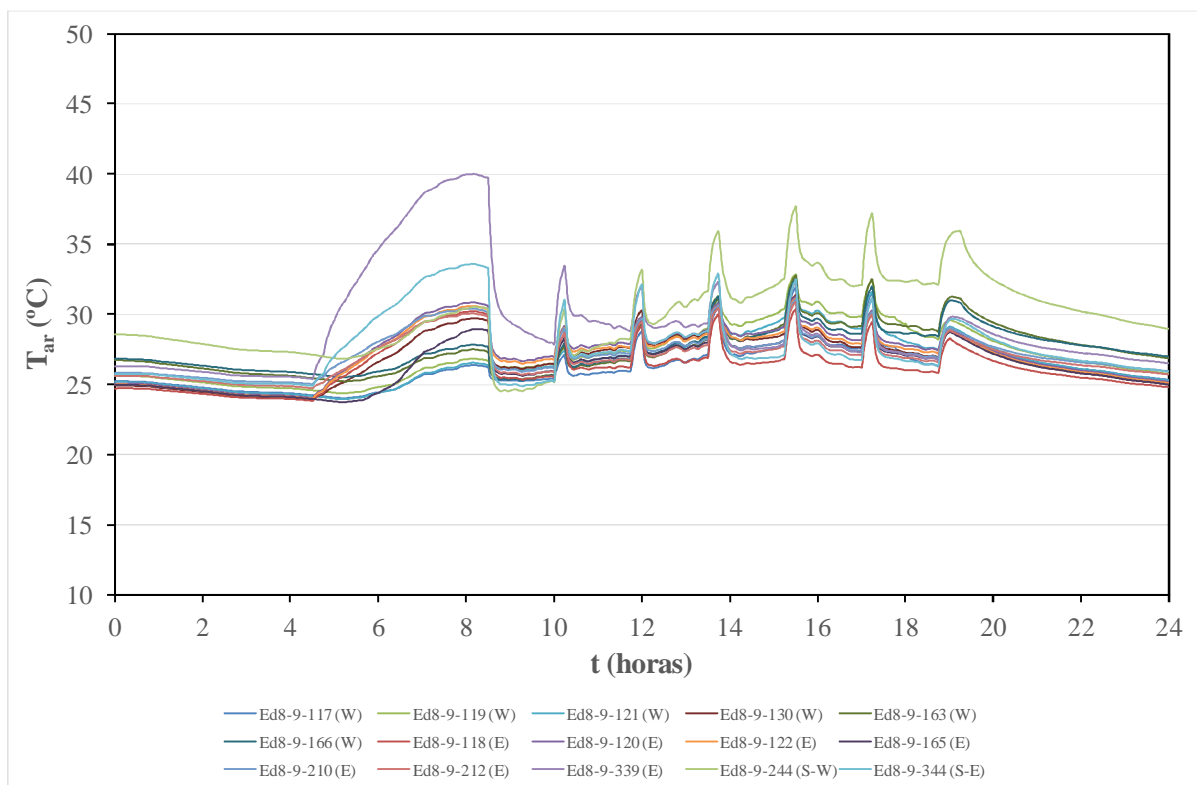


a)

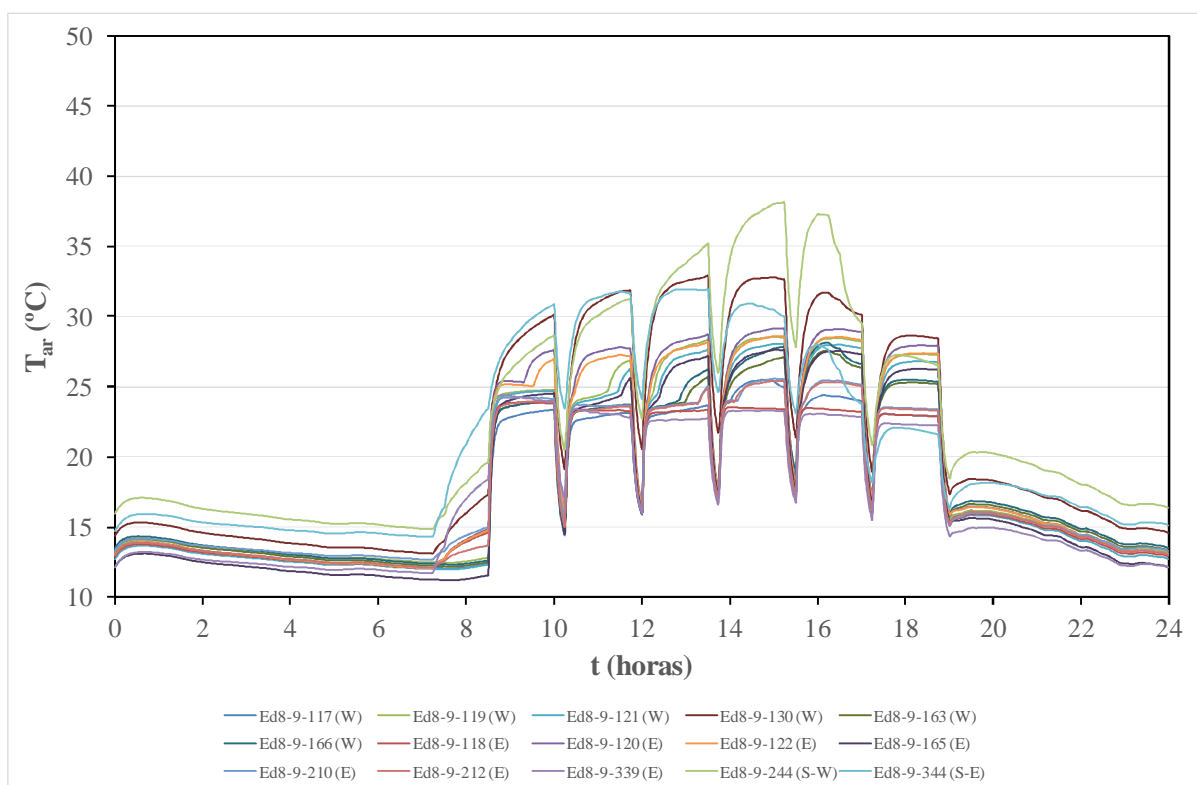


b)

Figura 4.29 – Temperatura do ar (T_{ar}) na simulação com controle do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.



a)



b)

Figura 4.30 – Temperatura do ar (T_{ar}) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

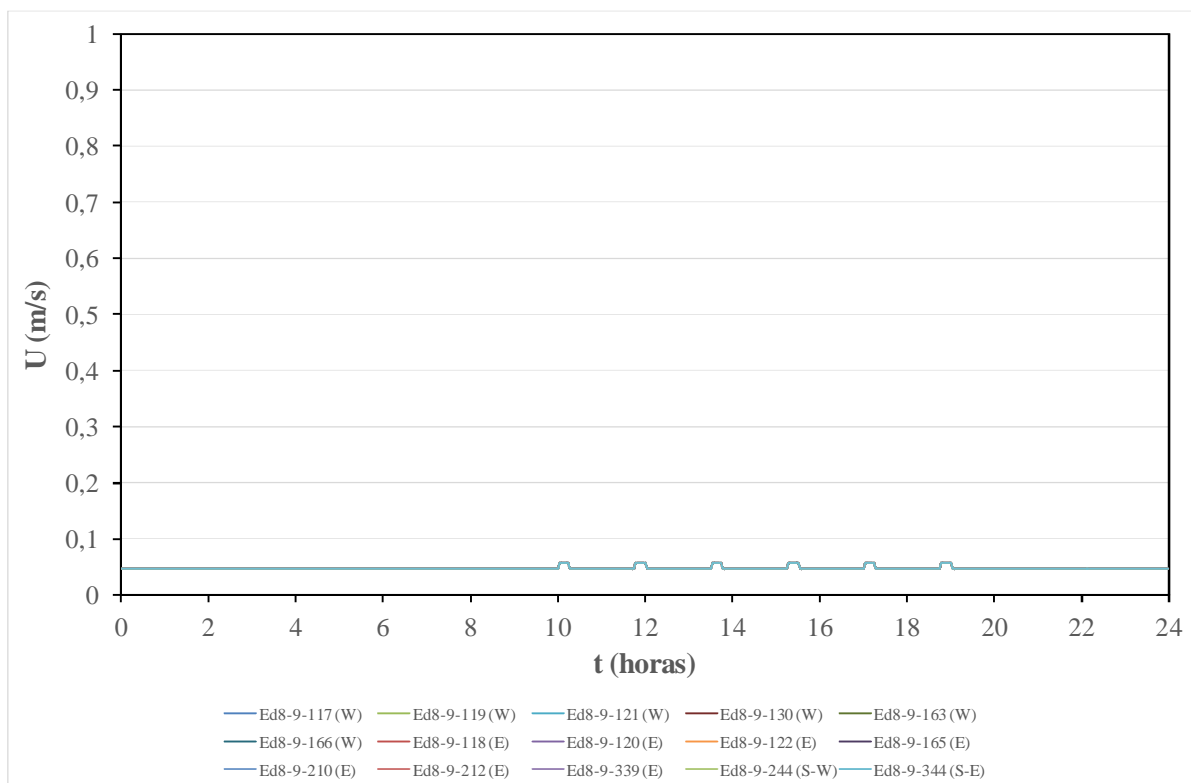
4.4.4.2 Velocidade do ar

Nas figuras 4.31, 4.32 e 4.33 são apresentados os resultados da velocidade do ar (U) nas salas de aula dos edifícios 8 e 9, respetivamente, na simulação sem controlo, na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. As figuras a) estão associadas ao verão e as figuras b) estão associadas ao inverno.

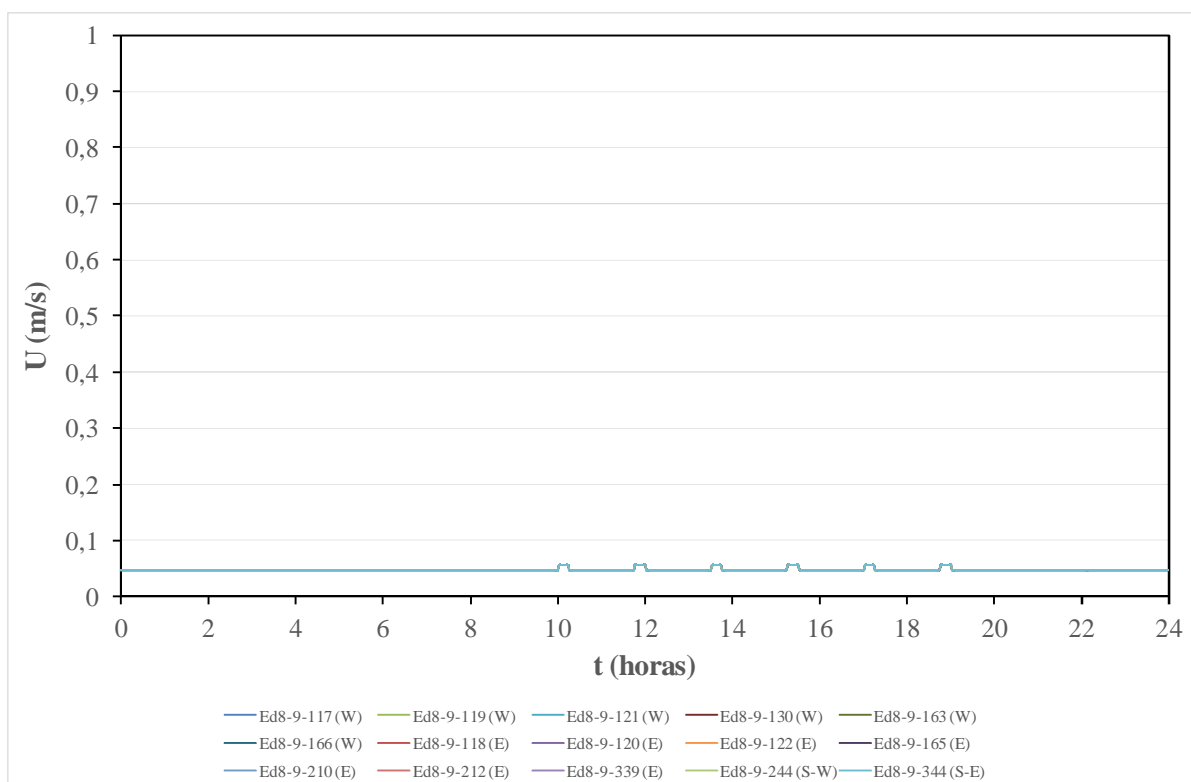
É possível verificar que, na simulação sem controlo, a velocidade do ar mantém-se estável e inferior a 0,1 m/s, tanto no verão como no inverno. Nesta situação apenas são consideradas as recirculações devido às infiltrações.

Na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo do Fanger é possível verificar que, tanto no verão como no inverno, quando as salas não estão ocupadas a velocidade do ar mantém-se estável e inferior a 0,1 m/s, e que quando as salas são ocupadas, a velocidade do ar aumenta significativamente diminuindo logo de seguida. Essa diminuição da velocidade do ar é mais significativa no inverno do que no verão. No verão, no início da manhã e da tarde a velocidade do ar encontra-se entre os 0,1 e os 0,2 m/s, a meio da manhã e da tarde a velocidade do ar encontra-se entre os 0,2 e os 0,6 m/s, chegando perto dos 0,9 m/s no final da manhã e perto dos 0,8 m/s ao final do dia. No inverno, existem salas que mantêm a velocidade do ar estável num valor inferior a 0,1m/s e existem salas em que a velocidade do ar aumenta para valores próximos dos 0,7 m/s ao fim da manhã. Tanto no verão como no inverno, as diferentes salas apresentam valores de velocidade do ar visivelmente diferentes umas das outras.

Na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo é possível verificar que, tanto no verão como no inverno, quando as salas não estão ocupadas, a velocidade do ar mantém-se estável e inferior a 0,1 m/s, e quando as salas são ocupadas a velocidade do ar aumenta significativamente diminuindo logo de seguida, como se verificou na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo do Fanger. Essa diminuição da velocidade do ar é mais significativa no inverno do que no verão. No verão, no início da manhã e da tarde a velocidade do ar encontra-se entre os 0,1 e os 0,2 m/s, a meio da manhã e da tarde a velocidade do ar encontra-se entre os 0,2 e os 0,4 m/s, chegando aos 0,5 m/s no final da manhã e ao final do dia. No inverno, existem salas que mantêm a velocidade do ar estável num valor inferior a 0,1 m/s e existem salas em que a velocidade do ar aumenta para valores perto dos 0,5 m/s no final da manhã. Tanto no verão como no inverno, as diferentes salas apresentam valores de velocidade do ar diferentes umas das outras.

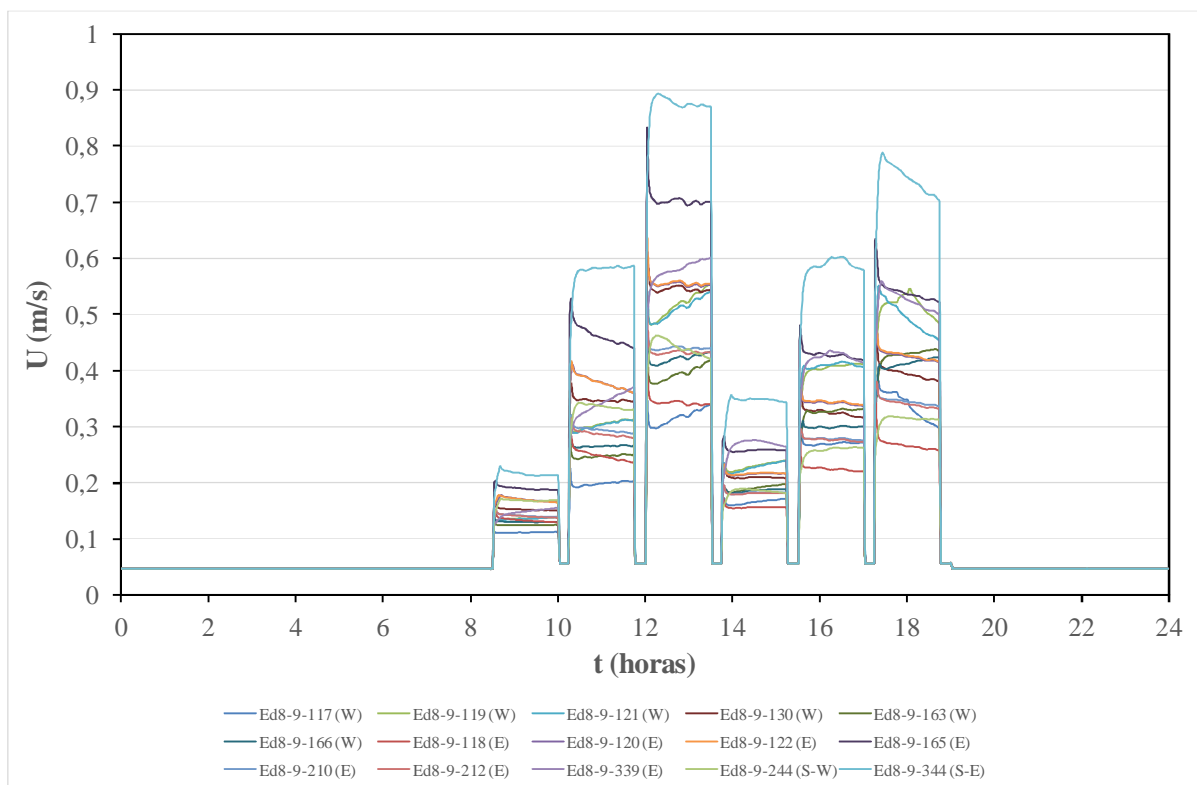


a)

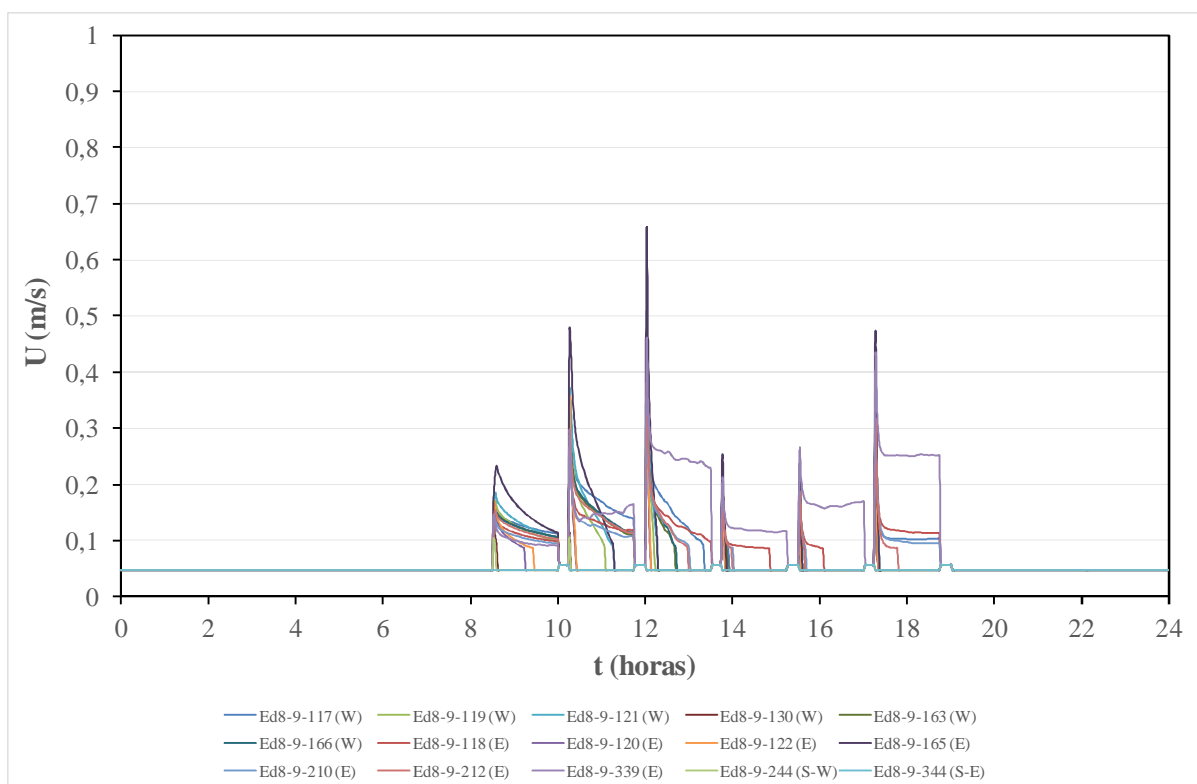


b)

Figura 4.31 – Velocidade do ar (U) na simulação sem controle no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

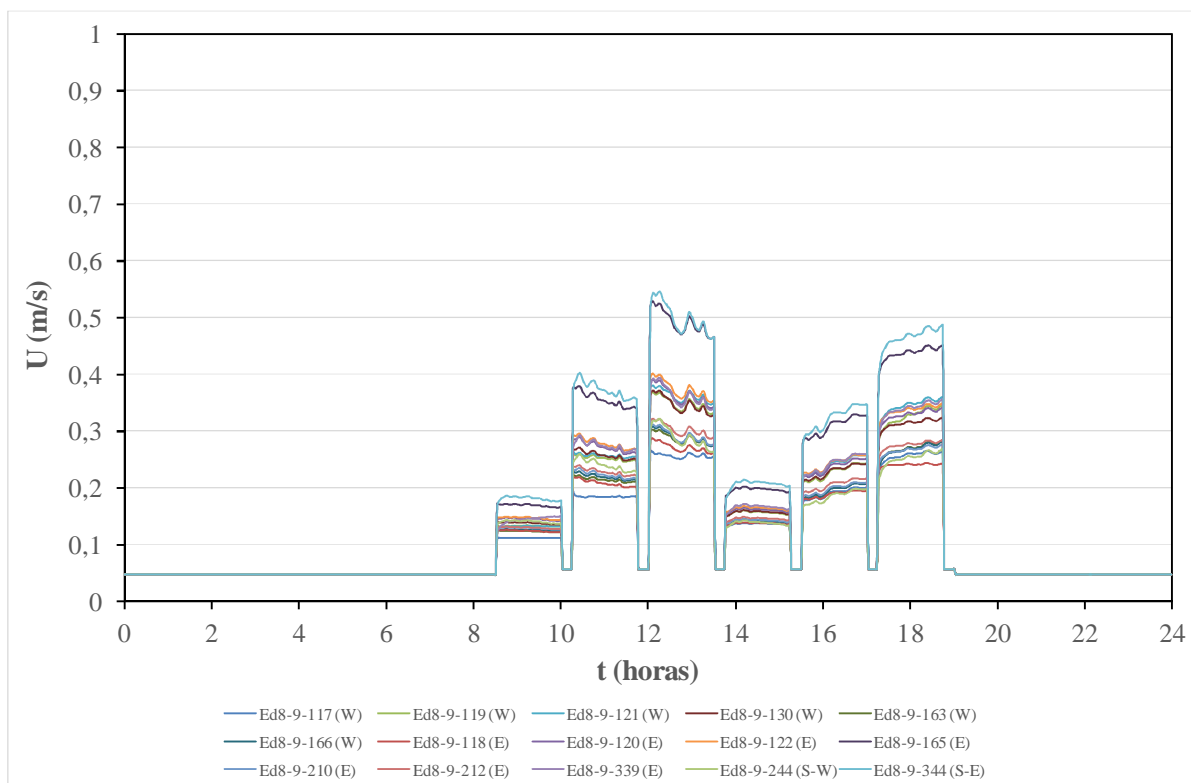


a)

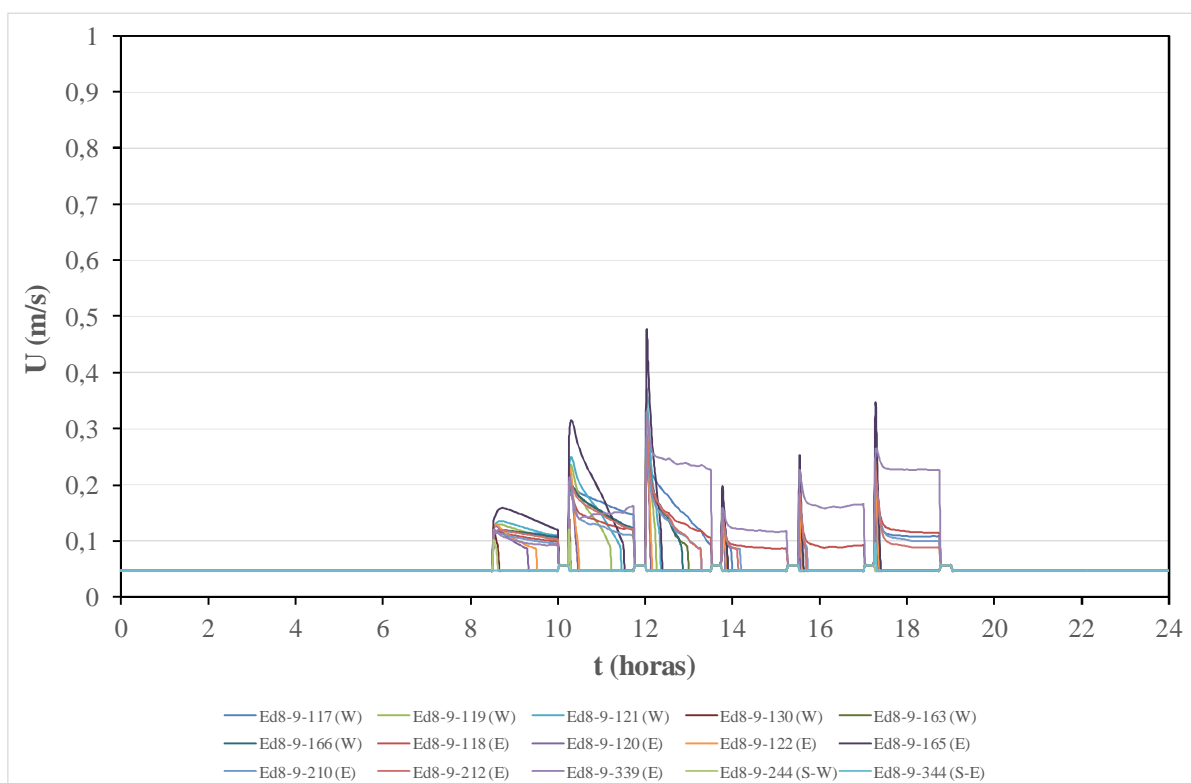


b)

Figura 4.32 – Velocidade do ar (U) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.



a)



b)

Figura 4.33 – Velocidade do ar (U) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

Os valores da velocidade do ar nas salas, de um modo geral, são maiores quando se aplica o sistema de controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger do que quando se aplica o sistema de controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. Tal justifica-se porque o modelo adaptativo prevê melhores níveis de conforto do que o modelo de Fanger e, conseqüentemente, o sistema AVAC irá injetar um caudal de ar menor no espaço a climatizar.

4.4.4.3 Humidade relativa do ar

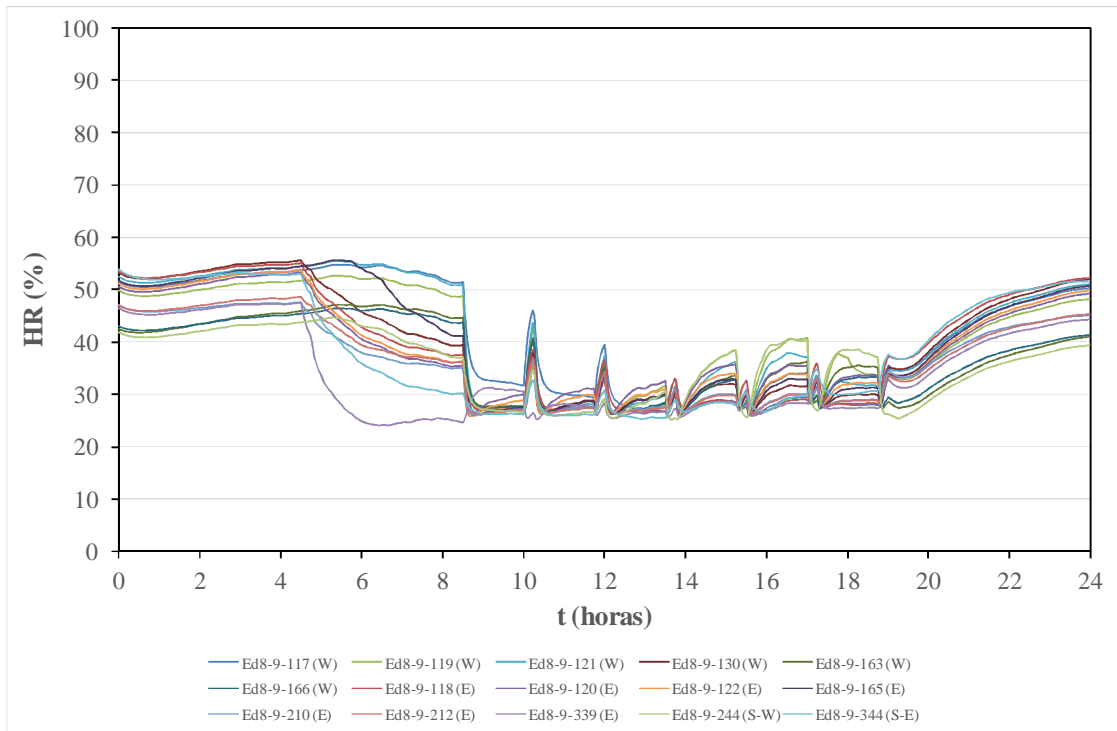
Nas figuras 4.34, 4.35 e 4.36 são apresentados os resultados da humidade relativa do ar (HR) nas salas de aula dos edifícios 8 e 9, respetivamente, na simulação sem controlo, na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. As figuras a) estão associadas ao verão e as figuras b) estão associadas ao inverno.

Na simulação sem controlo é possível verificar que, tanto no verão como no inverno, a humidade relativa do ar diminui quando as salas são ocupadas e aumenta novamente durante os intervalos sem ocupação. No verão a humidade relativa do ar das várias salas de aula mantêm-se em torno dos 30% e no inverno existe uma maior oscilação entre os valores da humidade relativa do ar das várias salas, no geral, entre os 10% e os 40%.

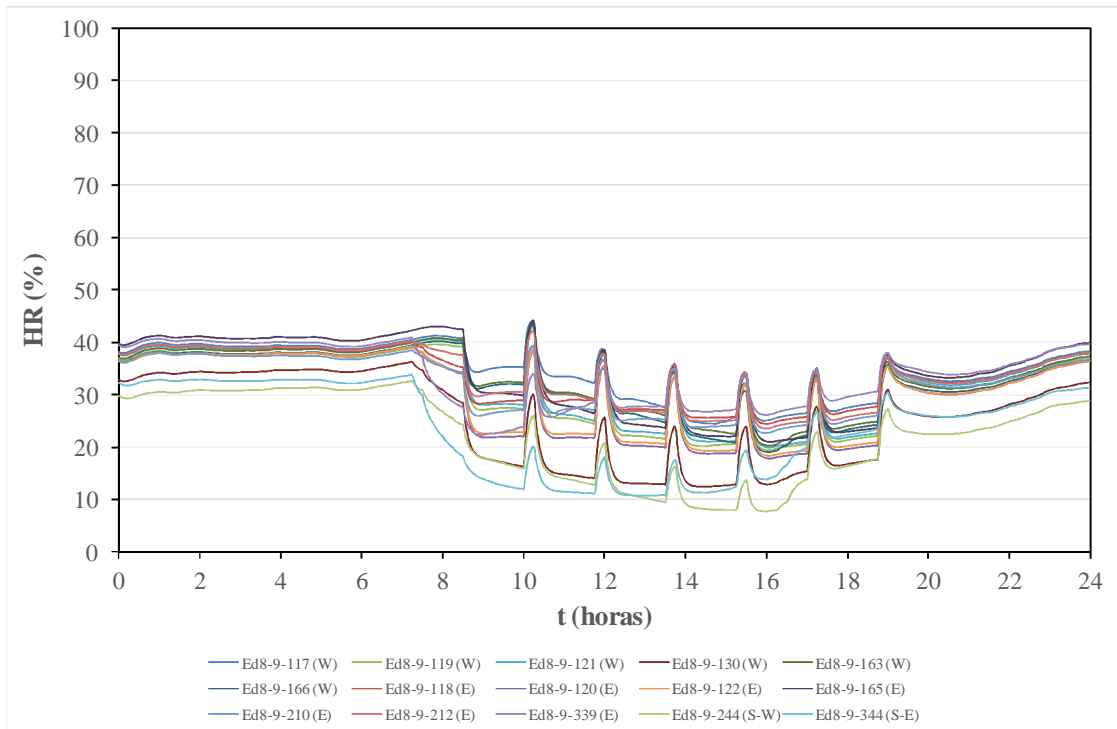
Na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger é possível verificar que no verão a humidade relativa do ar aumenta quando as salas são ocupadas e diminui novamente durante os intervalos sem ocupação. A humidade relativa do ar das várias salas de aula, quando são ocupadas, mantêm-se relativamente estáveis, variando de sala para sala, e aumentando nos períodos em que não estão ocupadas. A sua variação oscila entre os 50% e os 80%. No inverno, existe uma maior oscilação dos valores de humidade relativa do ar entre as diferentes salas e verificam-se valores de humidade relativa do ar mais baixos do que no verão. Estes valores oscilam entre os 10% e os 30%.

Na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo é possível verificar que no verão a humidade relativa do ar aumenta quando as salas são ocupadas, diminuindo novamente durante os períodos sem ocupação. A humidade relativa do ar das várias salas de aula quando ocupadas mantêm-se relativamente estáveis variando de sala para sala. A sua variação oscila entre os 50% e os 70%. No inverno, quando as salas são ocupadas, a humidade relativa do ar diminui para valores relativamente estáveis, que variam de sala para sala, e aumenta nos períodos em que as salas não estão ocupadas. No inverno verificam-se

valores de humidade relativa do ar mais baixos do que no verão. Estes valores oscilam entre os 10% e os 30%.

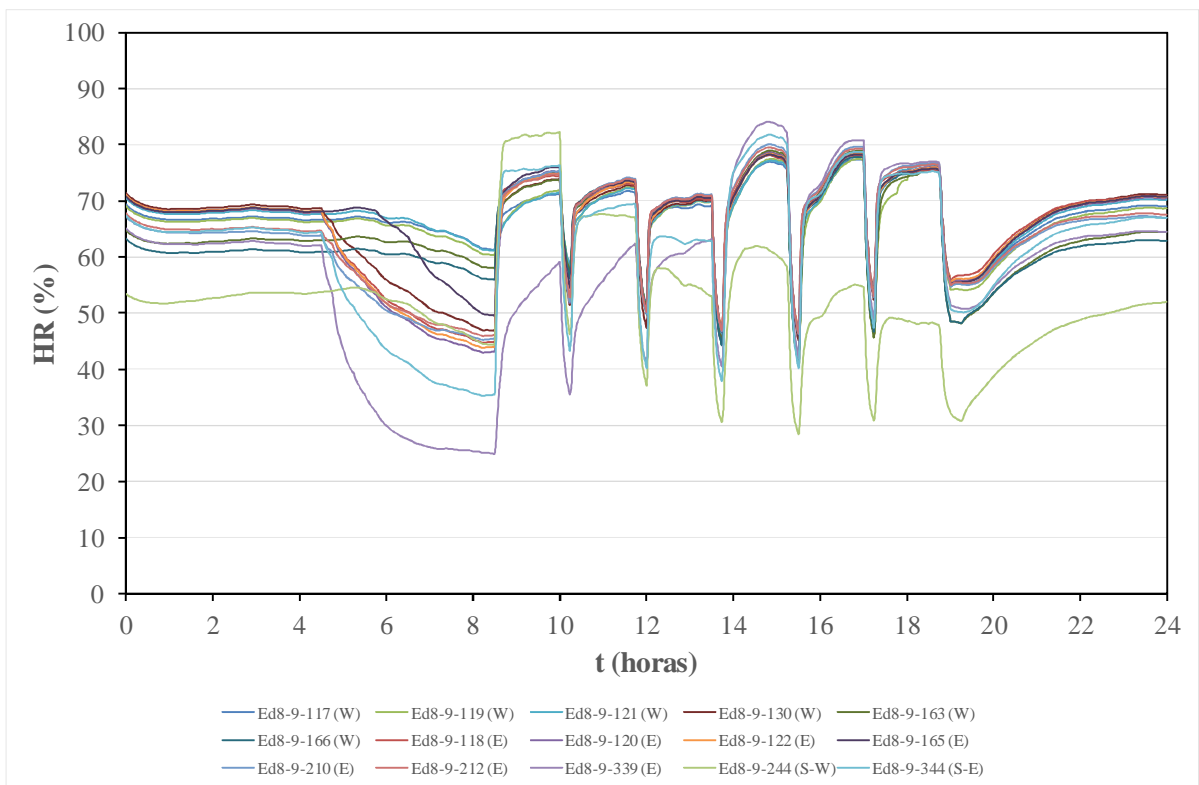


a)

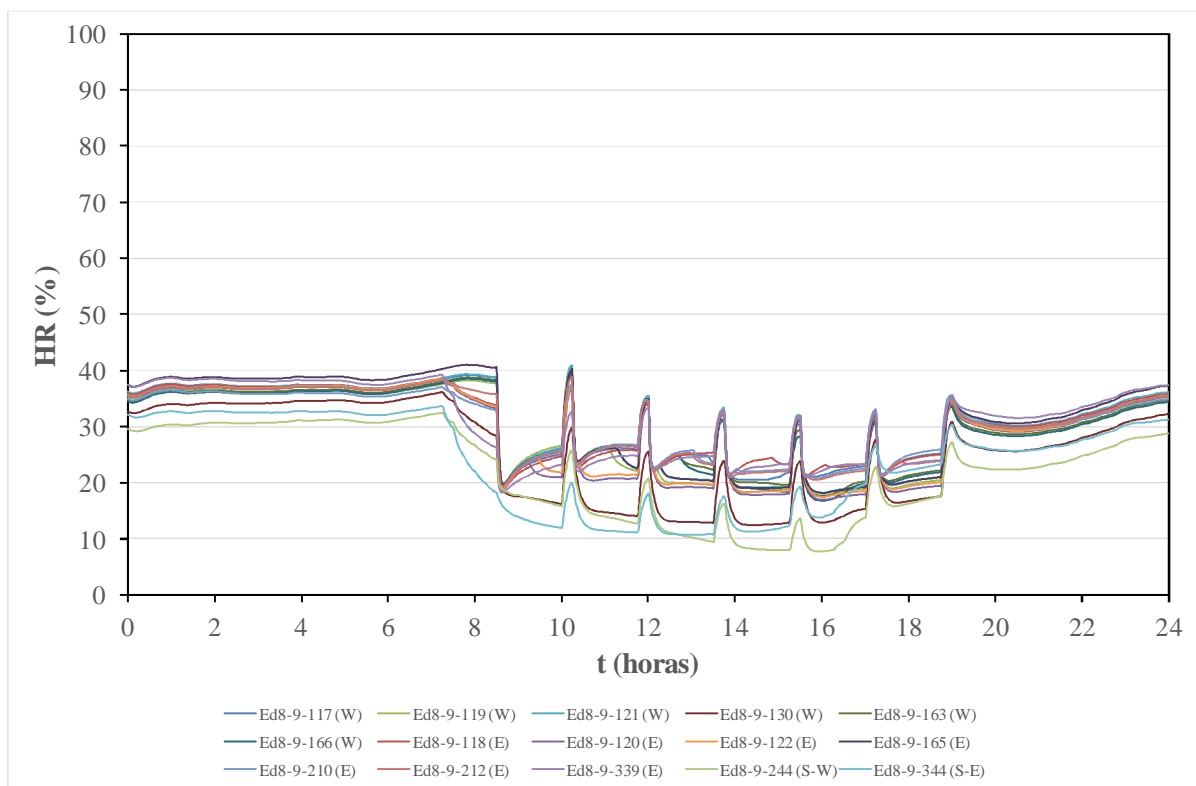


b)

Figura 4.34 – Humidade relativa do ar (HR) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

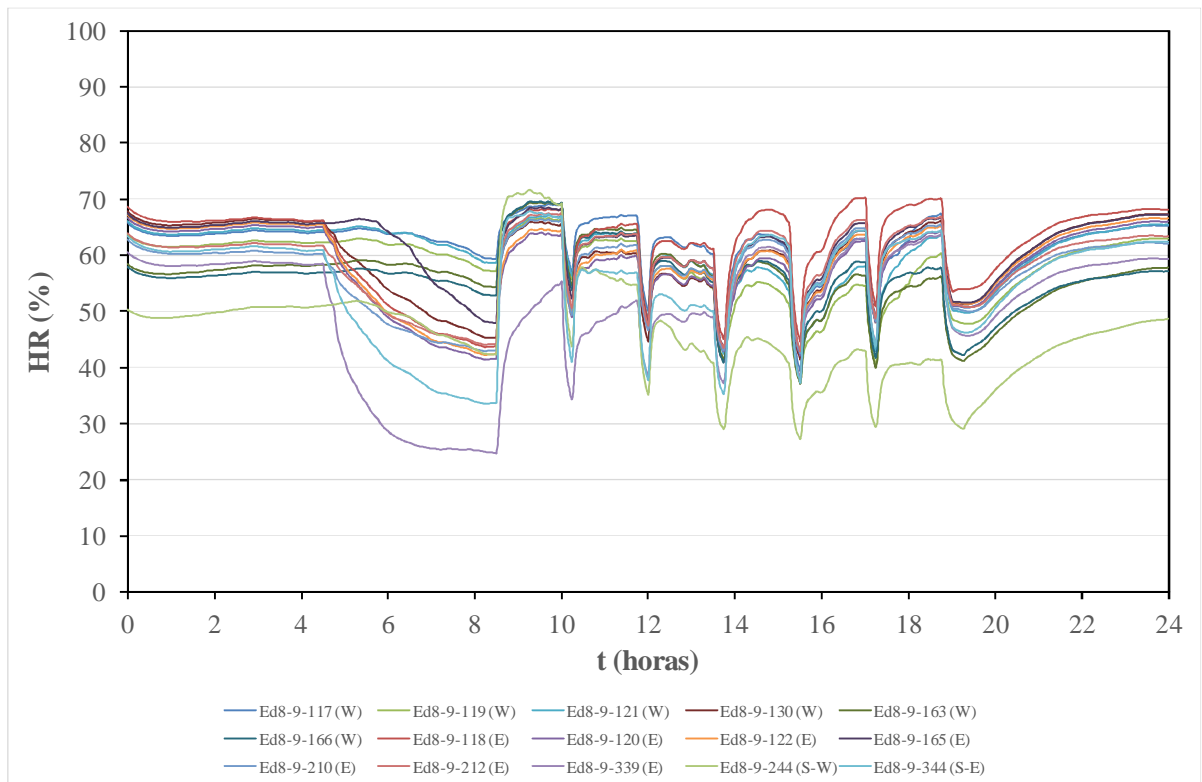


a)

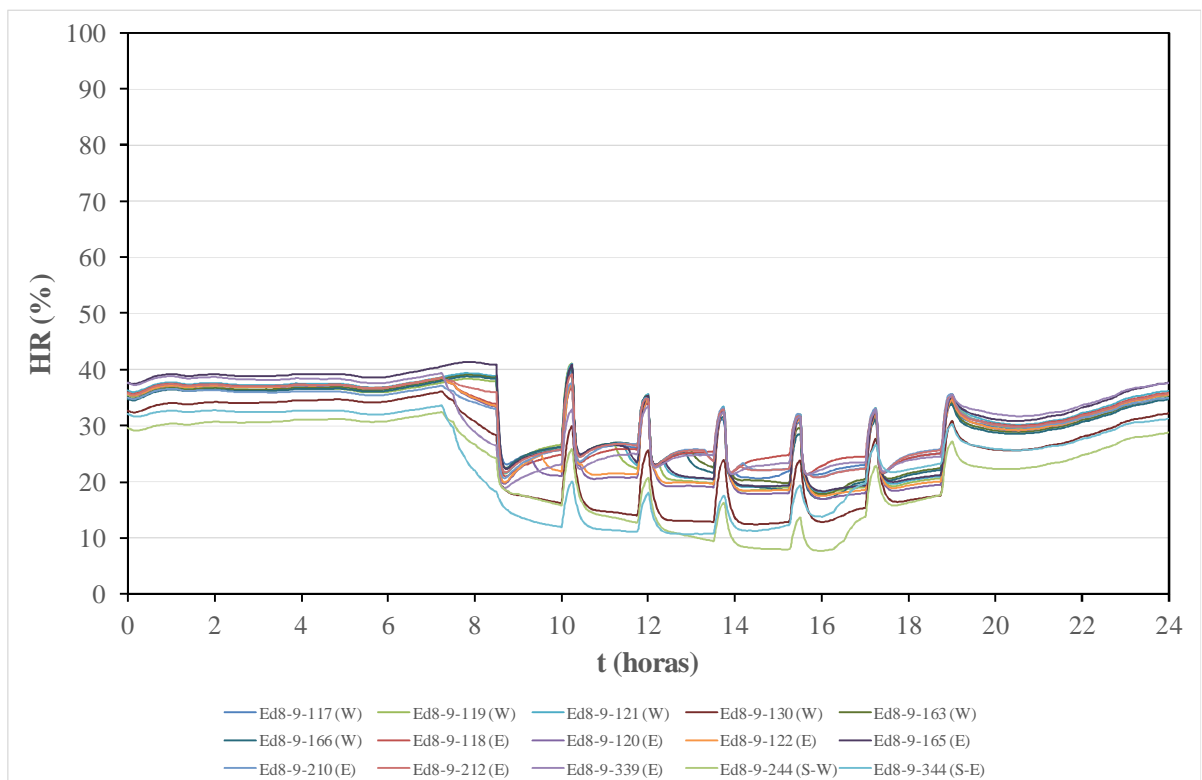


b)

Figura 4.35 – Humidade relativa do ar (HR) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.



a)



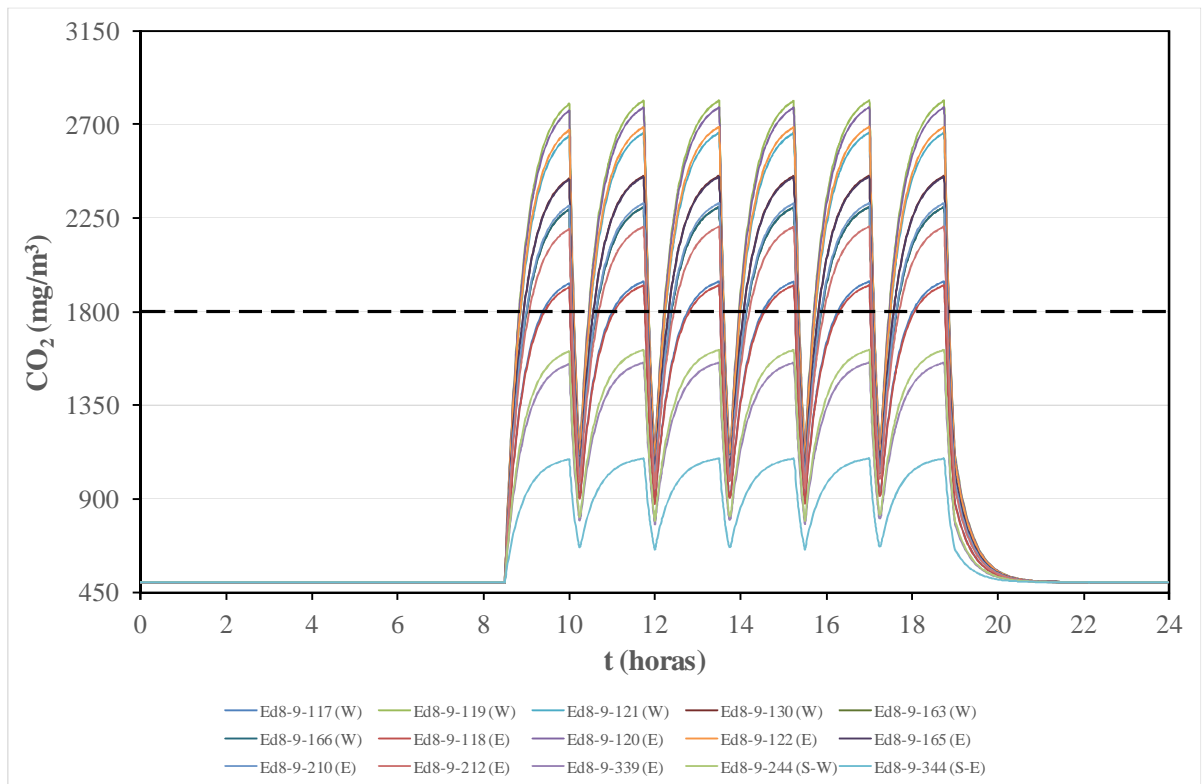
b)

Figura 4.36 – Humidade relativa do ar (HR) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo no a) verão e b) inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

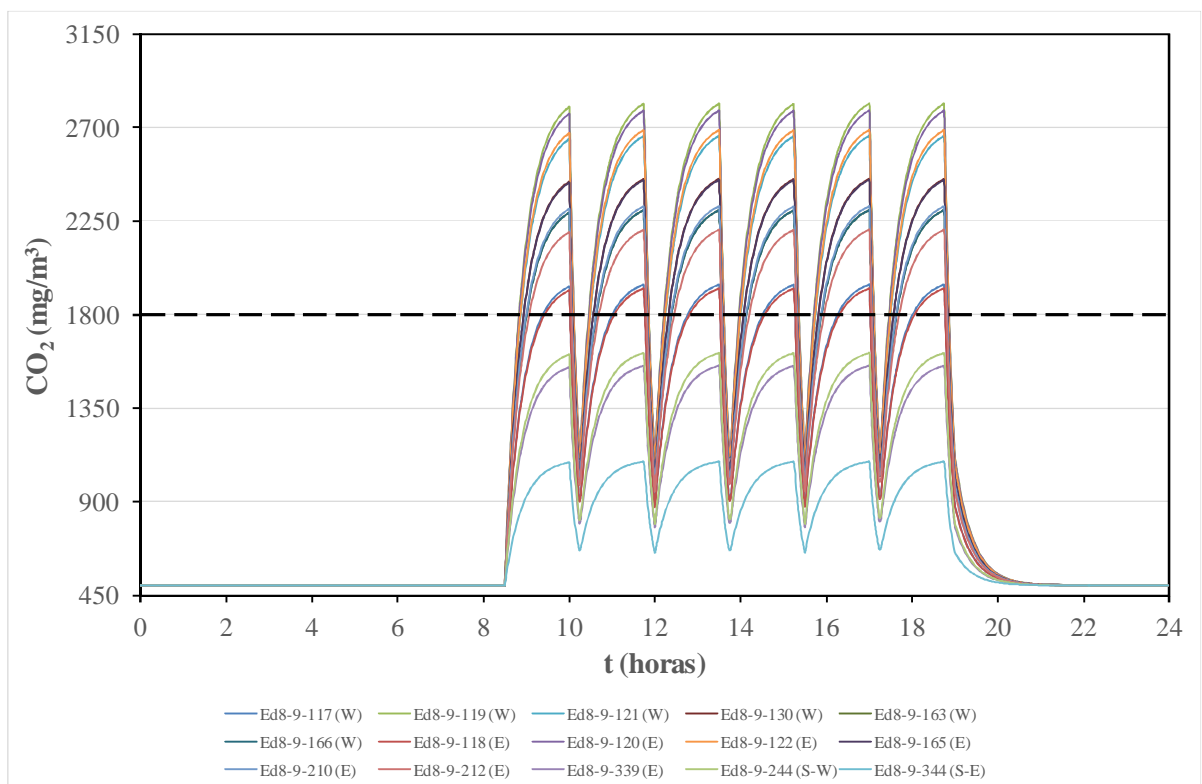
4.4.4.4 Qualidade do ar

Na figura 4.37 estão apresentados os resultados da qualidade do ar, dados pelos valores da concentração do dióxido de carbono (CO_2), nas salas de aula dos edifícios 8 e 9, nas simulações sem controlo, com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, respetivamente, no verão a) e no inverno b). A figura 4.37 é comum aos três casos porque a concentração do dióxido de carbono só depende da ventilação (natural por infiltrações) que é a mesma para os três casos e também para as condições de verão e as condições de inverno. Na figura 4.37 a linha a tracejado representa o valor limite para a concentração de dióxido de carbono recomendado pela legislação.

É possível verificar níveis de CO_2 mais elevados quando as salas encontram-se ocupadas e a sua diminuição repentina durante os intervalos sem ocupação. Os níveis de CO_2 apresentam diferentes valores máximos que dependem da dimensão, do caudal de renovação e das ocupações das diferentes salas. Verifica-se que a maioria das salas estudadas apresenta valores de CO_2 ligeiramente superiores ao admitido na legislação (1800 mg/m^3). Apenas as salas 119, 120 e 121 apresentam durante todo o dia uma concentração de dióxido de carbono abaixo do limite regulamentado.



a)



b)

Figura 4.37 – Valores de CO₂ para as três situações estudadas no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

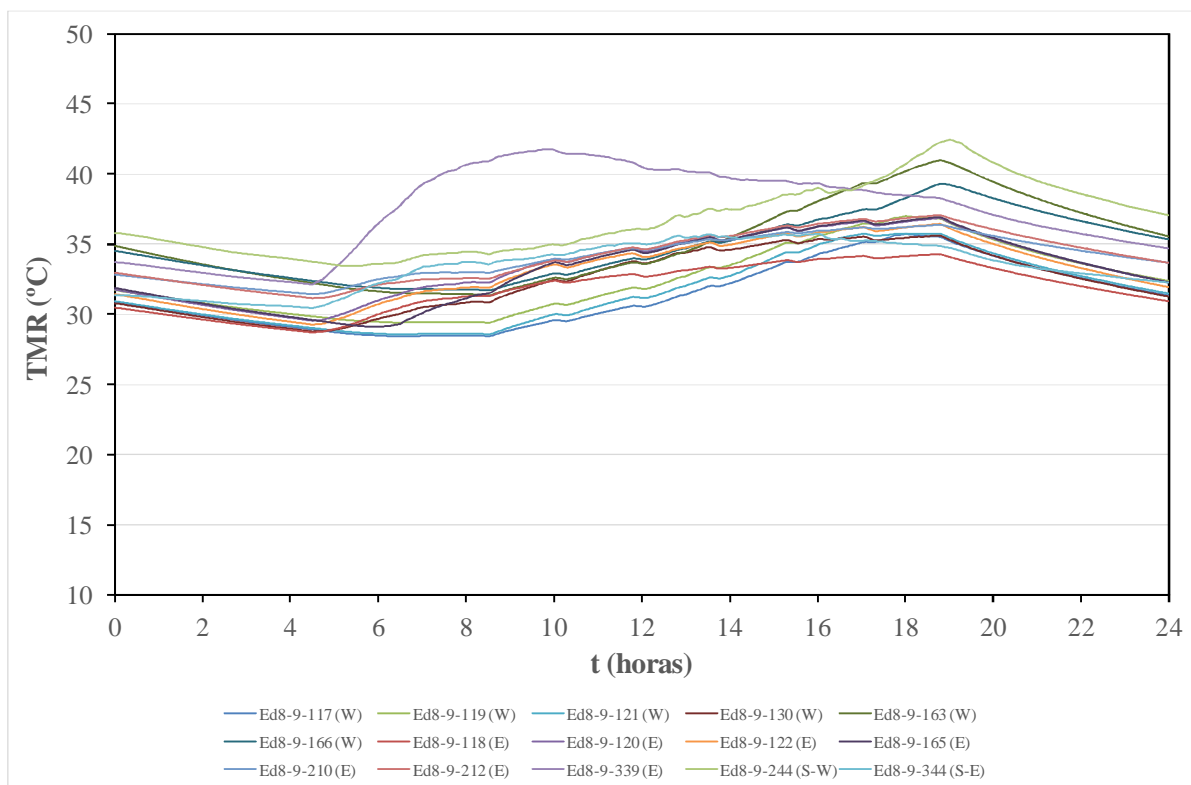
4.4.4.5 Temperatura média radiante

Nas figuras 4.38, 4.39 e 4.40 são apresentados os resultados da temperatura média radiante (TMR) nas salas de aula dos edifícios 8 e 9, respetivamente, nas simulações sem controlo, com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. As figuras a) estão associadas ao verão e as figuras b) estão associadas ao inverno.

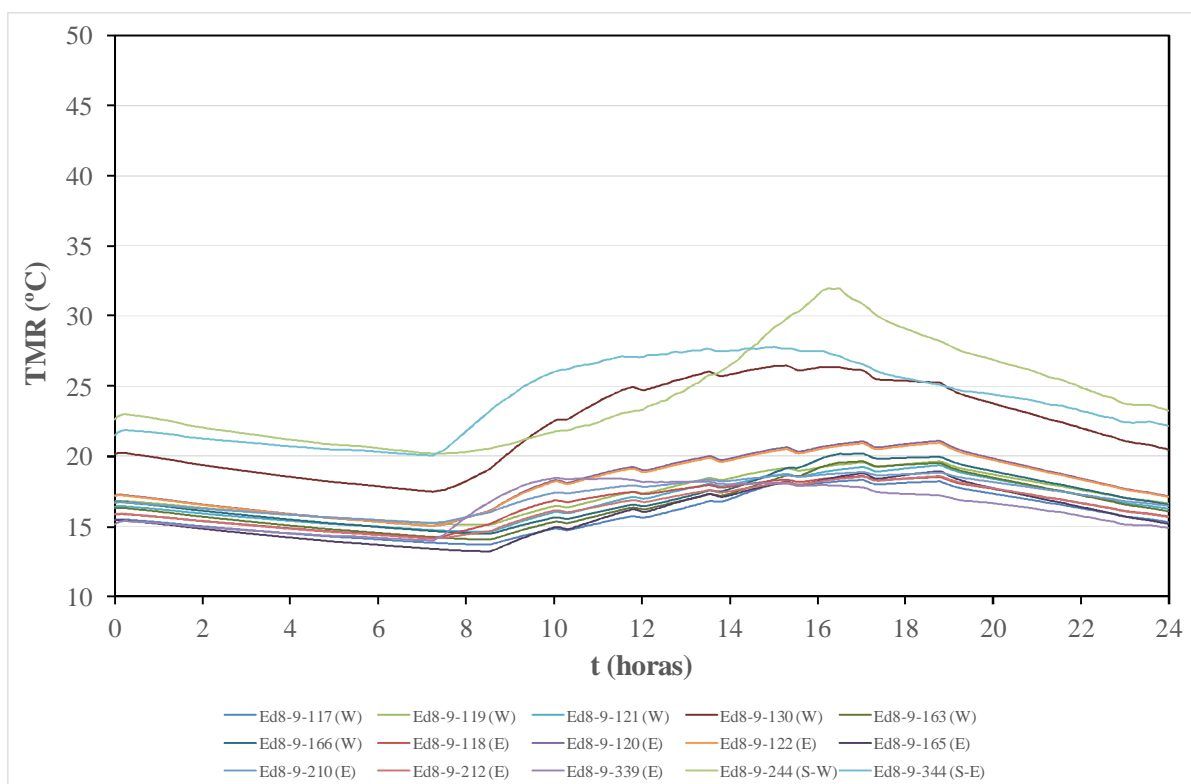
As diferentes simulações apresentam resultados da temperatura média radiante muito semelhantes. No verão, em geral, durante o período de maior utilização das salas (8:30 – 18 horas) a temperatura média radiante das diferentes salas encontra-se entre os 30°C e os 40°C. No inverno, em geral, durante o período de maior utilização das salas (8:30 – 18 horas) a temperatura média radiante das diferentes salas encontra-se entre os 15°C e os 20°C. Algumas salas com janelas voltadas a este apresentam valores de temperatura média radiante superiores durante a manhã e algumas salas com janelas voltadas a oeste apresentam valores de temperatura média radiante superiores durante a tarde.

Na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger, a temperatura média radiante diminui ligeiramente no verão quando o sistema de ar condicionado é ligado. Basicamente, esta redução está associada à diminuição das temperaturas das superfícies interiores dos compartimentos. Durante o inverno, o valor da temperatura média radiante aumenta ligeiramente quando o sistema de aquecimento é ligado. O aumento não é significativo, porque o valor do aquecimento também não é muito elevado. No verão, em geral, durante o período de maior utilização das salas a temperatura média radiante das diferentes salas varia entre os 25°C e os 30°C. No inverno, em geral, durante o período de maior utilização das salas a temperatura média radiante das diferentes salas varia entre os 15°C e 22°C.

A evolução da temperatura média radiante obtida na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo difere pouco da simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger.

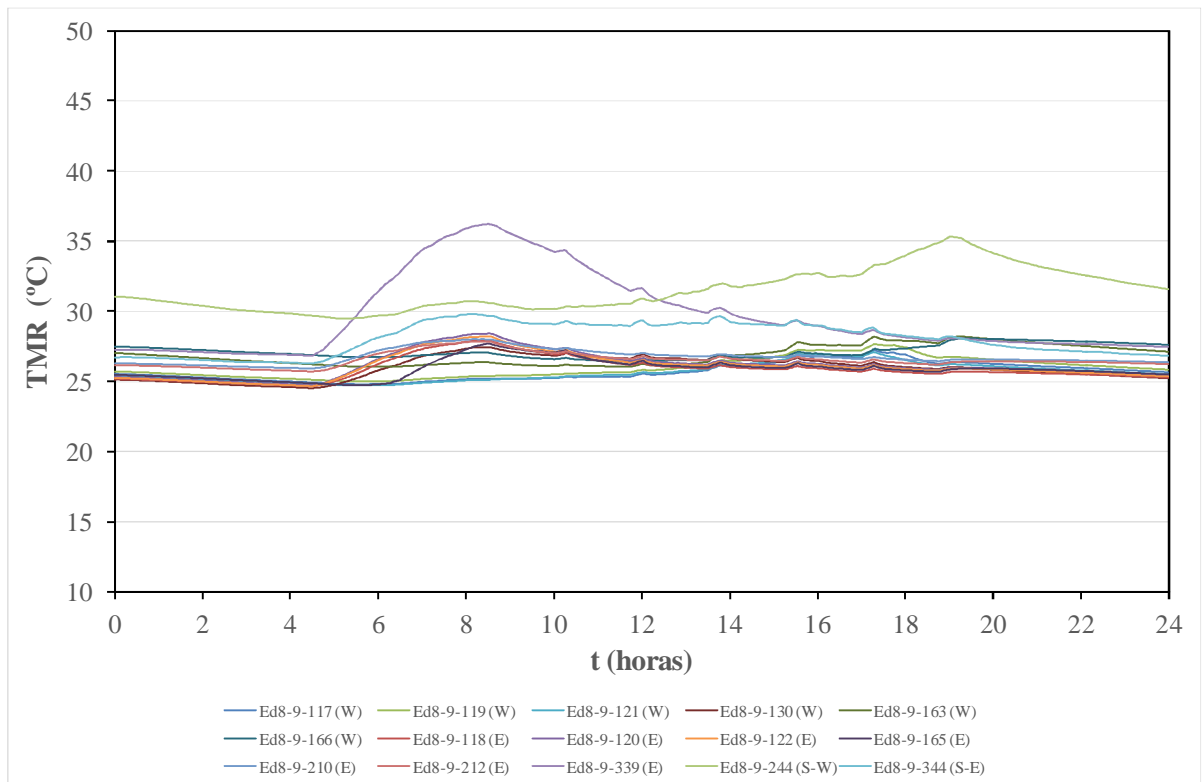


a)

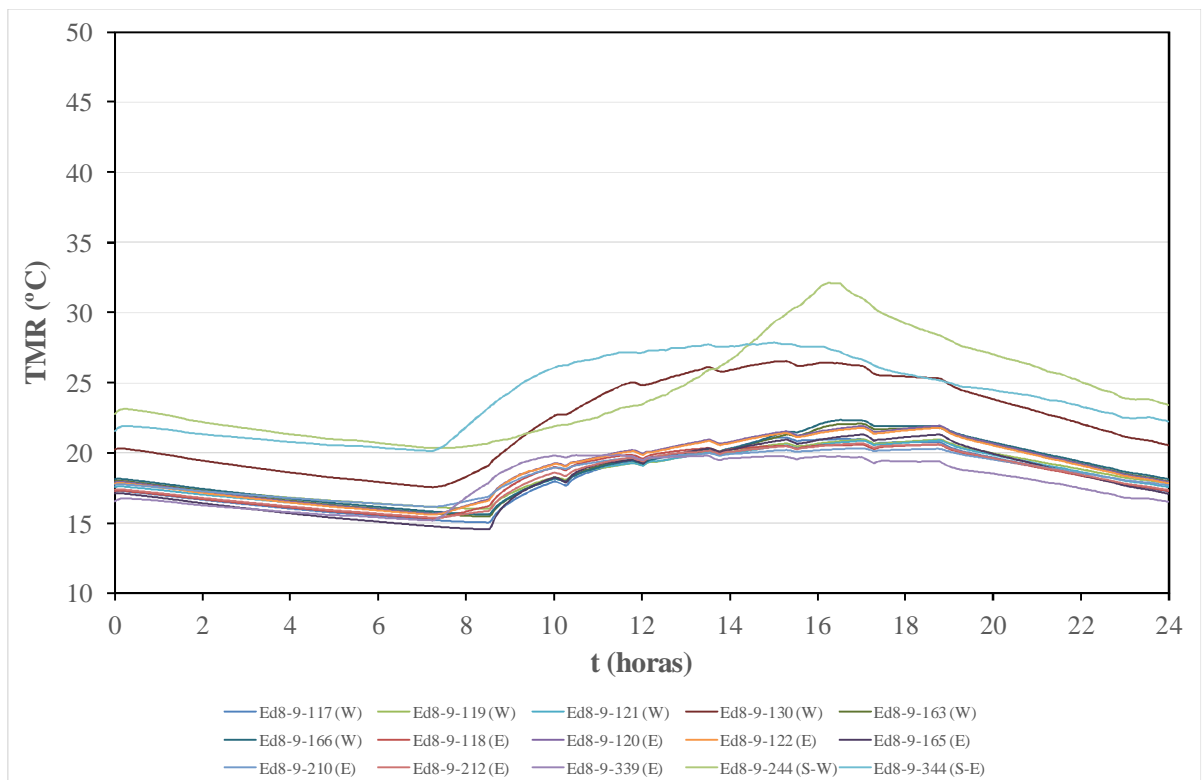


b)

Figura 4.38 – Temperatura média radiante (TMR) na simulação sem controlo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

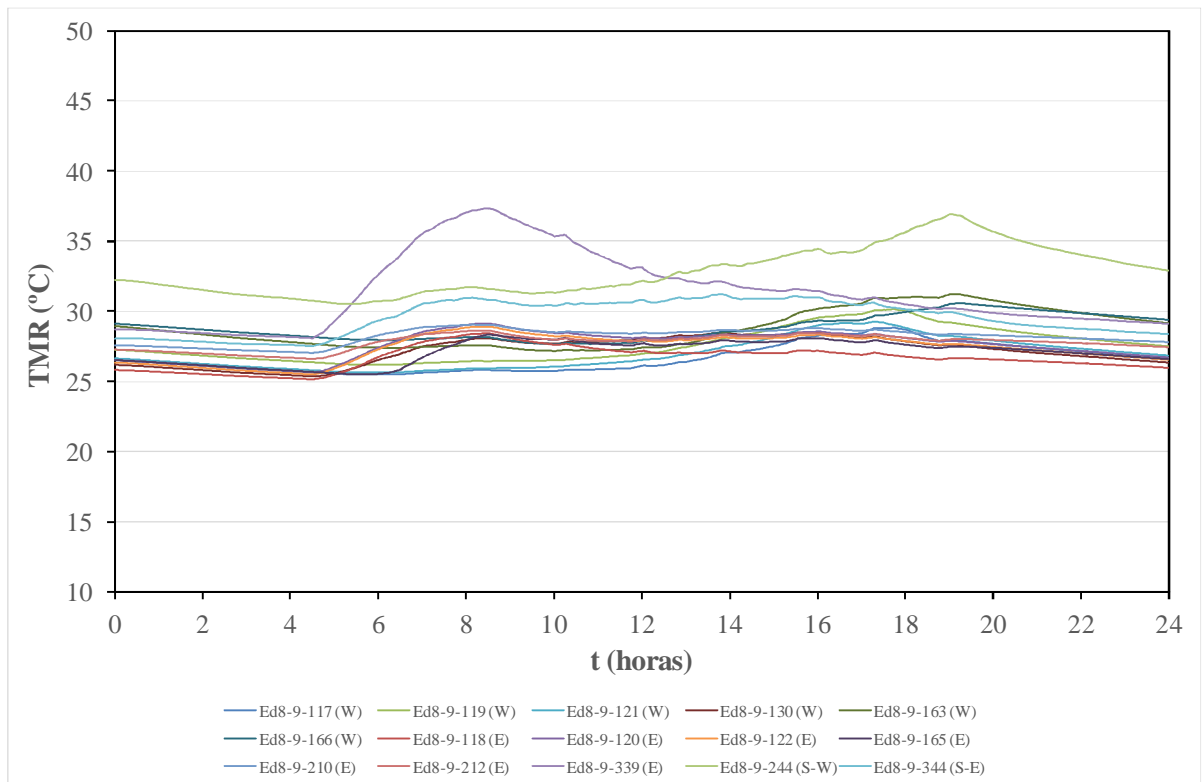


a)

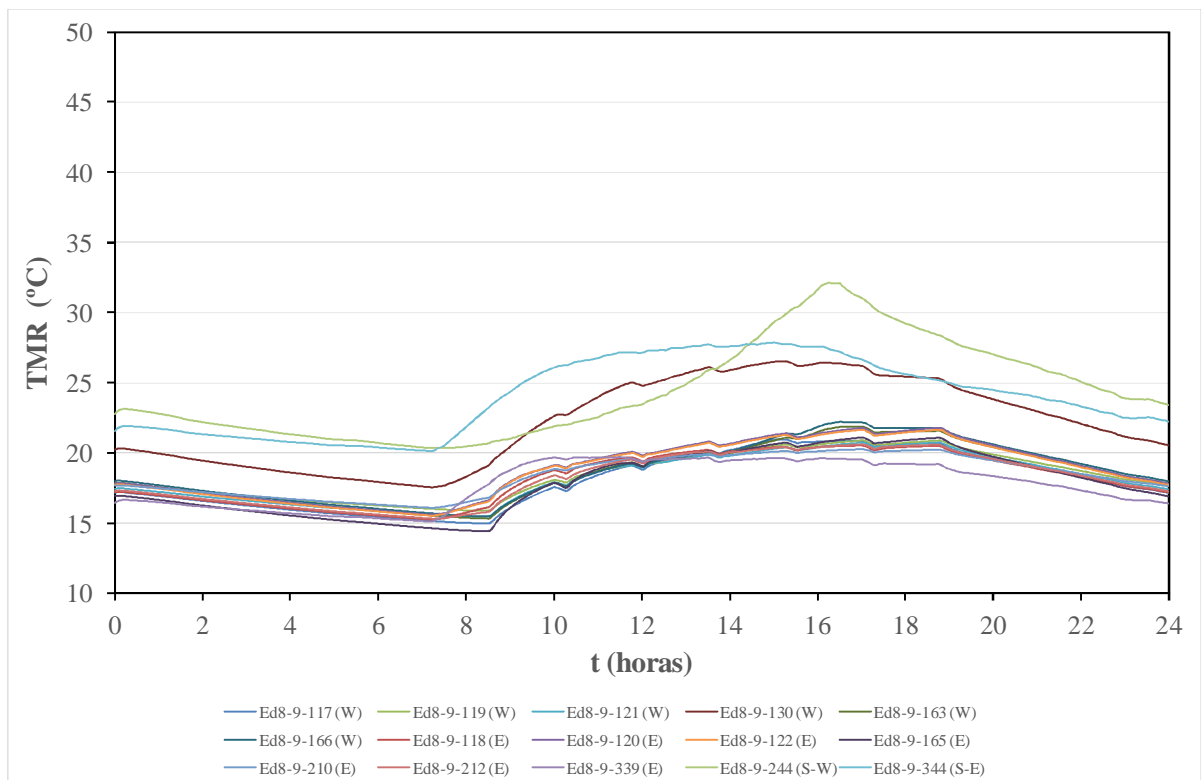


b)

Figura 4.39 – Temperatura média radiante (TMR) na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.



a)



b)

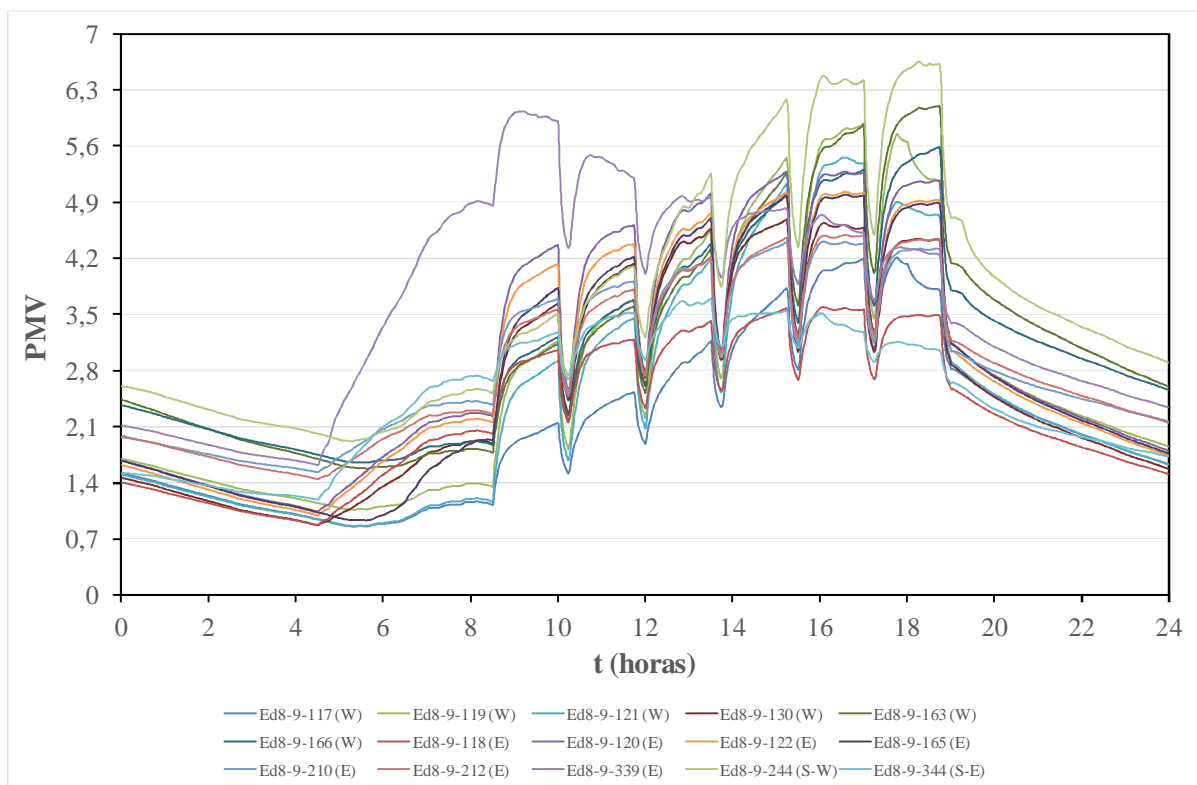
Figura 4.40 – Temperatura média radiante (TMR) na simulação com controlo do índice aPMV de acordo o modelo adaptativo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

4.4.4.6 Índices PMV e aPMV

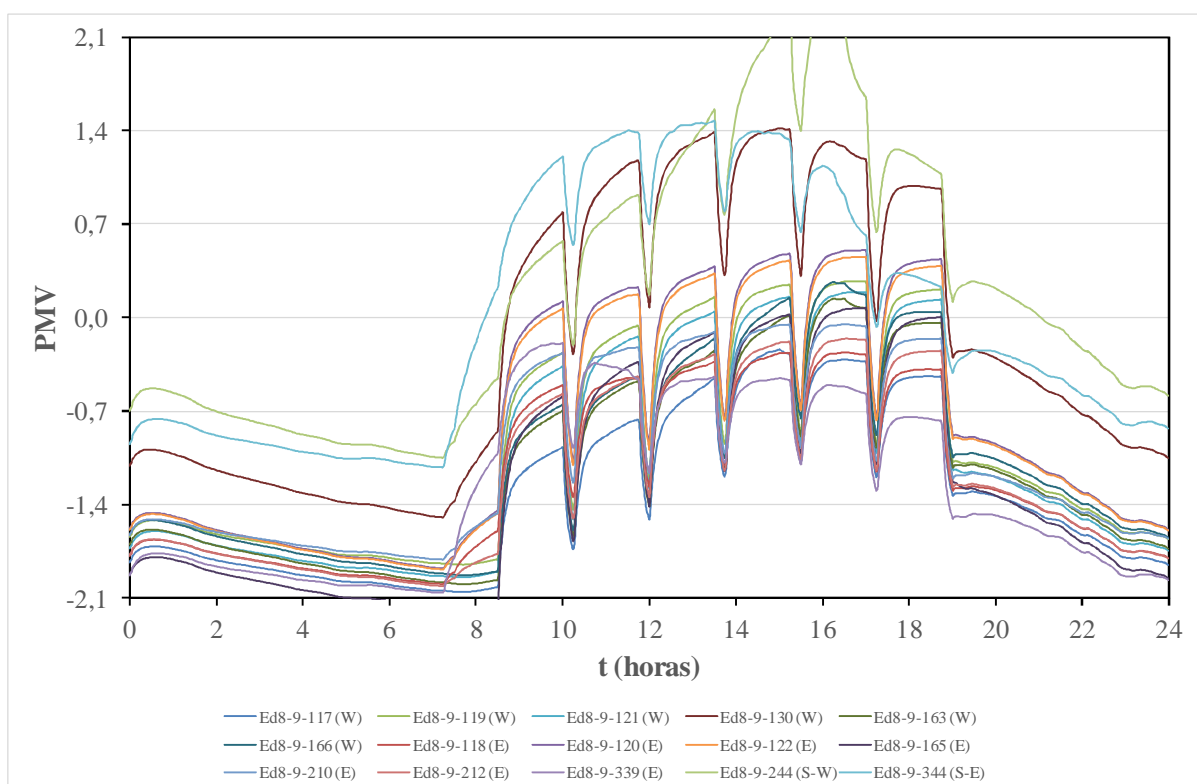
Nas figuras 4.41 e 4.42 são apresentados os resultados do índice PMV nas salas de aula dos edifícios 8 e 9, respetivamente, na simulação sem controlo e na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger. Na figura 4.43 são apresentados os resultados da simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. As figuras a) estão associadas ao verão e as figuras b) estão associadas ao inverno.

Na simulação sem controlo é possível verificar que o índice PMV é mais baixo no inverno, onde atinge valores negativos na maioria das salas, do que no verão, onde atinge valores positivos muito elevados em quase todas as salas. No verão verifica-se que todas as salas estudadas são desconfortáveis por valores positivos do índice PMV de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005). No inverno verifica-se que quase todas as salas estudadas (exceto as salas 119, 130 e 344), durante o seu período de ocupação, são confortáveis de acordo com a categoria C da ISO 7730 (2005): algumas por valores positivos do índice PMV (por exemplo, a sala 120), outras por valores negativos do índice PMV (por exemplo, as salas 121 e 339). Os valores mais elevados do índice PMV encontram-se nas salas com janelas orientadas a sul. Em algumas salas com janelas orientadas a este é possível verificar valores mais elevados durante a manhã e em algumas salas com janelas orientadas a oeste é possível verificar valores mais elevados durante a tarde. É também possível verificar que os picos do índice PMV estão associados com o nível de ocupação das salas entre as 8:30 e as 19 horas.

Na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger, é possível verificar que, em geral, o índice PMV tende a estabilizar próximo de zero, apresentando valores mais elevados em salas com janelas orientadas a sudoeste e a oeste. No verão, o índice PMV apresenta valores mais estáveis próximos de zero do que no inverno. É possível verificar a ocorrência de vários picos que descrevem a ocupação das salas entre as 8:30 e as 19 horas. Durante este período, no inverno, o índice PMV aumenta e é mais elevado do que no verão. No verão, o índice PMV é mais elevado quando as salas não estão ocupadas e o sistema AVAC está desligado. No geral, quando as salas estão ocupadas, o índice PMV varia entre $-0,5$ e $+0,5$, ou seja, de acordo com a categoria B da ISO 7730 (2005). Nalgumas salas (por exemplo as salas 119 e 121), no entanto, verifica-se que no verão o índice PMV aumenta acima da zona de conforto definida pela categoria C da ISO 7730 (2005), porque estas salas têm uma exposição elevada à radiação solar.

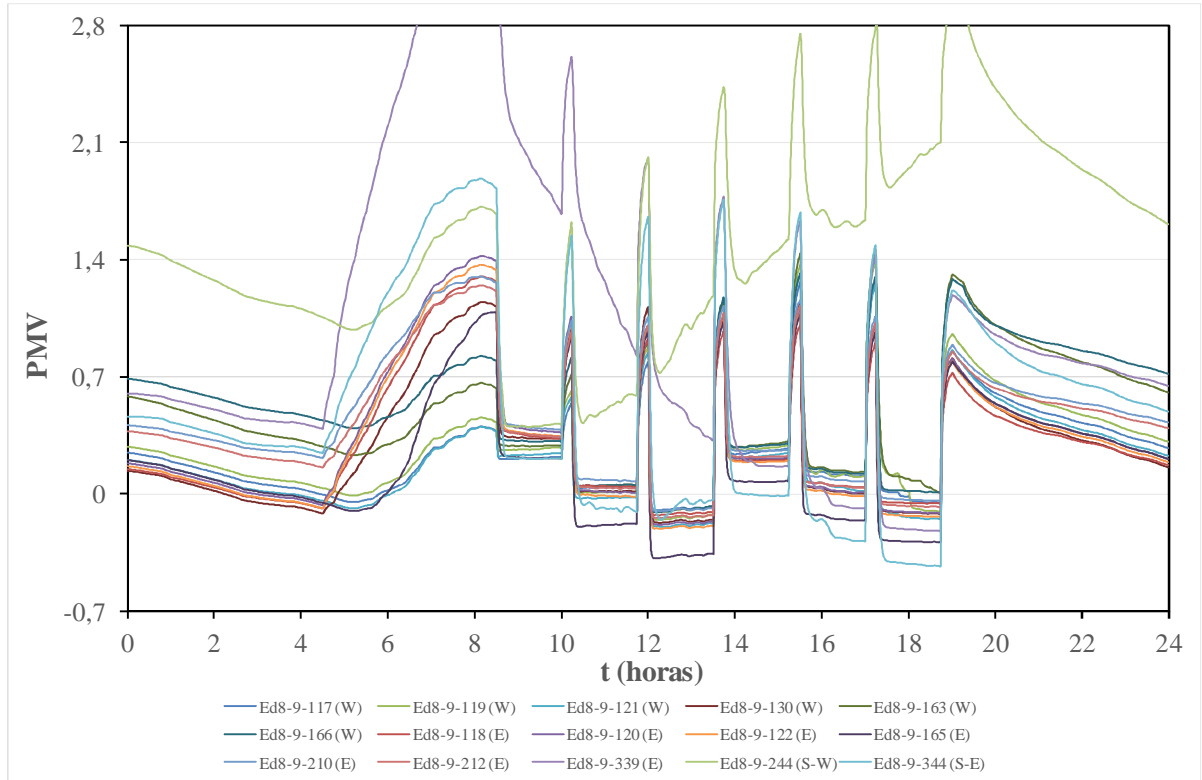


a)

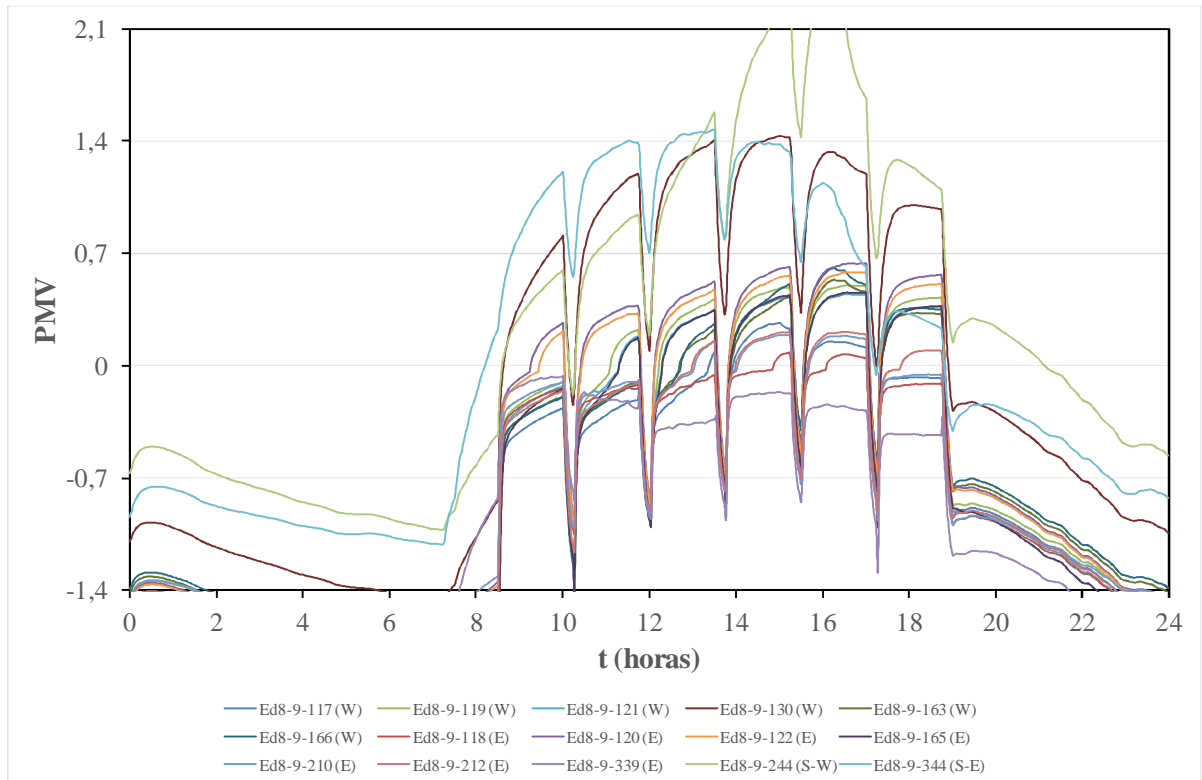


b)

Figura 4.41 – Índice PMV na simulação sem controlo em a) verão e b) inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

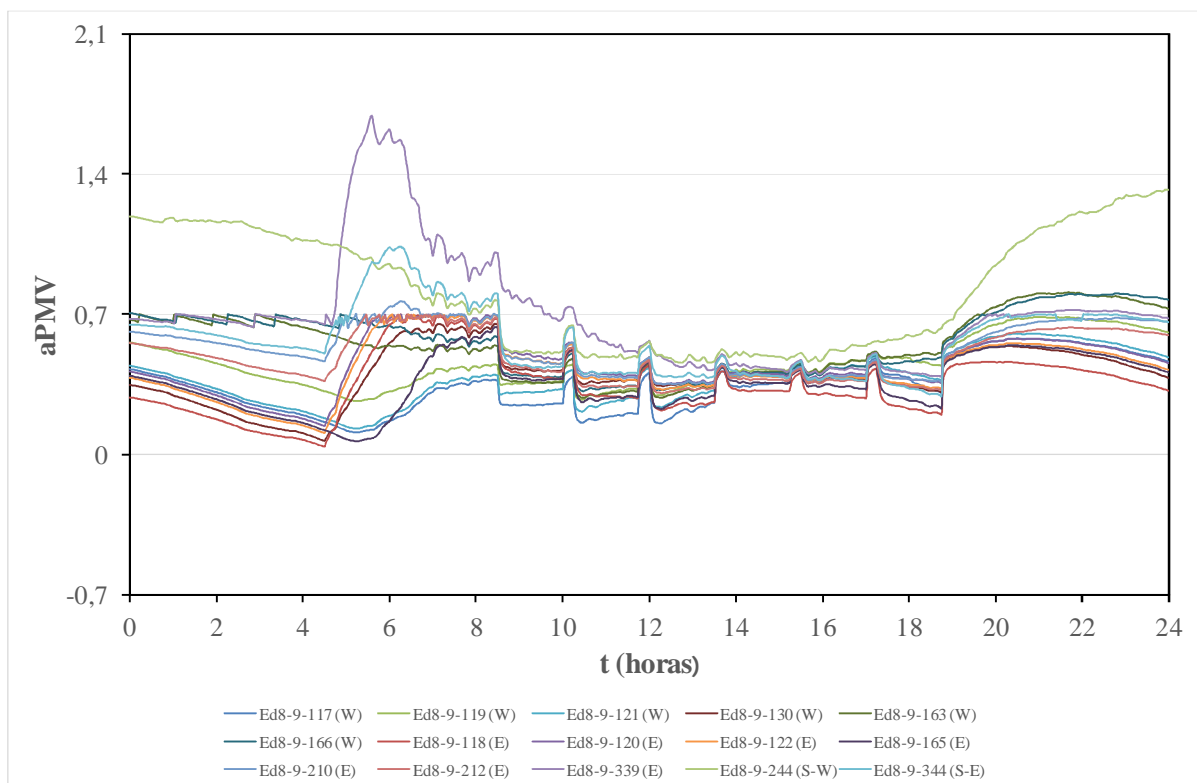


a)

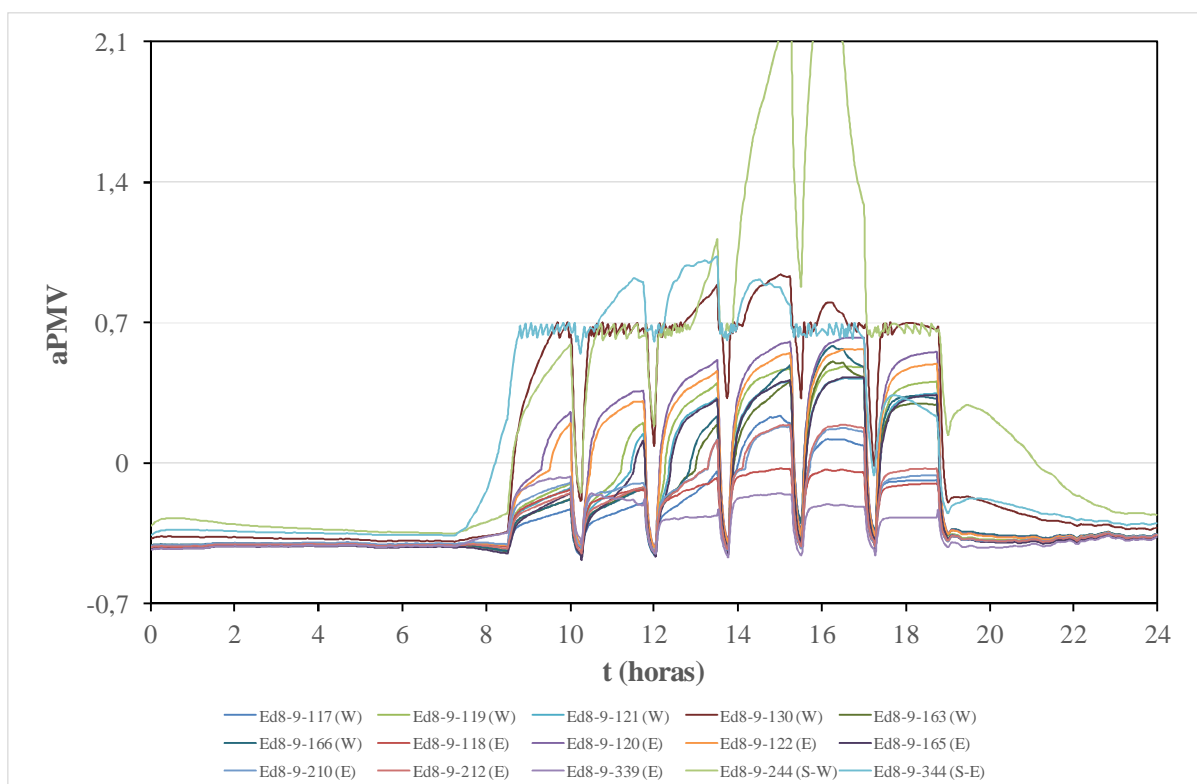


b)

Figura 4.42 – Índice PMV na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger no a) verão e b) inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.



a)



b)

Figura 4.43 – Índice aPMV na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo no a) verão e b) no inverno, no edifício 8/9 do campus de Gambelas.

Na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo é possível verificar que, em geral, o índice aPMV encontra-se próximo de zero, com valores mais elevados em salas com janelas orientadas a sudoeste e a oeste, no inverno. Os valores do índice aPMV são mais elevados no inverno do que no verão e mais estáveis no verão. O índice aPMV de algumas salas (por exemplo, a sala 121) apresenta alguns pequenos e sucessivos picos de forma a manter o seu valor mais ou menos estável (abaixo dos 0,7). É também possível verificar a ocorrência de vários picos que descrevem a ocupação das salas entre as 8:30 e as 19 horas. No inverno os valores do índice aPMV são mais elevados durante o período de ocupação e no verão são mais elevados quando as salas não estão ocupadas. No geral, os valores do índice aPMV variam entre os $-0,5$ e os $+0,7$ durante o inverno e mantem-se próximos de $+0,5$ durante o verão, ou seja, dentro da categoria B ou da categoria C da ISO 7730 (2005). Nota-se, no entanto, que a aplicação deste modelo a salas muito quentes durante o inverno não tem um bom comportamento, devido ao aquecimento provocado pela radiação solar. O modelo não foi ainda projetado para se adaptar a este tipo de situações que ocorrem em climas amenos: existência de compartimentos excessivamente aquecidos em condições de inverno. Este tipo de clima é característico da região onde os edifícios estudados estão implantados, e onde, cada vez mais, as temperaturas no inverno tomam valores muito acima dos expetáveis. Neste tipo de situação, o sistema de climatização não está preparado para ir buscar ar frio ao exterior de modo a arrefecer naturalmente os compartimentos (sistema de “free-cooling”).

4.4.4.7 Horas de desconforto e consumo energético

Na tabela 4.10 encontram-se os valores referentes ao total de horas de desconforto devido à sensação térmica de frio, ao total de horas de desconforto devido à sensação térmica de calor, ao total de horas de desconforto devido à qualidade do ar, ao total de horas de desconforto e ao consumo de energia obtidos em cada simulação, em condições de inverno e em condições de verão. Nesta tabela encontra-se também o resultado da relação entre o número total de horas de desconforto e o consumo de energia.

Na simulação sem controlo, o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de frio é significativo no inverno e nulo no verão, o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de calor é significativo no verão e pouco relevante no inverno e o total de horas de desconforto devido à qualidade do ar no inverno e no verão é semelhante. Nesta simulação não há consumo de energia porque não são considerados quaisquer sistemas AVAC.

Tabela 4.10 – Horas de desconforto e consumo energético.

| SIMULAÇÃO | Sem controlo | | Controlo PMV Fanger | | Controlo aPMV adaptativo | |
|--|--------------|-------|---------------------|-------|--------------------------|-------|
| | Inverno | Verão | Inverno | Verão | Inverno | Verão |
| Total horas de desconforto devido à sensação de frio | 5985 | 0 | 383 | 0 | 0 | 0 |
| Total horas de desconforto devido à sensação de calor | 167 | 9217 | 180 | 214 | 104 | 7 |
| Total horas de desconforto devido à qualidade do ar | 135 | 135 | 135 | 135 | 135 | 135 |
| Total de horas de desconforto | 6287 | 9352 | 698 | 349 | 239 | 142 |
| Consumo (kWh) | 0 | 0 | 5751 | 7645 | 4996 | 6588 |
| Total de horas de desconforto/consumo | 0 | 0 | 0,121 | 0,046 | 0,048 | 0,022 |

Na simulação com controlo do índice PMV, de acordo com o modelo de Fanger, o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de frio é pouco significativo no inverno e nulo no verão e o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de calor é pouco significativo no verão e no inverno, embora o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de calor obtido no inverno é ligeiramente inferior ao total de horas de desconforto devido à sensação térmica de calor obtido no verão. Os valores do total de horas de desconforto devido à qualidade do ar no inverno e no verão são semelhantes. Nesta simulação o valor de consumo de energia obtido no verão é superior ao valor do consumo de energia obtido no inverno.

Na simulação com controlo do índice aPMV, de acordo com o modelo adaptativo, o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de frio é nulo no inverno e no verão e o total de horas de desconforto devido à sensação térmica de calor é pouco significativo no inverno e irrelevante no verão. Os valores do total de horas de desconforto devido à qualidade do ar no inverno e no verão são semelhantes. Nesta simulação o valor do consumo energético obtido no verão é superior ao valor do consumo energético obtido no inverno.

Comparando os resultados das três simulações com diferentes tipos de controlo, a simulação sem controlo apresenta os maiores valores de horas de desconforto devido à sensação térmica de frio e devido à sensação térmica de calor, enquanto a simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo apresenta os menores valores. Em todas as simulações o total de horas de desconforto devido à qualidade do ar é 135. Relativamente ao valor do consumo de energia, a simulação sem controlo apresenta obviamente um valor nulo.

A simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, com um consumo de energia total de 11584 kWh, apresenta os menores valores de consumo de energia. A simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger apresenta o valor de consumo de energia mais elevado, com um valor total de 13396 kWh. Através da relação entre os valores do total das horas de desconforto e do consumo de energia é possível verificar que a simulação com o controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo é a simulação que possui a melhor relação, seguida da simulação com o controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger. Esta relação mostra que existe uma correlação direta entre o menor número de horas de desconforto e o menor consumo de energia.

4.4.5 Estudo comparativo

Neste estudo foram efetuadas três simulações do edifício 8 e 9 do Campus de Gambelas da universidade do Algarve, em Faro, em condições de verão e em condições de inverno. Uma simulação em que não há controlo do caudal de ventilação, uma simulação em que há controlo do caudal de ventilação do sistema AVAC a partir do controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e uma simulação em que há controlo do caudal de ventilação a partir do controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo. Foram analisados os resultados da temperatura do ar, da velocidade do ar, da humidade relativa do ar, da qualidade do ar, da temperatura média radiante, dos valores dos índices PMV e aPMV, do valor total das horas de desconforto e do consumo de energia obtidos em várias salas de aula do edifício.

A análise dos resultados obtidos para a temperatura do ar permite verificar o seguinte:

- Os valores da temperatura do ar obtidos nas simulações com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo são menores do que os valores obtidos na simulação sem controlo;
- No verão os valores da temperatura do ar obtidos na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo são maiores do que os valores obtidos na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger;
- No inverno, os valores da temperatura do ar obtidos na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo não apresentam diferenças significativas relativamente aos valores obtidos na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger;
- Nas simulações onde existe o controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo, o valor da potência de

aquecimento imposto pelo sistema AVAC é mais elevado durante o período de funcionamento de manhã do que durante o restante período de funcionamento. Esta potência vai ser reduzida gradualmente ao longo do dia devido ao aumento da potência (traduzida em calor) proporcionada pelos ocupantes e pela radiação solar.

A análise dos resultados obtidos para a velocidade do ar permite verificar o seguinte:

- Os valores da velocidade do ar obtidos nas simulações com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo são maiores do que os valores obtidos na simulação sem controlo. Neste caso, o valor da velocidade do ar está associado não apenas à taxa de renovação do ar devido às infiltrações, como também à recirculação do ar proporcionada pelo sistema AVAC;
- Os valores da velocidade do ar obtidos nas simulações com o controlo do índice PMV de acordo com os modelos de Fanger e adaptativo são maiores nas condições de verão do que nas condições de inverno. No inverno a potência do sistema de aquecimento apresenta os maiores valores no início das aulas, os quais vão depois decrescer rapidamente. No verão o sistema de ar condicionado, apesar de estar sempre em funcionamento durante o decurso das aulas, vai decrescendo ligeiramente ao longo do dia;
- Os valores da velocidade do ar obtidos na simulação com o controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo são ligeiramente menores do que os valores obtidos na simulação com o controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger. Estes resultados são justificados pelo facto dos sistemas AVAC com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo necessitarem de funcionar com uma potência menor do que os sistemas AVAC com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger.

A análise dos resultados obtidos para a humidade relativa do ar permite verificar o seguinte;

- A humidade relativa do ar diminui quando a temperatura do ar aumenta;
- Em condições de verão, os valores da humidade relativa do ar obtidos na simulação com o controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo são ligeiramente menores do que os valores obtidos na simulação com o controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger e ligeiramente maiores do que os valores obtidos na simulação sem controlo;

- Em condições de inverno, os valores da humidade relativa do ar obtidos nas três simulações são muito semelhantes entre si.

A análise dos resultados obtidos para a temperatura média radiante permite verificar que as três simulações são muito semelhantes entre si.

A análise dos resultados obtidos para os índices PMV e aPMV permite verificar o seguinte:

- Em condições de verão, os valores do índice aPMV obtidos na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo garantem melhores níveis de conforto térmico do que os valores do índice PMV obtidos na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger. Nesta situação, em geral, os valores do índice aPMV variam entre 0 e +0,7, apresentando a generalidade das salas níveis de conforto térmico dentro da categoria C da ISO7730 (2005);
- Em condições de inverno, os valores do índice aPMV obtidos na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo garantem melhores níveis de conforto térmico do que os valores do índice PMV obtidos na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger. Nesta situação, em geral, os valores do índice aPMV variam entre -0,5 e +0,7, apresentando a generalidade das salas níveis de conforto térmico dentro das categorias B e C da ISO7730 (2005);
- Comparativamente, a diferença entre os valores do índice aPMV obtidos na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo e os valores do índice PMV obtidos na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo Fanger são maiores em condições de verão do que em condições de inverno.

A análise dos resultados obtidos para as horas totais de desconforto devido à sensação térmica de frio, para as horas totais de desconforto devido à sensação térmica de calor, para as horas totais de desconforto devido à qualidade do ar e para o consumo de energia permite verificar o seguinte:

- Nas três simulações o valor do total das horas de desconforto devido à sensação térmica de frio obtido é nulo e o valor do total de horas de desconforto devido à qualidade do ar obtido é igual a 135 horas;
- Os valores dos totais das horas de desconforto devido à sensação térmica de calor obtidos nas simulações sem controlo e com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de

Fanger são maiores em condições de verão do que em condições de inverno, exceto na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo onde os valores totais das horas de desconforto devido à sensação térmica de calor são maiores em condições de inverno do que em condições de verão;

- O valor do total das horas de desconforto obtido com a simulação com controlo do índice aPMV é o menor dos valores obtidos nas três simulações efetuadas;
- Os valores do consumo de energia e da relação entre o total das horas de desconforto e o consumo de energia obtidos na simulação com controlo do índice aPMV de acordo com o modelo adaptativo são menores do que os valores obtidos na simulação com controlo do índice PMV de acordo com o modelo de Fanger.

4.5 Modelos integrais

Nesta seção são apresentados os modelos térmico e aerotérmico, desenvolvidos a partir de simulações numéricas do comportamento térmico de dois edifícios: uma escola do 2º e 3º ciclo, em Olhão, e uma biblioteca do Campus de Gambelas, em Faro.

4.5.1 Modelo térmico

4.5.1.1 Identificação e descrição do edifício escolar

Este estudo foi efetuado num complexo escolar destinado a jovens com idades compreendidas entre os 10 e os 15 anos. Foram considerados o edifício principal e dois outros edifícios. A ideia deste estudo, mais uma vez, é aplicar um modelo numérico de modo a definirem-se estratégias passivas e ativas neste complexo escolar de modo a aumentar o nível de conforto térmico, mantendo a qualidade do ar dentro dos valores admissíveis e simultaneamente obter baixos níveis de consumo de energia.

O complexo escolar, onde se encontram os três edifícios utilizados neste estudo, está localizado em Olhão. Na simulação numérica deste complexo escolar (ver figura 4.44 e tabela 4.11) são considerados 94 compartimentos (salas de aula, gabinetes, salas administrativas, cozinha, sala de convívio dos alunos, bar, cantina, biblioteca, auditório, quartos de banho, arrecadações, vestiários, corredores, átrios e escadas), 1578 elementos construtivos (os principais) e 307 janelas e painéis de vidros. Na construção dos edifícios foram utilizados, principalmente, tijolo duplo nas paredes externas, tijolo simples nas paredes internas, cobertura de cimento no teto, uma camada de vários metros de terra no chão coberta por

betonilha e cimento, portas interiores e exteriores (que incluem várias camadas de madeira) e dispositivos de sombreamento externos (constituídos por estores de alumínio).

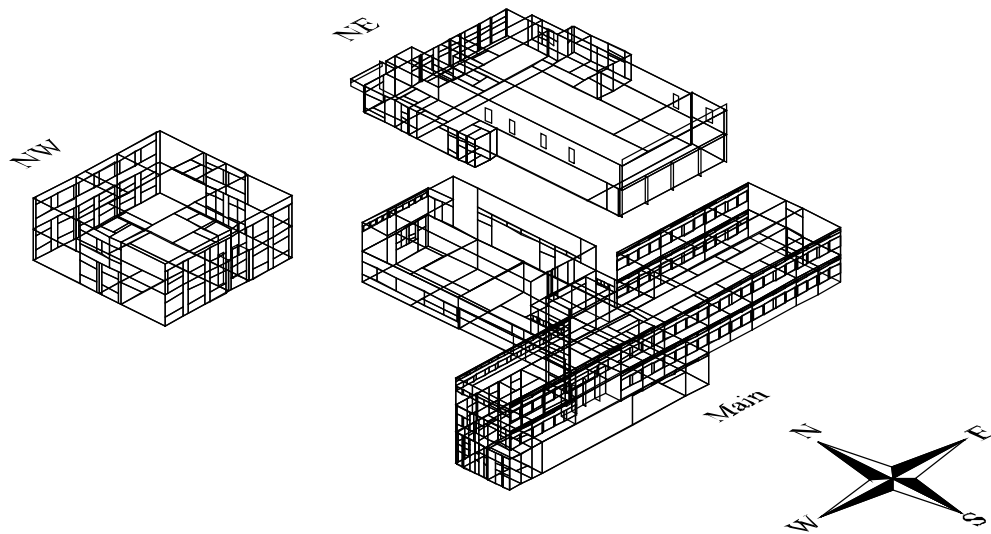


Figura 4.44 – Esquema dos edifícios escolares analisados: edifício principal (*main*), edifício noroeste (NW) e edifício nordeste (NE).

Tabela 4.11 – Identificação dos diferentes compartimentos utilizados na simulação.

| | Número dos compartimentos |
|-----------------------------------|--|
| Salas de aula | 16, 30, 34, 35, 37, 41, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 62, 65, 68, 77, 79, 80, 84 |
| Gabinetes e salas administrativas | 7, 17, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 69, 70, 71, 72, 74, 81, 82, 83, 91 |
| Cozinha | 9 |
| Sala de convívio e bar | 12 |
| Cantina | 6 |
| Biblioteca | 46, 47 |
| Auditório | 73 |
| Arrecadações | 2, 3, 4, 5, 8, 14, 15, 18, 22, 24, 36, 40, 60, 61, 66, 67, 75, 76, 85, 86, 90, 92, 93, 94 |
| Quartos de banho | 38, 39, 44, 45, 63 |
| Vestiários | 42, 43, 87, 88 |
| Corredores, átrios e escadas | 10, 11, 23, 31, 56, 64, 78, 89 |

Edifício principal

O edifício principal da escola é o maior edifício, possui 3 pisos e 56 compartimentos. Na figura 4.45 são apresentadas duas perspetivas deste edifício. Quanto à sua utilização, é um edifício multifuncional que incorpora a sala de convívio, o refeitório, a cozinha, gabinetes, salas administrativas, sala de impressão, arrecadações, salas de aula e ginásio. A entrada principal do edifício situa-se ao nível do rés-do-chão; no entanto parte do edifício tem compartimentos, localizados a norte e a oeste, situados ao nível de um piso inferior (piso -1). A maior parte das janelas do edifício são orientadas a sul e a norte.



a)



b)

Figura 4.45 – Perspetivas do edifício principal da escola básica 2/3 de Olhão: a) lado poente; b) lado nascente. (Fonte: <http://www.google.pt/maps/>, acedido a 5/10/2016).

A figura 4.46 mostra a disposição dos compartimentos por cada piso do edifício.

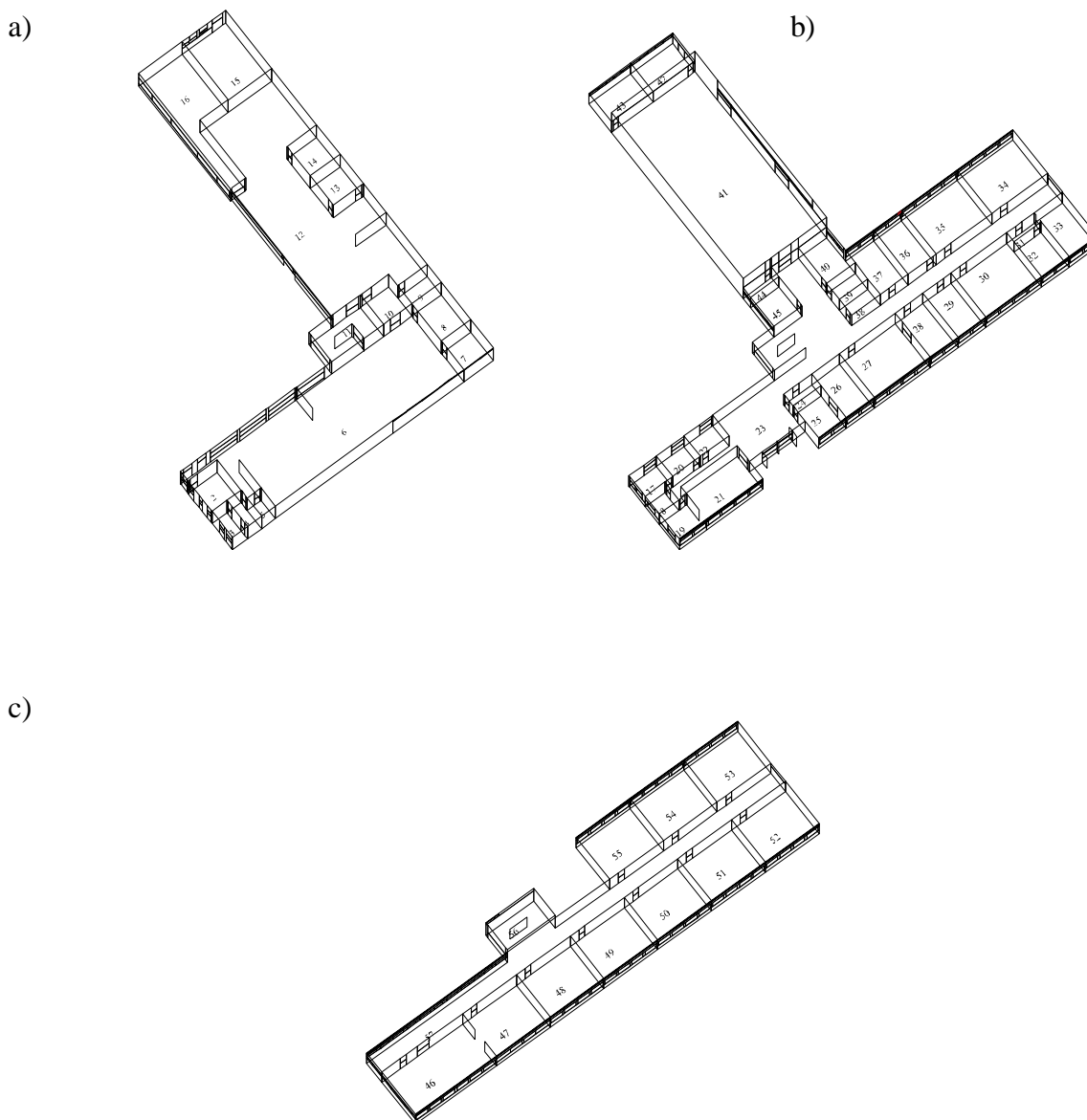


Figura 4.46 – Disposição dos compartimentos por cada piso do edifício principal da escola básica 2/3 de Olhão: a) rés-do-chão; b) 1º andar; c) 2º andar.

Edifício noroeste

O edifício noroeste (figura 4.47) tem 25 compartimentos e dois pisos. Os compartimentos do piso térreo são usados principalmente para gabinetes, salas de aula e auditório, enquanto os compartimentos do primeiro andar são usados como salas de aula. A generalidade do edifício possui janelas voltadas a sul e a norte.

A figura 4.48 mostra a disposição dos compartimentos por cada piso do edifício.

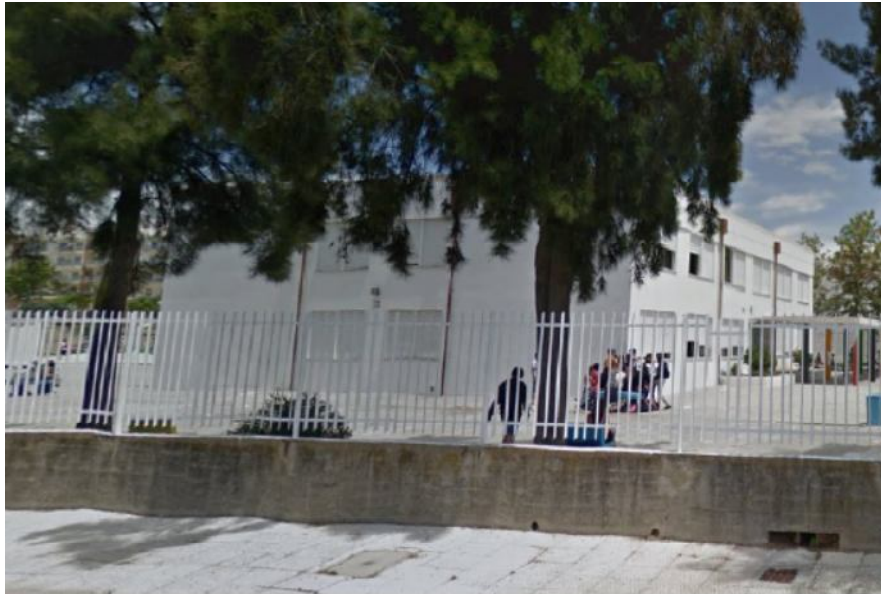


Figura 4.47 – Perspetiva do edifício noroeste da escola básica 2/3 de Olhão (Fonte: <http://www.google.pt/maps/>, acessido a 5/10/2016).

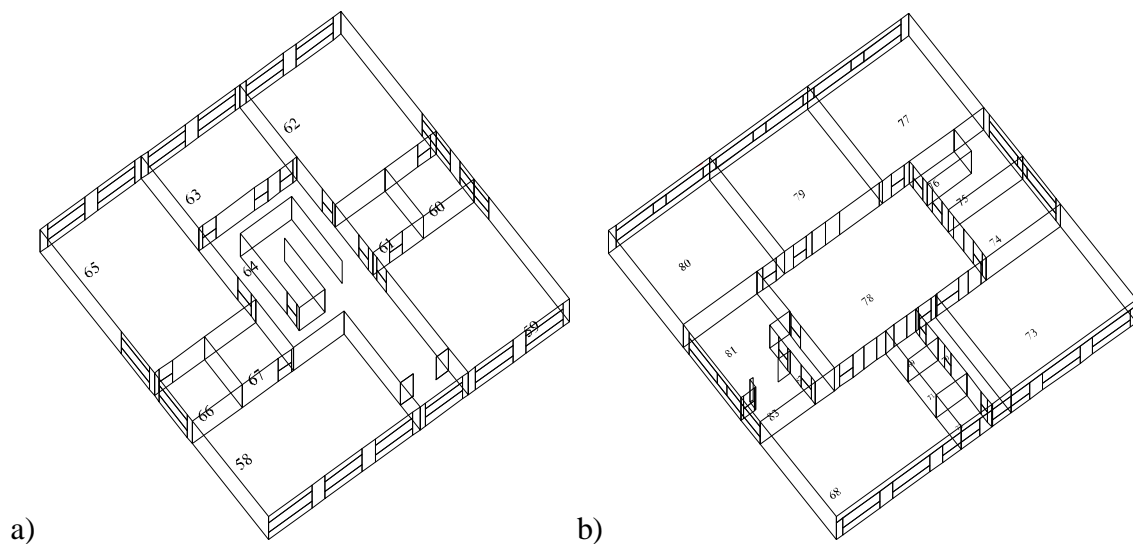


Figura 4.48 – Disposição dos compartimentos por cada piso do edifício noroeste da escola básica 2/3 de Olhão: a) rés-do-chão; b) 1º andar.

Edifício nordeste

O edifício nordeste (figura 4.49) tem 11 compartimentos distribuídos por um piso. A maior parte deste edifício é ocupado pelo ginásio, destinado à prática de vários desportos e de educação física escolar (compartimento 84).

A figura 4.50 mostra a disposição dos compartimentos neste edifício.



Figura 4.49 – Perspetiva do edifício nordeste da escola básica 2/3 de Olhão (Fonte: <http://www.google.pt/maps/>, acessido a 5/10/2016).

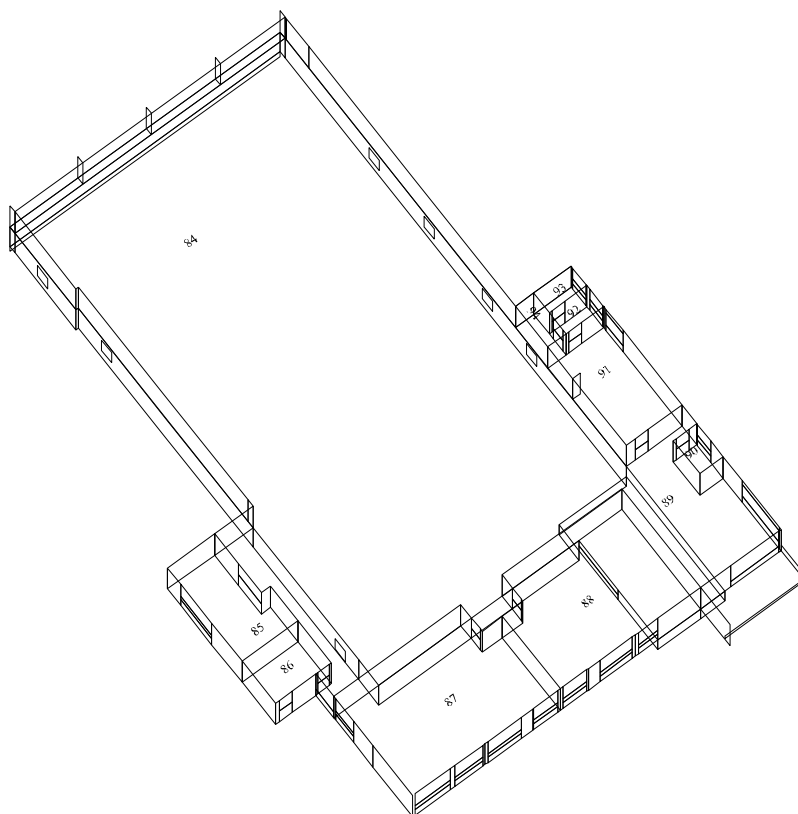


Figura 4.50 – Disposição dos compartimentos do edifício nordeste da escola básica 2/3 de Olhão.

4.5.1.2 Introdução de dados no modelo numérico

Neste ponto são apresentados os seguintes dados de entrada no modelo numérico: dados meteorológicos, ciclo de ocupação, topologia de ventilação, nível de vestuário dos ocupantes e nível de atividade dos ocupantes.

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados no modelo numérico incluem a temperatura do ar exterior, a humidade relativa do ar exterior, a velocidade do vento e a direção do vento. Na entrada de dados meteorológicos, entre as 0 e as 24 horas, é usado como referência o dia 21 de cada mês. Estes dias, com céu claro, são uma média representativa do mês. As medições foram obtidas através de uma estação meteorológica, localizada nas proximidades do edifício escolar, tendo sido registadas no ano de 2005. Mais pormenores podem ser consultados no ponto 4.1.1.

Ciclo de ocupação

A qualidade do ar e o nível de conforto térmico no interior dos espaços são diretamente influenciados pelo nível de ocupação humana.

A tabela 4.12 mostra o ciclo de ocupação durante um dia típico de funcionamento da escola, em todos os espaços ocupados, durante as aulas e os respetivos intervalos.

Topologia de ventilação utilizada

Nesta simulação são consideradas a ventilação cruzada e a ventilação natural.

Na ventilação cruzada, em cada compartimento, de acordo com o Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril, as taxas de renovação do fluxo do ar consideradas são:

- Salas sem ocupação: uma renovação por hora;
- Salas sem ocupação e sem janelas: zero renovações por hora;
- Salas com ocupação: o valor sugerido pelo decreto-lei acima citado.

A ventilação cruzada é garantida, neste estudo, através da abertura da porta principal e das janelas ou através de um sistema de ventilação forçada implementado na janela principal.

Tabela 4.12 – Ciclo de ocupação nos espaços ocupados durante as aulas e respectivos intervalos.

| Compartimentos | 0:00 | 8:30 | 10:00 | 10:20 | 11:50 | 11:55 | 13:25 | 13:40 | 15:10 | 15:20 | 16:50 |
|--|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | - 8:30 | - 10:00 | - 10:20 | - 11:50 | - 11:55 | - 13:25 | - 13:40 | - 15:10 | - 15:20 | - 16:50 | - 24:00 |
| 16, 30, 34, 35, 37, 41, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 62, 65, 68, 77, 79, 80, 84 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 |
| 37 | 0 | 13 | 0 | 13 | 0 | 13 | 0 | 13 | 0 | 13 | 0 |
| 21 | 0 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 0 |
| 27 | 0 | 3 | 40 | 3 | 40 | 3 | 40 | 3 | 40 | 3 | 0 |
| 28 | 0 | 3 | 6 | 3 | 6 | 3 | 6 | 3 | 6 | 3 | 0 |
| 29, 74 | 0 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 0 |
| 7, 13, 19, 20, 25, 32, 33, 69, 70, 71, 72, 81, 82, 83, 91 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 12 | 0 | 3 | 150 | 3 | 150 | 3 | 150 | 3 | 150 | 3 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 0 | 1 | 30 | 1 | 30 | 1 | 30 | 1 | 30 | 1 | 0 |
| 47 | 0 | 1 | 10 | 1 | 10 | 1 | 10 | 1 | 10 | 1 | 0 |
| 73 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 |
| 2, 3, 4, 5, 8, 14, 15, 18, 22, 24, 36, 40, 60, 61, 66, 67, 75, 76, 85, 86, 90, 92, 93, 94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 52, 53, 63 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 | 25 | 0 |
| 42, 43, 87, 88 | 0 | 0 | 12 | 0 | 12 | 0 | 12 | 0 | 12 | 0 | 0 |
| 11, 23, 31, 56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

No que se refere à ventilação natural, apenas são consideradas as infiltrações pela porta e pelas janelas. Nesta simulação, na definição das taxas de renovação e do caudal foram utilizados os valores presentes na tabela 4.2, apresentada no ponto 4.1.3, obtidos a partir de ensaios experimentais. Neste estudo, as taxas de renovação e as velocidades do ar utilizadas em cada mês são, respetivamente, as seguintes:

- Janeiro, fevereiro, março, abril, maio, outubro, novembro e dezembro: 1,32 1/h e 0,27 m/s;
- Junho, julho, agosto e setembro: 5,36 1/h e 0,59 m/s.

O caudal volúmico do ar utilizado nas situações em que se utiliza ventilação natural e ventilação forçada, para os intervalos de tempo considerados, nos espaços ocupados, está presente, respetivamente, nas tabelas 4.13 e 4.14. Nas tabelas 4.13 e 4.14 são apresentados os valores correspondentes às trocas entre os compartimentos e o exterior e vice-versa. O caudal volúmico é calculado em função da taxa de renovação e do volume das salas.

Tabela 4.13 – Caudal volúmico de ar (m³/s) quando se utiliza ventilação natural.

| Compartimento | 0:00 | 8:30 | 10:00 | 10:20 | 11:50 | 11:55 | 13:25 | 13:40 | 15:10 | 15:20 | 16:50 |
|--|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| | - 8:30 | - 10:00 | - 10:20 | - 11:50 | - 11:55 | - 13:25 | - 13:40 | - 15:10 | - 15:20 | - 16:50 | - 0:00 |
| 2, 7,13,14, 25 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 | 0,021 |
| 3, 83 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| 4 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,009 |
| 5, 31, 44 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 |
| 6 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 | 0,305 |
| 8, 74 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 |
| 9 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 |
| 10, 45 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| 11 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 |
| 12 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 |
| 15, 16, 20 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 | 0,062 |
| 17, 86 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 | 0,013 |
| 18, 24, 71, 82 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,008 |
| 19 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 |
| 21 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| 22, 70 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 |
| 23 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 | 0,199 |
| 26, 28, 29, 36, 37 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 | 0,029 |
| 32 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 |
| 34, 35, 46,47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 |
| 38, 39, 58, 65, 85 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 |
| 40 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 |
| 41 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 |
| 42, 43 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 | 0,028 |
| 46 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 | 0,087 |
| 56 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 |
| 57 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 | 0,187 |
| 59 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 |
| 60, 67 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 |
| 61, 66 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 |
| 62 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 | 0,092 |
| 63 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 | 0,054 |
| 64 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 | 0,089 |
| 68, 73 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 | 0,091 |
| 69, 72, 76 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 |
| 75 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 |
| 77, 80 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 | 0,073 |
| 78 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 | 0,112 |
| 79 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 |
| 81 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,017 |
| 84 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 | 1,519 |
| 87 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 | 0,078 |
| 88 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 |
| 89 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 | 0,059 |
| 90, 92, 93, 94 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
| 91 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 | 0,031 |

Tabela 4.14 – Caudal volúmico de ar (m³/s) quando se utiliza ventilação forçada.

| Compartimento | 0:00 | 8:30 | 10:00 | 10:20 | 11:50 | 11:55 | 13:25 | 13:40 | 15:10 | 15:20 | 16:50 |
|--|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| | - 8:30 | - 10:00 | - 10:20 | - 11:50 | - 11:55 | - 13:25 | - 13:40 | - 15:10 | - 15:20 | - 16:50 | - 0:00 |
| 2 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 |
| 3 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,023 |
| 4 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 | 0,022 |
| 5, 44 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 |
| 6 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 | 0,739 |
| 7 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 |
| 8 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 | 0,066 |
| 9 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| 10 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 | 0,049 |
| 11 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 | 0,090 |
| 12 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 | 0,262 |
| 13, 14, 25 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 | 0,052 |
| 15 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 | 0,151 |
| 16 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,150 |
| 17, 86 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| 18, 71, 82 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| 19 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 | 0,039 |
| 20, 22 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 | 0,033 |
| 21 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 | 0,108 |
| 23 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 | 0,482 |
| 24 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 | 0,019 |
| 26, 28, 29, 36, 37 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 | 0,070 |
| 27, 30, 34, 35, 47, 48, 49,51, 52, 53, 54, 55 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 | 0,140 |
| 31 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 |
| 32 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 | 0,055 |
| 33 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 | 0,071 |
| 38 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 |
| 39, 85 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 | 0,026 |
| 40 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 | 0,058 |
| 41 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 | 1,492 |
| 42, 43 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 | 0,068 |
| 45 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 | 0,048 |
| 46 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 | 0,210 |
| 56 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 | 0,097 |
| 57 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 | 0,452 |
| 58 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 | 0,266 |
| 59 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 |
| 60, 67 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 |
| 61, 66 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 | 0,044 |
| 62 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 | 0,222 |
| 63 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 | 0,130 |
| 64 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 | 0,215 |
| 65 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 | 0,267 |
| 68 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 |
| 69 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 |
| 70 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 |
| 72, 76 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 |
| 73 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 | 0,221 |
| 74 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 | 0,065 |
| 75 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,037 |
| 77, 80 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,176 |
| 78 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 | 0,272 |
| 79 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 | 0,170 |
| 81 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 | 0,040 |
| 83 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | 0,024 |
| 84 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 | 3,674 |
| 87 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 | 0,190 |
| 88 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 | 0,179 |
| 89 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 |
| 90, 92, 93, 94 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 | 0,011 |
| 91 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 |

Nível de vestuário dos ocupantes

De acordo com Endravadan *et al.* (2004), a mudança de vestuário é o mais importante meio de adaptação. Neste estudo, o nível de vestuário considerado, em cada mês, é o seguinte:

Janeiro, fevereiro e dezembro: 1 clo;

Março, abril, maio, setembro, outubro e novembro: 0,75 clo;

Junho, julho e agosto: 0,5 clo.

Nível de atividade dos ocupantes

Na simulação efetuada, o nível de atividade considerado é apresentado no ponto 4.1.5.

4.5.1.3 Aplicação do índice aPMV

Os resultados obtidos para o índice de conforto aPMV das salas de aula, quando a ventilação cruzada é utilizada, são apresentados nas figuras 4.51, 4.52, 4.53 e 4.54, respetivamente, para o primeiro, segundo, terceiro e quarto trimestre. Nas figuras 4.55, 4.56, 4.57 e 4.58, são apresentados os resultados obtidos para o índice de conforto aPMV em outros espaços, quando a ventilação cruzada é utilizada, respetivamente, para o primeiro, segundo, terceiro e quarto trimestre. Na legenda dessas figuras os termos M, NW e NE, colocado antes dos parênteses, estão associados ao edifício principal, ao edifício noroeste e ao edifício nordeste, respetivamente. Os termos N, S, E e W, colocados entre parênteses, estão associados, respetivamente ao norte, sul, este e oeste, enquanto o número colocado após os parênteses refere-se ao número do compartimento.

Em geral, durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro as condições de conforto térmico nas salas de aula não são aceitáveis (com níveis de desconforto térmico próximos da categoria C), por valores negativos do índice aPMV, de acordo com a norma ISO 7730 (2005). No entanto, em quatro salas de aula com janelas voltadas a sul, verificam-se condições de conforto térmico aceitáveis, de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005), porque a orientação das janelas permite receber o contributo da radiação solar incidente.

Nos meses de março, abril, maio e junho as salas de aula apresentam condições de conforto térmico aceitáveis de acordo com a categoria B da norma ISO 7730 (2005): na parte da manhã por valores negativos do índice aPMV e no período da tarde por valores positivos do índice aPMV. No entanto, em maio, nas salas de aula do edifício nordeste voltadas para norte e sudoeste, verificam-se condições de desconforto térmico.

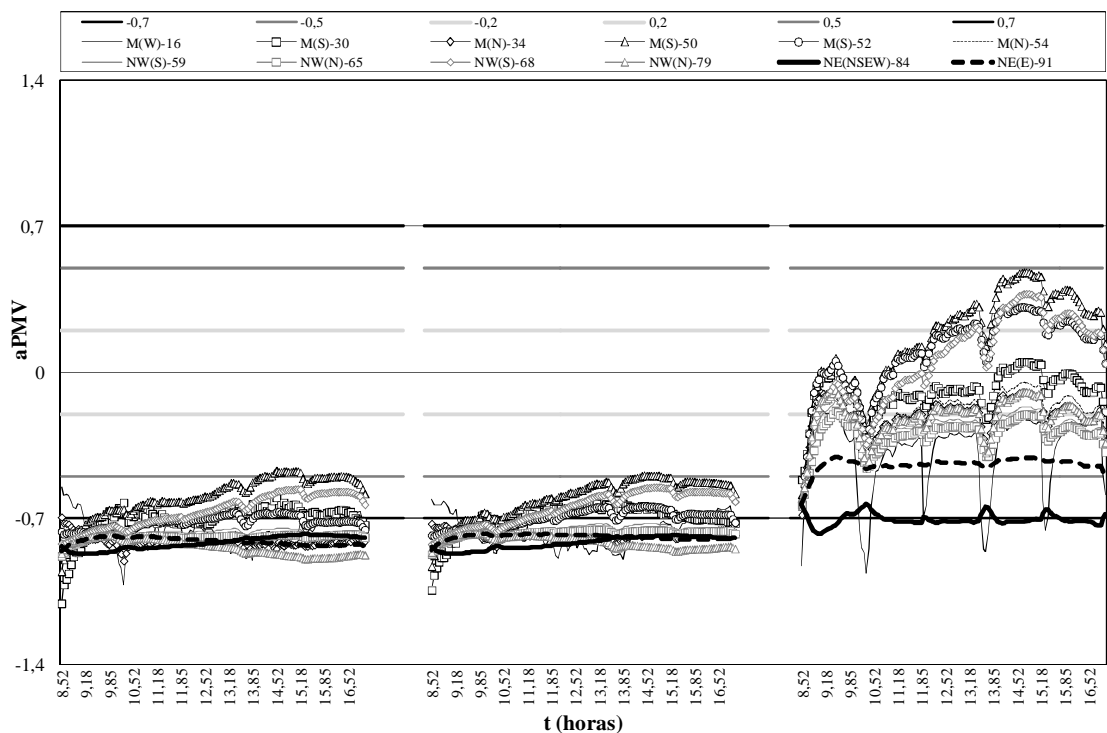


Figura 4.51 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em janeiro, fevereiro e março (primeiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

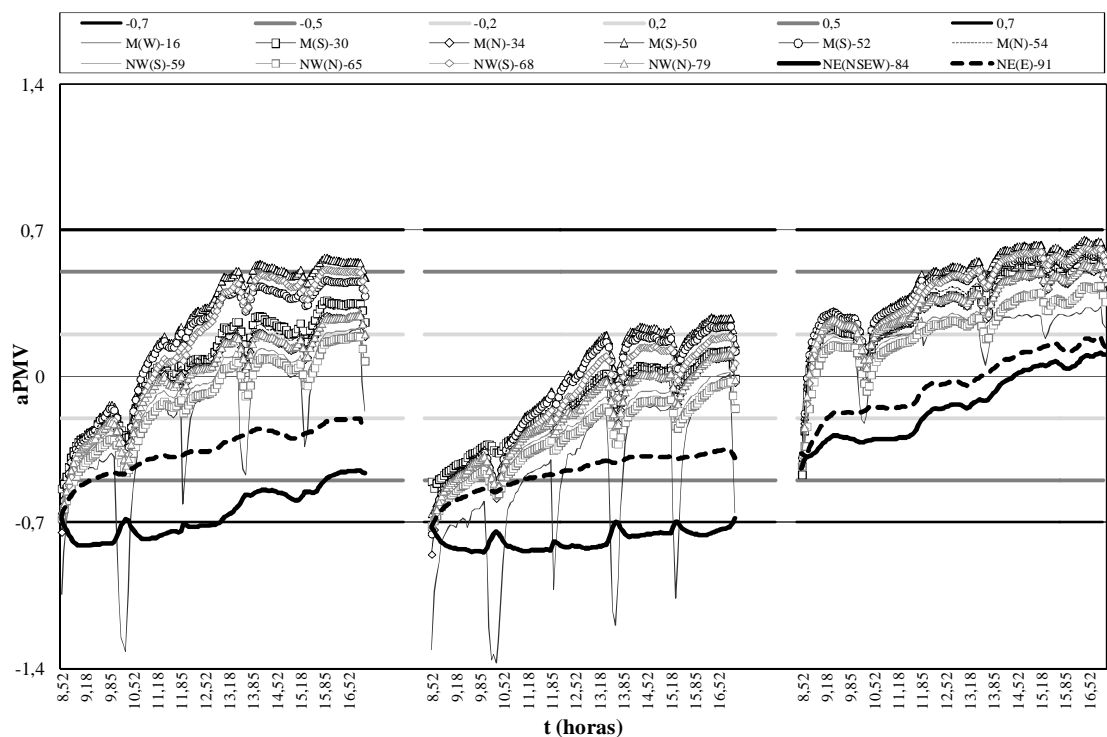


Figura 4.52 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em abril, maio e junho (segundo trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

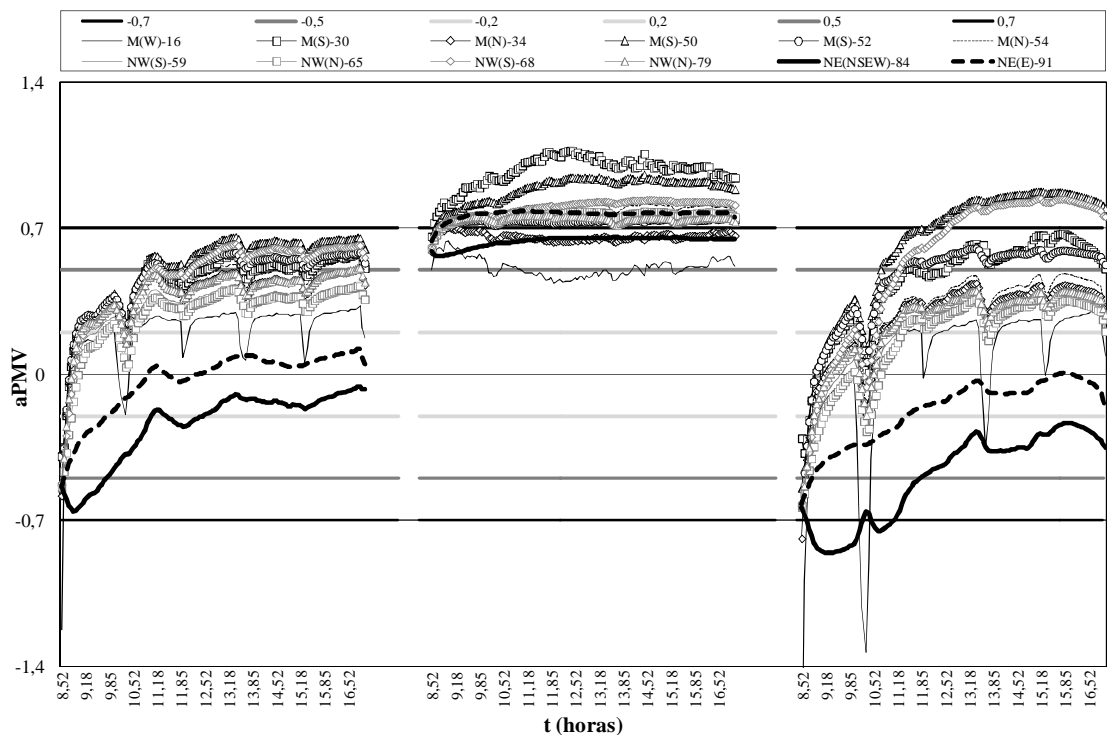


Figura 4.53 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em julho, agosto e setembro (terceiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

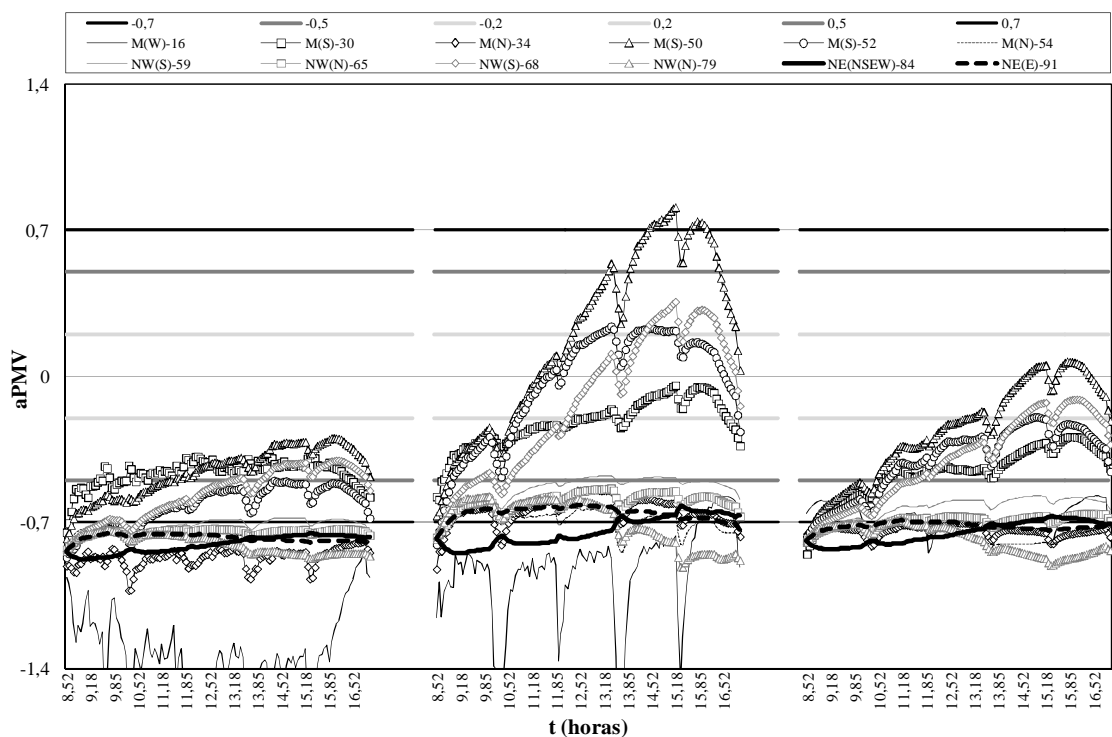


Figura 4.54 – Índice aPMV obtido para as salas de aula em outubro, novembro e dezembro (quarto trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

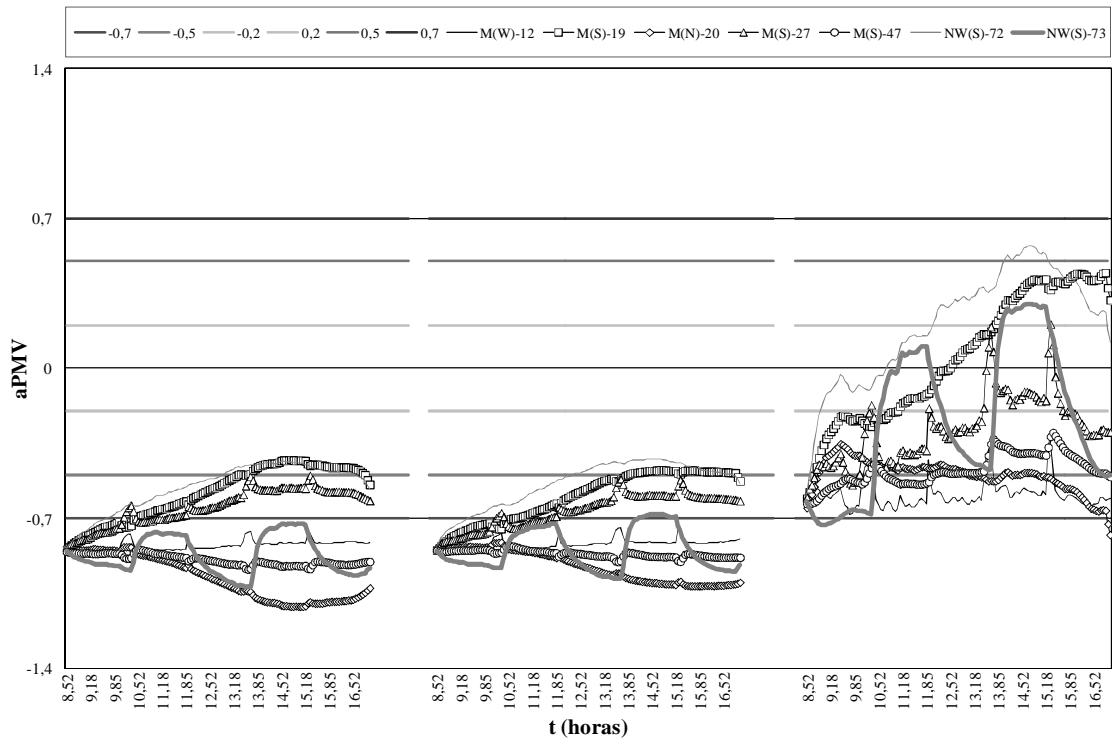


Figura 4.55 – Índice aPMV obtido para outras salas em janeiro, fevereiro e março (primeiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

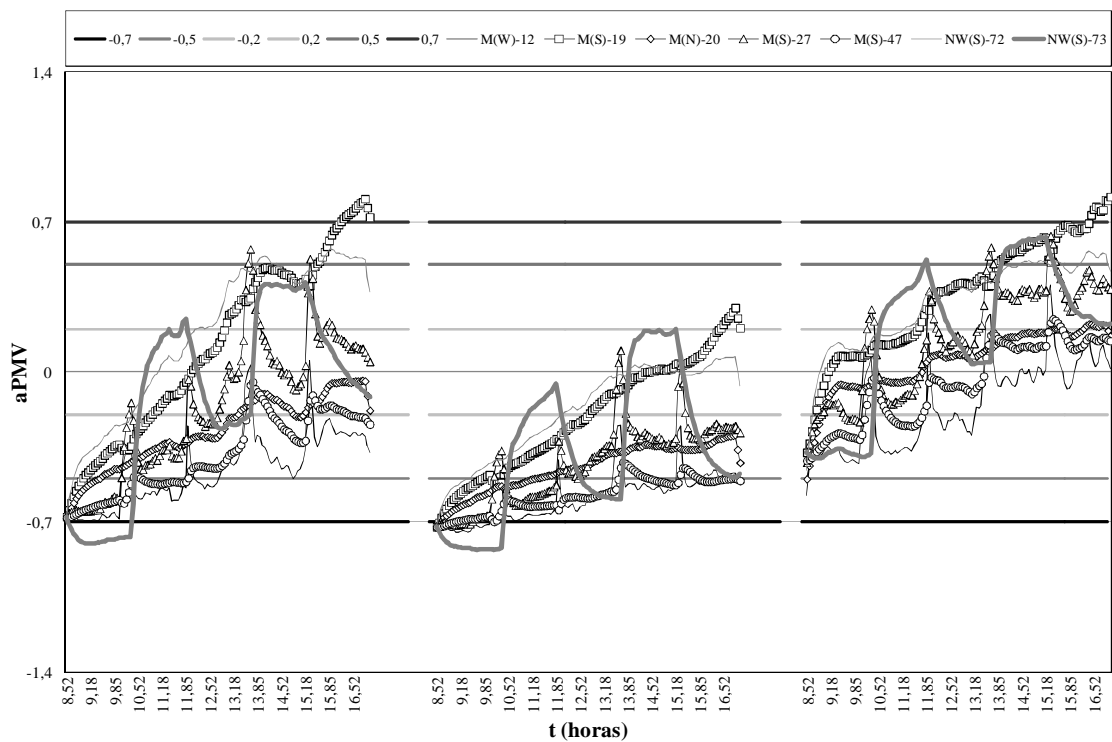


Figura 4.56 – Índice aPMV obtido para outras salas em abril, maio e junho (segundo trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

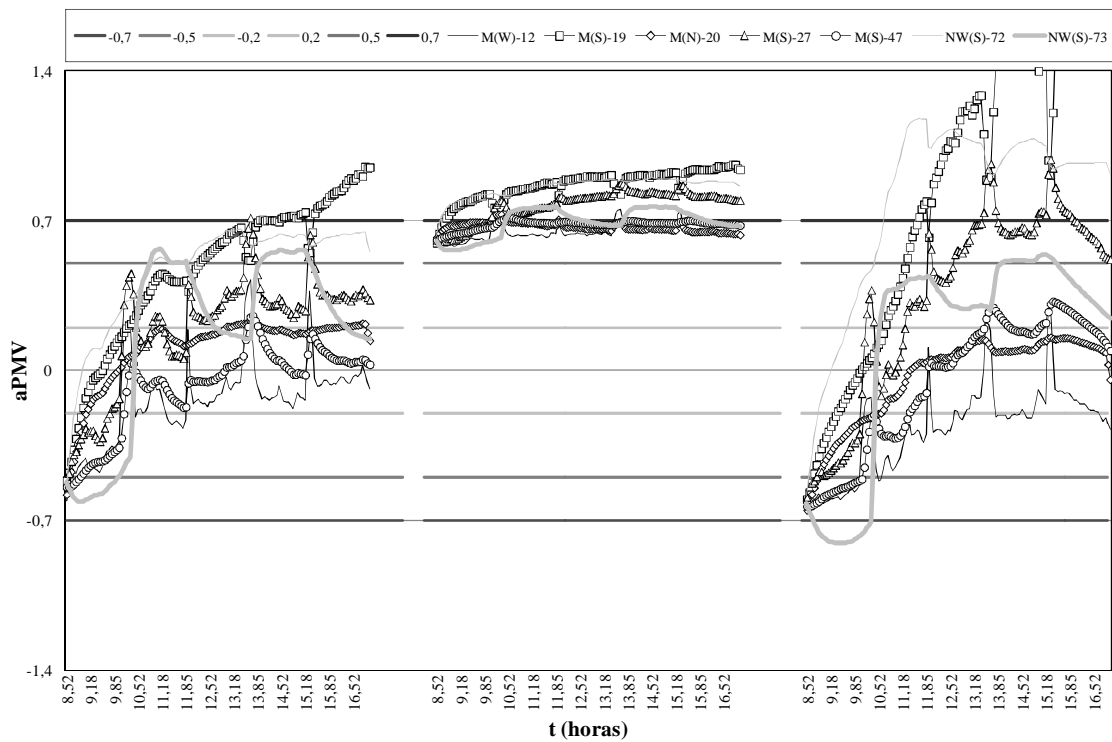


Figura 4.57 – Índice aPMV obtido para outras salas em julho, agosto e setembro (terceiro trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

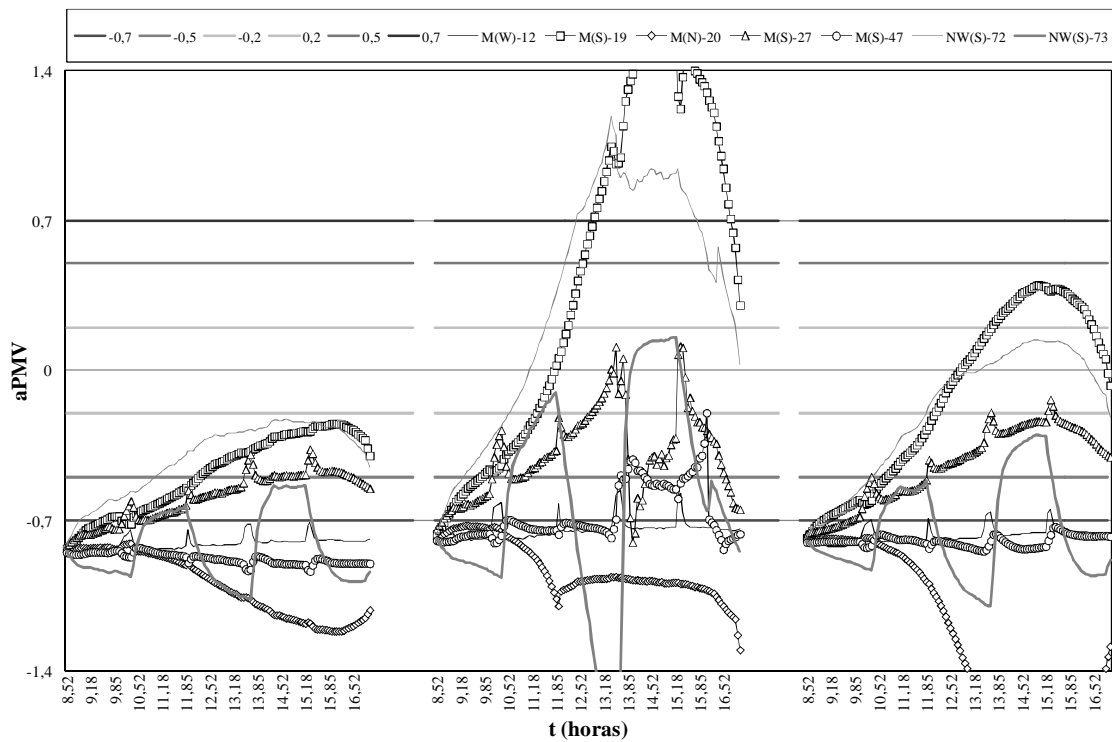


Figura 4.58 – Índice aPMV obtido para outras salas em outubro, novembro e dezembro (quarto trimestre) na escola básica 2/3 de Olhão.

Nos meses de julho e setembro as condições de conforto térmico nas salas de aula são aceitáveis, de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005): por valores negativos do índice aPMV no período da manhã e por valores positivos do índice aPMV no período da tarde.

Em agosto as condições de conforto térmico de algumas salas de aula não são aceitáveis (com níveis de desconforto térmico próximos da categoria C), por valores positivos do índice aPMV, de acordo com as recomendações da norma ISO 7730 (2005).

Em outubro as condições de conforto térmico nas salas de aula, em geral, não são aceitáveis. Contudo, em quatro salas de aula voltadas a sul as condições de conforto térmico são aceitáveis por valores negativos do índice aPMV, de acordo a categoria C da norma ISO 7730 (2005).

Finalmente, em novembro, na generalidade das salas de aula do edifício escolar noroeste, são apresentadas condições de conforto térmico aceitáveis de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005): na parte da manhã por valores negativos do índice aPMV e no período da tarde por valores positivos do índice aPMV.

Em todos os meses verifica-se que as salas do edifício principal apresentam os valores mais elevados do índice aPMV, as salas de aula do edifício nordeste apresentam os valores mais baixos do índice aPMV, e as salas de aula do edifício noroeste apresentam os valores do índice aPMV entre os valores anteriores. A evolução do índice aPMV das diferentes salas de aula mostra que nos meses quentes se verificam evoluções semelhantes nos níveis de conforto térmico; no entanto, nos meses frios, essas evoluções são diferentes. As evoluções verificadas nos níveis de conforto térmico estão associadas ao facto de, na simulação, se ter considerado a adaptação do ser humano ao ambiente térmico.

Os resultados apresentados nos outros espaços mostram que, durante os meses de janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro, em geral, as condições de conforto térmico não são aceitáveis, por valores negativos do índice aPMV. No entanto, nos espaços com janelas virados a sul as condições de conforto térmico são aceitáveis, por valores negativos do índice aPMV, de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005).

Nos meses de março, abril, junho e julho as condições de conforto térmico são aceitáveis de acordo com a categoria C da norma ISO 7730 (2005): durante a manhã por valores negativos do índice aPMV e durante a tarde por valores positivos do índice aPMV.

Em maio as condições de conforto térmico verificadas são aceitáveis, embora por valores negativos do índice aPMV.

Em agosto as condições de conforto térmico não são aceitáveis (com níveis de desconforto térmico próximos da categoria C da norma ISO 7730 (2005), por valores positivos do índice aPMV.

Em setembro, de um modo geral, durante a tarde, são verificadas condições de desconforto térmico nos espaços equipados com janelas voltadas a sul e condições de conforto térmico nos espaços equipados com janelas orientadas a norte e a oeste.

As evoluções do índice aPMV obtidas nos outros espaços nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro mostram que se obtém diferentes níveis de conforto térmico; no entanto, nos outros meses, as evoluções do índice aPMV obtidas mostram que se obtém níveis de conforto térmico semelhantes.

4.5.1.4 Conforto térmico integral

Nas tabelas 4.15 e 4.16 são apresentadas, para cada mês, as horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de calor (WUH), as horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio (CUH) e a soma das horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de calor e de frio. A tabela 4.15 considera a utilização da ventilação cruzada, enquanto a tabela 4.16 considera a utilização da ventilação natural. Na tabela a) são apresentados os resultados das salas de aula e na tabela b) são apresentados os resultados de outros espaços.

Quando a ventilação cruzada é aplicada, verifica-se que nos espaços com janelas voltadas a sul, especialmente no edifício principal (compartimentos 30, 50 e 52, por exemplo), são obtidos os menores valores das horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio, pelo que se sugere a utilização destes espaços nos meses frios. Como esperado, nos espaços com janelas viradas a norte, são obtidos os maiores valores das horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio, pelo que se sugere, se possível, não utilizar estes espaços nos meses frios.

Em geral, não são obtidas horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de calor. No entanto, os valores das horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio, obtidos quando se utiliza a ventilação cruzada, são maiores que os valores obtidos quando se utiliza a ventilação natural. Estes resultados estão associados à utilização de uma taxa de renovação do ar mais elevada na ventilação cruzada. A fim de reduzir as horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio, neste estudo, sugere-se, por exemplo, o recurso a uma menor taxa de renovação do ar.

Tabela 4.15a – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para as salas de aula, quando se utiliza a ventilação cruzada.

| CUH | M(W) - 16 | M(S) - 30 | M(N) - 34 | M(S) - 50 | M(S) - 52 | M(N) - 54 | NW(S) - 59 | NW(N) - 65 | NW(S) - 68 | NW(N) - 79 | NE(NSEW) - 84 | NE(E) - 91 |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Janeiro | 192 | 77 | 225 | 24 | 145 | 218 | 210 | 217 | 76 | 238 | 229 | 226 |
| Fevereiro | 152 | 81 | 192 | 36 | 80 | 190 | 184 | 190 | 57 | 205 | 207 | 197 |
| Março | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 91 | 0 |
| Abril | 23 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 98 | 0 |
| Maio | 72 | 0 | 3 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 212 | 1 |
| Junho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 15 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 0 |
| Outubro | 486 | 3 | 239 | 4 | 46 | 193 | 114 | 191 | 34 | 213 | 214 | 202 |
| Novembro | 271 | 0 | 39 | 0 | 3 | 63 | 8 | 8 | 5 | 101 | 132 | 21 |
| Dezembro | 34 | 6 | 103 | 2 | 4 | 0 | 15 | 35 | 6 | 107 | 84 | 86 |
| Total | 1258 | 167 | 803 | 66 | 280 | 665 | 533 | 642 | 179 | 865 | 1303 | 733 |
| WUH | M(W) - 16 | M(S) - 30 | M(N) - 34 | M(S) - 50 | M(S) - 52 | M(N) - 54 | NW(S) - 59 | NW(N) - 65 | NW(S) - 68 | NW(N) - 79 | NE(NSEW) - 84 | NE(E) - 91 |
| Janeiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fevereiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Março | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Abril | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maio | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Junho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 0 | 0 | 0 | 84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71 | 0 | 0 | 0 |
| Outubro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Novembro | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dezembro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 0 | 0 | 0 | 114 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71 | 0 | 0 | 0 |
| Horas desconfortáveis | 1258 | 167 | 803 | 180 | 280 | 665 | 533 | 642 | 250 | 865 | 1303 | 733 |

Tabela 4.15b – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para outros espaços, quando se utiliza a ventilação cruzada.

| CUH | M(W)- 12 | M(S)- 19 | M(N)- 20 | M(S)- 27 | M(S)- 47 | NW(S)- 72 | NW(S)- 73 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Janeiro | 233 | 47 | 305 | 61 | 261 | 29 | 254 |
| Fevereiro | 208 | 48 | 251 | 64 | 225 | 20 | 200 |
| Março | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| Abril | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 |
| Maio | 35 | 3 | 3 | 22 | 12 | 1 | 51 |
| Junho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26 |
| Outubro | 215 | 33 | 303 | 37 | 242 | 9 | 183 |
| Novembro | 182 | 6 | 281 | 8 | 135 | 3 | 162 |
| Dezembro | 105 | 6 | 301 | 15 | 115 | 6 | 87 |
| Total | 978 | 143 | 1446 | 207 | 990 | 68 | 1016 |
| WUH | M(W)- 12 | M(S)- 19 | M(N)- 20 | M(S)- 27 | M(S)- 47 | NW(S)- 72 | NW(S)- 73 |
| Janeiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fevereiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Março | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Abril | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maio | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Junho | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 0 | 0 | 0 | 23 | 0 | 150 | 0 |
| Outubro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Novembro | 0 | 200 | 0 | 0 | 0 | 105 | 0 |
| Dezembro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 0 | 233 | 0 | 23 | 0 | 255 | 0 |
| Horas desconfortáveis | 978 | 376 | 1446 | 230 | 990 | 323 | 1016 |

Tabela 4.16a – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para as salas de aula, quando se utiliza a ventilação natural.

| CUH | M(W) | M(S) | M(N) | M(S) | M(S) | M(N) | NW(S) | NW(N) | NW(S) | NW(N) | NE(NSEW) | NE(E) |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 16 | 30 | 34 | 50 | 52 | 54 | 59 | 65 | 68 | 79 | 84 | 91 |
| Janeiro | 23 | 20 | 89 | 14 | 14 | 144 | 152 | 207 | 35 | 165 | 260 | 209 |
| Fevereiro | 8 | 18 | 21 | 13 | 13 | 33 | 165 | 134 | 29 | 64 | 244 | 178 |
| Março | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 237 | 0 |
| Abril | 6 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 242 | 0 |
| Maio | 11 | 0 | 4 | 0 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 505 | 1 |
| Junho | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 10 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 78 | 0 |
| Outubro | 165 | 1 | 26 | 4 | 12 | 15 | 169 | 56 | 16 | 28 | 279 | 76 |
| Novembro | 19 | 0 | 8 | 0 | 5 | 5 | 8 | 8 | 5 | 5 | 533 | 8 |
| Dezembro | 0 | 4 | 3 | 2 | 2 | 0 | 9 | 8 | 5 | 4 | 167 | 7 |
| Total | 250 | 43 | 155 | 33 | 48 | 198 | 506 | 414 | 91 | 267 | 2545 | 479 |
| WUH | M(W) | M(S) | M(N) | M(S) | M(S) | M(N) | NW(S) | NW(N) | NW(S) | NW(N) | NE(NSEW) | NE(E) |
| | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 16 | 30 | 34 | 50 | 52 | 54 | 59 | 65 | 68 | 79 | 84 | 91 |
| Janeiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fevereiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Março | 0 | 0 | 0 | 79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| Abril | 0 | 110 | 0 | 125 | 22 | 52 | 0 | 0 | 52 | 0 | 0 | 0 |
| Maio | 0 | 60 | 0 | 59 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Junho | 0 | 188 | 0 | 153 | 87 | 135 | 0 | 0 | 72 | 33 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 0 | 160 | 0 | 147 | 73 | 99 | 0 | 0 | 110 | 0 | 0 | 0 |
| Outubro | 0 | 0 | 0 | 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Novembro | 0 | 137 | 0 | 240 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103 | 0 | 0 | 0 |
| Dezembro | 0 | 7 | 0 | 87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 0 | 662 | 0 | 931 | 182 | 296 | 0 | 0 | 348 | 33 | 0 | 0 |
| Horas desconfortáveis | 250 | 705 | 155 | 964 | 230 | 494 | 506 | 414 | 439 | 300 | 2545 | 479 |

Tabela 4.16b – Horas desconfortáveis devido ao calor (WUH), horas desconfortáveis devido ao frio (CUH) e soma destas horas desconfortáveis, para cada mês, para outros espaços, quando se utiliza a ventilação natural.

| CUH | M(W)- 12 | M(S)- 19 | M(N)- 20 | M(S)- 27 | M(S)- 47 | NW(S)- 72 | NW(S)- 73 |
|------------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Janeiro | 218 | 49 | 300 | 40 | 290 | 18 | 222 |
| Fevereiro | 193 | 46 | 243 | 38 | 247 | 13 | 192 |
| Março | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 |
| Abril | 28 | 9 | 0 | 0 | 7 | 0 | 69 |
| Maio | 76 | 11 | 12 | 16 | 53 | 1 | 76 |
| Junho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 79 |
| Outubro | 209 | 33 | 295 | 37 | 276 | 9 | 286 |
| Novembro | 188 | 70 | 298 | 30 | 205 | 35 | 122 |
| Dezembro | 93 | 11 | 304 | 15 | 148 | 36 | 131 |
| Total | 1005 | 229 | 1452 | 176 | 1226 | 112 | 1213 |
| WUH | E.P(W)- 12 | M(S)- 19 | M(N)- 20 | M(S)- 27 | M(S)- 47 | NW(S)- 72 | NW(S)- 73 |
| Janeiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fevereiro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Março | 11 | 0 | 0 | 6 | 0 | 216 | 0 |
| Abril | 36 | 38 | 0 | 9 | 0 | 213 | 18 |
| Maio | 26 | 13 | 3 | 3 | 0 | 0 | 66 |
| Junho | 33 | 53 | 0 | 13 | 0 | 144 | 48 |
| Julho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Agosto | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Setembro | 41 | 0 | 0 | 76 | 0 | 328 | 0 |
| Outubro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Novembro | 5 | 68 | 0 | 0 | 0 | 228 | 32 |
| Dezembro | 0 | 0 | 0 | 21 | 10 | 21 | 51 |
| Total | 152 | 172 | 3 | 128 | 10 | 1150 | 219 |
| Horas desconfortáveis | 1157 | 401 | 1455 | 304 | 1236 | 1268 | 1432 |

Quando se aplica a ventilação natural, em substituição da ventilação cruzada, em geral, o número de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio, para cada espaço ocupado, é diminuído entre duas a quatro vezes comparativamente com o número de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio obtido quando se utiliza a ventilação cruzada. Quando o espaço não está ocupado, devido à baixa renovação de ar envolvida, as horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio (compartimento 84 ou os espaços não ocupados) não diminuem quando se utiliza a ventilação natural em vez da ventilação cruzada.

De acordo com os resultados obtidos, quando a ventilação natural é aplicada nos espaços com janelas voltados a norte, verificam-se os maiores valores de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio e os menores valores de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de calor. Nos espaços com janelas viradas a sul, verificam-se os maiores valores de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de calor e os menores valores de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio. Os compartimentos com janelas viradas a oeste apresentam valores mais elevados de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio do que os compartimentos com janelas voltadas a norte.

Em condições de frio, os compartimentos que apresentam o maior número de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio situam-se no edifício nordeste, enquanto os compartimentos que apresentam o menor número de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio situam-se no edifício principal.

Finalmente, de acordo com os resultados apresentados, a combinação entre ventilação cruzada e ventilação natural pode ser utilizada para reduzir as horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio e à sensação térmica de calor. Assim, de março a setembro é sugerido o uso dos compartimentos com maior nível de ventilação, enquanto em janeiro, fevereiro, outubro, novembro e dezembro sugere-se a utilização de compartimentos com nível de ventilação inferior. No entanto, o nível de qualidade do ar deve ser avaliado nestes espaços.

Nesse sentido efetuou-se o estudo da concentração de dióxido de carbono no interior dos compartimentos de modo a avaliar a sua qualidade do ar. Nas figuras 4.59 e 4.60 é apresentada a evolução da concentração de dióxido de carbono (CO₂), respetivamente, nas salas de aula e noutros espaços, quando é utilizada a ventilação cruzada. Nas figuras 4.61 e 4.62 é apresentada a evolução da concentração de dióxido de carbono (CO₂), respetivamente, nas salas de aula e noutros espaços, quando é utilizada a ventilação natural.

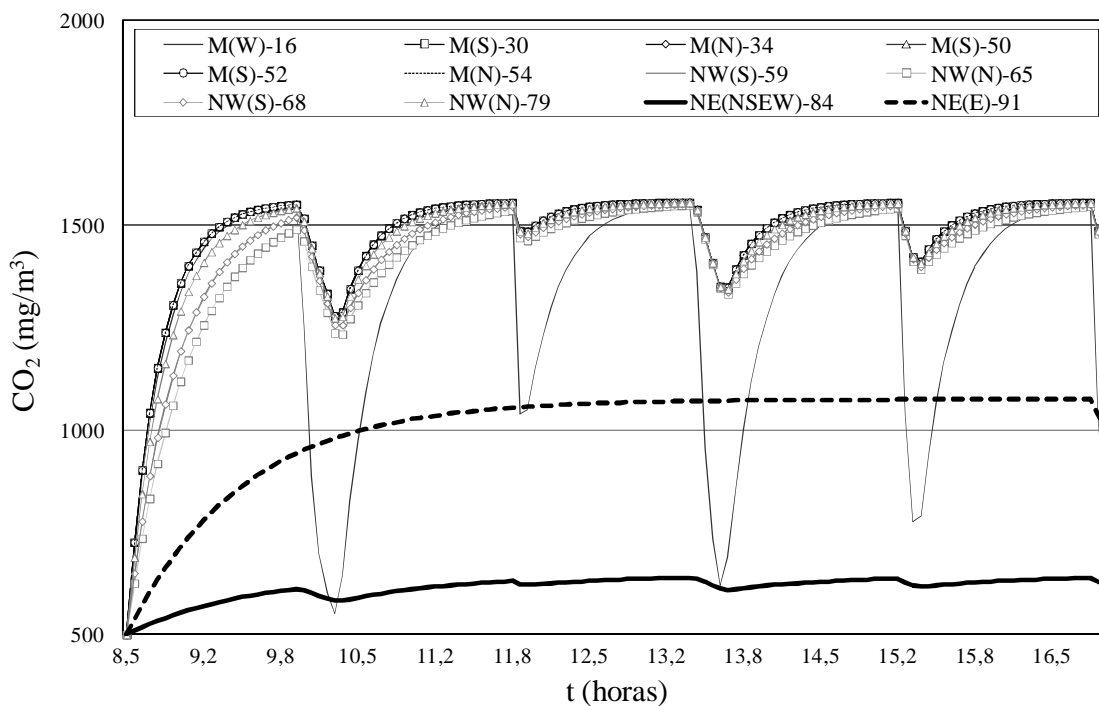


Figura 4.59 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) nas salas de aula quando é utilizada a ventilação cruzada (escola básica 2/3 de Olhão).

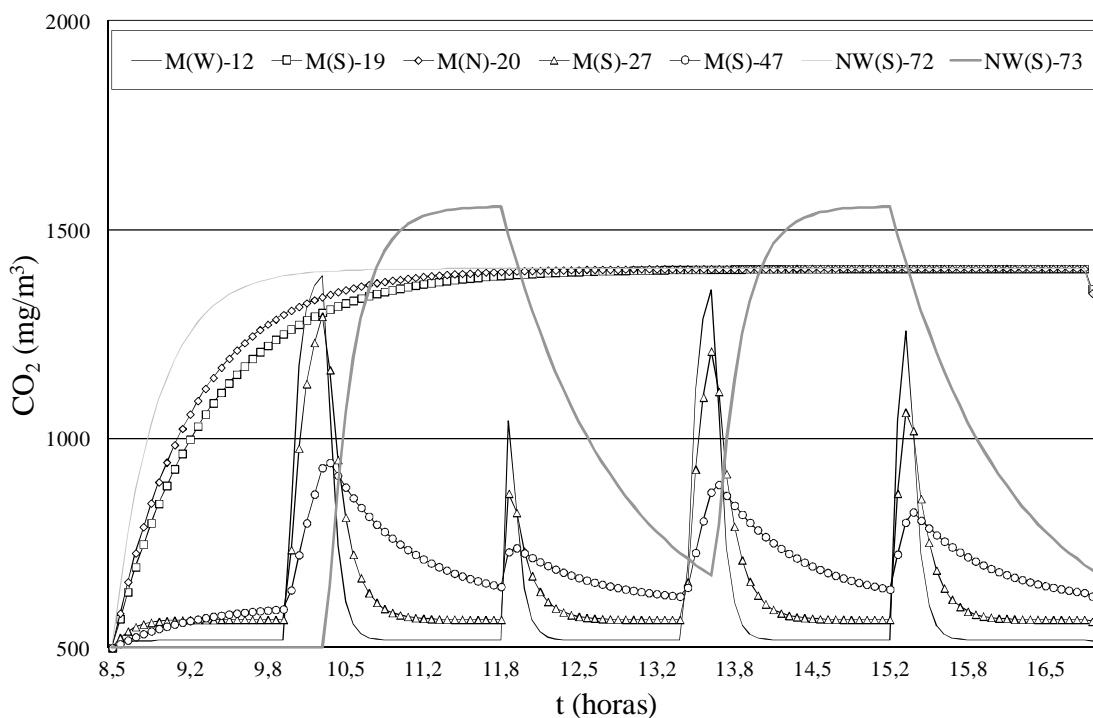


Figura 4.60 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) nas outras salas quando é utilizada a ventilação cruzada (escola básica 2/3 de Olhão).

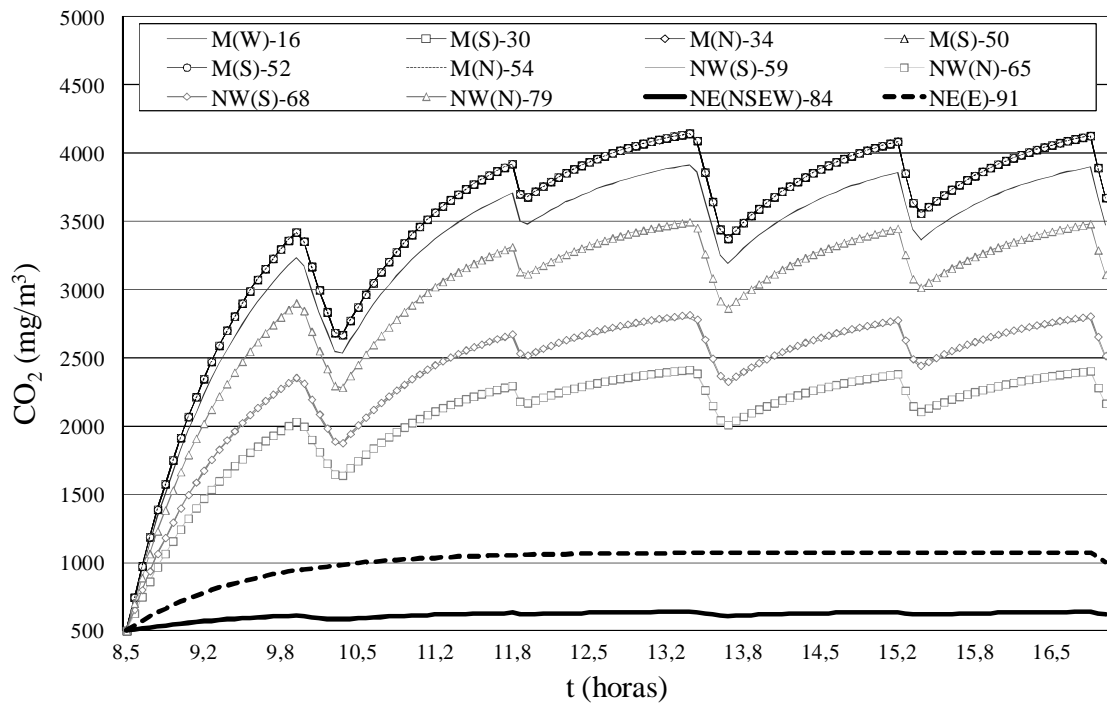


Figura 4.61 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) nas salas de aula quando é utilizada a ventilação natural (escola básica 2/3 de Olhão).

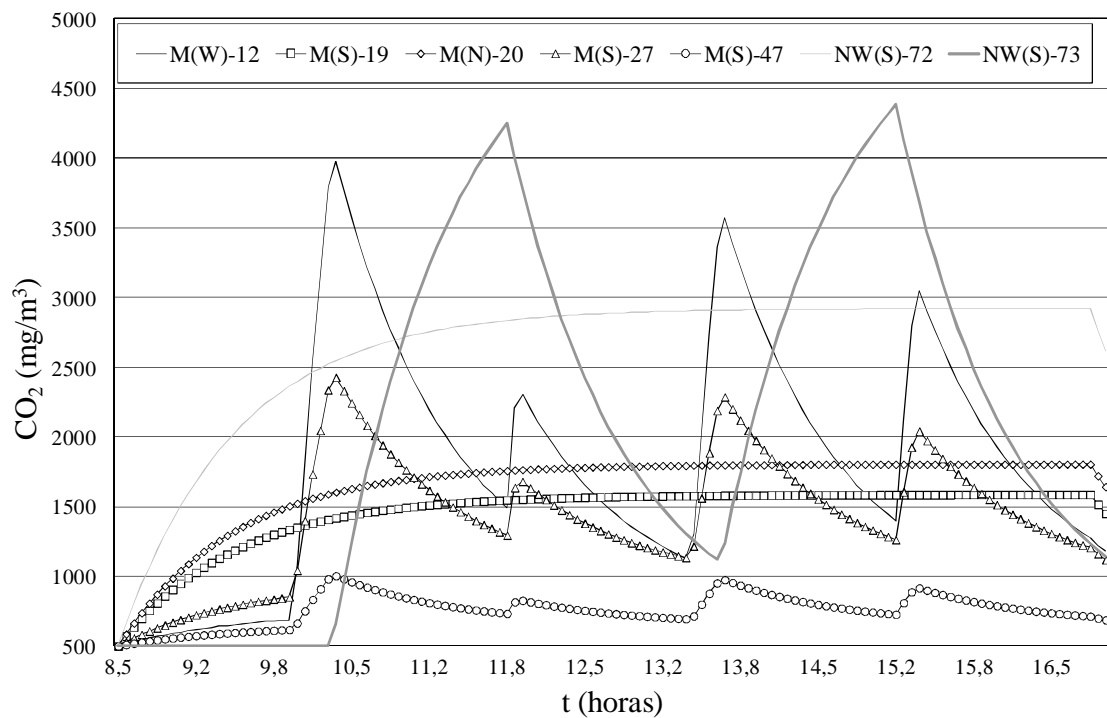


Figura 4.62 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) nas outras salas quando é utilizada a ventilação natural (escola básica 2/3 de Olhão).

Quando a ventilação cruzada é utilizada, a concentração de dióxido de carbono no interior das salas de aula aumenta durante a sua ocupação e, em geral, exceto no compartimento 73, é inferior a 1500 mg/m³.

Nos gabinetes, a concentração de dióxido de carbono é inferior a 1000 mg/m³, enquanto nos restantes compartimentos com ocupação flutuante (por exemplo, o auditório e a biblioteca) a concentração de dióxido de carbono é inferior a 1500 mg/m³.

Em conclusão, a introdução da ventilação cruzada nos compartimentos garante uma concentração de dióxido de carbono inferior a 1800 mg/m³, em concordância com a recomendação expressa no Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril e na norma ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2010b).

Quando se utiliza apenas a ventilação natural, em substituição da ventilação cruzada, a concentração de dióxido de carbono aumenta, como esperado. Os maiores valores da concentração de dióxido de carbono são obtidos nas salas de aula situadas no edifício principal e os menores valores da concentração de dióxido de carbono são obtidos nas salas de aula situadas no edifício nordeste. No entanto, nos outros compartimentos, estes resultados não se verificam. Os valores da concentração de dióxido de carbono nos compartimentos 12, 27, 72 e 73 são maior do que os valores recomendados; contudo, nos outros compartimentos os valores da concentração de dióxido de carbono estão de acordo com o recomendado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril e pela norma ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2010b).

4.5.1.5 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos a partir da análise detalhada da evolução dos níveis de conforto térmico, caracterizada pelo índice aPMV, mostram que, de um modo geral, quando se aplica a ventilação cruzada, as condições de conforto térmico verificadas são aceitáveis. Contudo, quando estas condições não se verificam, o nível de conforto térmico obtido está próximo dos valores aceitáveis.

Os resultados mostram também que pode ser definido um compromisso entre a utilização da ventilação cruzada e a utilização da ventilação natural para reduzir o número total de horas desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio e devidas à sensação térmica de calor. Assim, de março a setembro devem-se usar compartimentos com um nível de ventilação mais elevado, enquanto em janeiro, fevereiro, novembro e dezembro é aconselhada a utilização de compartimentos com baixos níveis de ventilação.

De acordo com o recomendado pelas normas, uma boa qualidade do ar interior é obtida quando o valor da concentração de dióxido de carbono é inferior a 1800 mg/m^3 . No edifício escolar analisado neste estudo a boa qualidade do ar interior é garantida quando a ventilação cruzada é utilizada. No entanto, quando se utiliza a ventilação natural, existe um número considerável de compartimentos que apresentam uma qualidade do ar interior que não cumpre o recomendado pelas normas.

4.5.2 Modelo aerotérmico

4.5.2.1 Descrição do edifício

Neste estudo é utilizado o edifício da biblioteca do Campus de Gambelas, em Faro (figura 4.63). É um grande edifício, com uma área bruta de cerca de 8834 m^2 . A arquitetura da biblioteca foi concebida para estimular e tirar proveito da radiação solar, particularmente no caso da utilização da iluminação natural. Na fachada norte, a área envidraçada é igual a 253 m^2 . As cúpulas presentes no telhado têm uma área envidraçada de 490 m^2 , ou seja, a fachada norte representa uma área envidraçada total igual a 743 m^2 . As fachadas sul, este e oeste do edifício têm uma área envidraçada de 307 m^2 , 215 m^2 e 187 m^2 , respetivamente.

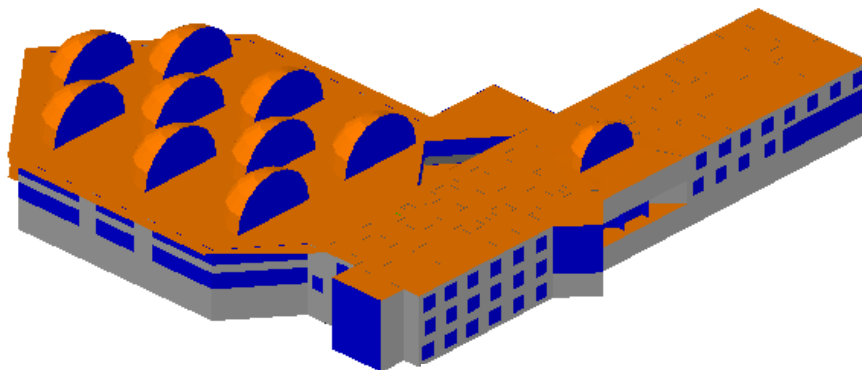


Figura 4.63 – Representação 3D do edifício da biblioteca do campus de Gambelas.

A biblioteca de Gambelas é constituída por 3 pisos e um total de 134 compartimentos distribuídos por uma cave (ver figura 4.64c), um piso térreo (ver figura 4.64b) e um primeiro andar (ver figura 4.64a). A cave do edifício é composta por 33 compartimentos utilizados para depositar ou arquivar livros, uma arrecadação de limpeza, uma zona destinada a máquinas, um quarto de banho, uma zona de estacionamento e alguns gabinetes. Também são consideradas as áreas onde as pessoas se movimentam.

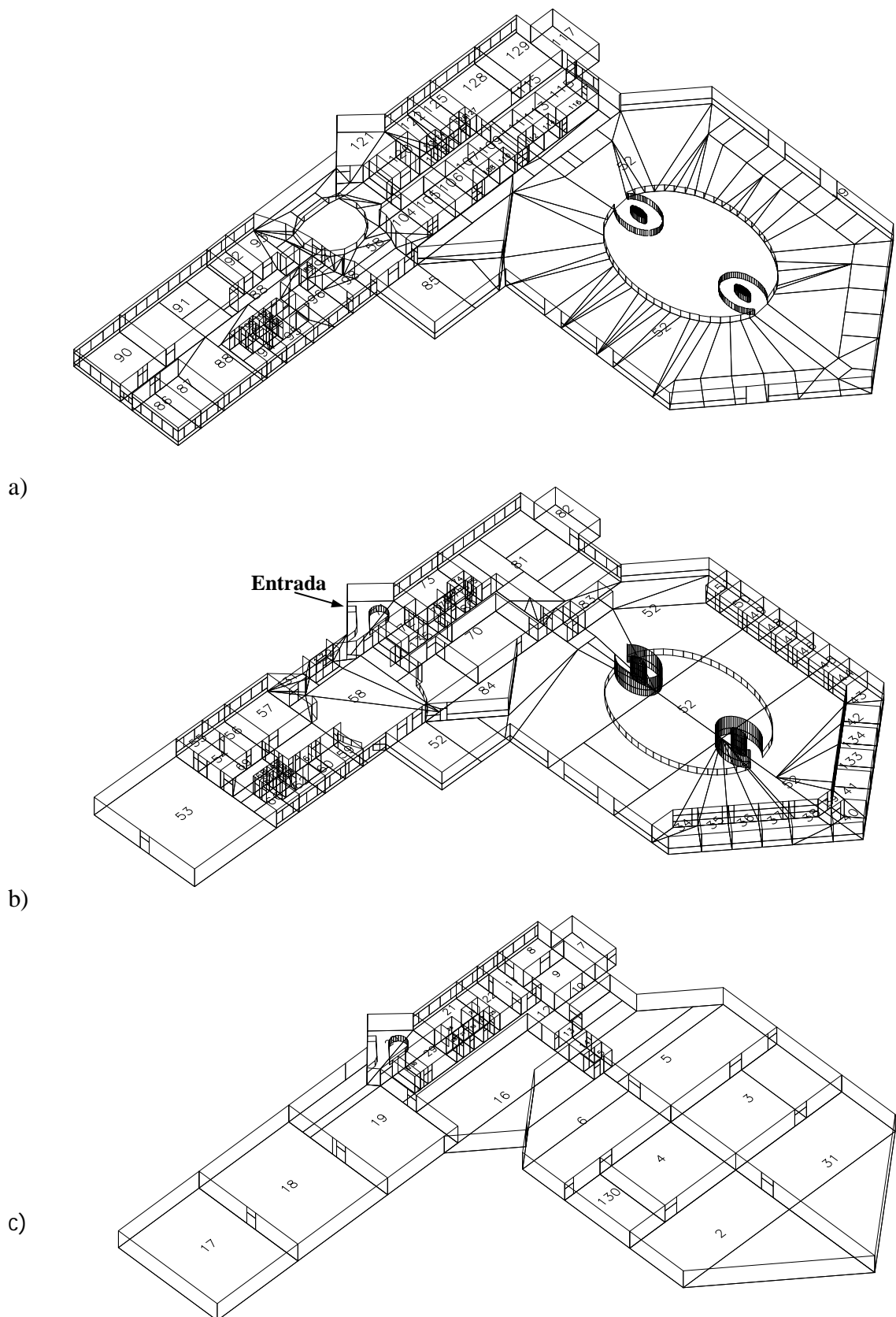


Figura 4.64 – Visualização 3D dos compartimentos da biblioteca das Gambelas com a respetiva numeração: a) primeiro andar; b) piso térreo; c) cave.

A entrada principal (compartimento 72, na figura 4.64b) do edifício está localizada no piso térreo. Este piso é composto por um átrio de entrada e no seu interior há vários gabinetes para os funcionários, áreas de serviços públicos, salas de leitura, uma livraria, uma sala de cópias, uma cozinha e um quarto de banho, no total de 57 compartimentos. O compartimento 52 na figura 4.64b representa o átrio principal da biblioteca, área utilizada principalmente para leitura. Os compartimentos de menores dimensões que rodeiam o átrio são gabinetes.

No primeiro andar, são identificados os compartimentos adequados para estudo individual ou em grupo, uma sala de seminários, uma sala de reuniões, duas salas de fotocópias, várias instalações sanitárias, serviços públicos de limpeza, gabinetes para os funcionários, que perfazem um total de 44 compartimentos.

4.5.2.2 Introdução de dados no modelo numérico

Nesta secção são apresentados os dados de entrada, nomeadamente, os dados meteorológicos, o ciclo de ocupação, o nível de vestuário dos ocupantes, o nível de atividade dos ocupantes e a topologia de ventilação.

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados no modelo numérico são a temperatura do ar exterior, a humidade relativa do ar exterior, a velocidade do vento e direção do vento. Os dados meteorológicos foram obtidos, entre as 0 e as 24 horas, no dia 21 de junho (como referência para as condições de verão) e no 21 de dezembro (como referência para as condições de inverno). Os valores obtidos nestes dias, com céu limpo, são uma média representativa dos valores mensais. Os dados experimentais foram obtidos, no ano de 2005, por uma estação meteorológica localizada nas proximidades do edifício. Mais pormenores podem ser consultados no ponto 4.1.1.

Topologia de ventilação

Neste estudo, a metodologia de ventilação utilizada considera que a taxa de renovação do ar pode variar entre as 0,5 e as 8 renovações por hora. De acordo com os testes experimentais realizados, os valores mais baixos da taxa de renovação do ar estão associados à utilização da ventilação natural, enquanto os valores mais elevados da taxa de renovação do ar podem ser obtidos, de acordo com os resultados apresentados nos estudos anteriores, por exemplo, com a abertura de janelas (ver ponto 4.1.3).

Ciclo de ocupação

A tabela 4.17 mostra o ciclo de ocupação durante um dia de trabalho, em todos os espaços ocupados, durante a utilização da biblioteca.

Tabela 4.17 – Ciclo de ocupação em todos os espaços ocupados, durante um dia de utilização da biblioteca.

| Compartimentos | 0:00 - 9:00 | 9:00 - 13:00 | 13:00 - 14:00 | 14:00 - 17:00 | 17:00 - 20:00 | 20:00 - 24:00 |
|---|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 4, 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6, 19, 69, 80, 85, 91, 133, 134, 135 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 8, 20, 22, 49, 55, 59, 60, 62, 86, 87, 92, 107, 113, 118, 122, 125 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 10, 18 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 16, 119 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 34 | 0 | 2 | 0 | 4 | 3 | 0 |
| 35 | 0 | 3 | 0 | 4 | 3 | 0 |
| 36, 72 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| 37 | 0 | 3 | 0 | 2 | 4 | 0 |
| 41 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| 42 | 0 | 3 | 0 | 4 | 2 | 0 |
| 43 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 0 |
| 44 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 1 | 2 | 4 | 0 |
| 46 | 0 | 2 | 2 | 0 | 6 | 0 |
| 47 | 0 | 1 | 1 | 3 | 3 | 0 |
| 48 | 0 | 1 | 0 | 2 | 6 | 0 |
| 50 | 0 | 3 | 1 | 5 | 7 | 0 |
| 51, 54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 52 | 0 | 15 | 20 | 60 | 80 | 0 |
| 53, 57, 81, 90, 96 | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 56, 70 | 0 | 2 | 1 | 2 | 2 | 0 |
| 58 | 0 | 4 | 6 | 2 | 7 | 0 |
| 66 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| 73 | 0 | 0 | 2 | 2 | 5 | 0 |
| 88 | 0 | 3 | 1 | 3 | 1 | 0 |
| 94 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 95 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 104 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 105 | 0 | 1 | 1 | 1 | 7 | 0 |
| 106 | 0 | 2 | 1 | 4 | 3 | 0 |
| 109 | 0 | 2 | 1 | 2 | 4 | 0 |
| 111 | 0 | 3 | 1 | 3 | 4 | 0 |
| 115 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| 117 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 128, 129 | 0 | 2 | 0 | 2 | 4 | 0 |
| 3, 11, 17, 21, 31, 33, 38, 39, 40, 61, 82, 84, 93, 97, 98, 121, 130, 131, 132 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nível de vestuário dos ocupantes

Considerou-se que, tipicamente, o valor do nível de vestuário dos ocupantes é de 1 e 0,5 clo, respetivamente, em condições de inverno e de verão.

Nível de atividade dos ocupantes

Na simulação efetuada, o nível de atividade considerado é apresentado no ponto 4.1.5.

4.5.2.3 Análise de resultados

Neste estudo foram avaliados o nível de conforto térmico a longo prazo (índice PMV), as condições de conforto (horas de desconforto térmico devidas à sensação térmica de calor e à sensação térmica de frio), o nível de qualidade do ar (através da concentração do dióxido de carbono) e o número de horas desconfortáveis devido à qualidade do ar, em diferentes compartimentos e para diferentes taxas de renovação do ar, em condições de verão e em condições de inverno.

4.5.2.3.1 Horas desconfortáveis

Na tabela 4.18 é resumido o número total de horas desconfortáveis (UH), obtidas durante um ano. O número total de horas desconfortáveis é obtido pela soma das horas de desconforto devidas à sensação térmica de frio (CUH), das horas de desconforto devidas à sensação térmica de calor (WUH) e das horas de desconforto devidas à qualidade do ar (AQUH) para cada variação da taxa de renovação do ar considerada entre 0,5 a 8 renovações por hora. Na tabela 4.18 também é apresentado o número total de horas desconfortáveis devido ao nível de conforto térmico (TUH) verificado. Os resultados são obtidos a partir dos modelos apresentados nas equações 16, 17 e 18.

Na figura 4.65 são apresentadas as evoluções dos parâmetros CUH, WUH, TUH, AQUH e UH em função da variação da taxa de renovação do ar durante um ano.

Na figura 4.66 pode-se observar a evolução mensal dos valores de UH em função da variação da taxa de renovação do ar durante um ano.

A partir dos resultados apresentados na figura 4.65 é definida uma taxa de renovação do ar que minimiza o número total de horas de desconforto, com base no nível de conforto térmico e no nível da qualidade do ar. Como se pode constatar na figura 4.65, obtém-se uma taxa de

renovação do ar em torno das três renovações por hora como o valor a utilizar de modo a minimizar o número total de horas de desconforto anuais.

Tabela 4.18 – Número total de horas desconfortáveis obtidas durante um ano.

| Varição da taxa de renovação do ar | CUH | WUH | TUH | AQUH | UH |
|------------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 0,50 | 1899,9 | 18969,9 | 20869,8 | 6104,3 | 26974,1 |
| 1,00 | 3602,6 | 12974,2 | 16576,8 | 3461,3 | 20038,1 |
| 2,00 | 6028,2 | 8067,9 | 14096,1 | 1739,4 | 16835,6 |
| 4,00 | 9387,5 | 5863,0 | 15250,4 | 584,8 | 15835,3 |
| 8,00 | 15846,4 | 3545,7 | 19392,2 | 50,2 | 19442,4 |

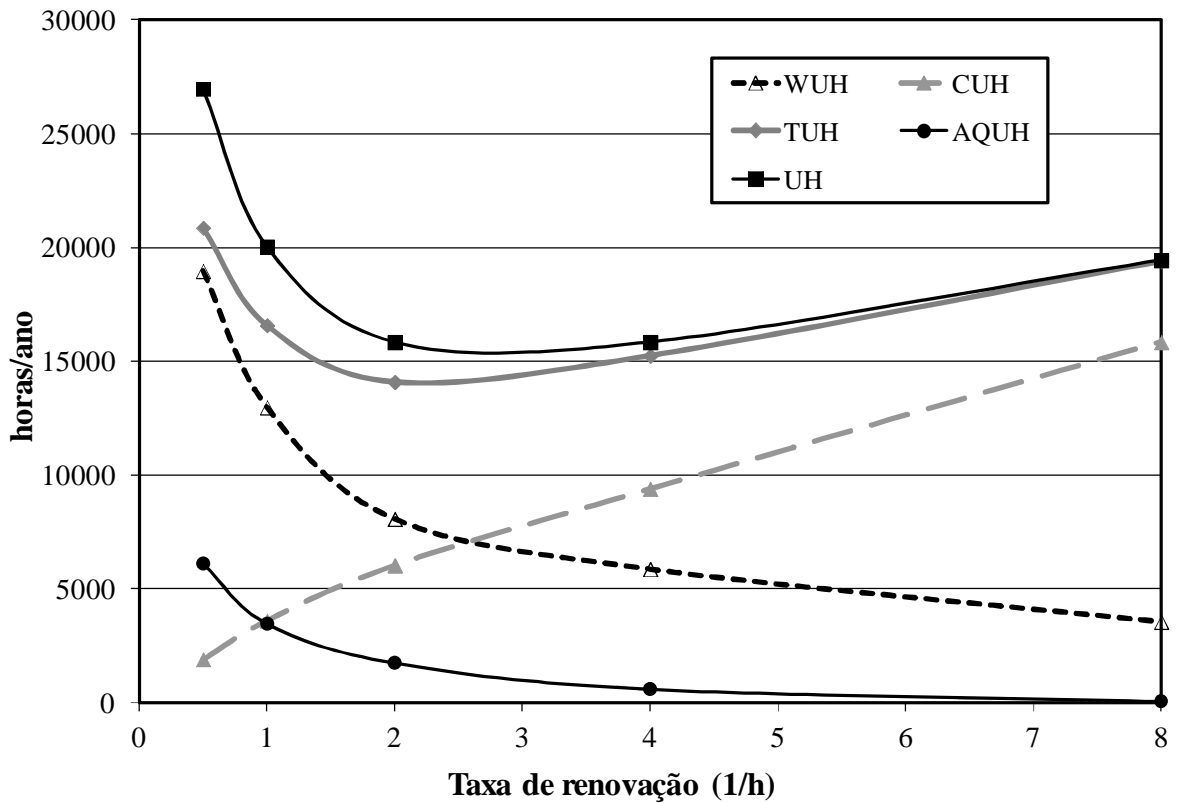


Figura 4.65 – Evolução dos valores de CUH, WUH, TUH, AQUH e UH em função da variação da taxa de renovação do ar durante um ano (biblioteca das Gambelas).

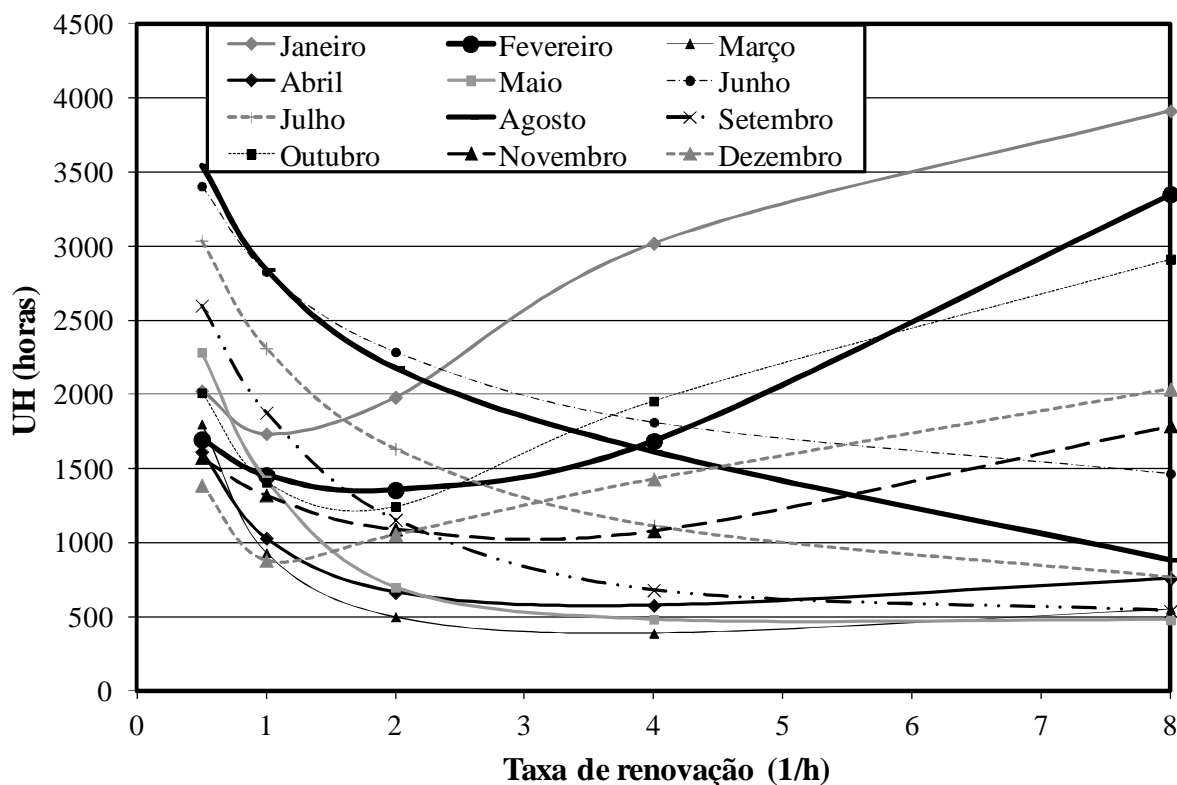


Figura 4.66 – Evolução dos valores de UH em função da variação da taxa de renovação do ar para cada mês do ano (biblioteca das Gambelas).

A partir dos resultados apresentados na figura 4.66 é possível definir uma taxa de renovação do ar de modo a minimizar o número total de horas de desconforto, com base no nível de conforto térmico e no nível de qualidade do ar, para cada mês. Em condições de verão (ver figura 4.66), como esperado, os resultados obtidos tendem a melhorar com o aumento da taxa de renovação do ar. Neste estudo, para as condições de verão, considerou-se uma taxa de três renovações de ar por hora, porque acima deste valor o total de horas desconfortáveis tende a estabilizar.

Em condições de verão não foram obtidas nenhuma hora desconfortáveis devidas à sensação térmica de frio e o número de horas desconfortáveis devidas à qualidade do ar foram menores do que as obtidas em condições de inverno. Tal acontece porque em condições de verão é possível obter maiores taxas de renovação do ar do que em condições de inverno e, conseqüentemente, diminuir a concentração de dióxido de carbono nas salas, sem comprometer o nível de conforto térmico. Assim, em condições de verão, é natural que, com o aumento da taxa de renovação do ar, o número total de horas de desconforto tenha tendência a diminuir.

Em condições de inverno, é natural que, acima de uma determinada taxa de renovação do ar, seja possível conseguir a obtenção de uma melhor qualidade do ar, devido à diminuição da concentração de dióxido de carbono. Por outro lado, o nível de conforto térmico diminui com o aumento do número de horas de desconforto devidas à sensação térmica de frio. Assim, em condições de inverno, há uma taxa de renovação de ar ideal: acima deste valor o número total de horas de desconforto aumenta. Neste estudo, a taxa de renovação do ar obtida foi de duas renovações por hora.

4.5.2.3.2 Evolução do índice PMV

A evolução do índice PMV é apresentada nas figuras 4.67 a 4.70. As figuras 4.67 e 4.69 estão relacionadas com o valor da taxa de renovação do ar igual a 2 renovações por hora para condições típicas de inverno, enquanto as figuras 4.68 e 4.70 estão relacionados com o valor da taxa de renovação do ar igual a 3 renovações por hora para condições típicas de verão, de acordo com o determinado no ponto anterior.

Nas figuras, as letras N, S, E, W, SE, SW, NW e WSE presentes nas legendas estão associados com a orientação das janelas para, respetivamente, norte, sul, este, oeste, sudeste, sudoeste, noroeste e oeste-sudeste.

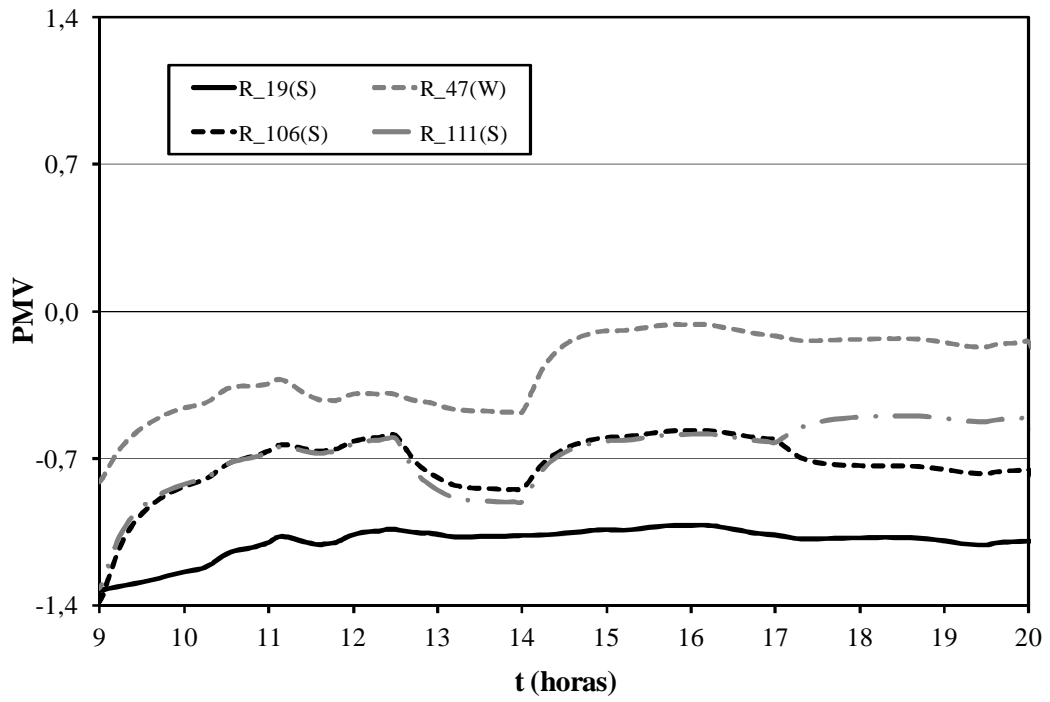
De acordo com os resultados obtidos, em condições de inverno, para uma taxa de renovação do ar igual a 2 renovações por hora (a melhor solução), pode-se afirmar o seguinte:

- As condições térmicas nas salas com janelas voltadas a norte (por exemplo, as salas 58 e 90) são desconfortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores negativos do índice PMV;
- As condições térmicas nas salas com janelas voltadas a oeste (por exemplo, a sala 47) são confortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores negativos do índice PMV;
- As condições térmicas nas salas com janelas voltadas a sul (por exemplo, a sala 19) são, em geral, desconfortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores negativos do índice PMV; a sala 111 é um exemplo de uma sala com janelas voltadas a sul que apresenta condições térmicas confortáveis na parte da tarde, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores negativos do índice PMV, mas desconfortáveis na parte da manhã;

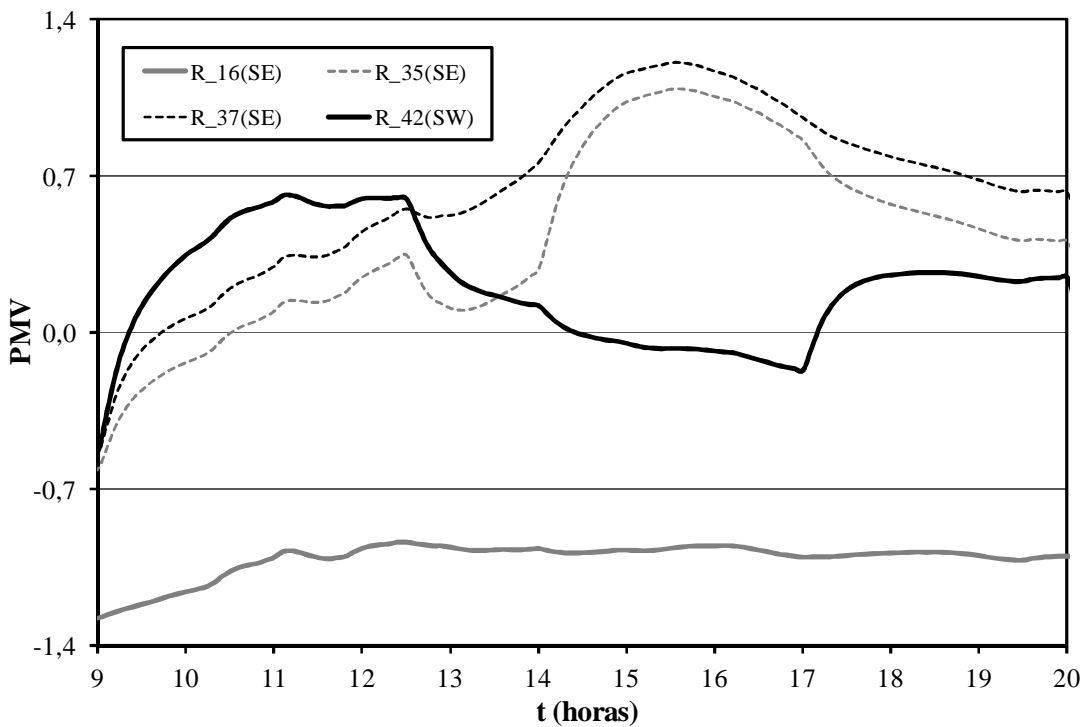
- As condições térmicas nas salas com janelas orientadas a sudoeste (por exemplo, a sala 42) são confortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores positivos do índice PMV durante quase todo o dia, exceto por um breve período durante a manhã e durante parte da tarde, onde são confortáveis por valores ligeiramente negativos do índice PMV;
- As condições térmicas nas salas com janelas orientadas a sudeste (por exemplo, a sala 16) são, geralmente, confortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores positivos do índice PMV, exceto no princípio da manhã, onde são confortáveis por valores negativos do índice PMV;
- As condições térmicas na sala principal (sala 52) são desconfortáveis, no período da manhã de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores negativos do índice PMV e são confortáveis durante quase toda a tarde por valores ligeiramente negativos do índice PMV.

De acordo com os resultados obtidos, em condições de verão, para uma taxa de renovação do ar igual a 3 renovações por hora (a melhor solução), pode-se afirmar o seguinte:

- As condições térmicas em quase todas as salas com janelas orientadas a sul, sudeste, sudoeste e oeste são desconfortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores positivos do índice PMV, exceto as condições térmicas de algumas salas (por exemplo, as salas 19 e 35) que são confortáveis, quase todo o dia, por valores positivos do índice PMV;
- As condições térmicas nas salas orientadas a norte (por exemplo, as salas 58 e 90) e a noroeste (por exemplo, a sala 81) são desconfortáveis, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005) por valores positivos do índice PMV;
- As condições térmicas na sala principal (sala 52) são desconfortáveis durante todo o dia, de acordo com a categoria C (ISO 7730, 2005), por valores positivos do índice PMV.

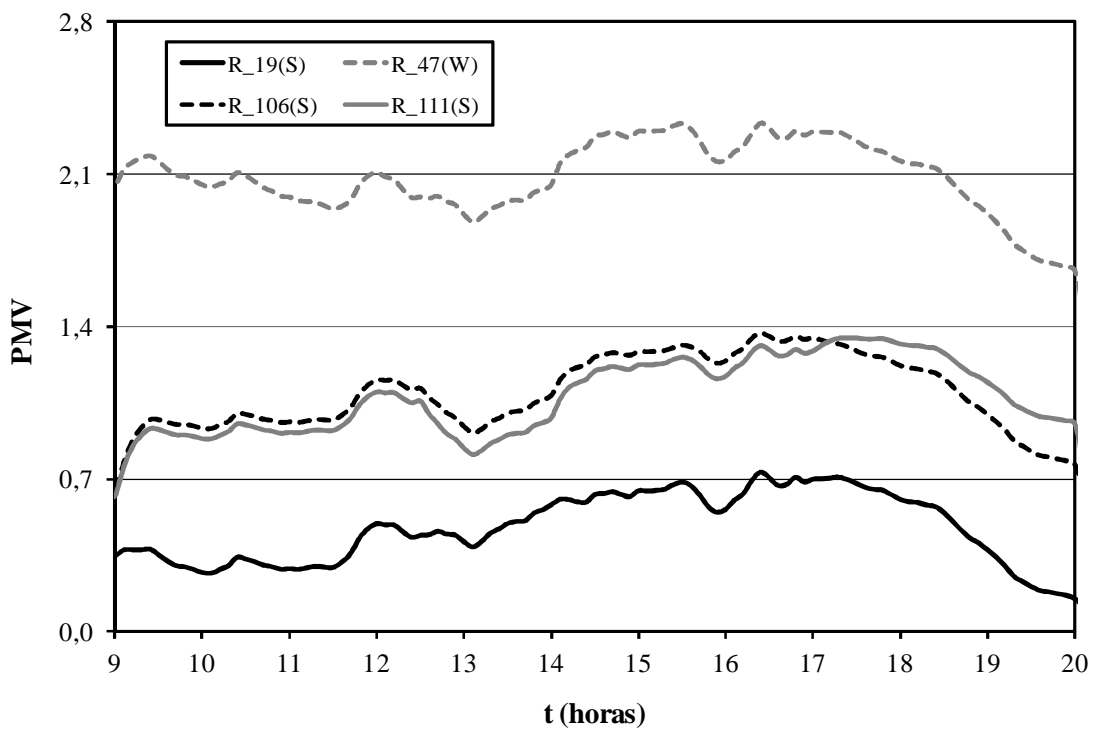


a)

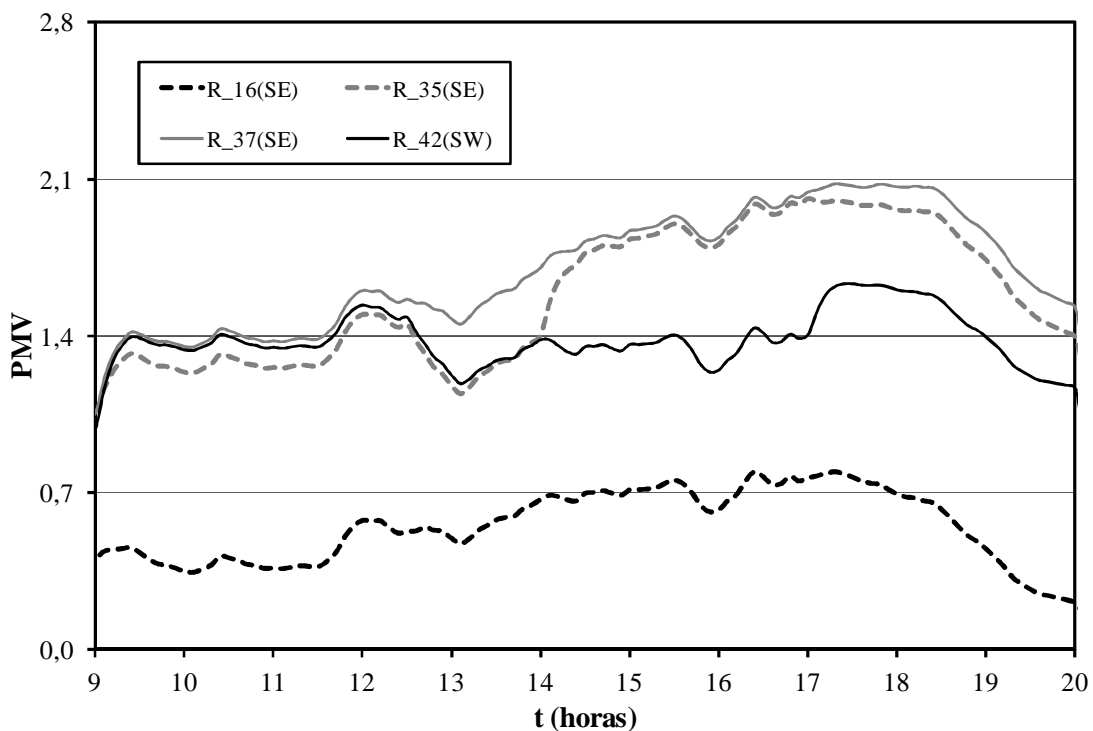


b)

Figura 4.67 – Evolução do índice PMV para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas).



a)



b)

Figura 4.68 – Evolução do índice PMV para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas).

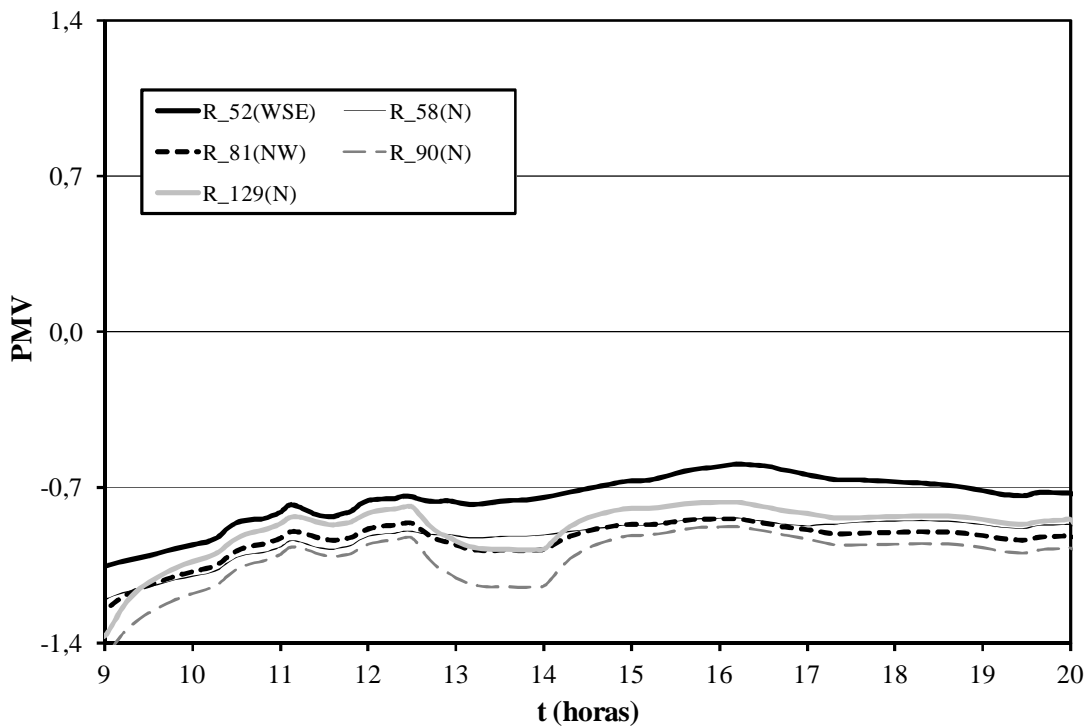


Figura 4.69 – Evolução do índice PMV para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas).

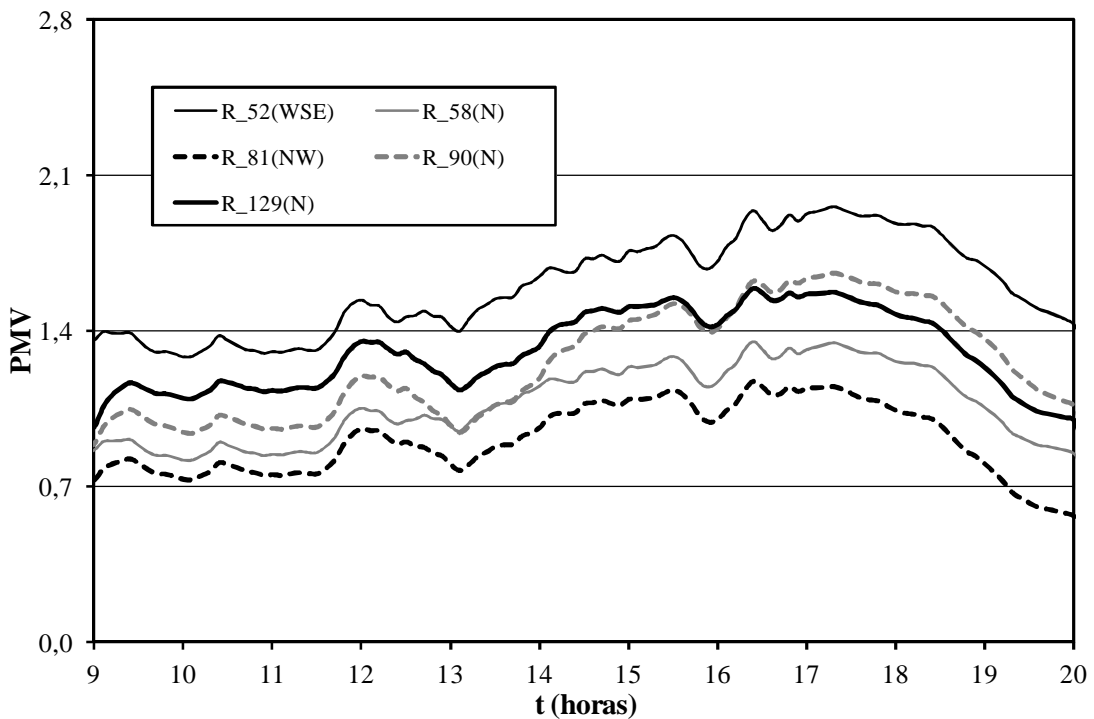


Figura 4.70 – Evolução do índice PMV para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas).

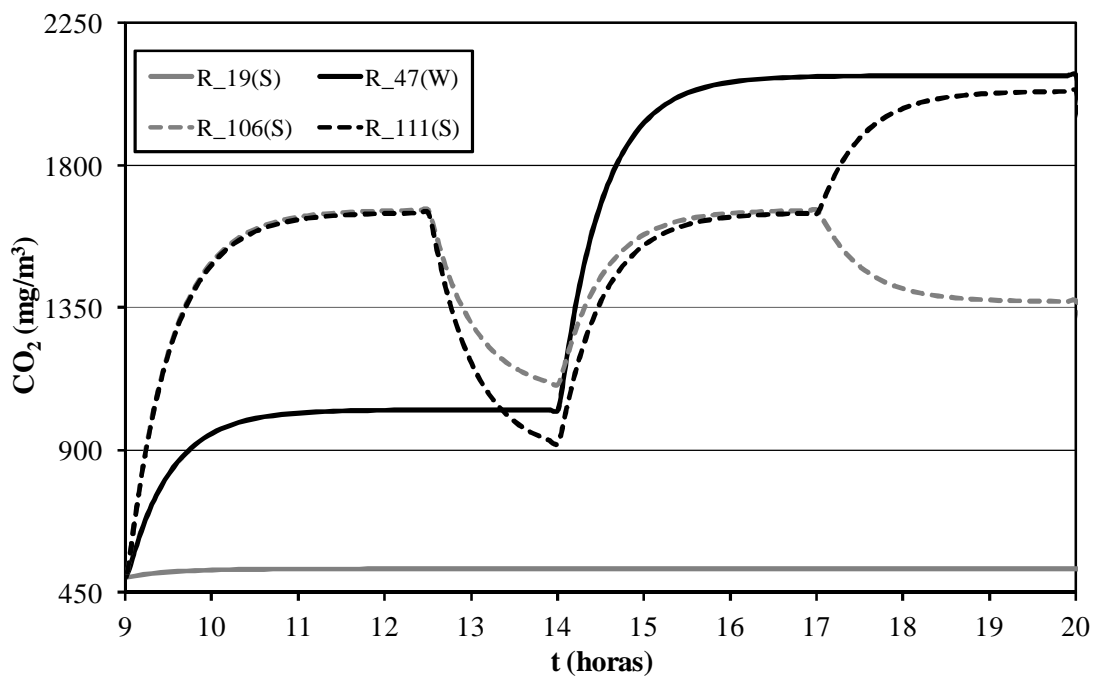
4.5.2.3.3 Evolução do nível de qualidade do ar

A evolução do nível da qualidade do ar, dada pela concentração do dióxido de carbono (CO₂), pode ser observada nas figuras 4.71 a 4.74. As figuras 4.71 e 4.73 referem-se às condições típicas de inverno, obtidas para um valor da taxa de renovação do ar igual a 2 renovações por hora. As figuras 4.72 e 4.74 referem-se às condições típicas de verão, obtidas para um valor da taxa de renovação do ar igual a 3 renovações por hora.

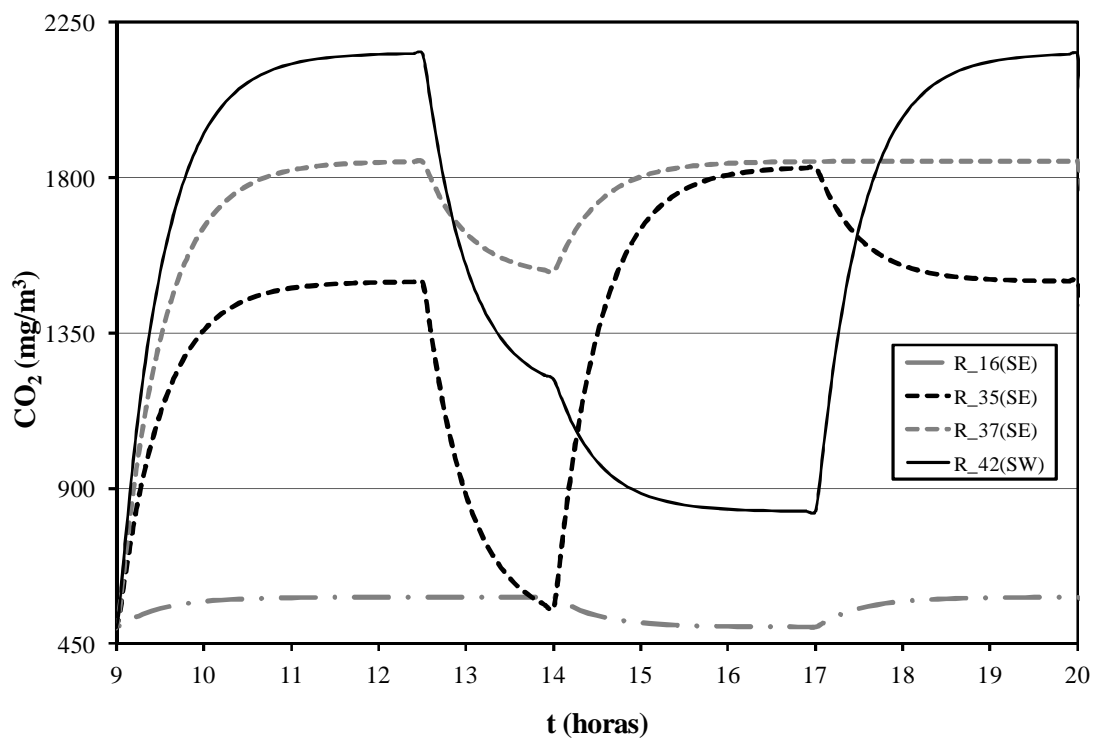
De acordo com os resultados obtidos, em condições de inverno, para uma taxa de renovação do ar igual a 2 renovações por hora (a melhor solução), pode-se afirmar o seguinte:

- As salas 16, 35, 58, 90, 106 e 111 apresentaram um bom nível de qualidade do ar durante todo o dia, inferior a 1800 mg/m³;
- A sala 42 apresentou um nível de qualidade do ar acima do desejável (1800 mg/m³) de manhã e no fim da tarde;
- A sala 47 apresentou um nível de qualidade do ar acima do desejável (1800 mg/m³) durante a tarde;
- A sala 19 apresentou um nível de qualidade do ar acima do desejável (1800 mg/m³) no final da tarde;
- A sala principal (52) apresentou um bom nível de qualidade do ar durante todo o dia.

De acordo com os resultados obtidos, em condições de verão, para uma taxa de renovação do ar igual a 3 renovações por hora (a melhor solução), verifica-se que todos os compartimentos, incluindo a sala 52, apresentam um bom nível de qualidade do ar durante todo o dia.

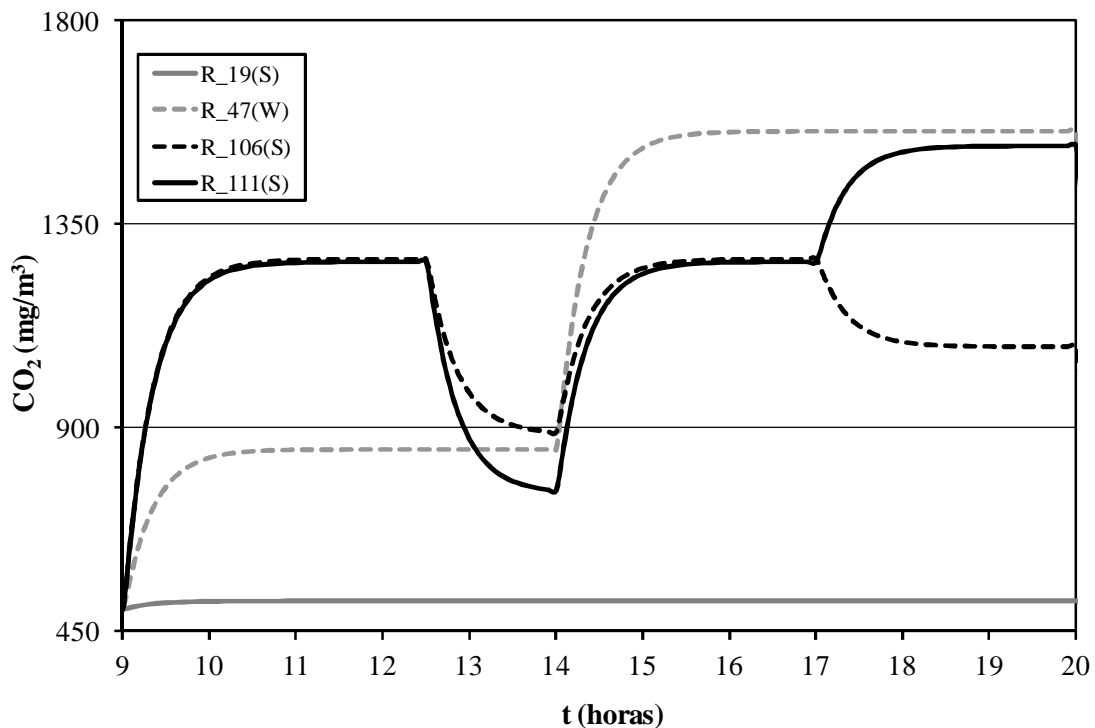


a)

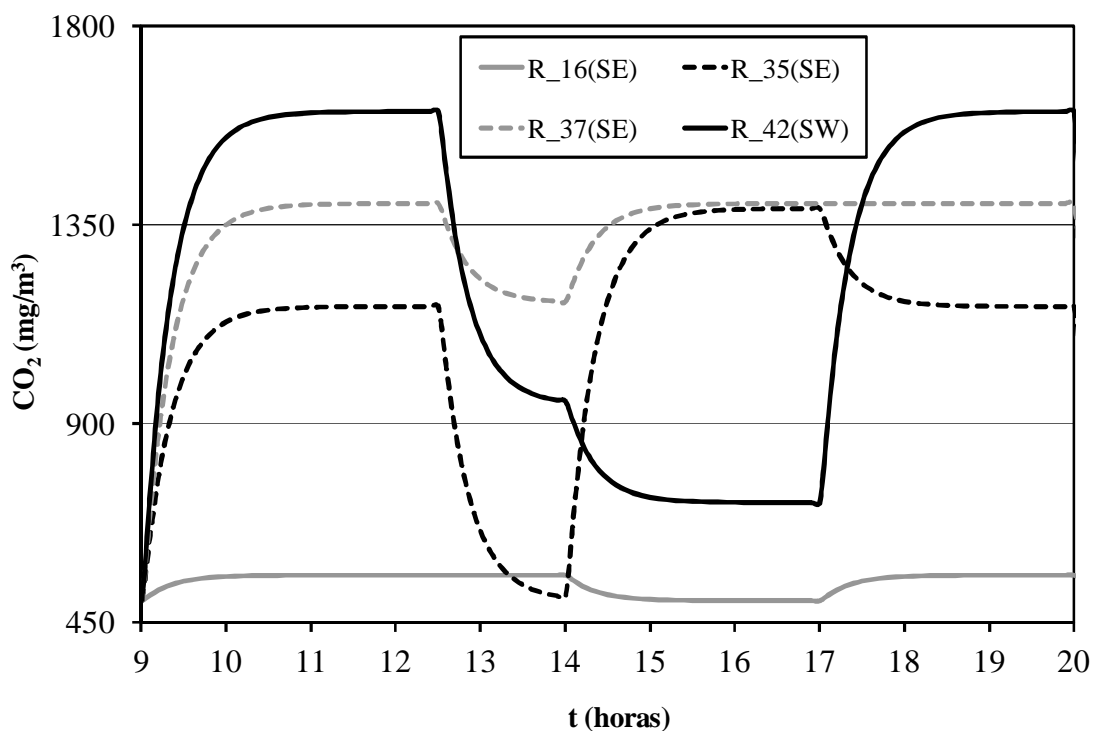


b)

Figura 4.71 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO₂) para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas).



a)



b)

Figura 4.72 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO₂) para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: a) 19, 47, 106 e 111; b) 16, 35, 37 e 42 (biblioteca das Gambelas).

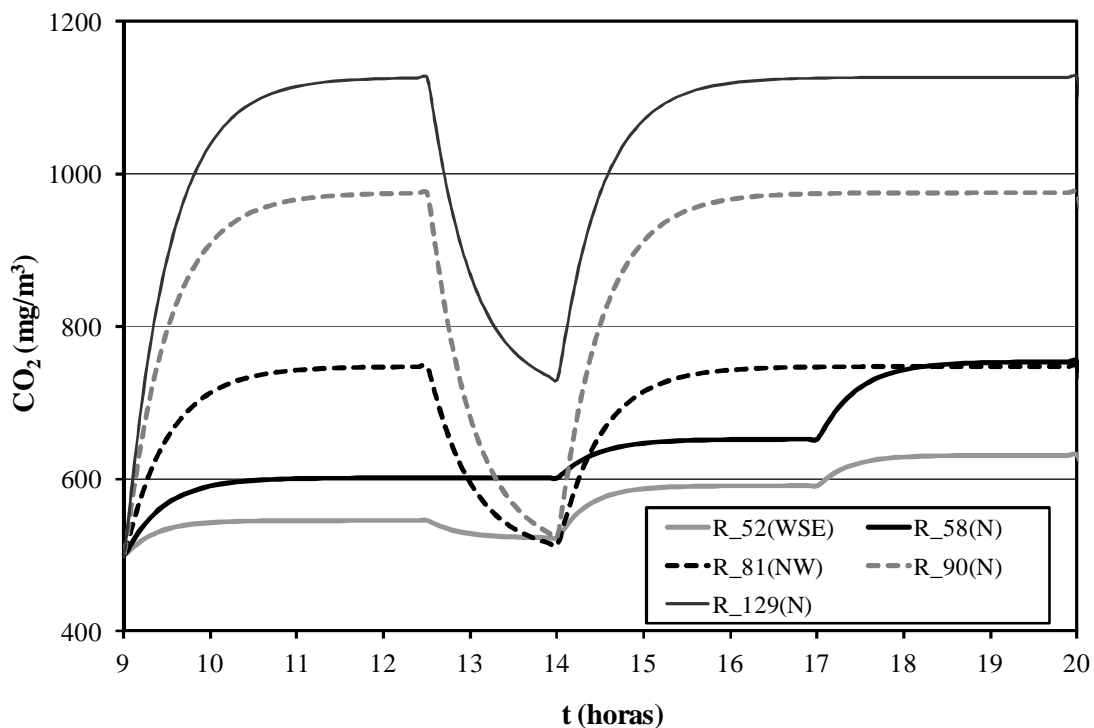


Figura 4.73 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) para um dia típico de inverno para uma taxa de renovação do ar de 2 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas).

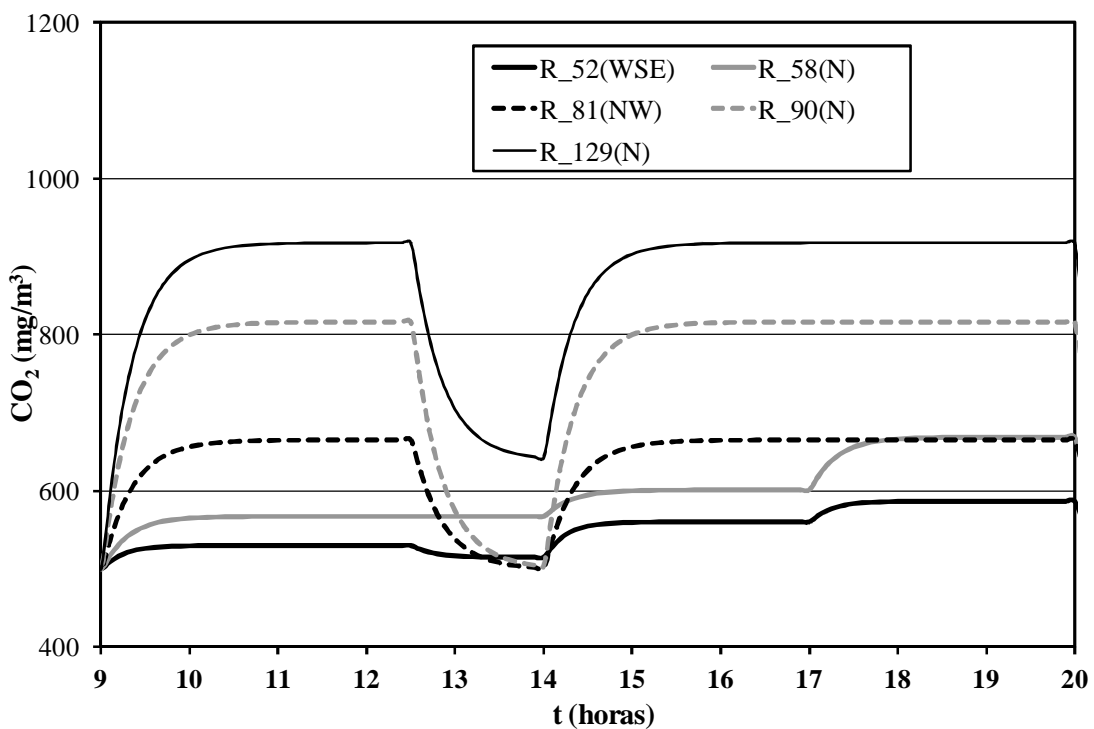


Figura 4.74 – Evolução da concentração de dióxido de carbono (CO_2) para um dia típico de verão para uma taxa de renovação do ar de 3 renovações por hora nos seguintes compartimentos: 52, 58, 81, 90 e 129 (biblioteca das Gambelas).

4.5.2.4 Discussão dos resultados

Neste estudo, utiliza-se o número total de horas desconfortáveis, devidas às condições de conforto térmico existentes (dadas pelos índices PMV e PPD) e devidas ao nível da qualidade do ar interior registado (dado pela concentração do dióxido de carbono) em todos os espaços, em função da taxa de renovação do ar, para sugerir estratégias de gestão eficiente de modo a minimizar a exposição dos ocupantes a ambientes aerotérmicos desconfortáveis. Com este tipo de gestão, o recurso, por exemplo, à utilização de equipamentos de climatização também se torna mais eficiente contribuindo assim para uma diminuição do consumo de energia.

Para avaliar as condições que determinaram o número de horas desconfortáveis devido à qualidade do ar interior foi desenvolvida uma nova metodologia numérica que considera a percentagem de pessoas insatisfeitas devido à concentração de dióxido de carbono.

Ao considerar o número total de horas desconfortáveis foi obtida a taxa de renovação de ar que minimiza a percentagem de pessoas insatisfeitas devido, simultaneamente, ao conforto térmico e à qualidade do ar, quer em condições de verão, quer em condições de inverno. Para o edifício estudado, a biblioteca do campus de Gambelas, em Faro, os valores da taxa de renovação do ar obtidos foram de 2 e 3 renovações por hora, respetivamente, em condições de inverno e em condições de verão.

5 Conclusões

No decurso deste trabalho foram já apresentadas as conclusões que resultaram da análise dos resultados respeitantes aos vários tipos de estudos realizados. Assim, neste capítulo ir-se-á efetuar uma síntese das conclusões mais importantes e apresentar algumas perspetivas de trabalho futuro.

Neste trabalho foi desenvolvido um novo modelo de conforto adaptativo (índice aPMV), que tem em consideração a influência da temperatura do ar exterior na adaptação de um indivíduo ao ambiente térmico de um espaço interior. Este modelo adaptativo foi utilizado na maioria dos casos de estudo aqui apresentados. Nalguns desses casos, os resultados obtidos a partir da utilização do modelo adaptativo foram comparados com os resultados obtidos a partir da utilização do modelo de Fanger (índice PMV). Os resultados numéricos obtidos demonstram a validade deste modelo quer em condições de verão, quer em condições de inverno. De um modo geral, o modelo adaptativo desenvolvido apresenta resultados que permitem concluir que existe uma maior margem para não colocar a funcionar os sistemas AVAC, ou seja, diminuindo o tempo de utilização e reduzindo o dimensionamento deste tipo de sistemas (por exemplo, recorrendo a máquinas com menor potência nominal). Pode-se, assim, inferir que a aplicação do modelo adaptativo induz menores consumos de energia do que a aplicação do modelo do Fanger. A aplicação do modelo adaptativo, ao considerar a adaptação dos indivíduos ao meio ambiente e a outros fatores interiores e pessoais, permite, objetivamente, na maioria dos casos, obter menores níveis de desconforto térmico e consequentemente permitir definir estratégias de gestão de energia mais eficientes.

Neste trabalho foram igualmente estudados cinco edifícios escolares de diversos graus de ensino, destinados a estudantes de todos os níveis etários. O comportamento térmico destes edifícios foi analisado numericamente com recurso a um *software* de simulação do comportamento térmico de edifícios de tipologia complexa. As simulações numéricas desenvolvidas permitiram prever a qualidade do ar e o conforto térmico em todos os edifícios estudados e o consumo de energia num dos edifícios estudados. Por outro lado, estas simulações numéricas também permitiram identificar os compartimentos onde será possível implementar soluções passivas ou ativas, com ou sem controlo, automático ou manual, que induzam à diminuição do consumo de energia por parte do edifício em análise. A implementação destas soluções será feita sem comprometer o nível de conforto térmico da maioria dos ocupantes (normalmente, de acordo com a categoria C da norma ISO 7730, 2005) e mantendo o nível da qualidade do ar abaixo do regulamentado (1800 mg/m^3).

No estudo de análise das condições de conforto térmico e da qualidade do ar realizado no jardim-infância foi desenvolvido e aplicado um modelo de conforto adaptativo em condições de inverno e em condições de verão. A partir de dois tipos de ensaios experimentais realizados em três salas de aulas foram definidas taxas de renovação que permitiram estabelecer estratégias de ventilação natural e forçada de modo a garantir níveis aceitáveis de conforto térmico (categoria C da ISO 7730 de 2005). Essas estratégias consistiram na implementação de medidas de minimização dos ganhos térmicos, associados à incidência da radiação solar (sombreamento de janelas), e através da redistribuição do caudal de ventilação ao longo dos espaços ocupados. A implementação destas estratégias foi estudada numericamente. Os resultados obtidos revelaram-se bastante positivos, o que permite concluir, objetivamente, que a implementação das estratégias propostas garante boas condições de conforto térmico e da qualidade do ar.

No estudo de análise das condições de conforto térmico realizado na escola de 2º e 3º ciclo de Estoi foi aplicado e avaliado um modelo de conforto adaptativo, em condições reais, a partir da utilização de dados experimentais das condições ambientais interiores e exteriores adquiridos durante um ano. A partir dos resultados obtidos foi possível estabelecer um perfil de comportamento térmico de três salas consideradas típicas deste edifício e assim estabelecer e otimizar estratégias de gestão da ocupação das suas salas e de ventilação diferenciada. Pretende-se assim garantir os melhores níveis de conforto térmico que as salas deste edifício podem proporcionar, também na perspetiva de alcançar uma redução dos consumos de energia.

No estudo de análise das condições de conforto térmico, da qualidade do ar e do consumo de energia realizado no edifício 8 e 9 do Campus Universitário de Gambelas, em Faro, foi desenvolvido e aplicado um modelo de conforto adaptativo em condições de inverno e em condições de verão, e foi estudada numericamente a aplicação de uma metodologia de controlo dos sistemas AVAC a partir da utilização dos valores do índice PMV e dos valores do índice aPMV. Os resultados obtidos neste estudo mostram que o controlo através do índice aPMV é o mais eficiente, porque permite obter menores consumos de energia, garantindo, simultaneamente e de um modo geral, bons níveis de conforto térmico dos ocupantes (de acordo com a categoria C, na maioria dos casos, e, por vezes, de acordo com a categoria B, da ISO 7730, 2005) e bons níveis da qualidade do ar interior (na maioria dos casos abaixo do valor regulamentado, 1800 mg/m³). O estudo permite também definir automaticamente os ciclos de funcionamento dos sistemas AVAC energeticamente mais eficientes.

No estudo de conforto integral desenvolvido na escola do 2º e 3º ciclo de Olhão foi feita uma análise do comportamento térmico dos seus edifícios. Neste estudo foram determinadas as horas de desconforto devidas à sensação térmica de frio e as horas de desconforto devidas à sensação térmica de calor, a partir da aplicação numérica do modelo de conforto adaptativo desenvolvido para as diferentes salas de aula desta escola e ao longo do ano civil. Os resultados obtidos permitem avaliar se as estratégias de ventilação adotadas são as mais eficazes e, caso não o sejam, alterá-las de modo a melhorar o seu desempenho. Permitem também propor uma gestão mais eficiente da ocupação das salas de aula ao longo do ano de modo a garantir as melhores condições para se obterem níveis de conforto térmico aceitáveis, sem comprometer o objetivo de tornar os consumos de energia mais eficientes.

No estudo de conforto integral desenvolvido no edifício da biblioteca do Campus Universitário de Gambelas, em Faro, foi feita uma análise numérica do comportamento aerotérmico desse edifício e aplicado um novo modelo que permite determinar o número de horas de desconforto integrado. Este novo modelo toma em consideração, de um modo integrado, o número de horas de desconforto devidas à sensação térmica de frio, o número de horas de desconforto devidas à sensação térmica de calor e o número de horas de desconforto devidas à qualidade do ar. Este modelo é utilizado na definição de estratégias de ventilação, diferenciada para condições de verão e para condições de inverno. Os resultados obtidos mostram que a aplicação deste modelo revelou estratégias de ventilação eficientes porque permitiram garantir bons níveis de conforto térmico (na maioria dos casos, de acordo com a categoria C da ISO 7730 de 2005) e inferir que a aplicação destas estratégias de ventilação conduz a uma redução dos níveis de consumo de energia. Note-se que as taxas de renovação obtidas, consideradas as melhores, são relativamente baixas (2 e 3 renovações por hora, respetivamente, em condições de inverno e em condições de verão), o que sugere que os sistemas ativos de climatização funcionam com uma potência relativamente reduzida.

Conclui-se então que existe um potencial de redução do consumo de energia, nomeadamente através de uma melhor gestão dos ciclos de utilização dos sistemas AVAC existentes, através da utilização de sistemas AVAC controlados pelos valores do índice aPMV em detrimento do controlo único da temperatura do ar interior, através da implementação de medidas de minimização dos ganhos térmicos, associados à incidência da radiação solar, e através da redistribuição do caudal de ventilação, promovendo a recirculação dos ganhos de energia térmica pelos vários compartimentos.

Para finalizar, na sequência deste trabalho, sugere-se, numa perspetiva de evolução futura, novos estudos, nomeadamente:

- Efetuar a correção do problema detetado no comportamento do modelo adaptativo que não responde adequadamente quando se depara com ambientes interiores termicamente quentes em condições de frio exterior ou com ambientes interiores termicamente frios em condições de calor exterior.
- Desenvolver um modelo de conforto adaptativo quer para outras regiões quer para outros tipos de edifícios, nomeadamente, públicos não relacionados com o ensino.
- Desenvolver uma nova estratégia de controlo de sistemas AVAC que recorra a um novo modelo diferente do linear utilizado neste estudo. Nessa perspetiva, desenvolver um controlo que faça o ajuste da potência do sistema AVAC em função de uma variação exponencial do índice aPMV, o que permitirá um controlo mais preciso dentro da zona de conforto pretendida e, por conseguinte, mais eficiente do ponto de vista do consumo energético.
- Implementar na prática o sistema de controlo dos sistemas AVAC sugerido neste trabalho e analisado numericamente. A avaliação dos resultados experimentais permitirá aferir da validade da implementação prática do modelo adaptativo aqui proposto e do seu contributo para uma gestão mais eficiente dos consumos de energia dos edifícios.

Referências Bibliográficas

- ASHRAE (2010a). ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA. 2010.
- ASHRAE (2010b). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2010, *Ventilation for acceptable indoor air quality*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, USA. 2010.
- Auliciems, A. (1981). *Towards a psychophysiological model of thermal perception*. International Journal of Biometeorology, 27, pp. 83-86.
- Becker, R., Paciuk, M. (2009). *Thermal comfort in residential buildings: failure to predict by standard model*. Building and Environment, 44(5), pp. 948-960.
- Bernardo, J. (2015). *Estratégia para a Eficiência Energética nos Edifícios Públicos*. Workshop: RePublic_ZEB, LNEG, 11 de dezembro de 2015. [Online] Disponível em: http://www.lneg.pt/download/10887/DGEG_REPublic_ZEB%2011dez2015.pdf.
- Bouden, C., Ghrab N. (2005). *An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: a field study results*. Energy and Buildings, 37(9), pp.952-963.
- Brager, G., de Dear, R. (1998). *Thermal adaptation in the built environment: literature review*. Energy and Buildings, 27(1), pp. 83-96.
- Brager, G., de Dear, R. (2000). *A standard for natural ventilation*. ASHRAE Journal, 42(10), pp. 21-28.
- Breum, N. (1988). *The Air Exchange Efficiency of a Lecture Hall*. Proceedings of Second International Symposium on Ventilation for Contaminant Control, London, England, September 1988, pp. 373-380.
- Breum, N. (1992). *Flow Fields of Simulated Body Odor in an Office Ventilated From the Displacement Design Principle*. ROOMVENT 92, Air Distribution in Rooms, Third International Conference, Aalborg, Denmark, September 1992, vol. 3, pp. 181-194.
- Breum, N., Skotte, J. (1991). *Displacement Air Flow in a Printing Plant Measured With a Rapid Reponse Tracer Gas System*. Building Services Engineering Research & Technology, vol. 12, pp. 39-43.
- Conceição, E. (1996). *Estudo Aero-Térmico de Habitáculos de Veículos de Transporte de Passageiros*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.

- Conceição, E. (2003). *Numerical Simulation of Building Thermal Behavior and Human Thermal Comfort Multi-Node Models*. Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 11 a 14 de agosto de 2003.
- Conceição, E., Silva, A., Lúcio, M. (2004). *Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Winter Conditions*. RoomVent 2004, Coimbra, Portugal, 5 a 8 de setembro de 2004.
- Conceição, E., Lúcio, M. (2005). *Estudo Térmico de Edifícios Escolares na Região do Algarve em Condições de Inverno*. Quarto Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica, Lisboa, Portugal, 2 a 4 de junho de 2005.
- 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, pp. 4-8.
- 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, pp. 451-458.
- 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, pp. 259-270.
- Conceição, E., Lúcio, M. (2006e). *Numerical Study of Thermal Response of School Buildings in Summer Conditions*. Healthy Buildings 2006, Lisboa, Portugal, 4 a 8 de Junho de 2006.
- 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, 19, pp. 48-51.
- 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, pp. 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, pp. 48-51.
- Conceição, E., Lopes, M., Lúcio, 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, pp. 644-654.

- 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, pp. 76-80.
- Conceição, E., Lúcio, M. (2008c). *Thermal study of school buildings in winter conditions*. Building and Environment, vol. 43, pp. 782-792.
- Conceição, E., Lúcio, M., Vicente, V., Rosão, V. (2008d). *Evaluation of Local Thermal Discomfort in a Classroom Equipped with Cross Flow Ventilation*. The International Journal of Ventilation, vol. 7, pp. 267-277.
- Conceição, E., Nunes, A., Gomes J., Lúcio, M. 2010. *Application of a school building thermal response numerical model in the evolution of the adaptive thermal comfort level in Mediterranean environment*. The International Journal of Ventilation, 9(3), pp. 287-304.
- 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, pp. 190-201.
- Corgnati, S., Ansaldi, R., Filippi, M. (2009). *Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches*. Building and Environment, 44(4), pp. 785-792
- Crawford, R., Neill, P. (1989). *Multi-Zone Airflow Measurements Using a Tracer Gas*. ASHRAE 1989, Building Systems, Room Air and Air Contaminant Distribution, pp. 103-105.
- Cunha, F. (2015). *Estudo de estratégias e tecnologias de climatização para atingir Edifícios nZEB*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.
- Custódio, M. (2011). *Eficiência energética em edifícios escolares*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- Dascalaki, E., Sermpetzoglou, V. (2011). *Energy performance and indoor environmental quality in Hellenic schools*. Energy and Buildings, vol. 43, pp. 718-727.
- Decreto-Lei n.º 118/98 (1998) *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios* (RSECE), Diário da República, 7 de maio de 1998. Lisboa.
- 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 de 2006. Lisboa.

- Decreto-Lei nº 79/06 (2006). *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios* (RSECE), Diário da República, 4 de abril de 2006. Lisboa.
- Decreto-Lei nº 80/06 (2006). *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios* (RCCTE), Diário da República, 4 de abril de 2006. Lisboa.
- Decreto-Lei nº 118/13 (2013). Diário da República, 20 de agosto de 2013. Lisboa.
- de Dear, R., Auliciems, A. (1985). *Validation of the predicted mean vote model of thermal comfort in six Australian field studies*. *ASHRAE Transactions*, 91(2b), pp. 452-468.
- de Dear, R., Brager, G., Cooper, D. (1997). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. Final report ASHRAE rp-884.
- Direção Geral de Energia (DGE) (2002). *Programa E4 - Eficiência Energética nos Edifícios*. Ministério da Economia, Lisboa. ISBN 972-8268-25-4.
- Dimoudi, A., Kostarela, P. (2009). *Energy monitoring and conservation potential in school buildings in the C climatic zone of Greece*. *Renewable Energy*, vol. 34(1), pp. 289-296.
- Donaisky, E., Oliveira, G., Freire, R., Mendes, N. (2007). *PMV-Based Predictive Algorithms for Controlling Thermal Comfort in Building Plants*. Proceedings of Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control, pp. 182-187, 1-3 de outubro de 2007.
- EDP (2006) – *Guia Prático da Eficiência Energética*. [Online] Disponível em: http://ws.cgd.pt/blog/pdf/guia_edp.pdf.
- EDP (2016) – *Soluções de Eficiência PME*. [Online] Disponível em: https://energia.edp.pt/pdf/pme/AVAC_EDP_PME.pdf.
- Economidou, M. (2011). *Europe's Buildings Under the Microscope – A country-by-country review of the energy performance of buildings*. Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Outubro 2011. ISBN: 9789491143014. [Online] Disponível em: http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf.
- Endravadan, M., Thellier, F., Bedrune, J. (2004). *Modeling of Occupant-Controlled Global Heating in Buildings*. International Conference 2004, Cumberland Lodge, Windsor, UK.
- Fanger, P. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill Book Company, USA, 1970.
- Fanger, P., Toftum, J. (2002). *Extension of the PMV model to non air conditioned buildings in warm climates*. *Energy and Buildings*, 34, pp. 533-536.
- Ferreira, J. (2012). *Análise de Sensibilidade de Factores de Desempenho Térmico de Edifícios*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

- Fontanella, M. (2009). *Percepção do ambiente térmico: preferências subjetivas e conforto térmico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil.
- Freire, R., Oliveira, G., Mendes, N. (2008). *Predictive controllers for Thermal Comfort Optimization and Energy Savings*. Energy and Buildings, 40(7), pp. 1353-1365.
- Geros, V., Santamouris, M., Tsangasoulis, A., Guarracino, G. (1999). *Experimental evaluation of night ventilation phenomena*. Energy and Buildings, 29, pp. 141-154.
- Gonçalves, H., Graça, J. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. Ed. IP-3E, Lisboa, Direção Geral de Geologia e Energia, 2004, ISBN 972-8268-34-3.
- Gonçalves, H., Nascimento, C. (2005). *Premio DGE 2003 – Eficiência Energética dos edifícios*. Direção Geral de Geologia e Energia, Ed. IP-3E, Lisboa, 2005. ISBN 972-8268-36-X.
- Hadjiski, M., Sgurev, V., Boishina, V. (2007). *HVAC Control via Hybrid Intelligent Systems*. Cybernetics and Information Technologies, 7(1), pp. 77-94.
- Harris, N. (1988). *Modern Air Conditioning Practice*. McGraw-Hill International Editions.
- Hong, L., Jia, L., Shulan, K., Zhaosheng, Z. (2007). *Predictive Functional Control Based on Fuzzy T-S Model for HVAC Systems Temperature Control*. Journal of Control Theory and Applications, 5(1), pp. 94-98.
- Hongli, L., Peyong, D., Lei, J. (2008). *A Novel Fuzzy Controller Design Based-on PID Gains for HVAC Systems*. Proceedings of 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 1-23, pp. 736-739, 25-27 de junho de 2008.
- Huh, J., Brandemuhel, M. (2008). *Optimization of Air-conditioning System Operating Strategies for Hot and Humid Climates*. Energy and Buildings, 40(7), pp. 202-1213.
- Humphreys, M. (1976). *Comfortable indoor temperatures related to the outdoor air temperature*. Building Service Engineer, 44, pp. 5-27.
- Hwang, R., Lin, T., Chen, C., Kuo, N. (2009). *Investigating the adaptive modelo f thermal comfort for naturally ventilated school buildings in Taiwan*. International Journal of Biometeorology, 53, pp. 189-200.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Canada, 1983.
- 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, 2005.
- Khedari, J., Yamtraipat, N., Pratintong, N., Hirunlabh, J. (2000). *Thailand Ventilation Comfort Chart*. Energy and Buildings, vol. 32, n. 3, pp. 245-249.

- Komareji, M., Stoustrup, J., Rasmussen, H., Bidstrup, N., Svendsen, R., Nielsen, F. (2008). *Optimal Model-based Control in HVAC Systems*. Proceedings of American Control Conference, pp. 1443-1448, 11-13 de junho de 2008.
- Kurazumia, Y., Tsuchikawab, T., Matsubarac, N., Horikoshid, T. (2008). *Effect of posture on the heat transfer areas of the human body*. Building and Environment, 43, pp. 1555–1565.
- Lanham, A., Gama, P., Braz, R., (2004), *Arquitetura Bioclimática, Perspectivas de inovação e futuro – Seminários de Inovação*. Instituto Superior Técnico, 2004, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.
- Leephakpreeda, T. (2008). *Grey Prediction on Indoor Comfort Temperature of HVAC Systems*. Expert Systems with Applications, 34(4), pp. 2284-2289.
- Liang, J., Du, R. (2007). *Design of Intelligent Comfort Control System with Human Learning and Minimum Power Control*. Energy Conversion and Management, 49(4), pp. 517-528.
- Liddament, M. (1996). *Energy-Efficient Ventilation for Apartment Buildings*. Lawrence Berkeley National Laboratory, IEA-ECBCS.
- Ly, H., Duan, P., Jia, L. (2008). *One Novell Fuzzy Controller Design for HVAC Systems*. Proceedings of Chinese Control and Decision Conference, 2008, 1-11, pp. 2071-2076.
- Mendes, N., Barbosa, R., Freire, R., Oliveira, R. (2008). *A Simulation Environment for Performance analysis of HVAC Systems*. Building Simulation, 1(2), pp. 129-143.
- Mendonça, L. (2005). *Condensações em Edifícios*. Arquitectura & Vida, 63, pp. 71-74.
- Nassif, N., Moujaes, S., Zaheeruddin, M. (2008). *Self-tuning Dynamic Models of HVAC System Components*. Energy and Buildings, 40(9), pp. 1709-1720.
- Nicol, F., Humphreys, M. (2002). *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. Energy Build, vol. 34, pp. 563–572.
- Nicol, F., Roaf, S. (1996). *Pioneering new indoor temperature standard: the Pakistan Project*. Energy and Buildings, 23, pp. 169-74.
- Niemelä, R., Lefevre, A., Muller, J., Aubertin, G. (1991). *Comparison of Three Tracer Gases for Determining Ventilation Effectiveness and Capture Efficiency*. The Annals of Occupational Hygiene, vol. 35, n. 4, pp. 405-417.
- Niemelä, R., Saamanen, A., Koskela, H. (1989). *A Comparison Between the Step-Up, Step-Down and Pulse Injection Technique for the Measurements of the Mean Age of Air*. 10 th AIVC Conference, Espoo, Finland, 25-28 September, pp. 17-30.
- Olesen, B. (1997). *International Development of Standards for Ventilation of Buildings*. ASHRAE Journal. April 1997, pp. 31-9.

- Olesen, B. (2002). *Radiant Floor Heating In Theory and Practice*. ASHRAE Journal American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2002, pp. 19-24.
- Olesen, B. (2004). *International standards for the indoor environment*. Journal Indoor Air, 14, pp. 18-26.
- Olesen, B.; Parsons, K. (2002). *Introduction to Thermal Comfort Standards and to the Proposed New Version of EN ISO 7730*. Energy and Buildings, 34, pp. 537-548.
- Pereira, L. (2016). *Modernised Portuguese Schools – From IAQ and Thermal Comfort towards Energy Efficiency Plans*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Pereira, L., Raimondo, D., Corgnati, S., Silva M. (2014), “Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: Methodology and results”, *Building and Environment*, 81, pp. 69-80.
- Pereira, L., Bernardo, H., Silva, M. (2013). *Energy Performance of School Buildings: From Energy Certificates to Benchmarking*. CLIMAMED’13 – VII Mediterranean Congress of Climatization, janeiro de 2013, pp. 511-519.
- Pereira, L., Cardoso, E., Silva, M. (2015), “Indoor air quality audit and evaluation on thermal comfort in a school in Portugal”, *Indoor and Built Environment*, 2, pp. 4256-4268.
- Pinto, M., Freitas, V., Viegas, J. (2007). *Qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação*. Engenharia e Vida, vol. 38, pp. 34-43.
- PORDATA – Base de Dados Portugal Contemporâneo (2016). [Online]. <http://www.pordata.pt/Subtema/Portugal/Energia-90>. Acedido em 21/09/2016.
- Portaria n.º 349-D/2013 (2013). Diário da República, 4 de dezembro de 2013. Lisboa.
- Redfern, A., Kopow, M., Wright, P. (2006). *Design Architecture for Multi-Zone HVAC Control Systems from Existing Single-Zone Systems Using Wireless Sensor Networks*. Proceedings of Smart Structures, Devices and Systems III, 6414, 11 de dezembro de 2006.
- Roulet, C. (1991). *Use of Tracer Gases to Assess Indoor Air Quality*. ASHRAE Symposium on Indoor Air Quality and Energy Consumption, Montreal, September 1991.
- Roulet, C., Cretton, P. (1992). *Field Comparison of Age of Air Measurement Techniques*. ROOMVENT 92, Air Distribution in Rooms, Third International Conference, Aalborg, Denmark, September 1989, vol. 3, pp. 213-229.
- Roulet, C., Compagnon, R., Jakob, M. (1991). *A Simple Method Using Tracer Gas to Identify the Main Airflow and Contaminant Paths Within a Room*. Indoor Air, vol. 1, N. 3, pp. 311-322.

- Ruano, A., Crispim, E., Conceição, E., Lúcio, M. (2006). *Prediction of Building's Temperature Using Neural Networks Models*. Energy and Buildings, vol. 38, n. 6, pp. 682-694.
- Sandberg, M. (1981). *What is Ventilation Efficiency?* Building and Environment, vol. 16, n. 2, pp. 123-135.
- Sandberg, M., Sjöberg, M. (1983). *The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms*. Building and Environment, vol. 18, n. 4, pp. 181-197.
- Sane, H., Haugstetter, C., Burnoff, S. (2006). *Building HVAC Control Systems – role of controls and Optimization*. Proceedings of American Control Conference, pp. 4483-4488, 14 de junho de 2006.
- Silva, P. (2006). *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*. Dissertação de Mestrado, 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, pp. 2420-2428.
- Song, F., Zhao, B., Yang, X., Jiang, Y., Gopal, V., Dobbs, G., Sahm, M. (2008). *A New Approach on Zonal Modelling Environment with Mechanical Ventilation*. Building and Environment, 43(3), pp. 278-286.
- Sousa, M. (2014). *Análise do Consumo Energético da Universidade do Algarve*. Projeto realizado no âmbito do Mestrado em Energia e Climatização de Edifícios, Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve.
- Tzikopoulos, A., Karatza, M., Paravantis, J. (2005). *Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings*. Energy and Building, 37, pp. 529-544.
- Universidade do Algarve – Ualg (2012). *A Universidade do Algarve em números*. Gabinete de Comunicação e Protocolo. Faro.
- Van der Linden, K., Boerstra, A., Raue, A., Kurvers, S. (2002). *Thermal Indoor Climate Building Performance Characterized by Human Comfort Response*. Energy and Buildings, 34, pp. 737-744.
- Wang, S., Ma, Z. (2008). *Supervisory and Optimal Control of Building HVAC Systems: A Review*. HVAC&R Research, 14(1), pp. 3-32.
- Wei, X., Xiangguang, C., Jun, Z. (2010). *An adaptive Predicted Mean Vote (aPMV) model in office*. 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, pp. 1887-1991.
- Yam, J., Li, Y., Zheng, Z. (2003). *Nonlinear coupling between thermal mass and natural ventilation in buildings*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, pp. 1251-1264.

- Yan, Y., Zhou, J., Lin, Y., Yang, W., Wang, P., Zhang, G. (2008). *Adaptive Control Model for Building Cooling and Heating Sources*. Energy and Buildings, 40(8), pp. 1394-1401.
- Yang, L., Li, Y. (2008). *Cooling Load Reduction by Using Thermal Mass and Night Ventilation*. Energy and Buildings, pp. 1-22.
- Yao, R., Li, B., Liu, J. (2009). *A theoretical model of thermal comfort – adaptive predicted mean vote (aPMV)*. Building and Environment, 44, pp. 2089-2096.
- Yao, R., Liu, J., Li, B. (2010). *Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms*. Applied Energy, 87, pp. 1015-1022.
- Zhou, J., Zhang, G., Lin, Y., Li, Y. (2008). *Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings*. Energy and Buildings, 40, pp. 979-986.